

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Крейцер Кирилл Олександрович

УДК 621.74.043

ДИСЕРТАЦІЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ОДЕРЖАННЯ ВИЛИВКІВ ІЗ МАГНІЄВИХ
СПЛАВІВ ЛИТТЯМ ПІД ТИСКОМ НА ОСНОВІ ІМПУЛЬСНОЇ СИСТЕМИ
ЗАХИСТУ

Спеціальність 05.16.04 – Ливарне виробництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



К.О. Крейцер

Науковий керівник – ЛИСЕНКО Т. В. доктор технічних наук, професор

Київ – 2020

АНОТАЦІЯ

Крейцер Кирилл Олександрович. Технологічний процес одержання виливків із магнієвих сплавів литтям під тиском на основі імпульсної системи захисту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.16.04 «Ливарне виробництво». – Одеський національний політехнічний університет Міністерства освіти і науки України, м. Одеса. 2020. – Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ, 2020.

Дисертація присвячена розробці, вдосконаленню та реалізації прогресивних технологічних прийомів та обладнання для управління якістю литва під тиском магнієвих сплавів, заснованих на використанні комплексної адаптованої системи управління технологічним процесом.

З метою створення нових технологічних процесів одержання складних тонкостінних виливків з магнієвих сплавів з газовим захистом розплаву в плавильних та роздаткових агрегатах комплексу лиття під тиском були встановлені закономірності, механізми та побудовані системи рівнянь регресії впливу основних технологічних факторів на умови захисту поверхні розплаву магнію з послідуєчим їх використанням для розробки технологічних процесів, та модернізації обладнання і автоматизованих систем управління комплексів лиття під тиском.

Вперше розроблено методику для досліджень поверхневого натягу розплавів магнію безпосередньо у промислових металоємних плавильних та роздаткових агрегатах з газовим захистом розплаву магнію, визначено основні фактори впливу на поверхневий натяг. Встановлені закономірності одержання магнієвих сплавів з використанням імпульсної подачі газової суміші для захисту магнієвого розплаву, де в якості факторів були обрані – температура T_1 і поверхневий натяг сплаву σ , вміст сірчистого ангідриду SO_2 і гексофториду сірки SF_6 , а в якості відгуку – час існування захисної плівки (до загоряння),

проведений аналітично-регресивний аналіз одержаних результатів і при цьому визначено, що на зростання межі руйнування захисної плівки для магнієвих сплавів Y істотно впливає вміст SO_2 (0,2-0,8 %), тобто при зростанні вмісту SO_2 значення Y обернено пропорційно спадає з 420 до 140 с, тобто зменшується втричі, встановлено також оптимальні параметри названих основних факторів впливу на імпульсну обробку розплаву магнію, які знаходяться для значень вмісту SO_2 і $SF_6, \%$, T_i і σ в межах 660-700 і 520-550 дін/м, $3,0-4,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$ та $0,002-0,004 \text{ м}^3/\text{кг}$, а це дає змогу досягти підвищення порогу існування плівки на поверхні магнієвого розплаву в межах 560-620 с. Водночас встановлено, що витрати складових захисної суміші, а саме SO_2 і SF_6 , при їх імпульсній подачі в 12 та 19 разів нижча у порівнянні з технологією безперервної подачі цих захисних газів у атмосферу плавильного агрегату.

Створена автоматизована система контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском з використанням механізму та регресивних моделей впливу основних технологічних параметрів, включаючи: поверхневий натяг і температуру розплаву магнію, складу суміші захисних газів на термін існування захисної плівки на поверхні магнієвого розплаву у плавильному чи роздатковому агрегаті лиття під тиском

Проведено аналіз експлуатаційної надійності створеної системи контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском за визначеними характерними ознаками надійності: параметр потоку відмов; середній час відновлення; коефіцієнт технічного використання; загальним коефіцієнтом використання з статистичною обробкою інформації, яка була отримана в результаті дворічної експлуатації створеної системи керування процесами лиття магнієвих сплавів з газовим захистом розплаву. Обробка отриманої статистичної інформації дозволила визначити параметри експлуатаційної надійності робочої системи: для системи в цілому 334 год, для системи, що підлягає ремонту - 295 год, для системи, що не ремонтується 379

год, а інтенсивність відмов для системи в цілому не перевищу значення $3 \cdot 10^{-4}$ 1/год.

Проведено прискорені випробування системи імпульсної подачі газового захисту, які передбачають одночасні випробування імпульсної подачі захисних газів з відомими експлуатаційними показниками надійності базової системи захисту під флюсом при цьому встановлено, що інтенсивність відмов для системи захисту поверхні розплаву магнію не перевищує значення $30 \cdot 10^{-4}$ 1/год, а аналогічний показник для систем захисту розплаву магнію під флюсом становить $39 \cdot 10^{-4}$ 1/год, тобто інтенсивність відмов при використанні базового методу на 30% вища ніж при методі захисту рідкого магнію у газовому захисному середовищі.

Розроблені технологічні процеси плавлення магнієвих сплавів в захисній газовій атмосфері з безперервною чи імпульсною їх подачею в плавильний чи роздатковий агрегат, а також автоматизована система контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском з оцінкою їх надійності при довготривалій експлуатації в промислових умовах в серійному та масовому виробництві виливків з магнієвих сплавів.

Для реалізації створених технологій захисту розплаву магнію було доопрацьовано обладнання і автоматизовані системи управління комплексу лиття під тиском з безперервним та імпульсним процесом газового захисту розплаву магнієвих сплавів, а також для реалізації технологічного процесу лиття магнієвих сплавів у вакуумовані прес-форми.

Проведені дослідно-промислові перевірки створених технологічних процесів і обладнання для їх реалізації з використанням нової конструкції радіатору з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів, які є перспективною продукцією на внутрішньому та зовнішньому ринку споживання. Водночас проведені дослідження щодо стабільності, надійності, довговічності технологічних процесів та обладнання для їх реалізації, що дало змогу розробити техніко-економічне обґрунтування щодо організації

виробництва радіаторів з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів у обсязі 1 000 000 шт./рік.

Порівняльний аналіз ефективності організації виробництва радіаторів з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів у обсязі 1 000 000 шт./рік показав, що при реалізації проекту виробництва литих радіаторів з магнієвих сплавів за рахунок зменшення витрат основних і допоміжних матеріалів, електроенергії, фонду заробітної плати, собівартості показники річного чистого прибутку становлять 82 000 000 грн (3 280 000 USD) і термін окупності проекту 1 рік, проти аналогічних показників лиття продукції з алюмінієвих сплавів у 52 500 000 грн (2 100 000 USD) і 1,5 року відповідно.

Результати роботи пройшли промислові випробування в “BAMAX Poland Sp.zoo”, Польща та у Державному підприємстві «Інженерний центр литва під тиском», Україна та було отримано позитивні результати.

МАГНІЄВІ СПЛАВИ, БЕЗФЛЮСОВЕ ПЛАВЛЕННЯ, ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ, ПОВЕРХНЕВИЙ НАТЯГ, ГАЗОВИЙ ЗАХИСТ, ЗАХИСНА ПЛІВКА, ІМПУЛЬСНА СИСТЕМА ЗАХИСТУ, БІМЕТАЛЕВИЙ РАДІАТОР, ВАКУУМУВАННЯ, МІКРОСТРУКТУРА.

ABSTRACT

Kreitser K. The technological process of obtaining castings of magnesium alloys by injection molding based on a pulsed protection system. – Qualification scientific work with the rights of the manuscript copyright.

The thesis for a candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) on specialty 05.16.04 «Foundry production». Odessa National Polytechnic University. – Physico-technological Institute of Metals and Alloys of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the development, improvement, and implementation of advanced technological techniques and equipment for quality control of injection molded magnesium alloys, based on the use of a comprehensive adapted process control system.

To create new technological processes for obtaining complex thin-walled magnesium alloy spills with gas protection of the melt in the melting and distributing units of the injection molding complex, regularities, mechanisms and systems of regression equations of the influence of the main technological factors on the conditions of protection of the magnesium melt surface were established. for the development of technological processes, and the modernization of equipment and automated control systems of injection molding complexes.

For the first time, a technique was developed to investigate the surface tension of magnesium melts directly in industrial metal-melting and dispensing units with gas protection of magnesium melt, and the main factors of influence on surface tension were determined. The regularities of obtaining magnesium alloys using the pulse supply of a gas mixture to protect the magnesium melt, where the factors were chosen as temperature T_1 and alloy surface tension σ , the sulfuric anhydride content SO_2 and sulfur hexafluoride SF_6 , and as a response - the life of the protective film (before ignition), an analytical and regression analysis of the results obtained, and it was determined that the increase of the limit of destruction of the protective film for magnesium alloys Y is significantly affected by the content SO_2 (0,2-0,8%), that is, when the SO_2 content increases, the value of Y inversely decreases from 420 to 140 s,

ie it decreases threefold, and the optimal parameters of the named main factors of influence on the pulse processing of the magnesium melt are found, which are for the values of SO_2 and SF_6 content, %, T_i and σ within 660-700 and 520-550 din/m, $3,0\text{--}4,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ and $0,002\text{--}0,004 \text{ m}^3/\text{kg}$, which allows to increase the threshold of the film on the surface of the magnesium melt within 560-620 sec. At the same time, it was found that the costs of the components of the protective mixture, namely SO_2 and SF_6 , at their impulse flow 12 and 19 times lower compared to the technology of continuous supply of these protective gases into the atmosphere of the melting unit.

An automated system for controlling and controlling the technological process of gas protection of magnesium melt in melting and distribution units of injection molding complexes was created using the mechanism and regressive models of the influence of the basic technological parameters, including surface tension and temperature of magnesium melt, the composition of the mixture of protective gases for the lifetime of on the surface of a magnesium melt in a melting or dispensing unit of injection molding.

The operational reliability of the created system of control and control of the technological process of gas protection of magnesium melt in the melting and distribution units of injection molding complexes according to certain characteristic features of reliability is carried out: parameter of the flow of failures; average recovery time; coefficient of technical use; the total utilization rate for the statistical processing of information obtained as a result of two years of operation of the created control system for the casting processes of magnesium alloys with gas melt protection. The processing of the obtained statistical information allowed us to determine the parameters of operational reliability of the working system: for the system as a whole 334 h, for the system to be repaired - 295 h, for the system which is not repaired 379 h, and the failure rate for the system as a whole does not exceed the value $3 \times 10^{-4} \text{ 1/year}$.

Accelerated tests of the pulse supply system of gas protection, which provide simultaneous tests of the pulse supply of shielding gases with a known operational reliability of the basic protection system under the flux, were carried out. h, and a

similar indicator for magnesium melt flux protection systems is $39 \cdot 10^{-4}$ 1/h, that is, the failure rate when using the basic method is 30% higher than the method and protection of liquid magnesium in a gas shielding medium.

The technological processes of melting of magnesium alloys in the protective gas atmosphere with continuous or impulse their feeding into the melting or distributing unit, as well as the automated system of control and control of the technological process of gas protection of the magnesium melt in the melting and distributing units of injection molding complexes with the evaluation industrial exploitation in mass and mass production of magnesium alloy castings.

The equipment and automated control systems of the injection molding complex with continuous and impulse process of gas protection of the melt of magnesium alloys, as well as for the implementation of the technological process of casting of magnesium alloys into vacuum molds were refined to implement the created technologies for the protection of magnesium melt.

Experimental and industrial inspections of the created technological processes and equipment for their realization were carried out with the use of the new design of the radiator of magnesium alloys in exchange for analogues of aluminum alloys, which are promising products on the domestic consumption market. At the same time, studies were conducted on the stability, reliability, durability of technological processes and equipment for their implementation, which made it possible to develop a feasibility study on the organization of production of magnesium alloy radiators in exchange for analogs of aluminum alloys in the amount of 1 000 000 pieces/year.

Comparative analysis of the efficiency of the organization of production of magnesium alloy radiators in exchange of analogs of aluminum alloys in the amount of 1 000 000 pieces/year showed that in the implementation of the project of production of cast radiators of magnesium alloys by reducing the cost of basic and auxiliary materials, electricity, wages, the cost of annual net profit is UAH 82 000 000 (USD 3 280 000) and the payback period of the project is 1 year, against the similar indicators of the casting of aluminum alloy products at UAH 52 500 000 (USD 2 100 000) and 1.5 year respectively.

MAGNESIUM ALLOYS, FLUXLESS MELTING, INJECTION MOLDING, SURFACE TENSION, GAS PROTECTION, PROTECTIVE FILM, IMPULSE PROTECTION SYSTEM, BIMETALLIC RADIATOR, VACUUM, MICROSTRUCTURE.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

Статті у фахових виданнях:

1. Получение отливок в замороженных формах под низким давлением / Н. И. Замятин, Т. В. Лисенко, **К. А. Крейцер**, А. А. Бондарь // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2013. № 2/5 (62). С. 50 – 54.
2. Лисенко Т. В., **Крейцер К. А.**, Бабилунга А. В. Исследование и выбор оптимального технологического процесса бесфлюсовой плавки магниевых сплавов // Металл и литье Украины. 2014. № 7. С. 19 – 23.
3. Лысенко Т. В., **Крейцер К. А.**, Воронова О. И. Модернизация средств управления технологическим процессом изготовления магниевых дисков для установки литья под низким давлением // Металл и литье Украины. 2014. № 11. С. 25–28 .
4. Выбор оптимального комплекса оборудования для безфлюсовой защиты магниевых сплавов / Т. В. Лисенко, **К. А. Крейцер**, В. В. Ясюков, А. А. Бондарь // Металл и литье Украины. 2016. № 8-9. С. 283 – 286.
5. Усовершенствование оборудования и технологии литья под давлением для получения тонкостенных отливок / Т. В. Лисенко, М. П. Тур, **К. А. Крейцер**, Е. Н. Козишкурт // Металл и литье Украины. 2018. № 9-10. С. 54–59.

Статті в іноземних фахових виданнях:

6. Использование нанотехнологий при изготовлении отливок / Т. В. Лысенко, В. В. Ясюков, О. И. Воронова, Е. Н. Козишкурт, **К. А. Крейцер** // Литье и металлургия. 2019. № 4. С. 94–99.
<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-4-94-99>.

Статті в Міжнародній наукометричній базі Scopus:

7. New Binding Materials Based on Recycling Polystyrene Foam for Foundry. InterPartner 2019 / Tatiana Lysenko, Vladimyr Shinsky, **Kyryll Kreitser**,

Vadym Dotsenko, Predrag Dašić // Advanced Manufacturing Processes. pp 424 – 432. 28 March 2020 . https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_43

Тези доповідей на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях:

8. Преимущества производства отливок из магниевых сплавов / А. А. Крейцер, **К. А. Крейцер**, Т. И. Капацिला, Т. В. Лисенко // V Международная научно-практическая конференция «Литье 2010». Запорожье: ТПП, 2010. С.140 – 142.

9. Крейцер А. А., **Крейцер К. А.**, Лисенко Т. В. Магниевое литье одно из основных ресурсосберегающих направлений развития литейного производства // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейной индустрии : тезисы докл. VI междунар. науч.-практич. конф. (г. Киев, 21-23 апреля 2010 г.). Киев, 2010. С.44 – 45.

10. Лысенко Т. В., **Крейцер К. А.** Влияние технологического процесса плавки магниевых сплавов на коррозионную стойкость отливок // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве – Краматорск : ДГМА, 2013. С.137 – 138

11. Лысенко Т. В., Ясюков В. В., **Крейцер К. А.** Формирование поверхностей раздела в композиционных отливках // Нові матеріали і технології в машинобудуванні Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Киев : НТУУ “КПІ”, 2014. С. 65

12. Magnesium alloys casts quality control at lowpressure casting technology / Т. V. Lysenko, V. M. Tonkonogyi, L. V. Bovnegrа, **К. О. Kreutzer** // Proceedings 5-th International conference «Economics and Management-Based on New Technologies» emont 2015. Vrnjacka Banja, Serbia, 2015. P. 307 – 311.

13. Лысенко Т. В., **Крейцер К. А.**, Пархоменко Е. А. Улучшение качества отливок из магниевых сплавов при литье под низким давлением // Литье. Металлургия. 2015 : материалы XI междунар. науч.-практич. конф. (г. Запорожье, 26-28 мая 2015 г.). Запорожье, 2015. С.161.

14. Лисенко Т. В., **Крейцер К. А.**, Могетич В. Ю. Сеточный метод

защиты магниевого сплава от возгорания // Литье. Металлургия. 2016 : материалы XII междунар. науч.-практ. конф. (г. Запорожье, 24-26 мая 2016 г.) / под общ. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.И. Запорожье, ЗТПП. С.142 – 144.

15. Лысенко Т. В., **Крейцер К. О.**, Тончук Н. Комплексы оборудования для газовой защиты магниевых сплавов // Литво. Металургія. 2017 : матеріали XIII міжнар. наук.-практ. конф. (м. Запорожжя, 23-25 травня 2017 р.). під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. Запоріжжя, 2017. АА Тандем. С.156 – 158.

16. Импульсная система безфлюсовой защиты магниевых сплавов от возгорания / Т. В. Лисенко, А. А. Бондарь, **К. А. Крейцер**, Е. Н. Козишкурт, О. Ю. Морозов // Литво. Металургія. 2019 : матеріали XV міжнар. наук.-практ. конф. (м. Запорожжя, 21-23 травня 2019 р.) / під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. Запоріжжя, АА Тандем. 2019. С.130 – 131.

17. Особенности вакуумирования формы при литье под давлением магниевых сплавов / Т. В. Лисенко, **К. А. Крейцер**, В. В. Ясюков, Е. Н. Козишкурт, А. Л. Морозов // Литво. Металургія. 2019 : матеріали XV міжнар. наук.-практ. конф. (м. Запорожжя, 21-23 травня 2019 р.) / під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. Запоріжжя, АА Тандем. 2019. С.132 – 133.

18. Методи підвищення якості товстостінних виливків, отриманих литтям під тиском / Т. В. Лисенко, В. В. Ясюков, **К. О. Крейцер**, Е. М. Козішкурт, Ю. Д. Пономаренко // Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві : матеріали VIII міжнар. наук.-техн. конф. (м. Краматорськ, 15-18 жовтня 2019 р.). / за заг. ред. А.М. Фесенка, М.А. Турчаніна. Краматорськ. ДДМА, 2019. С.135 – 136.

Статті в інших виданнях:

19. Управление процессами литья под низким давлением цветных сплавов / Т. В. Лысенко, В. В. Ясюков, Е. Н. Козишкурт, **К. А. Крейцер** // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. 2018. №1. С. 27 – 31.

20. The management of processes of casting under low pressure non – ferrous alloys / Т. V. Lysenko, V. V. Yasyukov, E. N. Kozishkuet, **К. А. Kreitser** // Metallurgical and Mining Industry. 2018. №8. С. 36 – 41

21. Управление скоростью затвердевания отливок из сплава АК7 за счет зонального охлаждения при литье под низким давлением / Т. В. Лысенко, Е. Н. Козишкурт, **К. А. Крейцер**, Л. И. Солоненко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2018. №2. С. 41 – 44.

22. Control of the solidification rate of casting from alloy AL9 due to zonal cooling during low – pressure casting / T. V. Lysenko, E. N Kozishkuet, **K. A. Kreitser**, L. I. Solonenko // *Metallurgical and Mining Industry*. 2018. №. C.32–35.

23. Using the sph method for modeling the crystallization process of aluminium alloys / T. V. Lysenko, Y. Morozov, **K. A. Kreitser**, E. N Kozishkuet // *World Science*. pp 26 – 33. №3(55), Vol.1 March 2020. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31032020/6981

ЗМІСТ

	стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ	18
ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ	27
1.1 Переваги і недоліки виливків з магнієвих сплавів	27
1.2 Область застосування магнієвих сплавів	30
1.3 Флюсовий і безфлюсовий захист магнієвих сплавів від окиснення і загоряння	31
1.4 Лиття під тиском магнієвих сплавів	38
1.5 Обладнання для лиття магнієвих сплавів	40
1.6 Особливості системи управління процесом плавки магнієвих сплавів	43
1.7 Дефекти виливків з магнієвих сплавів при литті під тиском	46
1.8 Фактори керування технологічним процесом	50
1.9 Висновки до розділу 1	54
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ, МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ	56
2.1 Методика визначення поверхневого натягу магнієвого сплаву	56
2.2 Експериментальний стенд лиття під тиском для дослідження впливу параметрів технологічного процесу одержання виливків з магнієвих сплавів з газовим захистом розплаву металу	61
2.3 Методика визначення вагового показника корозії	65
2.4 Методика управління параметрами лиття магнієвих сплавів під тиском	67
2.5 Методики дослідження якісних та кількісних характеристик неметалевих включень і мікроструктури в магнієвому сплаві	71
2.6 Методики визначення хімічного складу, механічних властивостей виливків з магнієвих сплавів	72

2.7 Висновки до розділу 2	72
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОДЕРЖАННЯ ВИЛИВКІВ З МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ ЛИТТЯМ ПІД ТИСКОМ З ГАЗОВИМ ЗАХИСТОМ РОЗПЛАВУ В МЕТАЛОЄМНИХ ПЛАВИЛЬНИХ АГРЕГАТАХ	75
3.1 Дослідження впливу та оптимізація складу захисної газової суміші на окиснюваність магнієвих сплавів при їх одержанні в металоємних плавильних агрегатах	75
3.2 Аналіз окислення і межі загоряння магнієвих сплавів	86
3.3 Теоретичне уявлення щодо процесів захисту магнієвих сплавів від загоряння і окислення	88
3.4 Установка для імпульсної подачі суміші захисних газів в плавильні та роздаткові агрегати одержання магнієвих сплавів	92
3.5 Регресійно-кореляційний аналіз експериментальних даних імпульсній подачі захисних газів при плавленні та збереженні розплаву магнієвих сплавів	96
3.6 Дослідження неметалічних включень і мікроструктури в ливарному сплаві на основі магнію	103
3.7 Вплив технологічних параметрів газового захисту на механічні характеристики виливків з магнієвих сплавів	106
3.8 Висновки до розділу 3	111
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ГАЗОВОГО ЗАХИСТУ РОЗПЛАВУ МАГНІЮ В ПЛАВИЛЬНИХ І РОЗДАТКОВИХ АГРЕГАТАХ КОМПЛЕКСІВ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ	114
4.1 Автоматизована система контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під	

тиском	114
4.2 Аналіз експлуатаційної надійності автоматизованої системи контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах	118
4.3 Дослідження надійності автоматизованої системи контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах за час тривалої експлуатації	120
4.4 Висновки до розділу 4	126
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ, ОБЛАДНАННЯ І ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА ВИЛИВКІВ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ІМПУЛЬСНОГО ГАЗОВОГО ЗАХИСТУ МЕТАЛУ В ПЛАВИЛЬНИХ І РОЗДАТКОВИХ АГРЕГАТАХ КОМПЛЕКСУ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ	129
5.1 Технологічний процес та обладнання для одержання виливків з магнієвих сплавів у вакуумованих формах литтям під тиском	130
5.2 Вибір продукції для реалізації технології одержання виливків магнієвих сплавів з використанням імпульсного газового захисту металу в плавильних і роздаткових агрегатах комплексу лиття під тиском	136
5.3 Технологічний процес виготовлення литих радіаторів з магнієвих сплавів під тиском з використанням газового захисту розплаву металу	140
5.4 Випробування надійності основних технологічних вузлів устаткування лиття під тиском магнієвих сплавів	144
5.5 Дослідження технологічного процесу одержання радіаторів з магнієвих сплавів на машині лиття під тиском на стадіях подачі і допресування металу у форми	147
5.6 Порівняльні показники властивостей магнієвого виливка	160

5.7 Система виявлення парів магнію	161
5.8 Порівняльна оцінка різних видів радіатору і економічна ефективність створеної системи	165
5.9 Висновки до розділу 5	172
ВИСНОВКИ	173
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	177
ДОДАТОК А Список публікацій здобувача за темою дисертації	194
ДОДАТОК Б Відомості про апробацію результатів дисертації на міжнародних та всеукраїнських конференціях	199
ДОДАТОК В Акт промислових випробувань на підприємстві “ВАМАХ Poland Sp.zoo”, Польща	202
ДОДАТОК Г Акт перевірки технології на надійність ДП «Інженерний центр литва під тиском»	204
ДОДАТОК Д Акт про впровадження результатів роботи в навчальний процес	206
ДОДАТОК Е Схема контролю хімічного складу, механічних і ливарних властивостей магнієвих сплавів для виливків	208
ДОДАТОК Ж Базова та нова технології системи подачі газової суміші	210
ДОДАТОК И Статистика прискорених випробувань базовим методом бесфлюсового захисту	213
ДОДАТОК К Статистика прискорених випробувань новим методом імпульсного бесфлюсового захисту	215
ДОДАТОК Л Статистика випробувань на новій системі імпульсної подачі захисних газів	217

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЛПТ – лиття під тиском

σ_b , МПа – тимчасовий опір розриву;

δ , % – відносне видовження;

ДП ІЦЛТ – Державне підприємство «Інженерний центр литва під тиском»

ВСТУП

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті у відповідності з планами науково-дослідних робіт.

Виконання дисертаційної роботи пов'язано з тематичними планами Одеського національного політехнічного університету, виконанням держбюджетних науково-дослідних робіт за темами: №86-28 «Підвищення якості виливків із залізовуглецевих та кольорових сплавів за рахунок керування ливарними процесами» (№ ДР 0114U000637), НДР III-08-17-670 «Процеси формування структури та властивостей алюмінієвих, магнієвих і титанових сплавів при концентрованому нагріванні та перемішуванні розплавів у вакуумі» (№ ДР 0117U002601, 2017-2019) та госпдоговірної теми № 1737 – 28 «Аналіз та розробка методики експериментального дослідження фізичних параметрів поверхневого натягу рідких сплавів».

Мета і завдання дослідження. Дослідження та створення нових технологічних процесів одержання складних тонкостінних виливків з магнієвих сплавів з газовим захистом розплаву в плавильних та роздаткових агрегатах комплексу лиття під тиском.

Для досягнення зазначеної мети необхідно було вирішити наступні завдання:

- Розробити методики та устаткування для досліджень впливу складу захисної суміші на окиснюваність, механічні властивості, поверхневий натяг розплаву магнієвих сплавів безпосередньо у металоємних агрегатах з газовим захистом, визначити основні фактори впливу.

- Встановити закономірності впливу безперервного газового захисту розплаву магнієвих сплавів на основі сірчистого ангідриду SO_2 , і співвідношення хлору Cl_2 та водню H_2 на корозійну стійкість виливків з магнієвого сплаву МЛ5 ГОСТ2856-79.

- Встановити закономірності одержання магнієвих сплавів з використанням імпульсної подачі газової суміші для захисту магнієвого розплаву, провести регресивний аналіз одержаних результатів.

- Визначити вплив імпульсної дії газової захисної суміші розплаву на механічні властивості виливків з магнієвих сплавів.

- Обґрунтовано вибрати вихідні данні для створення автоматизованої системи контролю і регулювання при модернізації плавильних та роздаткових агрегатів при одержанні високоякісних виливків з магнієвих сплавів.

- Створити нові технологічні процеси виробництва складних тонкостінних виливків з магнієвих сплавів, які мають газовий захист розплаву в плавильних та роздаткових агрегатах комплексу лиття під тиском.

- Доопрацювати обладнання і автоматизовані системи управління комплексу лиття під тиском з безперервним та імпульсним процесом газового захисту розплаву для лиття магнієвих сплавів у вакуумовані прес-форми, а також розробити автоматизовані системи контролю та керування процесами та обладнанням.

- Провести аналіз експлуатаційної надійності створених технологій, модернізованого обладнання та систем контролю і керування газовим захистом розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском радіаторів з магнієвих сплавів.

- Провести дослідно-промислову перевірку створених технологічних процесів і обладнання для їх реалізації з використанням нової конструкції радіатора з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів.

- Розробити техніко-економічне обґрунтування щодо організації виробництва радіаторів з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих.

Об'єкт досліджень – процес виготовлення виливків із магнієвих сплавів литвом під тиском.

Предмет досліджень – якість литва під тиском магнієвих сплавів, як результат використання нових технологічних прийомів управління процесами литва.

Методи дослідження. При аналізі експериментальних даних використовували регресивний аналіз і методи математичної статистики. Для оцінки хімічного складу та механічних властивостей магнієвих сплавів та виливків, одержаних з магнієвих сплавів під тиском з використанням газового захисту розплаву в печі, адаптовані стандартні методи. Для автоматичного визначення поверхневого натягу рідкого сплаву в печах плавки і розливання створено експериментальний пристрій, а чисельне значення визначали методом максимального тиску бульбашки газу. Для відпрацювання технологічного процесу захисту магнієвих сплавів від загоряння створено експериментальний стенд. Метод прискорених випробувань використовували при перерахунку результатів на умови тривалої експлуатації системи.

Наукова новизна одержаних результатів теоретичних та експериментальних досліджень:

1. Вперше розроблено методику та устаткування для досліджень поверхневого натягу рідких металів безпосередньо у металоємних агрегатах з газовим захистом розплаву магнію, визначено основні фактори впливу на поверхневий натяг, як хімічний склад і температура сплаву, склад і витрати захисної суміші, включаючи сірчистий ангідрид SO_2 і гексофторид сірки SF_6 , а також експериментальний сплав, в якості якого прийнято МЛ5 [ГОСТ 2856-79](#) та його аналоги.

2. Вперше встановлені закономірності впливу безперервного газового захисту розплаву магнієвих сплавів на основі сірчистого ангідриду SO_2 , і співвідношення хлору Cl_2 та водню H_2 на корозійну стійкість виливків з магнієвого сплаву МЛ5 ГОСТ2856-79 і при цьому визначено, що на зростання корозійної стійкості цих сплавів істотно впливає вміст SO_2 (0,12-0,70 л/хв), значення його обернено пропорційно змінюється з 7 до $12 \cdot 10^{-3}$ г/м²год, тобто в 1,7 рази; встановлені також оптимальні витрати SO_2 , H_2 , Cl_2 в суміші захисних газів, які знаходяться в межах 0,12-0,25 л/хв, 3,0-4,0 10^3 м³/кг та 0,002-0,004 м³/кг, а це дає змогу досягти мінімальну окиснюваність за критерієм масового

коефіцієнту корозії виливків з магнієвого сплаву типу МЛ5 ГОСТ2856-79 до значень $7\text{--}8 \cdot 10^{-3}$ г/м²год.

3. Встановлені закономірності одержання магнієвих сплавів з використанням імпульсної подачі газової суміші для захисту магнієвого розплаву, де у якості факторів були обрані – температура T_1 , поверхневий натяг сплаву σ , вміст сірчистого ангідриду SO_2 і гексофториду сірки SF_6 , а у якості відгуку – час існування захисної плівки (до загоряння), проведений аналітично-регресивний аналіз одержаних результатів і при цьому визначено, що зростання межі руйнування захисної плівки для магнієвих сплавів Y істотно впливає вміст SO_2 (0,2-0,8 %), тобто при зростанні вмісту SO_2 значення Y обернено пропорційно спадає з 420 до 140 с, тобто зменшується втричі, встановлено також оптимальні параметри названих основних факторів впливу на імпульсну обробку розплаву магнію, які знаходяться для значень вмісту SO_2 і SF_6 , %, T_i і σ в межах 660-700 і 520-550 дін/м, $3,0\text{--}4,0 \cdot 10^3$ м³/кг та 0,002-0,004 м³/кг, а це дає змогу досягти підвищення порогу існування плівки на поверхні магнієвого розплаву в межах 560-620 с. Водночас встановлено, що витрати складових захисної суміші, а саме SO_2 і SF_6 , при їх імпульсній подачі в 12 разів і 19 разів нижчі у порівнянні з технологією безперервної подачі цих захисних газів у атмосферу плавильного агрегату.

4. Досліджені закономірності впливу названих технологічних параметрів імпульсного захисту магнієвих сплавів у порівнянні з традиційним «флюсовим», за результатами аналітично-регресивного аналізу одержаних даних встановлено, що за значеннями коефіцієнту вагової корозійної стійкості, $K_{\text{ваг}}$ та глибинним показником корозійної стійкості Π , під дією атмосфери навколишнього середовища вказані характеристики для сплаву МЛ5 ГОСТ2856-79, у одержанні якого використовується газовий захист становлять 0,008 г/м²год і 0,04 мм/рік, а за традиційним «флюсовим» методом аналогічні характеристики відповідають значенням 2,01 г/м²год і 10,3 мм/рік, тобто величина корозії в останньому вища в 250 і 260 разів відповідно.

5. Вперше визначено вплив імпульсної дії газової захисної суміші розплаву на механічні властивості виливків з магнієвих сплавів, одержаних під високим тиском і при цьому встановлено, що за умов варіювання технологічних параметрів, як вмісту сірчистого ангідриду SO_2 та поверхневого натягу і температури розплаву, значення міцності, відносного видовження та твердості МЛ5 може знаходитись в межах 140-285 МПа, 1,1-3,1, 80-100 НВ відповідно. Водночас слід відзначити, що величина міцності, пластичності перевищує аналогічні характеристики для виливків зі сплаву МЛ5, що визначені у ГОСТ 2856-79 для лиття під тиском у 1,5 та 3 рази відповідно.

6. Завдяки комплексному дослідженню впливу основних факторів створеної імпульсної технології, включаючи температуру T_1 і поверхневий натяг сплаву σ , вміст сірчистого ангідриду SO_2 і гексофториду сірки SF_6 , а у якості відгуків – час існування захисної плівки (до загоряння) розплаву, корозійна стійкість і механічні властивості виливків з магнієвих сплавів, стало можливим розробити вихідні дані для послідуєчого створення автоматизованої системи контролю і регулювання, модернізувати плавильні та роздаткові агрегати для одержання високоякісних виливків з магнієвих сплавів, в першу чергу, за технологією лиття під тиском, включаючи у вакуумовані форми.

Практичне значення одержаних результатів. На основі досліджень закономірностей та особливостей впливу основних технологічних факторів на якість литих виробів з магнієвих сплавів створені нові технологічні процеси та обладнання, включаючи:

1. Розроблено техніко-економічне обґрунтування організації виробництва радіаторів з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів у обсязі 1 000 000 шт./рік та проведено дослідно-промислову перевірку створених технологічних процесів і обладнання.

2. Для проведення дослідно-промислової перевірки щодо стабільності, надійності, довговічності технологічних процесів та обладнання комплексу лиття під тиском був обраний радіатор Р300МгЛ з магнієвого сплаву МЛ5 ГОСТ 2856-79 та Р300АЛ алюмінієвого сплаву АК12 ДСТУ 2839-94 що дало

змогу встановити основні характеристики для цих конструкцій водночас, а саме: для радіатора Р300МгЛ: маса - 7,2 кг, номінальний тепловий потік - 800 Вт; питома маса 9кг/КВт, а для радіатора Р300АЛ: маса - 9,2 кг, номінальний тепловий потік - 730Вт; питома маса 12,6кг/КВт, тобто за умов організації виробництва радіаторів з заміною Р300АЛ на Р300МгЛ, маса останнього зменшується у 1,3 рази, а питома маса в 1,4 рази відповідно.

3. Порівняльний аналіз ефективності організації виробництва радіаторів з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів у обсязі 1 000 000 шт./рік показав, що при реалізації проекту виробництва литих радіаторів з магнієвих сплавів за рахунок зменшення витрат основних і допоміжних матеріалів, електроенергії, фонду заробітної плати, собівартості показники річного чистого прибутку становлять 82 000 000 грн. (3 280 000 USD) і термін окупності проекту 1 рік, проти аналогічних показників лиття продукції з алюмінієвих сплавів у 52 500 000 грн. (2 100 000 USD) і 1,5 року відповідно. За розрахунком на одиницю продукції литих радіаторів з магнієвих сплавів типу МЛ5 ГОСТ2856-79 собівартість і чистий прибуток становитимуть 110 грн. (4,5 USD) і 85 грн. (3,5 USD).

Результати роботи пройшли промислові випробування на підприємстві “BAMAX Poland Sp.zoo”, Польща (акт від 22.10.2015) та у Державному підприємстві «Інженерний центр литва під тиском», Україна (акт від 20.11.2017). Встановлено, що нова імпульсна система відповідає необхідному рівню надійності та підтверджено переваги створеного технологічного процесу виготовлення литих радіаторів з магнієвих сплавів.

Запропоновані методики і моделі впроваджені в навчальний процес Одеського національного політехнічного університету при вивченні дисциплін «Теоретичні основи ливарного виробництва», «Моделювання та оптимізація технологічних систем» та «Спеціальні способи литва».

Особистий внесок здобувача. Дисертація виконана автором самостійно і базується на результатах досліджень, що опубліковані. Всі наукові результати, отримані в дисертації, базуються на дослідженнях, проведених особисто

здобувачем. Публікації відображають дослідження, виконані здобувачем. У дисертації не використані ідеї співробітників, які сприяли виконанню роботи. Здобувач безпосередньо брав участь в розробці технологічних і теоретичних основ для створення нової технології захисту магнієвих сплавів, проведенні експериментів, аналізів та обробці експериментальних даних. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: брав участь у проведенні експериментів і обробці одержаних даних, здійснив аналіз результатів [1]; провів дослідження на підприємстві, визначив основні параметри технологічного процесу [2]; провів дослідження нових засобів управління, підготував статтю до друку [3]; розробив методику проведення експериментів, підготував статтю до друку [4]; здійснив обґрунтування вибору нового обладнання [5]; провів аналіз наноматеріалів, підготував статтю до друку [6]; провів дослідження на підприємстві [7]; брав участь у проведенні експериментів і обробці одержаних даних, здійснив аналіз результатів [19]; провів вибір об'єктів досліджень, провів експериментальні дослідження[20]; - розробив методику проведення експериментів [21]; визначив параметри лиття під тиском [22]; визначив технологічні параметри процесу[23].

Автор узагальнив результати досліджень і виконав апробацію запропонованих технічних рішень.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення і результати, що представлені в дисертації, пройшли апробацію на конференціях: V і XI-XIII, XV міжнародних науково-практичних конференціях «Литво 2010, 2015-2017, 2019», м. Запоріжжя; VI міжнародній науково-практичній конференції «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейной индустрии» Київ, 2010; науково-практичній конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» 2013, Краматорськ; VI міжнародній науково-технічній конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні», (м. Київ, 2014); Proceedings 5-th International conference «Economics and Management-Based on New Technologies» Emont 2015, Vrnjacka Banja, Serbia; VIII міжнародній науково-технічній конференції «Перспективні

технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві» м. Краматорськ, 2019.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи викладені в 23 надрукованих роботах, в тому числі: в 7 статтях в наукових фахових виданнях, 1 з яких – у закордонному виданні, 1 – у виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, в 11 тезах доповідей на міжнародних науково - технічних і науково - практичних конференціях та 5 статтях в інших виданнях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, основної частини - п'яти розділів з висновками для кожного з них, загальних висновків, списку використаних джерел із 160 найменувань та 10 додатків. Загальна частина дисертації викладена на 221 сторінці, містить 43 рисунки і 29 таблиць. Загальний обсяг роботи - 168 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ

1.1. Переваги і недоліки виливків з магнієвих сплавів

Тенденції розвитку промисловості і машинобудування вимагають розвитку технології лиття легких сплавів. Дані сплави мають вирішальні значення для авіакосмічної, машинобудівної та автомобільної галузей.

У сучасній техніці найбільш актуальним є розвиток магнієвого виробництва. Магній за останнє десятиліття з рідкісного матеріалу для космічної індустрії, став третім металом, які найбільш часто використовуються, після сталі та алюмінію [1-10].

Магній - найбільш легкий конструкційний матеріал в промисловості, його густина всього $\rho = 1800-1900 \text{ кг / м}^3$. З цього випливає, що він в 6 разів легше сталі і в 1,5 рази легше алюмінію, що дозволяє знижувати масу виробів до 30%. При такій низькій густині магній володіє високою питомою міцністю, поступається в цьому показнику тільки титану, питомої вібраційної стійкістю і жорсткістю. Його питома міцність поступається лише титану, а питома ударна міцність в 200 разів вище ніж у дюралюмінію і в 300-500 разів вище ніж у титану. Магній поглинає всі види електромагнітних хвиль, а також має високу теплопоглинальну здатність [11-14].

Крім високих характеристик цей метал дуже конкурентоспроможний, в рамках ринкової економіки. Це обумовлено його поширеністю, це восьмий елемент в земній корі і третій в морській воді. В даний час магнієві сплави займають лідируючу позицію серед високоефективних енергозберігаючих технологій.

За останні десятиліття підвищилися вимоги до автомобільної промисловості в області зниження ваги автомобіля, поліпшення екологічної обстановки, зниження споживання палива і поліпшення продуктивності. Провідні виробники автомобілів, такі як Audi, Volkswagen, Daimler Chrysler

(Mercedes-Benz), Toyota, Ford, BMW, Jaguar, Fiat, Hyundai та Kia Motors Corporation використовували магнієві сплави для заміни звичайних сталевих деталей (див. рис. 1.1) [15-17]. Приріст магнію в автомобільній промисловості провідних країн - до 20% в рік. Найбільший приріст магнієвого виробництва - Китай - 26% в рік.

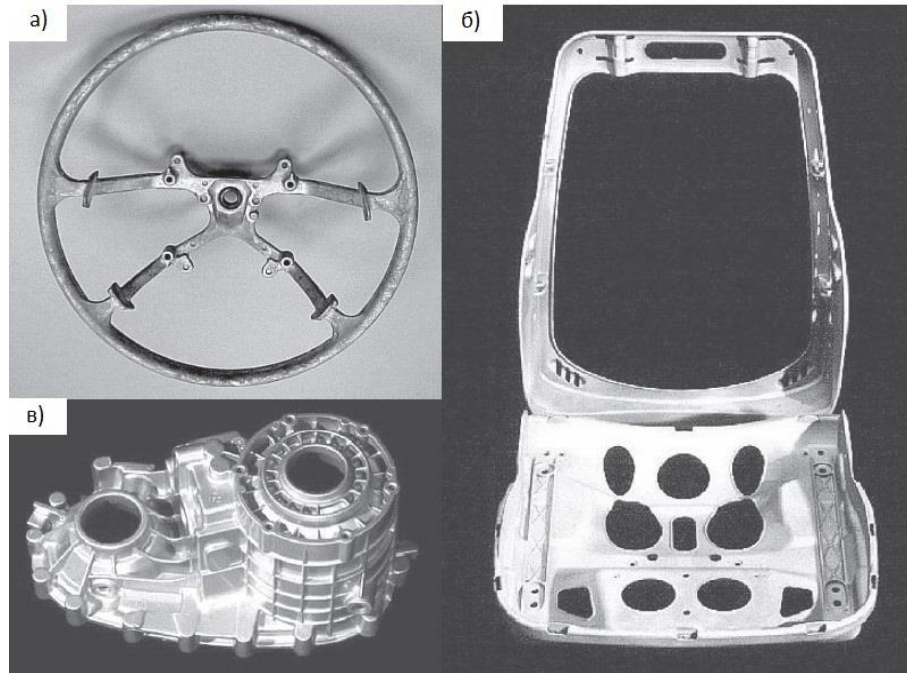


Рис. 1.1 Виливки з магнієвих сплавів

а) рульове колесо з магнію Toyota Camry вагою 0,75 кг, б) каркас сидінь моделей Jaguar і Fiat вагою 2,6 кг, в) коробка передач вагою 2,7 кг.

Окремо можна виділити лиття дисків з магнієвих сплавів. Протягом всього терміну служби вони повинні витримувати як величезні пікові навантаження, так і постійні перевантаження. Такі диски виготовляються для гоночних автомобілів, таких як Corvette, Porsche, авто для гонок NASCAR та інші.

В аерокосмічній промисловості, зниження ваги є однією з найбільш важливих завдань для підвищення ефективності використання палива. Зниження ваги літака веде до економії палива і підвищення експлуатаційних характеристик. Протягом багатьох років магнієві сплави використовуються як у військовій, так і в цивільній авіації. Останнім часом використовуються для Boeing (737, 747, 757, 767), коробка передач (Rolls-Royce), двигуни, і кожухи

передачі гелікоптеру, військові літаки такі, як Eurofighter Typhoon, Tornado і F16 [18].

Магнієві сплави часто застосовують в електронній промисловості. Вони відповідають таким важливим вимогам, як довговічність, зносостійкість, необхідну передачу тепла, а також найважливіше - захищають від електромагнітних і радіочастотних перешкод.

Матеріали на основі магнію використовуються в корпусах телефонів, комп'ютерів, ноутбуків і портативних медіа-плеєрів (наприклад, Apple Ipad Nano) [19].

Магнієві сплави застосовуються в багатьох галузях промисловості (корпусу електроінструментів), біоінженерії та інших. Вироби з магнієвих сплавів легко утилізуються, не завдаючи шкоди навколишньому середовищу і безпечні при контакті з людиною. Завдяки своїм унікальним властивостям магнієві сплави знайшли найбільший розвиток як матеріали з високими фізичними та хімічними властивостями. [20]

Незважаючи на всі переваги магнію, він має ряд недоліків, які стримують його впровадження. Одна з головних проблем - це його велика спорідненість з киснем і воднем [21, 22].

Адсорбуючи всередині сплаву кисень і магній, що виділяє його на поверхню, запалюється. Температура горіння магнію 2500°C , він не гаситься водою, що викликає особливу небезпеку при загорянні.

Наступна проблема магнію - його низька корозійна стійкість. Магній найбільш електронегативний метал і його хімічна активність посилюється з підвищенням температури. Через це незахищені магнієві виливки мають низьку корозійну стійкість, на їх поверхні за пару годин утворюється наліт - гідроксид магнію. Характерною особливістю магнієвих сплавів МЛ5 є схильність до утворення мікрорихлот. При контакті з іншими металами, магній утворює гальванічну пару, в якій виступає анодом і піддається руйнуванню. Домішки, такі як Fe, Cu, Ni викликають електрохімічну корозію на мікрорівні всередині виливки [23-27].

1.2. Область застосування магнієвих сплавів

В даний час існує широка гама ливарних магнієвих сплавів. Вони забезпечують виконання індивідуальних вимог виливків різного призначення.

Найчастіше використовують сплав на основі Mg-Al-Zn. МЛ5 - має високу корозійну стійкість, гарні ливарні властивості і підвищені характеристики. Набув найширшого впровадження в промисловості.

Істотну роль в кінцевих показниках механічних властивостей магнієвих сплавів, на основі Mg-Al-Zn, грають легуючі елементи. Їх можна поділити на три основні категорії:

Ті, які збільшують міцність і пластичність. В порядку ефективності:

- Al, Zn, Ca, Ag, Ce, Ga, Ni, Cu, Th (Критерій міцності);
- Th, Ga, Zn, Ag, Ce, Ca, Al, Ni, Cu (Критерій пластичності).

Ті, які збільшують міцність і при цьому збільшують пластичність:

- Cd, Ti і Li.

Ті, які збільшують міцність, але за рахунок пластичності:

- Pb, Bi і Sb.

Особливе значення щодо підвищення корозійної стійкості являє добавка 0,02% Be [28].

Фахівцями ВІАМ розроблені більш 17 марок високоміцних, корозійностійких, жароміцних магнієвих сплавів. Істотний вплив на магній надає Zr. Він сприяє подрібненню зерна, виведенню шкідливих домішок, підвищує загальні характеристики сплаву [29, 30].

Запатентовані авторами І.О Мухіною та ін., сплави ВМЛ20 і ВМЛ24, мають високі характеристики міцності і високу корозійну стійкість. Після термообробки межа міцності цих сплавів підвищується до 330 МПа. Ці сплави використовуються для литих навантажених деталей. Сплави рекомендовані для застосування в літаках, гелікоптерах, космічних апаратах і двигунах. З них пропонують лити диски авіаколес, коробки швидкостей, корпусів, які

працюють при температурах вище 150 °С. Це дозволить знизити маси літальних апаратів на 10-20%, збільшити їх експлуатаційні характеристики і знизити вартість деталей на 25% [28-35].

1.3. Флюсовий і безфлюсовий захист магнієвих сплавів від окислення і загоряння

Висока пружність парів магнію робить практично неможливою плавку його сплавів у вакуумі. Зниження окислюємості магнію домагаються додаванням в нього металів, що змінюють природу плівки MgO , роблячи її більш щільною і менш проникною для кисню. Додавання 0,3% Se підвищує механічні властивості і корозійну стійкість, а для зниження горячеламкості додають 0,3% La. Введення в сплав 0,2% Ca подрібнює його зерно і покращує механічні властивості. Термічна обробка не покращує властивостей, а застосовується тільки для зняття внутрішніх напружень. У разі сильного газонасичення розплав продувають інертними газами (азотом, аргоном) або хлором. Корисні добавки кальцію до 0,1%, так як він пов'язує водень, в стійкі включення типу гідрату, які менш шкідливі.

Більш раціональним методом поліпшення властивостей магнієвих сплавів є модифікування їх речовинами, що містять вуглець. Сплави, що містять алюміній, модифікують продувкою охолодженим природним газом: ацетиленом і вуглекислим газом. Для цих же цілей в сплав вводять карбіди, графіт, вуглекислі солі. У практиці велике поширення має модифікування крейдою або мармуром 0,5-0,6%, за допомогою «дзвіночка» в 2-3 прийоми при температурі 760-780 °С [36].

Процес рафінування магнієвих сплавів заснований на принципах адсорбції і хемосорбції. Фільтрація застосовується при литті сплавів МЛ10, МЛ12, МЛ15, а також МЛ5. Фільтрами можуть служити ряд матеріалів, наприклад фільтр з магнезитової крихти. При цьому флюси і оксиди, що знаходяться в сплаві, стикаючись з магнезитом адсорбуються їм, а неметалеві включення механічно

затримуються. Також, як активний фільтр, використовується титанова губка. Титан з розвиненою поверхнею пір має високу хімічну активність, тобто крім чисто механічного затримання, він ще здатний адсорбувати на поверхню розчинені гази – водень і металеві домішки.

Рафінування за допомогою азоту аналогічно дії нейтрального газу. Крім того, пухирець азоту, проходячи через розплав і взаємодіючи з магнієм утворює нітрид магнію, що призводить до забруднення розплаву [37-42].

Рафінування хлором або сумішшю хлору з чотирьох хлористим вуглецем і іншими газовими сумішами приводить до утворення хлористого магнію. Продування хлором в кількості понад 3% призводить до огрубіння зерна сплаву і до зниження механічних властивостей. Також цей спосіб викликає ряд незручностей, з них найбільш серйозним є токсичність хлору. Тому метод хлорування не знайшов застосування в промисловості. Гарні результати виходять при пропущенні через розплав послідовно вуглекислого газу та інертного газу, а також, інертного газу з чотирьох хлористим вуглецем або чотирьох хлористим титаном.

Використання послідовної обробки вуглекислим газом і гелієм підвищує ефективність дегазації інертного газу. Обробка чотирьох хлористим вуглецем з гелієм, а потім просто гелієм показало, що кількість водню в металі знизилася в 3 рази. Такий же ефект досягається при рафінуванні сумішшю чотирьох хлористого титану і гелію. Застосування чотирьох хлористого титану змінює характер розташування мікрорихлот, які розподіляються рівномірно за обсягом виливки і проявляє себе у вигляді найдрібніших частинок. Титан є гідридоутворюючим металом і пов'язує водень, який виділяється в сплаві. Під час продування інертним газом велика частина водню видаляється разом з титаном, який погано розчиняється у сплаві, також відбувається зв'язування водню, який залишився в сплаві, в гідриди [43].

Для рафінування магнію від металевих домішок в сплав при температурі 800 °С вводять добавки марганцю (4,5%), аналогічну дію надає добавка до сплаву церію і цирконію. При приготуванні магнієвих сплавів з цирконієм,

необхідно враховувати можливість забруднення розплаву в результаті хімічної взаємодії сплаву з солями по типу реакції заміщення [44].

Модифікування перегрівом – сплав після рафінування нагрівають до температур 800 - 830 °С і витримують 20-10 хв. Дія модифікування пропадає при тривалому витримуванні сплаву при низьких температурах 680-720 °С. Повторне перегрівання призводить до подрібнення зерна сплаву, при витримці на температурі понад 1000 °С результат аналогічний з низькими температурами - огрубіння зерна. Також сплав повинен містити для ефективного подрібнення 0,2% Mn при 0,02-0,03% Fe. Модифікування перегрівом не пов'язане із застосуванням дефіцитних матеріалів, а простота і надійність методу забезпечила йому широке застосування. Його недоліки - підвищена витрата палива для нагріву металу до високої температури, зниження продуктивності плавильних печей, підвищений знос тиглів і зростаюче окислення сплаву з підвищенням температури [45].

Модифікування сполуками, що містять вуглець (крейда і магнезит), отримало найбільше поширення в промисловості. При модифікуванні розплаву крейдою або мармуром – крейда у вигляді сухого порошку, а мармур у вигляді дрібної крихти 0,5-0,6%, вводять в розплав за допомогою «дзвіночка» при температурі 760-780 °С. Модифікування крейдою або мармуром не має недоліків, властивих методу перегріву. Головним недоліком цього методу є утворення в виливках мікрорихлот в результаті насичення сплаву воднем за рахунок вологи, яка завжди знаходиться в крейді. Магнезит менш гігроскопічний, ніж крейда, і його можна вводити в розплав при порівняно низьких температурах, його подрібнюють і вводять в розплав 0,3-0,4% за допомогою «дзвіночка». Відбувається це 8-12 хвилин, після чого сплав відстоюється не менше 15 хвилин, але не більше 40 хвилин [46].

Також для модифікування магнієвих сплавів використовують такі фізичні методи: вібрація, електромагнітне або індукційне перемішування і ультразвукову обробку. Застосування фізичних методів для подрібнення зерна магнієвих сплавів доцільно і можливо в тих випадках, коли інші методи,

наприклад, модифікування малими добавками, виявляється неефективним. Їх головною перевагою є те, що їх можна застосовувати у всіх видах лиття і без додаткової витрати часу. Їх відмітною особливістю є їх вплив безпосередньо на хід процесу кристалізації [47].

Численні дослідження вібраційної обробки розплаву, який кристалізується, показали, що вібрація в основному впливає на макроструктуру і майже не змінює мікроструктуру литого матеріалу. У більшості випадків використовують механічний, пневматичний або електромагнітний вібратор. При вібрації подрібнюється зерно внаслідок збільшення числа центрів кристалізації. Вібрація допомагає системі металу, який твердіє, наблизитися до рівноважного стану. Однак при цьому вібрація руйнує шари абсорбції, що сприяє отриманню не модифікованих структур. У виробничих умовах цей метод не застосовується.

При обробці ультразвуком в розплаві збуджуються вібрації ультразвукової частоти. Ультразвукова обробка при напівбезперервному литті дозволяє подрібнити розмір зерна. Але головний недолік цього методу – складне виготовлення генераторів ультразвукових хвиль. Всі фізичні процеси, що викликаються ультразвуковими коливаннями, діляться на дві групи: макромеханічні (перемішування, кавітація, коливальний тиск, сили в'язкого тертя) і молекулярні (інтенсифікація флуктуацій і інтенсифікація дифузійних процесів). Цей метод дозволяє не тільки подрібнити зерно, а й поліпшити структуру виливка, а також усувається або істотно подрібнюється дендритна структура, утоншуються ліквацийні включення і рівномірніше розподіляються за обсягом виливка неметалеві включення [48-50].

Використання берилію в якості захисту від окислення при переробці магнієвих сплавів високої чистоти відомо. В цьому випадку берилій використовується в цілях запобігання окислення магнію при транспортуванні і передачі на подальшу обробку. Фірма Brush Wellman Inc. виробляє і збуває, наприклад, високо магнієві окатиші, в яких присутність берилію становить 5% або менше. Подібні окатиші виробляють гарячим пресуванням тонкоподрібненого магнію і берилію. Присутність берилію в кінцевому

магнієвому продукті після подальшої обробки становить менше 0,01%. Наприклад, підвищення вмісту берилію на 5% в сплаві на магнієвої основі при одній і тій же щільності підвищує модуль пружності на 28%. Таким чином, в магнієвих сплавах можна досягти підвищення модуля, принаймні на 25%, при мінімальному підвищенні добавки берилію на 5%. У переважному варіанті сферичний берилієвий порошок, який переважно проводиться розпиленням рідкого берилію, змішується з порошковим магнієм у вигляді стружок або в іншій роздробленій формі. Сферичний берилій був отриманий розпиленням з використанням інертного газу. Цей метод добре відомий серед фахівців. Застосування розпорошеного берилію переважно при описаній обробці в напівтвердий стан, тому що сферична форма частинок покращує плинність при формоутворенні і гарантує менший поверхневий знос використовуваного обладнання.

Як було сказано вище, взаємодія атмосфери цеху з розплавленим магнієм може призвести не тільки до погіршення якості лиття, але і до аварійної ситуації. Тому з початку розробок технологій плавки магнію розроблялися і засоби його захисту.

До теперішнього часу використовується для захисту від загоряння магнію і його сплавів флюси на основі $MgCl_2$, Cl і F . Але їх використання призвело до хлоридних включень в литві. Тому почалися розробки та перевірки інших складів і методів.

Наступним кроком було використання хлоридів лужноземельних металів, таких як $BaCl_2$. Ця речовина була пористою і не забезпечила оптимальне рішення поставленого завдання.

Далі були розроблені флюси на базі MgO і MgF_2 . Вони створили в'язкий, щільний, захисний шар на поверхні розплаву і виключили недоліки попередніх дослідів. Однак для достатнього захисту потрібно від 20% до 50% флюсу від ваги сплаву, який захищається. Цей метод приносив величезні економічні збитки. Тому розроблялися флюси на основі хлористих і фтористих солей металів і деяких оксидів [51-61].

В даний час флюси часто використовуються, особливо в нашій країні. Тому до них висувають такі вимоги:

- 1) захист шихти від окислення і запалення, а також від зменшення вмісту легуючих компонентів у сплаві;
- 2) рафінування розплаву від неметалевих домішок (оксидів, нітридів та ін.), які присутні в зваженому стані в розплаві;
- 3) відділення розплавленого металу (і сплаву) від сольової фази і шлаків;
- 4) отримання сплаву заданого хімічного складу в результаті видалення з розплаву шкідливих домішок (наприклад, лужних металів натрію і калію) і в результаті посилення переходу в розплав легуючих елементів - цирконію, ітрію, неодиму, церію та ін. [62].

Кращими захисними властивостями володіють флюси, що мають в своєму складі хоча б невеликі кількості хлористого магнію, який частково розкладається вже при 400°C - флюс ВІ2. Флюси, що не містять хлористий магній, задовільно захищають розплав при температурі понад 700°C .

Однак флюси мають характерні недоліки. Флюс ВІ2 є високо гігроскопічним. Це призводить до підвищення загазованості і утворює додаткові мікрорихлоти. Також порівняно невелика в'язкість і щільність сильно ускладнює відділення флюсу від металу. Виробництво спеціальних магнієвих сплавів за даною технологією неможливо через взаємодію легуючих компонентів з складовими флюсів. Флюси практично неможливо повністю прибрати з розплаву, тому їх включення утворюють в виливках додаткові дефекти. Це різко знижує їх корозійну стійкість і зменшує надійність виливків. Внаслідок виробу, виконані за такою технологією, не можуть бути впроваджені в аерокосмічну галузь і їх використання обмежене [63].

З усього вищесказаного можна зробити висновки, що застосування флюсів - це пройдений етап розвитку технології захисту магнієвих сплавів.

В даний час найбільш передовим методом захисту магнієвих сплавів є безфлюсова плавка під шаром захисних газів. Ця технологія дозволяє усунути

більшість вище перелічених негативних факторів флюсового захисту. Застосування безфлюсової плавки призведе до:

- підвищення корозійної стійкості деталі в два і більше разів;
- підвищення довговічності деталі за рахунок усунення змісту іонів хлору, і, як наслідок, міжкристалічної корозії;
- скорочення донного осаду на 30%;
- зниження безповоротних втрат сплаву на 5%;
- підвищення продуктивності плавки на (10-15)%;
- зниження собівартості плавки на (10-15)%, в тому числі по витраті електроенергії;
- скорочення шкідливих викидів газів в 20 разів – різке поліпшення санітарно-гігієнічних умов.

Нова технологія безфлюсової плавки магнієвих сплавів заснована на застосуванні газового захисту, яка дозволяє ізолювати метал від контакту з повітрям краще, ніж флюсове покриття. Газове середовище здатне виконувати свою захисну функцію в тому випадку, якщо воно, хімічно взаємодіючи з рідким магнієвим сплавом, утворює тонку щільну плівку [64-70].

Газове середовище повинно затримувати випаровування під час плавки парів магнію і запобігати подальшій взаємодії газового середовища з магнієвим розплавом після утворення плівки. Для цих цілей використовується атмосфера, що складається з безперервної подачі на дзеркало сплаву суміші активного та інертного газів. В якості активних газів використовуються SF_6 , (Тетрафторметан) CF_4 , SO_2 , (Дихлордифторметан) CCl_2F_2 , (Трифторид бору) BF_3 , в якості розріджувачів - Ar , N_2 , CO_2 , повітря. Причому, оптимальний склад захисного газового середовища для різних марок магнієвих сплавів різний.

Для сплавів системи Mg-Al-Zn (МЛ_5 ; $\text{МЛ}_{5\text{пч}}$; МЛ_3 ; МЛ_4 ; МЛ_6) використовуються суміші, що складаються з N_2 - CO_2 ; Ar - CO_2 ; N_2 - SO_2 ; осушене повітря- SO_2 ; CO_2 SO_2 ; N_2 - SF_6 ; Ar - SF_6 ; SF_6 - осушене повітря. Постійна подача газу збільшує товщину захисної плівки, на якій створюється великий перепад температур. При цьому починають рости температурні напруги в усьому шарі.

Внаслідок в пливці з'являються тріщини (рихлоти), через які з боку рідкого металу проходять пари магнію, а всередину дифундує кисень.

На жаль, на ливарних виробництвах України безфлюсова плавка магнієвих сплавів не використовується. В Європі практично всі відповідальні деталі з магнієвих сплавів для аерокосмічного комплексу, електроінструменту, радіоелектронних пристроїв використовують безфлюсову плавку [71-79].

Найбільш перспективним захисним складом газів є осушене повітря з активним газом. Але потрібно обмеження вмісту кисню. Це викликано тим, що при малих вмістах кисню до 4% загоряння магнію повільне, при температурі 550 - 750°C з періодичним займанням і загасанням.

1.4. Лиття під тиском магнієвих сплавів

Лиття під тиском дозволяє одержувати складні виливки з товщиною стінки до 0,8 мм, які не потребують механічної обробки або можуть бути використані при мінімальній обробці. При додатку до металу тиску підвищується його рідкоплинність, що дозволяє йому повністю заповнити всі складні вигини форми. При зниженні обсягів механічної обробки економиться метал, який іде в стружку [80].

Наприклад, при литті в піщані форми охолодження металу відбувається повільно, внаслідок чого виливок виходить крупнозернистої будови. При литті під тиском виливок охолоджується дуже швидко, структура виходить дрібнозернистою, механічні властивості вищі. Нормальна товщина стінок виливків, які одержують литтям під тиском, становить 2-4 мм.

Лиття під тиском - високопродуктивний процес, що дозволяє отримувати як тонкі виливки, так і різностінні. При порівнянні з литтям в піщані форми виявляється, що при литті під тиском зменшується як трудомісткість виготовлення виливків, так і трудомісткість їх обробки. Слід також врахувати, що при зниженні обсягу механічної обробки знижується кількість необхідних пристосувань, інструментів і т. п.

Величезна перевага лиття під тиском полягає в тому, що воно дозволяє одержувати виливки високої точності. Лиття під тиском забезпечує 5, а іноді і 4, 3 класи точності, при цьому лиття за моделями, що виплавляються, - лише 7 клас точності, а в піщані форми нижче 9 класу точності.

Якість виливків залежить від ряду технологічних і конструктивних чинників, наприклад, вибору сплаву, конструкції виливка, ливникової і вентиляційної систем, форми, стабільності температури сплаву і форми, вакуумування форми для попередження утворення пористості і т. п.

Друга величезна перевага лиття під тиском - це значно менша трудомісткість виготовлення виливків. У масовому виробництві виливки виходять швидше і вартість їх знижується. Відносно продуктивності лиття під тиском не має собі рівних серед усіх існуючих способів лиття.

Область застосування методу лиття під тиском обмежується наступними обставинами: по-перше, машини для лиття під тиском, що застосовуються в сучасному виробництві, придатні лише для отримання виливків дуже обмежених розмірів і в більшості своїй тільки зі сплавів, що мають температуру плавлення до 800°C; по-друге, наявність пористості у виливках робить їх менш надійними в експлуатації і не дозволяє підвищувати їх механічні властивості шляхом термічної обробки та, по-третє, через високу вартість форми лиття під тиском економічно себе виправдовує лише при литті порівняно великих партій виливків: від декількох сотень при нескладних нормалізованих формах до кількох тисяч при литті в складні форми. Також однією з проблем лиття під тиском є складним, а іноді і зовсім неможливим виготовлення виливків деталей з порожнинами, які мають внутрішні отвори, або деталей без ливарних ухилів по внутрішніх стінках [81-85].

Завдяки компактності обладнання в кілька разів краще використовується виробнича площа. По конфігурації і розмірам одержувані виливки максимально наближаються до розмірів і конфігурації готових деталей, при цьому можна отримати внутрішню і зовнішню різьбу. Машина лиття під тиском забезпечує високу продуктивність праці, до 200 - 600 виливків на годину, при високій

продуктивності це забезпечує низьку собівартість. Поряд з цим є ряд недоліків при литті під тиском:

- висока вартість обладнання і оснастки;
- обмеження по масі і габаритах виливків;

Методом ЛПТ відливаються такі складні виливки як: радіатори-конвектори, корпуси насосів, корпус картера та інше [86].

1.5. Обладнання для лиття магнієвих сплавів

Обладнання для лиття під тиском магнієвих сплавів проводиться, в основному на машинах з гарячою камерою пресування. Цей метод є найбільш прогресивним способом масового виробництва виливків. Виключно швидкоплинний процес великої потужності і динаміки:

- тиск пресування рідкого сплаву до 600 МПа;
- швидкість прес - поршня, до 12,0 м / с;
- прискорення прес-поршня, до 1200 м / с²;
- безударне пресування рідкого сплаву, який виключає гідравлічний удар в формі;
- потужність вприскування для машини ЛПД 400 тс замикання, до 3000 кВт;
- пропорційна гідроапаратура.

Для здійснення такого процесу необхідно мати спеціалізований комплекс лиття під тиском. Склад комплексу:

- машина лиття під тиском з ненаголошених вузлом пресування;
- плавильний і роздавальний агрегат;
- установки термостатування форми;
- засоби автоматизації нанесення захисних покриттів на робочу поверхню прес - форми.

Система управління технологічним процесом із засобами контролю статичних і динамічних параметрів. В особливу категорію входить плавильний і роздавальний агрегат.

Плавильно-роздавальне обладнання для комплексів магнієвого лиття є особливо складним і відповідальним обладнанням.

Для лиття під тиском магнієвих сплавів використовують машини двох видів:

- машини лиття під тиском з холодною камерою пресування;
- машини лиття під тиском з гарячою камерою пресування.

Машини лиття під тиском з холодною камерою пресування використовуються з ковшовим ручним заливанням розплаву в камеру пресування і з заливанням від насосу подачі рідкого розплаву по металопроводу.

У машині лиття під тиском з гарячою камерою пресування використовують замкнуту герметичну подачу сплаву. У цьому варіанті прес-камера знаходиться всередині рідкого розплаву роздавальної печі. Кожен з варіантів має свої переваги і свої недоліки.

Машина ЛПТ з холодною камерою мають значно більш високі характеристики по тиску підпресування, що дозволяє отримати більш точний відбиток і щільність вилівка. Разом з тим, контакт з атмосферою повітря цеху при заливці розплаву в холодну камеру пресування для магнію знижує якість вилівка по чистоті сплаву (оксидні плівки і газова пористість). В Україні навіть на провідних виробництвах немає машин лиття під тиском з гарячою камерою пресування [82]. Лиття під тиском магнієвих сплавів, з безфлюсовим варіантом захисту, в основному реалізується на базі машин ЛПТ з гарячою камерою пресування. Для реалізації безпечної експлуатації до плавильно-роздавального обладнання пред'являються жорсткі вимоги пожежної безпеки - плавильна і роздавальна печі зв'язуються в єдиний комплекс (див. рис.1.2. та 1.3.)

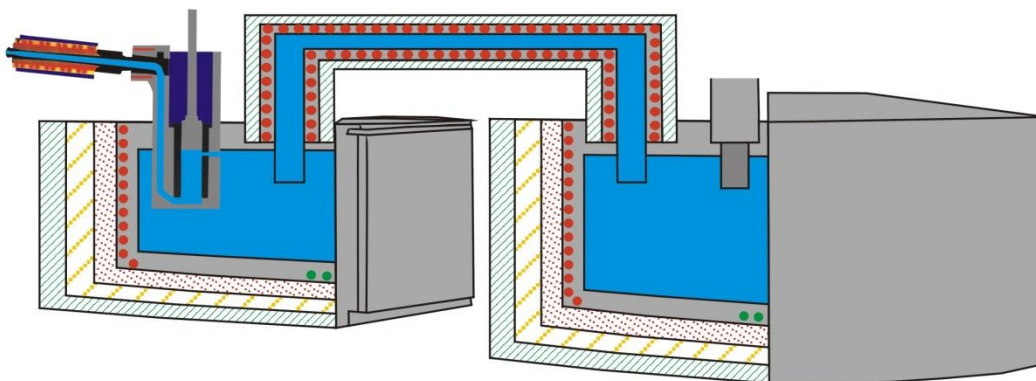


Рис. 1.2 Схема плавильно-роздавального комплексу



Рис. 1.3 Фото комплексу

Провідними фірмами-виробниками обладнання лиття під тиском магнієвих сплавів, які забезпечують всі вимоги пожежної безпеки і якість рідкого сплаву - це фірма Frech (Німеччина) і фірма Buller (Швейцарія) та ін.

Академія ОттоЮнкер виробляє комбіновані плавильні та роздавальні печі на базі тигельних індукційних печей. Тиглі з оптимальними співвідношеннями висоти і діаметра дозволяють оптимізувати витрати активних захисних газів і енергоспоживання [87].

Фірма Rauch (Австрія) проводить удосконалення заливально-дозуючих пристроїв для магнієвих сплавів. Використовується в якості плавильних печей з автоматичною подачею сплаву в роздавальні печі спільно з машинами лиття під тиском з холодною камерою пресування. У дозаторі використовується шнековий насос, який розміщений в камері поза зоною рідкого металу. Залежно від розташування роздавальної печі з гарячою камерою пресування, заливально-дозуючий пристрій може регулюватися по висоті. Устаткування комплектується транспортером подачі в піч підігрітої шихти і електронною системою управління на базі контролера Siemens з групою мікропроцесорів і засобами контролю. Система управління забезпечує задані режими дозування з безфлюсовим захистом від загоряння [88].

1.6. Особливості системи управління процесом плавки магнієвих сплавів

Для виявлення різних особливостей систем управління безфлюсового захисту магнієвих сплавів розглянуті відомі в світовій практиці прості, середні і складні системи.

Представлені системи:

- 1) Система плавильної печі РБПМ-0.3 (Росія);
- 2) Система дозування і контролю захисної суміші візуально по ротаметру фірми Frech FM1 (Німеччина);
- 3) Система CPMGH 700 з комп'ютерним управлінням витрат захисного газу. З режимами «середній», «стандарт» і «сильний», з контролем температури, витрати і тиску (Польща-Норвегія);
- 4) Система дозування на основі газозмішувачів фірми Witt, KM-20-2, RM-20-3, засобів Siemens, датчиків контролю газів, температур, витрат, аварійних ситуацій і їх усунення, і резервних контурів (Україна).

Характеристики систем приведено в таблицях 1.1 – 1.4.

Таблиця 1.1

Характеристика системи управління безфлюсового захисту магнієвих сплавів РБПМ-0.3

Характеристика	Система РБПМ-0.3
Склад обладнання	Піч плавильна РБПМ-0.3; піч роздавальна (входить до складу машини ЛПТ)
Склад системи: 1) Використаний захисний газ	1-2% елегазу SF_6 , решта осушений вуглекислий газ CO_2
2) Склад системи змішування	Рампа з балонами CO_2 та SF_6 ; запірна арматура; ротаметри; редукційні клапани; термопари; електричні прилади; вологовідділювачі;

Таблиця 1.2

Характеристика системи управління безфлюсового захисту магнієвих сплавів Frech FM1

Характеристика	Frech FM1
Склад обладнання	Піч плавильна з конвеєром для підігріву чушок і завантаження їх в плавильну піч; піч роздавальна.
Склад системи: 1) Використаний захисний газ	40% CO_2 та 60% осушений N_2
2) Склад системи змішування	Рампа з балонами CO_2 и N_2 ; ротаметри; рампа з газами для модифікування та рафінування локальні регулятори температури; осушувач; вимірювальні прилади; термопари; датчики параметрів

Таблиця 1.3

Характеристика системи управління безфлюсового захисту магнієвих сплавів CPMGH 700

Характеристика	CPMGH 700
Склад обладнання	Піч плавильна і роздавальна пов'язані між собою, що обігрівается трубою переливу гарячого металу
Склад системи: 1) Використаний захисний газ	1,5-2% SO ₂ , інше осушене повітря
2) Склад системи змішування	Рампа з балонами SO ₂ ; пропорційна пневматика; керуючий ПК Siemens; світлова та звукова сигналізація аварії; осушувач; термопари; рампа з газами для модифікування та рафінування.

Таблиця 1.4

Характеристика системи управління безфлюсового захисту магнієвих сплавів Witt, КМ-20-2, КМ-20-3

Характеристика	Witt, КМ-20-2, КМ-20-3
Склад обладнання	Двокамерна плавильно-роздавальна піч обладнана автоматичними засобами завантаження підігрітих чушок
Склад системи: 1) Використаний захисний газ	1,5-2% SO ₂ та осушений азот N ₂ . Кріогенна установка (осушення до точки роси -70°C)
2) Склад системи змішування	Рампа з балонами SO ₂ и N ₂ ; Газові змішувачі КМ-20-2, КМ-20-3; рампа з газами для модифікування та рафінування; термопари; осушувач; шафа управління на базі засобів Siemens; повний контроль параметрів; автоматичне гасіння загоряння сплаву

Аналіз реальних варіантів існуючих технологічних процесів, розглянутих вище не дозволив запропонувати оптимальний варіант системи.

Це говорить про те, що вдосконалення системи безфлюсової плавки і заливки має економічно обґрунтовані і виправдані завдання вкладення коштів на НДР і ДКР, а саме – підвищення корозійної стійкості виливків і зниження трудовитрат на ліквідацію усувного браку [89].

1.7. Дефекти виливків з магнієвих сплавів при литті під тиском

Освоєння лиття тонкостінних великогабаритних виробів, збільшення темпу роботи машин і інші обставини створюють нові проблеми якості виливків. Не зупиняючись на загальних дефектах, властивих всім литим під тиском деталям, наведемо перелік характерних дефектів магнієвих виливків: гарячі тріщини, холодні тріщини, підскоринкова пористість (шаруваті розташування газоповітряних включень), непропресовка (пухкі ділянки), світлі плями (лікваційні зони), неметалеві включення (флюс, оксид магнію), механічні пошкодження (проколи, відрив ливника), нестабільність розмірів і геометрії.

Нижче розглянуті природа, причини утворення та заходи попередження зазначених дефектів.

Гарячі тріщини. Цей вид браку є найбільш поширеним і досить важко усувати для магнієвих деталей, виготовлених при литті під тиском. Висока швидкість охолодження і невіддатливість прес-форми створюють підвищену схильність виливків до утворення гарячих тріщин. Гарячі тріщини зазвичай вражають місця сполучення протяжних стінок ребрами жорсткості і бобишками, а також з виступаючими елементами деталі - лапками, вушками, фланцями. Вельми часто вони утворюються на поверхні біля теплових вузлів. У багатьох випадках гарячі тріщини мають вигляд тонкої звивистої лінії погано помітної на литій поверхні неозброєним оком. Після антикорозійної обробки тріщини виділяються темним забарвленням і видні більш чітко. У ряді випадків тріщини розкриваються після нанесення лакофарбових покриттів. Це

пояснюється тим, що мікроскопічні тріщини, що зародилися при затвердінні, розвиваються в довжину і ширину при нагрівах або при витримці при кімнатній температурі, коли в деталі відбувається перерозподіл залишкових ливарних напруг [90].

Методи попередження гарячих тріщин в магнієвих виливках, виготовлених при литті під тиском, можна розділити на металургійні, конструкторські та технологічні. До металургійних методів належать очищення сплавів від оксидів і зміна складу сплавів. При литті магнієвих сплавів під тиском помічено, що тріщини завжди вражають ділянки виливків, які засмічені оксидами і забрудненнями. Якісне рафінування сплаву перед розливанням і зменшення окислення його в процесі лиття сприяє зменшенню браку по тріщинах. Зміна складу сплаву в межах, що допускаються ГОСТом, слід проводити шляхом збільшення вмісту елементів, що підвищують кількість евтектики в сплаві. Багато дослідників прагнуть знизити гарячеламкість стандартних сплавів введенням спеціальних добавок. Можливості пошуку ефективних добавок, далеко ще не вичерпані. До конструкторських заходів слід віднести ретельне опрацювання креслення деталі при проектуванні виливка. Особливу увагу слід приділити радіусам заокруглень, які повинні бути по можливості великими (8-12 мм). Обов'язкове дотримання плавних переходів від одного перерізу до другого. Дуже ефективно правильне розташування і достатній обсяг промивників. Останні повинні забезпечувати повне видалення забрудненого і окисленого металу. Технологічними заходами служать температурні режими лиття, а також тиск на метал. Вплив температур форми і заливання показує, що основним засобом попередження гарячих тріщин служить підвищення температури прес-форми [91].

При литті під тиском, тиск на метал в камері пресування, що передається до виливка в період затвердіння металу, багато в чому визначає тріщиностійкість сплаву. Максимальний тиск діє в момент закінчення запресовування, тому збільшення тиску пресування має знижувати число гарячих тріщин у виливках. Для магнієвих сплавів, що мають підвищену

схильність до утворення гарячих тріщин, потрібні, отже, більш високий тиск, ніж для алюмінієвих сплавів [92].

Практика лиття під тиском підтверджує це: використання більш потужних ливарних машин дозволяє різко скоротити брак магнієвих виливків з гарячих тріщин. Вельми корисним для попередження гарячих тріщин є мультиплікування тиску після заповнення форми для підпресування, локальне підпресування. При проектуванні ливарного процесу з використанням машин невеликої потужності необхідно прийняти всі технологічні заходи, щоб забезпечити якісне підпресування всього виливка.

Гарячі тріщини вражають, як правило, непропресовані місця виливків і ділянки, де зосередилися рихлоти. Тому при призначенні ливникової системи та встановленні промивників важливо передбачити правильність заповнення, видалення забрудненого і окисленого металу в промивник і можливість застосування тиску підпресування до всіх ділянок виливка до повного затвердіння металу [93].

Холодні тріщини. Причиною утворення холодних тріщин є перекіс виливка при зніманні з прес-форми і невідповідність хімічного складу сплаву оптимальному. Отже, попередження холодних тріщин необхідно починати вже на стадії проектування прес-форми. Виштовхувачі повинні бути розташовані рівномірно по всьому контуру виливка, щоб забезпечити знімання виливка без перекосів; в місцях оголення форми - навколо стрижнів і виступів форми необхідно встановлювати додаткові виштовхувачі. Плоскі великогабаритні виливки для попередження холодних тріщин краще знімати за допомогою рамки або плити. Блискучі ділянки на поверхні виливка або ливника, подряпини свідчать про те, що виливок при зніманні відчуває небажані навантаження, що руйнують цілісність окремих вузлів [94]

У деяких випадках прагнучи поліпшити рідкоплинність сплаву МЛ5 і попередити утворення гарячих тріщин, вміст алюмінію доводять до 10,0%. У такому випадку ймовірність появи холодних тріщин зростає, так як в структурі виливка утворюються надмірна кількість крихкої фази, крім того підвищується

небезпека поломки такої деталі при випробуваннях або експлуатації. Невиправдано високий вміст алюмінію в сплаві може бути викликано також засміченням магнієвої шихти відходами силуминів (прес-залишками, ливниками) [95].

Підкіркова пористість. На відміну від пористості в алюмінієвих і цинкових виливках у виливках з магнієвих сплавів утворюється підкоркова шарувата пористість, яка заповнена воднем. Розвиток її може бути настільки значним, що в деяких випадках при розрізанні виливка може статися відділення кірки. Якщо шарувата пористість при обробці виливків без розкриття, то вона практично не погіршує механічні та службові властивості виливків.

Непропресовка. Цей дефект має вигляд білих матових ділянок на поверхні і вражає переважно виливки з протяжними плоскими стінками. Такі ділянки є зосередженням рихлоти, яка утворюється в місці зустрічі охолоджених крайніх зон паралельних потоків або в тупикових місцях. З огляду на передчасне затвердіння пухкі ділянки вже не ущільнюються в період підпресування. Основні заходи попередження полягають у підвищенні температури форми, раціональному розміщенні живильників і промивників [92].

Світлі смуги і плями. У виливках, що мають плоскі стінки значної протяжності, спостерігається явище зворотної ліквації, що приймає вид світлих смуг на поверхні виливки. Дослідження, виконане автором спільно з А. Е. Гаєвським і А. К. Шіпіаіной, показало, що лікватом є збагачена евтектикою складова. Про це свідчить як мікроструктура лікваційної смуги в поперечному перерізі, так і зіставлення мікротвердості смуги і основного поля тіла деталі [96].

Походження лікваційних смуг пояснюється наступним чином. Зовнішня скоринка виливка, що затверділа раніше серцевини, починає свою усадку в той час, як в центрі виливка є ще рідка фаза, яка завдяки тиску газових бульбашок вичавлюється в усадкові розриви зовнішньої скоринки. Збагачення ліквату евтектичною складовою обумовлено підвищеною кількістю евтектики, що

утворюється при кристалізації через нерівноважні умови затвердіння. Заходи попередження можуть полягати в переробці ливникової системи з бічної на центральну, установці технологічних ребер в місцях утворення дефекту, підвищенні температури форми і зниженні температури заливання [97].

Неметалеві включення. Флюсові включення, що заносяться з виливків разом з металом, є нарівні з гарячими тріщинами одним з основних видів браку магнієвих деталей при литті під тиском. Заходи попередження зводяться до ретельної промивки деталей в гарячій воді і лужних розчинах, застосування чайникових заливальних ковшів і усунення флюсу з роздавальної печі, з заміною на захисну середу [98].

Механічні пошкодження. Ушкодження у вигляді проколу деталі виштовхувачами або відриву ливника (при центральній ливниковій системі) відбуваються через завищений темп роботи або місцевий перегрів прес-форми, а, отже, і неповне затвердіння вилівка на цій ділянці. Необхідно передбачати охолодження виступаючих стрижнів, і в першу чергу, стрижня-розсікача [52].

Нестабільність розмірів і геометрії. Причина явища - виникнення нерівноважених залишкових ливарних напруг в деталях. До заходів попередження відноситься забезпечення рівномірного розподілу і достатньої температури по робочій поверхні прес-форми, а також відпал і терморихтування виливків [99].

1.8. Фактори керування технологічним процесом

Складний процес управління технологіями плавки і запресовування сплаву вимагають особливої уваги і дослідження. До переліку основних чинників, що забезпечують якість сплаву в процесі лиття входять:

- температура сплаву;
- поверхневий натяг, як узагальнений фактор відповідності сплаву вимогам техпроцесу;

- інертний газ - повітря зі зниженим вмістом кисню забезпечується регуляторами з заданим станом за якістю осушення і фільтрації в централізованому ресивері;

- активні гази SO_2 і SF_6 , як основні елементи, що забезпечують захист магнієвого сплаву від загоряння. Ці гази поряд із захистом від загоряння є основними джерелами забруднення сплаву неметалевими включеннями. Необхідно провести дослідження з метою оптимізації витрат газів для підвищення якості сплаву зі збереженням захисту.

Перші два чинники є інерційними і не можуть при відхиленні швидко входити в область визначення техпроцесу.

Система управління, вузла пресування як елемента адаптивної системи має забезпечувати постійне регулювання часу кристалізації як функцію температури сплаву і форми. Така безінерційна система дозволить виключити вплив усадки на утворення тріщини в виливках.

З метою підвищення надійності та якості технологічного процесу необхідно використовувати постійно в кожному циклі автоматичне підналагодження зусилля замикання по відхиленню від заданої температури розміру форми. При зниженні температури форми в робочому діапазоні певний розмір форми знижується і як наслідок - знижується зусилля замикання. Це небезпечно як для якості виливка від підпресування, так і по техніці пожежної безпеки.

Незважаючи на велику кількість наукових робіт з удосконалення технології плавки і лиття під тиском магнієвих сплавів, цей науковий напрям має досить проблемних питань прикладної науки.

Комплексний технологічний процес лиття під тиском розглядається по двом фізичним складовим - плавка і виробництво (в основному на машинах з гарячою камерою пресування).

Наявність існуючих проблем обумовлені складністю і багатогранністю технології. Аналіз наукових досягнень в області розуміння фізичних і хімічних

процесів загоряння магнієвих сплавів дозволив сформулювати основні завдання дослідження.

Магнієві сплави в рідкому стані при існуючому процесі безфлюсового газового захисту мають ряд недоліків. Використовувані, як кращий варіант захисних газів осушене повітря з активними газами SO_2 і SF_6 проходить стадії фізичного взаємодії з магнієм в результаті якого утворюється на поверхні розплаву тонка еластична і герметична плівка. Вона не пропускає кисень всередину сплаву і пари магнію в атмосферу пічного простору. Режим постійної подачі суміші газів підвищує товщину плівки, що збільшує її жорсткість і термічні напружки, які руйнують поверхневий шар. Внаслідок сплав забруднюється неметалічними включеннями – це знижує ливарні властивості.

Потрібно вийти з режиму постійної подачі захисної суміші газу і перейти на імпульсну динамічну систему, що забезпечує оптимізацію об'ємного уприскування газової суміші і часу такту «ресурсу» захисного стану плівки.

Для роботи такої системи необхідно експериментально отримати математичну модель управління, як функцію від температури і поверхневого натягу сплаву інерційних факторів і складових газової суміші – безінерційних факторів. Як узагальненого відгуку використовувати час такту без займання.

Створення такої системи дозволить різко підвищити якість сплаву, знизити в рази використання активних газів і як наслідок створити реальну можливість широкого використання магнієвих сплавів у всіх галузях народного господарства.

У зв'язку з тим, що математична модель управління процесу захисту магнієвих сплавів від загоряння повинна працювати в умовах динамічного постійного коливання інерційних факторів, необхідно здійснити коригування та перерахунок. Такий перерахунок і коректування проводиться кожен такт роботи. Подібний клас системи відноситься до рівня адаптивних систем. Прийнятий в якості основного фактора поверхневий натяг є в свою чергу узагальненим фактором характеристик технологічного процесу. В даний час відсутні пристрої автоматичного визначення значень поверхневого натягу в

кожному такті циклу роботи адаптивної системи. Тому в рамках цієї роботи прийнято рішення про створення на базі лабораторної, відомої системи вимірювання поверхневого натягу, автоматичної установки, що працює в складі адаптивної системи діючого виробництва, схематично це представлено у Додатку Ж1 та Ж2. Вимірювання проводяться в закритих печах плавки і роздачі на межі рідкого сплаву і робочої атмосфери печей. Система управління вимірювальною установкою повинна бути повністю автоматичною і входити в загальну систему комплексу лиття під тиском [100-102].

Для виконання комплексу досліджень лиття під тиском на базі серійної машини 400 тс замикання з гарячою камерою пресування потрібно створити стенд, обладнаний експериментальними пристроями, вимірювальними засобами контролю параметрів. Всі контрольовані властивості магнієвих сплавів схематично представлені у Додатку Е. Передбачена комплектність:

- машина лиття під тиском;
- піч плавильна;
- піч внутрішня розливна;
- пристрій термостатування форми;
- засоби очищення й змащення форми;
- пристрої для автоматичного вимірювання поверхневого натягу;
- система вакуумування форми і печей;
- пристрій для підігріву чушок;
- адаптивна система управління подачі захисних газових сумішей в печі від загоряння;
- система автоматичного регулювання часу кристалізації як функція залежності від температури сплаву і форми;
- система автоматичного регулювання зусилля замикання форми;
- ненаголошений вузол пресування з регуляторами запресування і підпресування;
- загальна система управління і реєстрації параметрів стенду на базі системи Siemens.

1.9. Висновки до розділу 1

1. Проведений аналіз літературних даних показав, що практично всі методи захисту магнієвих сплавів від загоряння мають ряд недоліків. При цьому, як правило, використовуються шкідливі флюси або у великій кількості небезпечні гази, витрату яких потрібно скоротити.

2. На сьогодні до кінця не встановлені механізми і закономірності загоряння магнієвих сплавів. Не розроблено математичні моделі для контролю цим процесом.

3. На підставі результатів проведеного аналізу сформульована мета і поставлені завдання досліджень.

Таким чином, з метою створення нових технологічних процесів одержання складних тонкостінних виливків з магнієвих сплавів з газовим захистом розплаву в плавильних та роздаткових агрегатах комплексу лиття під тиском необхідно було вирішити наступні задачі:

- розробити методики та устаткування для досліджень впливу складу захисної суміші на окиснюваність, механічні властивості, поверхневий натяг розплаву магнієвих сплавів безпосередньо у металоємних агрегатах з газовим захистом, визначити основні фактори впливу.

- встановити закономірності впливу безперервного газового захисту розплаву магнієвих сплавів на основі сірчистого ангідриду SO_2 , і співвідношення хлору Cl_2 та водню H_2 на корозійну стійкість виливків з магнієвого сплаву МЛ5 ГОСТ2856-79.

- встановити закономірності одержання магнієвих сплавів з використанням імпульсної подачі газової суміші для захисту магнієвого розплаву, провести аналітично-регресивний аналіз одержаних результатів.

- визначити вплив імпульсної дії газової захисної суміші розплаву на механічні властивості виливків з магнієвих сплавів.

- розробити вихідні данні для послідуочого створення автоматизованої системи контролю і регулювання, модернізувати плавильні та роздаткові агрегати для одержання високоякісних виливків з магнієвих сплавів.

- створити нові технологічні процеси виробництва складних тонкостінних виливів з магнієвих сплавів з газовим захистом розплаву в плавильних та роздаткових агрегатах комплексу лиття під тиском.

- доопрацювати обладнання і автоматизовані системи управління комплексу лиття під тиском магнієвих сплавів з безперервним та імпульсним процесом газового захисту розплаву та лиття магнієвих сплавів у вакуумовані прес-форми, а також розробити автоматизовані системи контролю та керування процесами та обладнанням.

- провести аналіз експлуатаційної надійності створених технологій, модернізованого обладнання та систем контролю та керування газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском радіаторів з магнієвих сплавів.

- провести дослідно-промислові перевірки створених технологічних процесів і обладнання для їх реалізації з використанням нової конструкції радіатору з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів.

- розробити техніко-економічне обґрунтування щодо організації виробництва радіаторів з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ, МАТЕРІАЛИ ТА ОБЛАДНАННЯ

2.1. Методика визначення поверхневого натягу магнієвого сплаву

Методи визначення поверхневого натягу металів різноманітні, але серед них найбільш поширені метод капілярного підняття, методи крапель і максимального тиску бульбашки газу [103-110].

За умов вивчення закономірностей фізико-хімічних характеристик розплаву у масштабному експерименті, які пов'язані з поведінкою рідкого металу у металоємному плавильному агрегаті був використаний саме метод максимального тиску бульбашки газу, який найчастіше застосовується для визначення чисельного значення поверхневого натягу розплавлених металів.

Суть методу полягає в тому, що в розплав через трубку невеликого діаметру (близько 2 мм) повільно подається газ; бульбашка газу, яка утворюється на кінці трубки (капіляра), в міру подачі газу збільшується, і кривизна бульбашки зменшується. Коли радіус бульбашки газу дещо перевищить радіус трубки, бульбашка відривається від кінчика капіляру.

Рівновага буде відповідати рівності діаметрів бульбашок газу і капіляра. Для збільшення обсягу бульбашки на малу величину dV , що достатня для його відриву, потрібно затратити роботу (2.1) $P \times dV$, де P - надлишок тиску над атмосферним. Ця робота витрачається на збільшення запасу енергії поверхні бульбашки в рідині, що дорівнює $\sigma \times dO$ где σ - поверхнева енергія, а O – поверхня. Таким чином

$$P \times dV = \sigma \times dO \quad (2.1)$$

Для випадку кулі (2.2)

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3; O = 4 \pi r^2; dV = 4 \pi r^2 \times dr; dO = 8 \pi r \times dr \quad (2.2)$$

відповідно, отримуємо формулу (2.3)

$$P \times 4\pi r^2 \times dr = \sigma \times 8\pi r \times dr \quad (2.3)$$

з цього випливає формула (2.4)

$$P_1 = \frac{2\sigma}{r} \quad (2.4)$$

Тиск (2.5), що необхідний для відриву бульбашки газу, буде залежати ще від гідростатичного тиску P_2 , що випробовується бульбашкою і відповідного питомій вазі випробуваної рідини d та глибиною занурення h :

$$P_1 = d \times g \times h \quad (2.5)$$

де g – прискорення сили тяжіння

Таким чином отримуємо формулу (2.6),

$$P_3 = P_1 + P_2 = \frac{2\sigma}{r} + d \times g \times h \quad (2.6)$$

Спостережуваний тиск P_3 в момент відриву бульбашки газу пов'язаний з питомою вагою манометричної рідини d_m і показанням висоти цієї рідини h_m в манометричній трубці, представлено у формулі (2.7):

$$P_2 = d_m \times g \times h_m \quad (2.7)$$

відповідно, отримуємо формулу (2.8)

$$d_m \times g \times h_m = \frac{2\sigma}{r} + d \times g \times h \quad (2.8)$$

Звідки (2.9)

$$\sigma = \frac{rg}{2} (d_m \times h_m - d \times h) \quad (2.9)$$

Для зручності обчислень висловимо останній множник як наведену висоту (2.10):

$$h_\sigma = \frac{h_m \times d_m}{d} - h \quad (2.10)$$

Тоді величина поверхневого натягу буде обчислюватися по формулі (2.11)

$$\sigma = \frac{rg}{2} \times d \times h_\sigma \quad (2.11)$$

Для реалізації даного методу був створений прилад, схема якого наведена на рис.2.1.

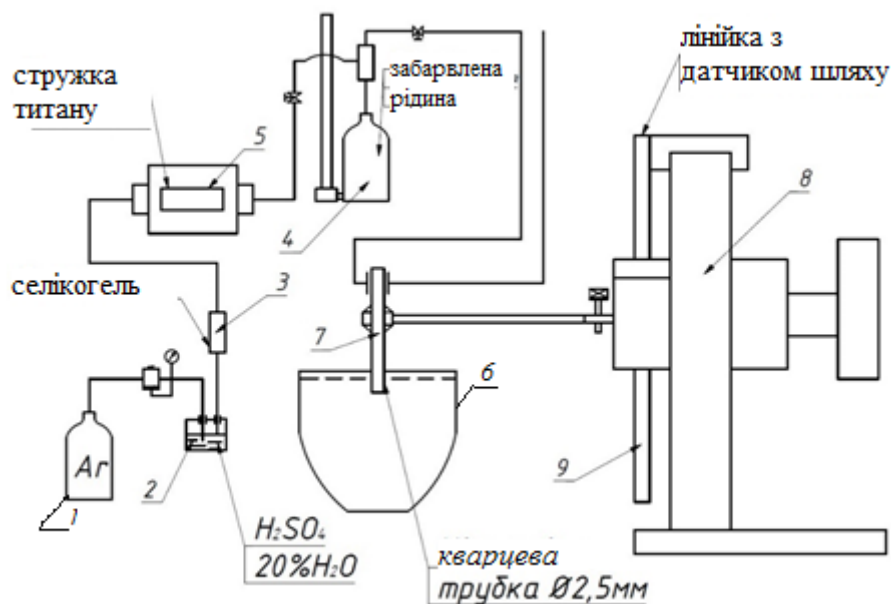


Рис. 2.1 Схема установки для вимірювання поверхневого натягу: 1 – балон з аргоном; 2 – склянка з сірчаною кислотою; 3 – скляний циліндр, наповнений селікогелем; 4 – склянка з підфарбованою манометричною рідиною; 5 – кварцова трубка, наповнена титановою стружкою; 6 – нагрівальна піч; 7 – кварцова трубка; 8 – станина приладу; 9 – лінійка з датчиком лінійного переміщення .

Визначення поверхневого натягу з використанням створеного приладу (рис.2.1) відбувається наступним чином.

Першочергово, газ (аргон) з балону через редуктор надходить в гумову трубку, звідки через склянку з сірчаною кислотою і скляний циліндр, наповнений селікогелем, потрапляє в склянку, що містить підфарбовану манометричну рідину. Звідси газ потрапляє через гумовий шланг в кварцову трубку, наповнену титановою стружкою. Трубка поміщена в піч, яка нагріває титан до $700-750^{\circ}\text{C}$, для того, щоб він цілком поглинав домішки кисню і вологу, що містяться в аргоні. Очищений газ потрапляє в капіляр, який занурено в розплавлений метал. У міру видування бульбашки аргону в розплавленому металі рівень рідини в манометричній трубці поступово зростає. Момент відриву бульбашки аргону добре фіксується візуально по різкому падінню тиску. При цьому відзначається найбільша висота рівня рідини, яка спостерігається перед

відривом газової бульбашки. Відлік висоти манометричної рідини може бути проведений з точністю до 0,05 см; зазвичай ця точність не перевищує 0,1 см. Для успішної роботи необхідно ретельно обробляти (полірувати) робочу поверхню капіляра, на якій відбувається формування бульбашки газу, а також прагнути до того, щоб капіляр був встановлений вертикально. Для відліку глибини занурення капіляра в розплав, яке проводиться за допомогою гвинта, крім лінійки з міліметровою шкалою, є індикатор, що дозволяє вимірювати глибину занурення з точністю до 0,01 мм. Отримане значення манометричного тиску в сантиметрах використовується при розрахунках як зазначено вище. Необхідні для обчислення поверхневого натягу рідких металів величини питомої ваги беруться за довідковими даними, а для сплавів обчислюються за правилом адитивності.

При роботі на цьому приладі отримано значення величини поверхневого натягу для води, ртуті, олова та ін., які сходились зі значеннями, добре відомими з літературних та довідкових даних. Тому можна вважати, що прийнятий метод і наш прилад є цілком придатними для вирішення поставленого завдання. Простота цього приладу може виявитися певною перевагою в разі використання його в заводських лабораторіях і в умовах виробництва для контролю рідкого металу.

Відповідно до наведеного аналізу впливу технологічних параметрів на поверхневий натяг розплаву магнієвих сплавів типу МЛ5 ГОСТ 2856-79, хімічний склад якого знаходився у межах (мас.%): алюмінію - 7,5-9,0; марганцю - 0,15-0,5; цинку - 0,2-0,8; домішок - до 0,5, залишок - магній, у металоємному плавильному агрегаті визначені основні перемінні параметри та інтервали їх варіювання, що наведені у табл.2.1

Таблиця 2.1

**Основні перемінні параметри та інтервали їх варіювання для
вивчення закономірностей зміни поверхневого натягу у магнієвих сплавах
типу МЛ5 в металосємному плавильному агрегаті**

Межі параметру	Параметри					
	Склад газової суміші		Вміст водню		Вміст хлору	
	Натуральна Z ₁ , л/хв SO ₂ + осушене повітря	Кодована, X ₁	Натуральна Z ₂ , 10 ⁻³ м ³ /кг	Кодована, X ₂	Натуральна Z ₃ , %	Кодована, X ₃
1	2	3	4	5	6	7
Верхній рівень	0,696+ 22,504	+1	13	+1	0,12	+1
Нижній рівень	0,116+ 23,084	-1	9	-1	0,04	-1
Основний (нульовий рівень)	0,348+ 22,852	0	11	0	0,08	0
Крок варіювання	0,116	-	1	-	0,04	-

Хімічний склад та межі варіювання хімічним складом експериментального сплаву типу МЛ5 наведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Хімічний склад МЛ5 ГОСТ 2856-79 (в мас. %)

Fe	Si	Mn	Ni	Al	Cu	Zr	Be	Mg	Zn	домішки
до 0.06	до 0.25	0.15 - 0.5	до 0.01	7.5 - 9	до 0.1	до 0.002	до 0.002	89.1 - 92.15	0.2 - 0.8	інші 0.1; всього 0.5

2.2. Експериментальний стенд лиття під тиском для дослідження впливу параметрів технологічного процесу одержання виливків з магнієвих сплавів з газовим захистом розплаву металу

Для дослідження і розробки технологічного процесу лиття магнієвих сплавів з газовим захистом рідкого металу шляхом вивчення характеристик поверхневого натягу рідкого сплаву, дослідження впливу та оптимізації складу захисної газової суміші на окиснюваність, механічні властивості магнієвих сплавів при їх одержанні в металоємних плавильних агрегатах був створений стенд на базі машини лиття під тиском з гарячою камерою пресування мод. CP MGH 400.

Машина CP MGH 400 відповідає європейським стандартам з безпеки у металургійній промисловості, а саме 98/37 EG і EN869 і спеціальним нормам щодо обладнання для лиття під тиском, яка має наступні основні технічні характеристики, а саме;

Зусилля замикання, тс	400
Хід поршня, мм	18,2
Зусилля штовхача, тс	200
Обсяг уприскування, дм ³	6,65
Потужність гідроприводу, кВт	37
Маса машини, т	16

Базова комплектація комплексу включає:

- машину мод. CP MGH 400
- систему дозування і контролю потоку металу, SO₂ і сухого повітря, а також SF₆ (протипожежна безпека) у 2-х камерній печі;
- піч для плавки з пристроєм попереднього прогріву чушок;
- роздавальну піч, яка вбудована в машину;
- цифровий контроль газового середовища, рівнем і температурою металу у печі;

- мультипроцесорне управління з візуалізацією на екрані панельного комп'ютера з послідуочим створенням документованого банку даних для кожного виливка, включаючи:

- графіки динамічних параметрів технологічного процесу лиття;
- розрахунок параметрів лиття;
- задані установки вузла пресування відповідно регулювальних карт та ін.

Технологічний процес з використанням наведеного комплексу обладнання реалізується у наступному порядку.

Першочергово потрібно виконати умови, щоб плавильна піч була герметична, щоб виключити підсмоктування повітря з атмосфери цеху. Водночас герметизований простір печі повинен знаходитися з незначним зниженням внутрішнього тиску, для того, щоб активні гази не потрапляли в атмосферу цеху. Також, швидкість перемішування рідкого металу повинна бути такою, щоб не відбувалось замішування оксидної плівки в рідкий метал, а використання SF_6 можливе при температурі, що не перевищуватиме 800°C , тому що при температурі вище 800°C відбувається термічний розклад SF_6 і втрачаються захисні його властивості.

Слід відзначити, що захисна плівка не повинна замішуватися технологічними діями, в плавильній печі при міксерному режимі та спокійній окисній плівці на 60 дм^2 площі дзеркала металу повинно витрачатися SO_2 - 5 л/г, SF_6 - 2 л/г. При цьому значення поверхневого натягу магнієвого сплаву МЛ5 при температурі 700°C повинно становити 520-525 дін/см.

Сухе повітря повинно мати вміст вологи до температури точки роси на виході з осушувача до -70°C і залишковий вміст вологи становитиме $0,0033 \text{ г/м}^3$.

Робочий режим захисного середовища на базі сірчистого ангідриду SO_2 , який змішувався з сухим повітрям, забезпечувався згідно зі схемою (рис. 2.2).

Система передбачає три контури захисного газу, які вводяться в магістраль до плавильної печі на дзеркало розплаву. Газ SO_2 з балону 1 через голчастий вентиль 2, електромагнітний клапан 3 і систему фільтрів 4 редукується

клапаном 5 до тиску близького до атмосферного, через ротаметр 6 і зворотний клапан 7 надходить у вузол змішування з потоком осушеного повітря. Останній проводиться в пристрої 8 очищення і осушення, шляхом зв'язування і видалення кисню і інших газів подається компресором 9, при цьому вміст пари в повітрі становить до 0,00007%. Частка залишкового кисню не перевищує 4%, залишки водню зв'язуються оксидом міді і залишок водню не перевищує 0,001%. Велика частина вологи конденсується і віддаляється в холодильному пристрої.

Залишки вологи видаляються адсорбером, після чого відбувається остаточне очищення від пилу. Очищене повітря надходить на вхід редукційного клапана 10 через калібровану діафрагму 11 і зворотний клапан 12 в точку змішування з SO_2 13. Контур шестифтористої сірки SF_6 , який використовується тільки в аварійному випадку загоряння магнію, вводиться в роботу тільки при загорянні сплаву в автоматичному циклі від світлового датчика загоряння. При цьому SF_6 з балона 14 через редуктор тиску 15, голчастий вентиль 16 надходить на електрокерований клапан 17, який в разі аварії включається автоматично, а такий же клапан 18 відключає суміш O_2 та SO_2 . При цьому чистий 100% елегаз SF_6 поступає на дзеркало сплаву та гасить місце займання [111-120].

Сутність процесу використання газової інертної атмосфери для захисту розплаву від контактів з повітрям визначається основними операціями та контролем.

Так, після вхідного контролю шихтових матеріалів і очищення тигля проводять:

- підігрів шихти до температури 200 °C;
- завантаження в тигель печі;
- підйом температури в печі до 300 - 350 °C;
- подача однієї з газових сумішей з витратою 0,1 - 0,15 л/хв;
- нагрів розплаву до 720 - 750 °C;

- модифікування одним з модифікаторів (природний магнезит) протягом 5-10 хв за кількістю 0,25 - 0,3% від маси розплаву або гексахлоретаном протягом 5 - 10 хв з кількістю 0,1 - 0,15% від маси розплаву.

- рафінування проводиться продувкою інертним газом, наприклад, аргоном при температурі 740 - 760 °С, протягом 5 хв з витратою 3 - 5 л/хв.

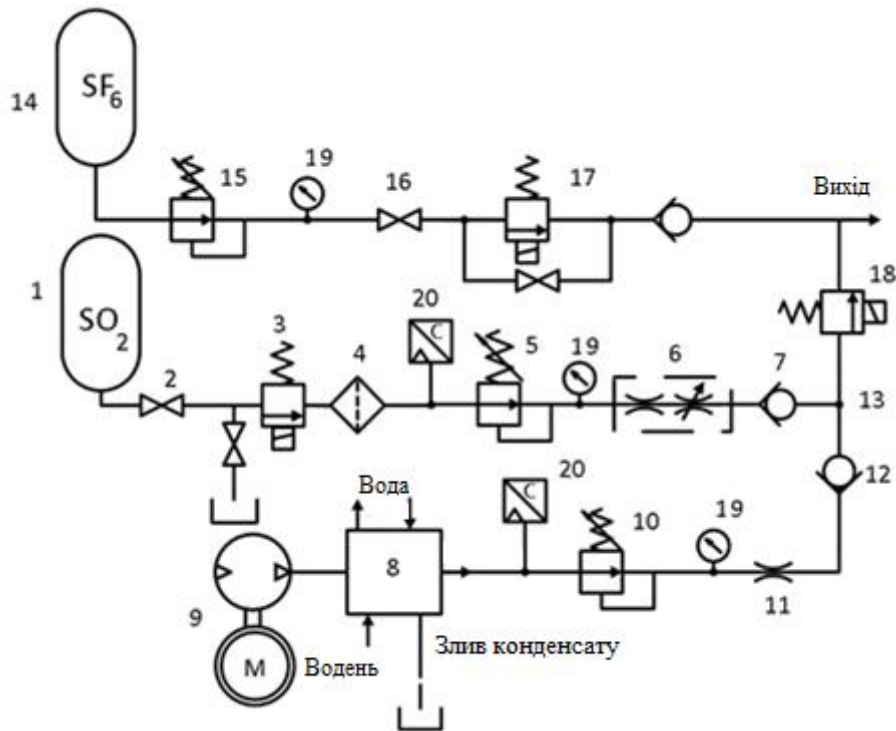


Рис. 2.2 Схема установки для безфлюсового захисту магнієвих сплавів:

1 – балон з сернистим газом; 2 – голчасті вентиля; 3 – електромагнітний клапан; 4 - система фільтрів; 5 - редуктор тиску; 6 - ротаметр; 7 - зворотний клапан; 8 - пристрій для осушення і очищення повітря; 9 - компресор; 10 - редукційний клапан; 11 - калібрована діафрагма; 12 - зворотний клапан; 13 - точка змішування повітря і сірчистого газу; 14 - балон з SF_6 ; 15 - редукційний клапан; 16 - голчастий вентиль; 17, 18 - електрокеровані клапани; 19 - манометр тиску; 20 - перетворювач тиску.

Сутність процесу використання газової інертної атмосфери для захисту розплаву від контактів з повітрям визначається основними операціями і контролем показників.

Так, після вхідного контролю шихтових матеріалів і очищення тигля проводять:

- підігрів шихти до температури 200 °С;
- завантаження в тигель печі;
- підйом температури в печі до 300 - 350 °С;
- подача однієї з газових сумішей з витратою 0,1 - 0,15 л/хв;
- нагрів розплаву до 720 - 750 °С;
- модифікування одним з модифікаторів (природний магнезит) протягом 5-10 хв за кількістю 0,25 - 0,3% від маси розплаву або гексахлоретаном протягом 5 - 10 хв з кількістю 0,1 - 0,15% від маси розплаву.

Після цього проводяться процедури механічного очищення поверхні сплаву через люк в центрі кришки печі і взяття необхідних проб (хімічний склад, загазованість, засміченість, механічні властивості металу і ін.).

Діапазон температури хімічної стійкості захисної плівки на базі SF_6 650 - 780 °С. При температурі вище 800 °С SF_6 починає розкладатися і втрачає свої захисні властивості. Хімічна інертність SF_6 практично охоплює робочий діапазон магнієвого сплаву за рахунок великої кількості неметалевих включень [111 – 115].

Зважаючи на наведене щодо якісних характеристик литих виробів та впливу на них перемінних параметрів плавлення металу в захисній газовій атмосфері визначені основні параметри та границі їх варіювання (табл. 2.1).

2.3. Методика визначення вагового показника корозії

Ваговий показник корозії - зміна ваги зразка в результаті корозії, віднесене до одиниці площі поверхні металу і до одиниці часу. Зміна ваги зразка визначається як різниця між вагою зразка до випробування і його вагою після випробування зі зняттям продуктів корозії (спад ваги металу) (2.12):

$$K_{\text{ваг}} = \frac{m_0 - m_1}{S_0 \cdot \tau} \quad (2.12)$$

де:

$K_{\text{ваг}}$ – ваговий показник корозії, г/м² год;

m_0 – початкова вага зразка, г;

m_1 – вага зразка після корозії після видалення продуктів корозії, г;

S_0 – поверхня зразка, м²;

τ – час корозії, год.

Глибинний показник корозії - зменшення товщини металу внаслідок корозії, виражене в лінійних одиницях і віднесена до одиниці часу. Цей показник дуже зручний при порівнянні різних металів з різними питомими вагами. Перехід від вагового показника корозії до глибинного показника може бути зроблений по формулі 2.13:

$$\Pi = \frac{K_{\text{ваг}} \cdot \omega}{\rho_{\text{ме}}} \quad (2.13)$$

де:

Π – глибинний показник корозії, мм/рік;

$K_{\text{ваг}}$ – ваговий показник корозії, г/м² год;

ω – коефіцієнт 8,76 розрахований з кількості годин на рік (8760), поділений на 1000;

$\rho_{\text{ме}}$ – густина металу, г/см³;

Результати розрахунків за формулами 2.12, 2.13 представлені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Результати розрахунків показників корозії

Показники корозійної стійкості	Безфлюсовий захист	Флюсовий захист BI2
$K_{\text{ваг}}$, г/м ² год	0,008	2,01
Π , мм/рік	0,04	10,3
Бали за шкалою корозійної стійкості	4	10

Тому важливо підтвердити методику розрахунку показників корозії серією натурних експериментів, де за контрольний сплав взято МЛ5, хімічний склад якого знаходиться в границях відповідно до табл.2.2 та перемінними для технології безфлюсового захисту магнієвого сплаву у плавильному агрегаті з границями варіювання, що наведені у таблиці 2.1.

Для визначення корозійної стійкості магнієвого сплаву типу МЛ5 при флюсовому його захисті використовувався флюс ВІ2.

Температурний інтервал витримки експериментального сплаву в тиглі плавильного агрегату в границях для обох серій експериментів повинен знаходитись в інтервалі 720-750⁰ С [116].

2.4. Методика управління параметрами лиття магнієвих сплавів під тиском

Модель техпроцесу в загальному випадку може бути задана функцією (2.14):

$$\begin{aligned} y &= b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m C_i Z_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m C_{ij} X_i Z_j = \\ &= b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^m (C_j + \sum_{i=1}^k C_{ij} X_i) Z_j \end{aligned} \quad (2.14)$$

де

y_i - узагальнений параметр якості вилівка (вихідний параметр техпроцесу)

x_i - вхідні параметри техпроцесу, інерційні, для зміни яких регулятору необхідно певний час (наприклад, хімічний склад, температури сплаву, форми і т.п.)

z_i - малоінерційні параметри техпроцесу, зміна яких забезпечується регулятором практично миттєво (наприклад, швидкість пресування, тиск підпресування, час кристалізації і т.п.)

$b_0, b_i, b_{ij}, C_i, C_{ij}$ - коефіцієнти моделі

$k \leq 10$ - кількість вхідних інерційних параметрів

$m \leq 10$ - кількість мало інерційних вхідних параметрів

$x_i \in [\alpha_i, \beta_i]$
 $z_i \in [\gamma_i, g_i]$ - область визначення функції

X_{io}, Z_{io} - параметри, що забезпечують оптимальне значення функції.

Наявність на комплексі лиття під тиском інерційних регуляторів, створює реальну можливість коливань технологічного режиму, тобто тимчасову (тривалість визначається часом, необхідним регулятору для виведення відповідного параметра на заданий рівень) невідповідність фактичних параметрів X_i та заданих необхідним X_{io} . Коливання режимів призводить до погіршення якості лиття, і відхилення його від заданого оптимального рівня.

Для підтримки технологічного процесу на заданому рівні необхідно компенсувати наявні відхилення по параметрам X_{io} за рахунок малоінерційних параметрів, зміна яких проводиться відповідними регуляторами миттєво, при цьому необхідною умовою для всіх параметрів є належність їх до заданої області визначення функції (1) - моделі техпроцесу.

Коригування уставок регуляторів повинна здійснюватися в наступній послідовності:

1) На всіх регуляторах задані значення параметрів X_{io} та Z_{io}
 ($i=1, \dots, k; j=1, \dots, m$), що забезпечують оптимальне значення функції Y_0

2) Фіксуються відхили

$$\Delta x_{i1} = x_{i1} - x_{i0}, i = 1, \dots, k$$

3) Перевіряється належність значень параметрів X_{i1} до області визначення.

Можливо:

$$X_{i1} \in [\alpha_i, \beta_i]$$

або

$$X_{i1} \in [\alpha_i, \beta_i], i = 1, \dots, k$$

4) Якщо $X_{i1} \in [\alpha_i, \beta_i]$, роботу комплексу забороняється доти, поки регулятор не виведе i -тий параметр на рівень, при якому $X_{i1} \in [\alpha_i, \beta_i]$

5) Якщо $X_{i1} \in [\alpha_i, \beta_i]$ по рівнянню (2.14) визначають розрахункове значення вихідного параметру

$$Y_1 = f(X_{i1}, Z_{j0}), i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, m$$

6) Розраховують

$$\Delta Y_1 = Y_1 - Y_0$$

За умови, що узагальнений параметр за відхиленнями кожного вихідного параметра від оптимального значення, буде позитивною величиною.

7) Оцінюється абсолютна величина відхилення

Можливо

$$\Delta y_1 \leq \delta y \quad \text{або} \quad \Delta y_1 \leq \delta y$$

де δy - допустиме відхилення за узагальненим вихідного параметру.

8) якщо $\Delta y_2 \leq \delta y$, коригування уставок регуляторів параметрів Z_i не проводиться, робота комплексу дозволяється.

9) якщо $\Delta y_2 > \delta y$, робота комплексу забороняється і обчислюються коефіцієнти при Z_j

$$A_j = \sum_{j=1}^m (c_j + \sum_{j=1}^m C_{ij} X_{i1})$$

10) Проводиться ранжирування коефіцієнтів по абсолютній величині, присвоюється перший номер максимальним коефіцієнтом і області його значень, другий - наступного і так далі.

$$A_1 = A_k = \max \{ |A_i| \}$$

$$1 \leq i \leq m$$

$$A_1 = A_n = \max \{ |A_i| \} \quad \text{і так далі.}$$

$$(1 \leq i \leq m, i \neq k)$$

11) За умовою $\Delta y_2 = y_2 - y_0 = \delta y$ визначається приріст параметру Z_1 , що компенсує відхилення по параметрам X_i з урахуванням допустимого відхилення по “у” (2.15)

$$\Delta Z_1 = \frac{1}{A_1} [\delta y - (\sum_{i=1}^k B_i \Delta x_{i1} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m B_{ij} \Delta x_{i1} \Delta x_{j1} + \sum_{j=2}^m \sum_{i=1}^k C_{ij} \Delta x_{i1} Z_{j0})] \quad (2.15)$$

12) Розраховують $Z_{1.1}$ (2.16)

$$Z_{1.1} = Z_{1.0} + \Delta Z_1 \quad (2.16)$$

13) визначають належність $Z_{1.1}$ до області визначення функції (2.14);

Можливо:

$$Z_{1.1} \in [Y_1, g_1] \quad \text{або} \quad Z_{1.1} \in \bar{e}[Y_1, g_1]$$

14) якщо $Z_{1.1} \in [Y_1, g_1]$, значення $Z_{1.1}$ вводиться у відповідний регулятор, інші уставки регуляторів залишаються без зміни. Робота комплексу дозволяється. При появі знову відхилень по X_i процес компенсації цих відхилень повторюється з п. 2.

15) якщо $Z_{1.1} \in \bar{e}[Y_1, g_1]$, дозвіл на роботу комплексу не видається; параметр Z_1 фіксується на одній з меж відрізка $[Y, g_i]$.

Приймають

$$Z_{1.2} = Y_1, \text{ якщо } |Y_1 - Z_{1.1}| < |g_1 - Z_{1.1}|$$

$$\text{Або } Z_{1.2} = g_1, \text{ якщо } |Y_1 - Z_{1.1}| > |g_1 - Z_{1.1}|$$

16) визначають $\Delta Z_{1.2} = Z_{1.2} - Z_{1.0}$

17) Подальша компенсація відхилень параметрів X_i здійснюється за рахунок параметра Z_2

За умовою $\Delta y_3 = y_3 - y_0 = \delta y$ визначають приріст ΔZ_2

$$\Delta Z_2 = \frac{1}{A_2} [\delta y - (\sum_{i=1}^k B_i \Delta x_{i1} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m B_{ij} \Delta x_{i1} \Delta x_{j1} + \sum_{j=3}^m \sum_{i=1}^k C_{ij} \Delta x_{i1} Z_{j0} + A_1 \Delta Z_{1.2})]$$

18) розраховують $Z_{2.1} = Z_{2.0} + \Delta Z_2$

19) визначають $Z_{2.1} \in [Y_2, g_2]$ або $Z_{2.1} \in \bar{e}[Y_2, g_2]$

20) якщо $Z_{2,1} \in [Y_2, g_2]$, то до відповідних регуляторів вводиться значення $Z_1 = Z_{1,2}$ та $Z_2 = Z_{2,1}$, інші уставки регуляторів залишаються без зміни; робота комплексу дозволяється.

При наступній появі відхилень по X_i процес їх компенсацій повторюється з п.2.

21) якщо $Z_{2,1} \notin [Y_2, g_2]$, то дозвіл на роботу комплексу не видається; параметр фіксується на одній з меж відрізка $[Y_2, g_2]$, приймають $Z_{2,2} = Y_2$, якщо $|Y_2 - Z_{2,1}| < |g_2 - Z_{2,1}|$ або $Z_{2,2} = g_2$, якщо $|Y_2 - Z_{2,1}| > |g_2 - Z_{2,1}|$

22) розраховують $\Delta Z_{2,1} = Z_{2,2} - Z_{2,0}$

23) визначають приріст параметру Z_3 (2.16)

$$\Delta Z_3 = \frac{1}{A_3} [\delta y - (\sum_{i=1}^k B_i \Delta X_{i1} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m B_{ij} \Delta x_{i1} \Delta x_{j1} + \sum_{j=4}^m \sum_{i=1}^k C_{ij} \Delta X_{i1} Z_{j0} + A_1 \Delta Z_{12} + A_2 \Delta Z_{2,2})] \quad (2.16)$$

Подальші операції виконуються аналогічно п. п. 18 – 23.

При виході на межі області всіх параметрів $Z_i (i = 1...5)$ видається дозвіл на роботу комплексу [121].

2.5. Методики дослідження якісних та кількісних характеристик неметалевих включень і мікроструктури в магнієвому сплаві

Для дослідження неметалевих включень і мікроструктури виливків з магнієвих сплавів першочергово виготовляли циліндричні адаптери з алюмінієвого сплаву діаметром 22 мм, в центрі яких просвердлили конусні отвори діаметром 10мм, в яких кріпили досліджувані зразки з магнієвого сплаву.

Виготовлення шліфів: попередню обробку для отримання плоскої поверхні виконали на бічній поверхні абразивного круга.

Дослідження неметалевих включень проводили на мікроскопі MIM-M, оснащеному відеокамерою, яка з'єднана з комп'ютером.

При мікроскопічному дослідженні використовували мікропланар з $F = 40$ мм для збільшення 100 і планахромати з $F = 40$ для збільшення 300.

Після дослідження неметалічних включень шліфи промивали 96% спиртом і травили в 4% спиртовому розчині азотної кислоти.

2.6. Методики визначення хімічного складу, механічних властивостей виливків з магнієвих сплавів

Визначення хімічного складу та механічних властивостей виливків з магнієвих сплавів, включаючи тимчасову міцність на розтяг, відносне видовження і твердість проводились відповідно до стандартів, включаючи: ДСТУ ISO 16220:2008 «Магній і магнієві сплави. Зливки та виливки з магнієвих сплавів. Технічні умови», ГОСТ 2856-79 «Сплави магнієві ливарні. Марки».

2.7. Висновки до розділу 2

1. Вперше розроблено методику для досліджень поверхневого натягу розплавів магнію безпосередньо у промислових металоємних плавильних та роздаткових агрегатах з газовим захистом розплаву магнію, визначено основні фактори впливу на поверхневий натяг, включаючи: склад захисної газової суміші (SO_2 + осушене повітря), щільності водню та вмісту хлору у захисній суміші з межами варіювання цими факторами: 0,12-0,6 л/хв; $9-12 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$. та 0,04- 0,12 %, а також експериментальний сплав, в якості якого прийнято сплав МЛ5 ГОСТ 2856-79.

2. Вперше для розробки технологічного процесу лиття магнієвих сплавів з газовим захистом рідкого металу шляхом вивчення характеристик поверхневого натягу розплаву, дослідження впливу та оптимізації складу захисної газової суміші на окиснюваність, механічні властивості магнієвих сплавів при їх одержанні в металоємних плавильних агрегатах був створений

стенд на базі машини лиття під тиском з гарячою камерою пресування мод. CP MGH 400 з системою автоматизованого керування складом захисної газової суміш та їх витратами при створенні заданої атмосфери в порожнині плавильних агрегатів, що дало змогу варіювати основними параметрами захисту розплаву магнієвих сплавів, включаючи: склад та витрати захисної газової суміші (SO_2 + осушене повітря), щільності водню та вмісту хлору у захисній суміші з межами варіювання цими факторами 0,12-0,6 л/хв.; $9-12 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$ та 0,04-0,12% і температури розплаву, $^{\circ}\text{C}$, вмісту в суміші газів SO_2 , та SF_6 , терміну імпульсу подачі суміші газів, хв, з межами варіювання цими факторами: $650-750^{\circ}\text{C}$; 0,2-0,6 %, 0.02-0,08%, 5-8 хв, а також експериментальний сплав, в якості якого прийнято сплав МЛ5 ГОСТ 2856-79.

3. Розроблено оригінальну методику визначення вагового показника корозії, як зміна ваги зразка в результаті корозії та створеної математичної моделі, яка дає змогу розрахувати величину показників корозійної стійкості (вагових втрат, глибини корозії та за шкалою корозійної стійкості) магнієвих сплавів, одержаних за умов газового захисту та за традиційним флюсовим захистом розплаву у плавильному агрегаті.

4. Для об'єктивного та високоточного дослідження впливу основних параметрів лиття під тиском на якісні характеристики литих зразків з магнієвих сплавів за заданими та сталими технологічними параметрами розроблена методика управління параметрами лиття магнієвих сплавів під тиском та алгоритм її реалізації, які включають: загальну функціональну модель технологічного процесу одержання виливків з магнієвих сплавів під тиском та систему автоматичного корегування параметрів технологічного процесу на заданому рівні, зміна яких проводиться автоматично відповідними регуляторами короткостроково.

5. Визначені та адаптовані методики дослідження якісних та кількісних характеристик неметалевих включень і мікроструктури в магнієвих сплавах, які дали змогу встановити вплив основних технологічних параметрів одержання виливків з магнієвих сплавів під тиском з використанням створеної дослідної

установки лиття під тиском та системи автоматизованого відображення і фіксації всіх основних параметрів плавлення сплавів та одержання з них виливків .

6. Визначені та адаптовані стандартні методи оцінки хімічного складу та механічних властивостей магнієвих сплавів та виливків, одержаних з магнієвих сплавів під тиском з використанням газового захисту розплаву в печі, що відповідають стандартам, включаючи: визначення хімічного складу та механічних характеристик відповідно до ДСТУ ISO 16220:2008 «Магній і магнієві сплави. Зливи та виливки з магнієвих сплавів. Технічні умови», ГОСТ 2856-79 «Сплави магнієві ливарні. Марки».

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОДЕРЖАННЯ ВИЛИВКІВ З МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ ЛИТТЯМ ПІД ТИСКОМ З ГАЗОВИМ ЗАХИСТОМ РОЗПЛАВУ В МЕТАЛОЄМНИХ ПЛАВИЛЬНИХ АГРЕГАТАХ

3.1. Дослідження впливу та оптимізація складу захисної газової суміші на окиснюваність магнієвих сплавів при їх одержанні в металоємних плавильних агрегатах

Відповідно до аналізу літератури щодо різновидів технологічних процесів плавлення магнієвих сплавів у захисному газовому середовищі [25] стало доцільними дослідити закономірності одержання магнієвого сплаву МЛ5 ГОСТ 2856-79 (аналог AZ91) з використанням безфлюсового газового захисту сплавів на базі сірчистого ангідриду SO_2 і при цьому встановлено, що на підвищення корозійної стійкості магнієвих сплавів істотно впливає вміст SO_2 в захисній атмосфері печі, а також вміст і співвідношення хлору Cl_2 та водню H_2 у цій захисній суміші, що потребує встановлення оптимального співвідношення захисних газів.

Тому для оптимізації технологічних параметрів процесу безфлюсового плавлення магнієвих сплавів з використанням 4-компонентної захисної газової суміші доцільно провести серію експериментів для визначення впливу захисної газової суміші на окиснюваність (корозійну стійкість) магнієвих сплавів.

Для оптимізації параметрів захисної газової суміші був застосований метод повнофакторного експерименту [118], у якому перемінними факторами були:

- вміст сірчистого ангідриду SO_2 в складі осушеного повітря в суміші захисних газів;
- вміст хлору Cl_2 в суміші захисних газів;
- вміст водню H_2 в суміші захисних газів. .

Межі варіювання перемінними факторами в серії експериментів визначені за наступних умов.

Вміст SO_2 в газовій суміші.

Верхній рівень вмісту SO_2 за об'ємом в суміші захисних газів обмежувався умовами відсутності загоряння магнію, який становить 0,696 л/хв, а нижній рівень вмісту SO_2 - 0,116 л/хв,

Вміст водню H_2 у газовій суміші.

Верхній рівень вмісту H_2 за питомим об'ємом в суміші захисних газів становив $9,0 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$, а нижній рівень вмісту H_2 - $3,0 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Вміст хлору Cl_2 у газовій суміші.

Верхній рівень вмісту Cl_2 за питомим об'ємом в суміші захисних газів становив $14,0 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$, а нижній рівень вмісту H_2 - $2,0 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Ефективність газового захисту магнієвих сплавів від окислення при плаванні визначався по корозійній стійкості цього сплаву у виливках-зразках за масовим показником корозії ($\text{г}/\text{м}^2\text{год}$) за методикою, яка викладена у п. 3 розділу 2.

Проведення серії натурних експериментів здійснювалася на діючому обладнанні лиття під тиском при відпрацюванні технології лиття біметалевих радіаторів конвекторів з магнієвого сплаву МЛ5 ГОСТ 2856-79.

Комплекс включає машину лиття під тиском (ЛПТ) з гарячою камерою пресування 400 т.с., яка додатково обладнана системою безфлюсового захисту магнієвого сплаву з установкою низького холоду для осушення повітря.

При проведенні серії експериментів в осушене повітря додавали заданий обсяг SO_2 в межах встановлених табл. 3.1, що забезпечує надійний захист магнієвого сплаву від загоряння і окислення. Гексофторид сірки SF_6 в ємності 50 кг може використовуватись, як аварійний резерв, подача якого відбувається автоматично.

Таблиця 3.1

Межі варіювання параметрів досліджень

Межі параметру	Параметри захисної газової суміші					
	Миттєві витрати SO ₂		Значення вмісту H ₂		Значення вмісту Cl	
	Натуральна Z ₁ , л/хв SO ₂	Кодована, X ₁	Натуральна Z ₂ , 10 ⁻³ м ³ /кг	Кодована, X ₂	Натуральна Z ₃ , %	Кодована, X ₃
Верхній рівень	0,696	+1	9	+1	0,12	+1
Нижній рівень	0,116	-1	3	-1	0,04	-1
Основний (нульовий рівень)	0,406	0	6	0	0,08	0
Крок варіювання	0,290	-	3	-	0,04	-

Розширена матриця планування повнофакторного експерименту для трьох факторів, з фіктивною змінною, представлена в таблиці 3.2. Матриця планування передбачає 2³ досліджень [13].

Таблиця 3.2

Матриця планування експерименту для визначення технологічних параметрів газового захисту сплаву на корозійну стійкість виливка

Номер дослідження	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	Y, 10 ⁻³ г/м ² год
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Перша серія експериментів</i>									
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	8
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	10
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	9

Продовж.табл.3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	11
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	13
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	14
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	10
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	20
<i>Друга серія експериментів</i>									
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	7
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	12
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	7
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	14
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	11
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	16
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	8
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	22
<i>Третя серія експериментів</i>									
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	6
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	11
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	8
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	14
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	12
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	18
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	9
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	19
<i>Середні значення результатів 3-х серій експериментів</i>									
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	7
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	11

Закінч.табл. 3.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	8
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	13
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	12
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	16
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	9
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	20

Для визначення технологічних параметрів газового захисту сплаву на корозійну стійкість виливків було проведено три серії однотипних експериментів за матрицею планування експерименту, наведеною у табл. 3.2.

Відповідно до середніх значень даних наведених у табл. 3.2. (виділено темним кольором) визначені коефіцієнти рівняння регресії для повного факторного експерименту, що визначає залежність масової корозії зразків з магнієвого сплаву МЛ5 ГОСТ 2856-79 від варіації параметрами складу газової захисної суміші (вміст SO₂, вміст Н₂, вміст Cl₂), а при цьому рівняння набуло наступного вигляду:

$$Y = 48 + 12x_1 + 2x_2 + 9x_3 + 4x_1x_2 + 3x_1x_3 - x_2x_3 + 3x_1x_2x_3, \text{ г/м}^2\text{год.}$$

$$12 + 3x_1 + 0,5x_2 + 2,25x_3 + x_1x_2 + 0,75x_1x_3 - 0,25x_2x_3 + 0,75x_1x_2x_3, \times 10^{-3} \text{ г/м}^2\text{год} \quad (3.1)$$

Для визначення дисперсії адекватності, оцінки значущості коефіцієнтів з довірчого інтервалу додатково провадиться кілька паралельних дослідів в одній точці плану, щоб визначити розкид значень в даній точці. Паралельні експерименти проводимо для точки 8:

$$Y_{21} = 20; Y_{21} = 22; Y_{21} = 19.$$

Їх середнє значення:

$$\bar{Y}_2 = 20.33 \quad (3.2)$$

Дисперсія відтворюваності (адекватності) визначається за допомогою повторних дослідів в нульовій точці (центрі експерименту).

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^3 (\bar{Y}_2 - Y_{2i})^2}{3-1} = 2.33 \quad (3.3)$$

Середнє квадратичне відхилення:

$$S_y = 1,53 \quad (3.4)$$

Середнє квадратичне відхилення складо:

$$S_{bi} = 0,26 \quad (3.5)$$

Для оцінки значущості коефіцієнтів з довірчого інтервалу обчислюють довірчий інтервал для коефіцієнта за формулою 3.6

$$\Delta b_i = \pm t S_{bi} \quad (3.6)$$

де t – критерій Стюдента (табличне значення критерію при 5% -му рівні значущості і при кількості ступенів свободи $f = n - 1 = 3 - 1 = 2$ дорівнює 4,3).

Довірчий інтервал:

$$\Delta b_i = \pm 0.86 \quad (3.7)$$

В кінцевому вигляді рівняння регресії визначення масової корозії магнієвого сплаву МЛ5 ГОСТ 2856-79 у кодовому вигляді набуде слідуючого вигляду:

$$Y = 48 + 12x_1 + 2x_2 + 9x_3 + 4x_1x_2 + 3x_1x_3 - x_2x_3 + 3x_1x_2x_3, \text{ г/м}^2\text{год} \quad (3.8)$$

$$12 + 3x_1 + 0,5x_2 + 2,25x_3 + x_1x_2 + 0,75x_1x_3 - 0,25x_1x_3 + 0,75x_1x_2x_3, \text{ х } 10^{-3} \text{ г/м}^2\text{год}.$$

На рис.3.1 приведена графічна інтерпретація рівняння 3.8.

Аналіз даних, одержаних за рівняннями регресії (3.8) дає змогу встановити, що найбільший вплив на захист від окиснюваності сплаву в плавильному агрегаті надає склад сумішей захисних газів у плавильному агрегаті, що у подальшому підвищує і корозійну стійкість виливків з магнієвих сплавів.

За допомогою побудованої регресійної моделі (3.8) та її графічної інтерпретації (рис.3.1) стає можливим не тільки аналізувати процес плавлення магнієвих сплавів, але й оптимізувати і прогнозувати ступінь окиснюваності чи

корозійної стійкості виливків з магнієвих сплавів при одержанні їх в захисній газовій атмосфері у режимі плавлення вихідних магнієвих сплавів.

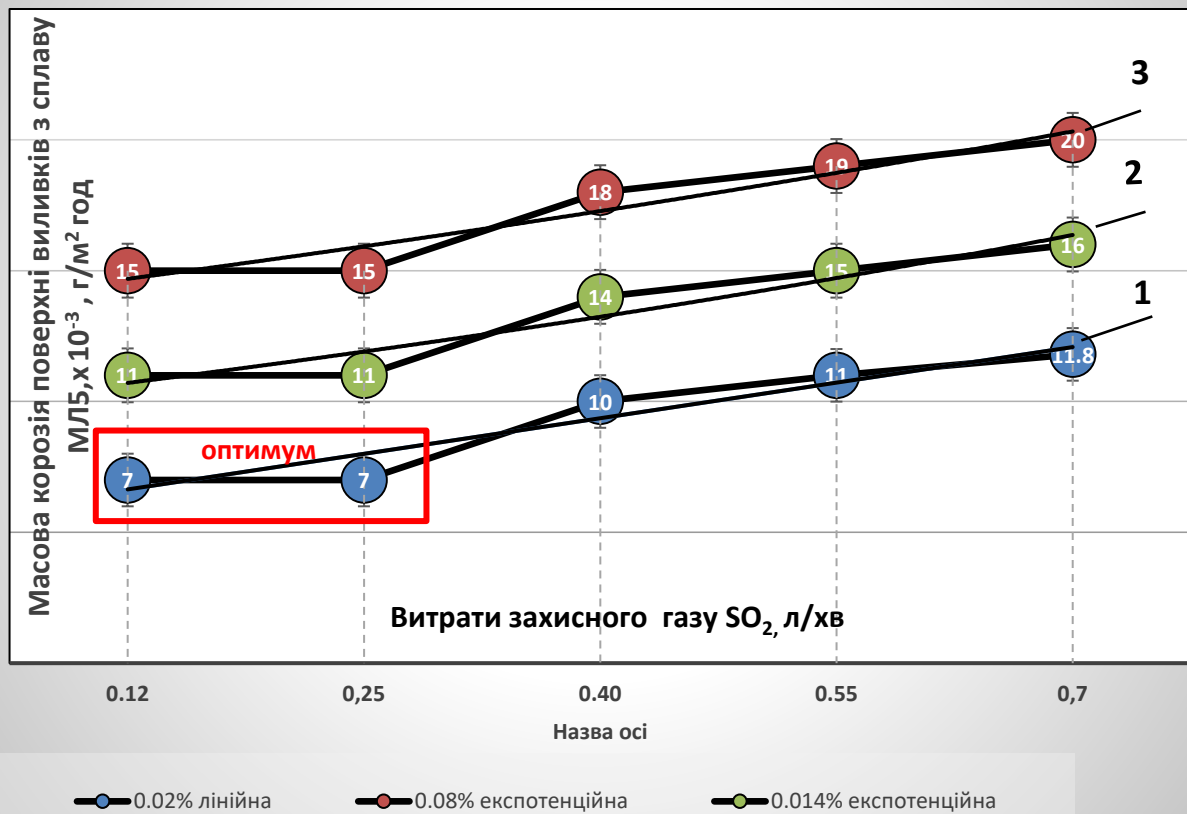


Рис. 3.1 Вплив захисної суміші газів в плавильному агрегаті при одержанні магнієвих сплавів

Так відповідно до аналізу даних наведених на рис.3.1 встановлено, що найменша окиснюваність дослідного магнієвого сплаву типу МЛ5 та його масова корозійна стійкість у виливках досягається при мінімальних витратах сірчистого ангідриду SO₂ та вмісту хлору Cl₂ (рис.3.1.кр.1), значення яких становлять 0,12 л/хв та 0,02% відповідно, а коефіцієнт масової швидкості корозії за цих умов складає 0,007 г/ м² х год в цій суміші в захисному газі, що відповідає значенням окиснюваності та корозійної стійкості X (кр.1,рис.3.1) та У (кр.2, рис.3.1). Причому, при зростанні значення витрат SO₂ до 0,7 л/хв коефіцієнт масової швидкості корозії за цих умов зростає до 0,012 г/ м² •год, тобто на 70 %.

На зміну значень масової швидкості корозії істотно впливає і вміст хлору Cl_2 в захисній суміші. Так при мінімізації витрат на рівні 0,12 SO_2 , але при зростанні вмісту Cl_2 в суміші з 0,002% (рис.3.1, кр.1) до 0,014% (рис.3.1, кр.3) значення масового коефіцієнту корозії зростає з 0,007 (рис.3.1, кр.1) до 0,015 (рис.3.1, кр.3) $\text{г/м}^2 \times \text{год}$, тобто в 2,1 рази.

Слід відзначити, що вплив вмісту водню H_2 в складі захисної газової суміші у межах експерименту не істотний і може відрізнятись за різних умов серії дослідів лише на 10-15% (відповідно до рівняння 3.1).

Найбільші значення коефіцієнту масової корозії металу виливків з магнієвого сплаву МЛ5 досягається за умов, коли значення основних параметрів захисної газової суміші : витрати SO_2 , вміст водню H_2 та хлору Cl_2 знаходяться в межах 0,6-0,7 л/хв, 0,012-0,014% та 7-9% відповідно (рис.3.1. кр.1, кр.2, кр.3). За цих умов значення коефіцієнту вагової корозії виливків з магнієвого сплаву МЛ5 досягають значень 0,015-0,020 $\text{г/м}^2 \cdot \text{год}$, що у 2,1-2,9 раз вищі за оптимум складу захисної газової суміші (рис.3.1. кр.1, кр.2).

Відповідно до аналізу результатів серії експериментів з використанням рівняння регресії (3.8) щодо дослідження впливу складу захисної газової суміші на окиснюваність магнієвих сплавів при їх одержанні в металоємних плавильних агрегатах за оптимальний склад захисної суміші слід вважати співвідношення:

1) Оптимальні витрати сірнистого ангідриду SO_2 в суміші захисних газів становитиме - 0,12-0,25 л/хв,

2) Оптимальний вміст водню H_2 в суміші захисних газів становитиме 3,0-4,0 $10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$.

Оптимальний вміст хлору Cl_2 в суміші захисних газів становитиме 0,002-0,004, яке дає змогу досягти мінімізації окиснюваності за критерієм масового коефіцієнту корозії виливків з магнієвого сплаву типу МЛ5 ГОСТ ГОСТ 2856-79 значення $7-8 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^2 \text{ год}$ (рис.3.8, кр.1, кр.2)

За оптимальним складом газової суміші в плавильному агрегаті (витрати SO_2 - 0,12-0,15 л/хв, вміст H_2 - 3,0-3,5 $10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$, вміст хлору Cl_2 - 0,002-0,003) та

за методикою, наведеною у п.3 розділу 2 були виготовлені зразки для дослідження корозійної стійкості виливків з магнієвого сплаву МЛ5 ГОСТ 2856-79 в різних кліматичних умовах, які були проведені у Спеціалізованій лабораторії кліматичних випробувань на базі Державного підприємства «Інженерний центр литва під тиском», що дало змогу у подальшому отримати розрахункові залежності для визначення ресурсних показників корозійної стійкості виливків з магнієвих сплавів за наступними режимами:

- температура середовища 40 °C при відносній вологості 100% - 12 годин;
- температура середовища 25 °C при відносній вологості 95% - 10 годин;
- витримка на повітрі при кімнатній температурі - 2 години;
- тривалість випробувань -4 цикла;
- тривалість одного циклу- 24 год.

Першочергово оцінка корозійного стану проводилася за зовнішнім оглядом після закінчення випробувань за критерій було прийнято площа зразка, на поверхні якого є продукти корозії.

На рис. 3.2 представлені данні щодо зміни поверхні зразків після прискорених випробувань, одержаних за двома технологічними процесами захисту магнієвого сплаву МЛ5, у тому числі в захисному середовищі суміші на основі SO₂ (а) та під шаром захисного флюсу ВІ2 (б).

При візуальному аналізі поверхні зразка з МЛ5 (рис.3.2а), одержаного при плавці у газовому захисному середовищі суміші на основі SO₂ корозії не виявлено, а при візуальному аналізі поверхні зразка з МЛ5 (рис.3.2б), одержаного при плавці під шаром захисного флюсу на поверхні має місце пухкий наліт білого кольору, який представляє собою продукти корозії основного металу, площа ураження корозією - 80%.

Водночас проводилися атмосферні випробування зразків з МЛ5 терміном у 1 місяць на базі Державного підприємства «Інженерний центр литва під тиском» в умовах неопалюваного приміщення в зимовий період.



а)



б)

Рис. 3.2. Поверхня зразків після кліматичних випробувань зразків виливків з магнієвого сплаву МЛ5, одержаних при плавці у газовому захисному середовищі суміші на основі SO_2 (а); при плавці під шаром захисного флюсу ВІ2 (б).

На рис. 3.3 наведені результати атмосферних випробувань на зразках з магнієвого сплаву МЛ5 розмірами 40x40x1 мм, одержаних за двома технологіями: в захисному середовищі суміші на основі SO_2 (а) та під шаром захисного флюсу ВІ2 (б).

За аналізом поверхні зразка з магнієвого сплаву МЛ5 одержаних при плавці у газовому захисному середовищі суміші на основі SO_2 (3.3а) встановлено, що його площа вражена продуктами корозії лише на 1,6%, а відповідна поверхня зразка, одержаного при плавці під шаром захисного флюсу ВІ2 (3.3б) суттєво вражена продуктами корозії і складає 40%. При цьому, після видалення продуктів корозії з зразка (3.3. б) дефекти представляють собою заглибини кратерного типу (рис. 3.4). Площа окремих плям на цьому зразку становила 2,5-3 мм^2 , а середня глибина 0,8 мм, по периметру спостерігається деяке здуття, висота якого складала 0,025 мм.

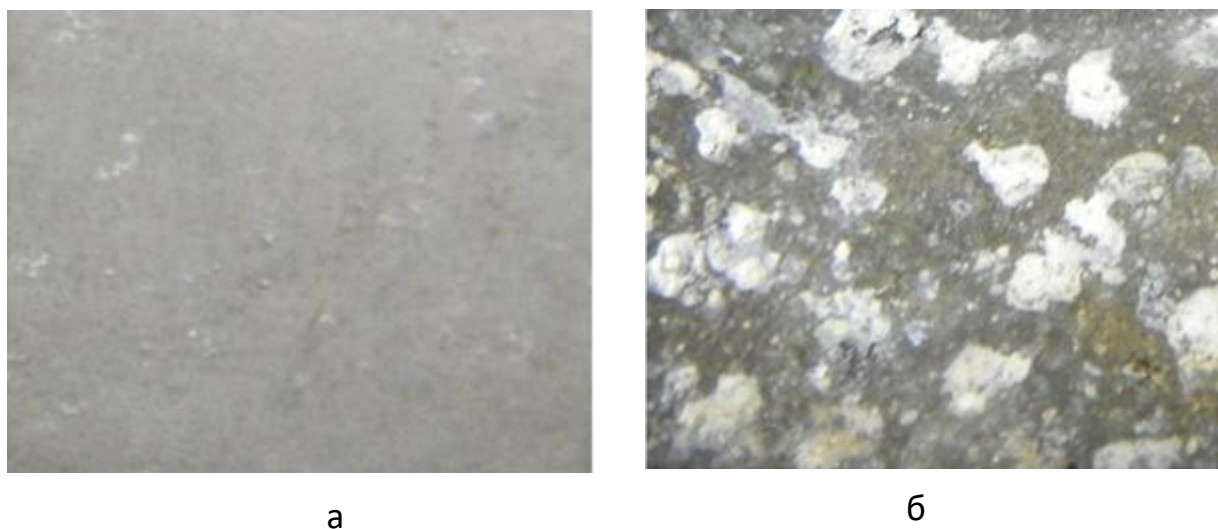


Рис. 3.3 Поверхня зразків після атмосферних випробувань зразків виливків з магнієвого сплаву МЛ5, одержаних при плавці у газовому захисному середовищі суміші на основі SO_2 (а); при плавці під шаром захисного флюсу ВІ2 (б).

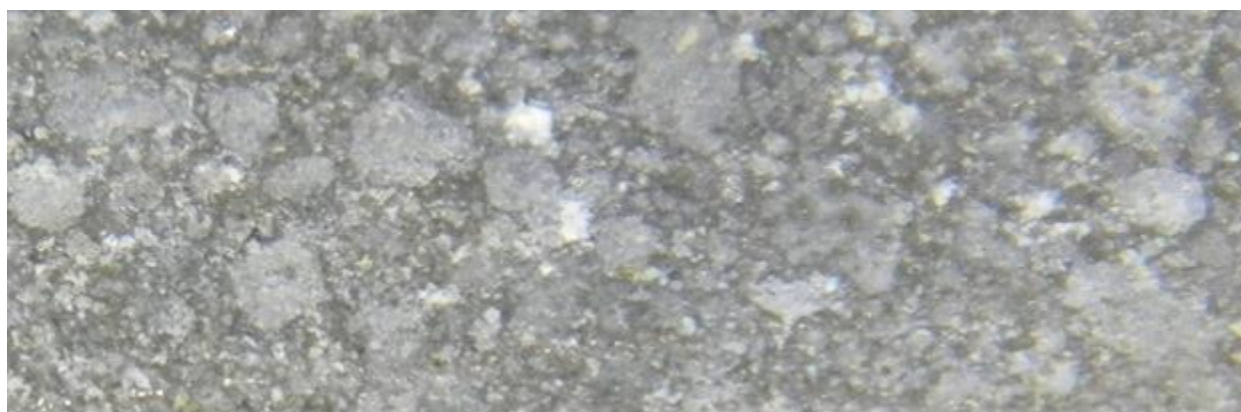


Рис. 3.4 Дефектна поверхня зразка після атмосферних випробувань з магнієвого сплаву МЛ5 одержаних при плавці під шаром захисного флюсу ВІ2 (б).

Для кількісної оцінки результатів корозійної стійкості за даними, одержаними в цій серії експериментів були обрані два показника: масовий і глибинний та були виконані відповідні розрахунки. Результати розрахунків представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

**Оцінка результатів корозійної стійкості зразків з магнієвого сплаву МЛ5
ГОСТ 2856-79**

Показники корозійної стійкості	Захист в газовому середовищі на основі SO ₂	Флюсовий захист ВІ2
1. Коефіцієнт масової корозійної стійкості, K _{мас.} , г/м ² год.	0,008	2,01
2. Глибинний показник корозійної стійкості П, мм/рік	0,04	10,3
Бал. за шкалою корозійної стійкості (ГОСТ 9.908-85)	4	10

3.2. Аналіз окислення і межі загоряння магнієвих сплавів

Перехід від повільного окислення магнієвих сплавів до парофазного або гетерогенного горіння до теперішнього часу залишається дискусійним. За результатами робіт Інституту структурної макрокінетики і проблем матеріалознавства встановлено [22, 23], що газофазна реакція парів магнію з окиснювачем багато в чому визначається станом оксидної плівки, яка визначає характер протікання процесу при загорянні. Встановлено зв'язок структурної особливості оксидної плівки з макрокінетичним високотемпературним окисленням.

Виключно тонким і складним дослідженням інституту «Фізика горіння і вибуху» (ІСМАН) [23] встановлено три області горіння:

- область 1, 560 - 690 °С - повільне гетерогенне окислення без розігріву магнію і виділення магнієвої пари (газу);

- область 2, до 750°C незначно змінюється розігрів і з'являються нестійкі вогнища горіння і повторні осередки слабого горіння;

- область 3, понад 750°C - горіння стає стійким, швидкість випаровування магнію зростає і відповідно зростає тиск парів - полум'я починає просуватися до металу.

Висновок Інституту: характер окислення магнію в ізотермічних умовах, так як і можливість існування різних видів горіння в першу чергу залежить від складної залежності властивостей і структури показників зростаючої захисної плівки, від температури і концентрації кисню в середовищі [54].

Зі збільшенням температури і вмісту кисню в газовій фазі, а саме, при досягненні критичної товщини, захисна плівка починає розтріскуватися, пари магнію проникають в атмосферу цеху і відбувається спалах [22]. На сьогоднішній день немає ще розуміння механізму зворотного зв'язку між кінетикою загоряння і структурою захисної плівки.

Встановлено залежності характеру окислення від процентного вмісту кисню в газовому середовищі парів магнію над дзеркалом сплаву:

- при 1% O_2 і температурі 500°C рівень окислення падає;
- при 2% O_2 частота пульсацій зростає і починається відшаровування оксидної плівки;
- при подальшому підвищенні температури до 900°C горіння стає стійким.

При малих концентраціях кисню яскраво виражений максимум температури в газовому середовищі відсутній. Фізика змінюється при підвищенні вмісту кисню вище 6%. З цього випливає, що практично необхідно знизити вміст кисню до можливого мінімуму [23]. І тому, необхідно досліджувати залежність часу існування захисної плівки (до загоряння) на поверхні магнієвого сплаву від складу газової суміші і параметрів імпульсної подачі захисних газів.

3.3. Теоретичне уявлення щодо процесів захисту магнієвих сплавів від загоряння і окислення

У зв'язку з поставленим в даній роботі науковим завданням по створенню нової імпульсної системи захисту магнієвих сплавів від загоряння шляхом зміни фізичного процесу постійного впливу активних газів на захисну плівку рідкого сплаву на імпульсний, змінюється фізичний процес роботи захисної плівки.

Використання захисного ефекту хімічного процесу формування поверхневої плівки постійної подачі суміші захисного газу призводить до постійного зростання товщини шару плівки. При цьому відбувається наступне: поверхні з боку рідкого сплаву зберігають температуру, а з боку зовнішнього шару температура падає. Збільшення перепаду температури на межах плівки створює наростаючу напругу в плівці, що приводить до її руйнування, схему якого наведено на рис. 3.5. З'являються тріщини, через які проходять назовні пари магнію, а в середину кисень. Це призводить до накопичення кисню всередині рідкого магнію, а парів магнію зовні. Саме такий стан є основною причиною загоряння. При цьому втрачаються захисні властивості плівки через порушення її герметичності. Одночасно з цим, через безперервність процесу дифузії захисного газу і магнієвого сплаву, маса плівки збільшується і частина плівки тоне. Далі процес повторюється. До непрямих недоліків такого процесу слід віднести велике споживання активних газів, втрати сплаву, зниження якості магнієвого сплаву, засмічення неметалічними включеннями і як наслідок, зниження якості лиття.

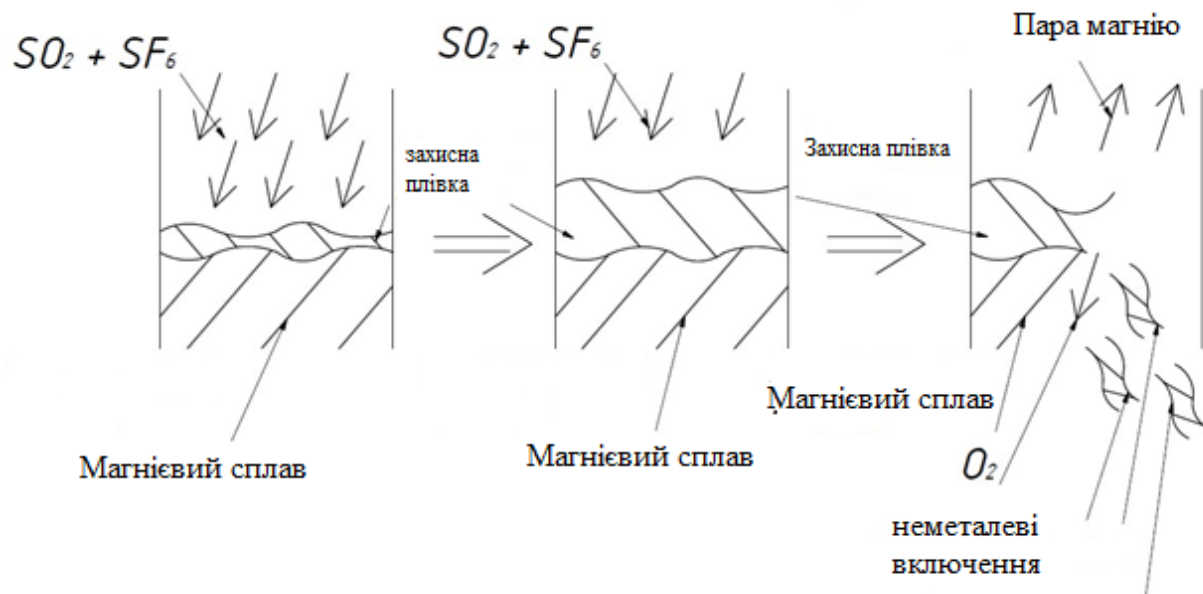


Рис. 3.5 Схема утворення, наростання та руйнування плівки

Для усунення зазначених недоліків доцільно застосувати в безфлюсовому захисті магнієвих сплавів імпульсну систему подачі захисних газів на дзеркало розплавленого металу. Ефективність роботи даної системи буде забезпечуватися системою динамічного управління зі зворотним зв'язком по фізичному стану плівки, у якій факторами управління виступають інерційні параметри - поверхневий натяг плівки магнієвого сплаву σ і температура сплаву T . В якості узагальненого відгуку використовується час існування захисної плівки (до появи загоряння) Y с.

Використання описаної вище системи дозволить різко знизити кількість активних газів. Підвищення терміну існування плівки буде запобігати початку процесу загоряння, плівка буде тонкою і легкою. Порушення плівки відбудеться при фізичних впливах ззовні. Процес опису поведінки плівки на поверхні магнієвих сплавів утруднений у зв'язку з відсутністю достатніх теоретичних викладок. Тільки пасивний і активний експеримент дозволять описати «поведінку» плівки. Створення математичної моделі дозволить прогнозувати «поведінку» захисної плівки (до появи загоряння) і визначати кількість захисного газу, необхідного для процесу плавки без спалаху.

Використання в процесі плавки динамічної моделі управління технологічним процесом дозволить мінімізувати негативний вплив хімічних реакцій на механічні характеристики лиття.

Суть моделі полягає в наступному. Для сплавів МЛ5 і AZ91, які використовувались, були встановлені значення порогових температур трьох рівнів стану по загорянню [22, 119].

1. Температура, при якій не спостерігається виділення парів магнію і саморозігріву. При експерименті з подачею сухого повітря для МЛ5 - 320°C, для AZ91 - 305°C.

2. При температурі 430°C для AZ91, 450°C для МЛ5 окремі осередки загорання нестійкі. При температурі 630°C подача сухого повітря, ще немає виділення парів магнію і слабе горіння вогнищ.

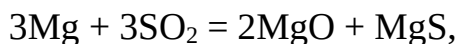
3. При температурі рідкого розплаву МЛ5 640 - 650°C з'являються стійкі вогнища горіння і виділення парів магнію, які набувають білий колір (MgO).

З цього моменту необхідно включати подачу активних газів.

Встановлені значення трьох рівнів, що передують займання, використовувалися для нижнього рівня температури подачі захисних активних газів.

З огляду на хімічну активність використовуваних в експерименті активних газів, було проведено в ручному режимі експеримент для встановлення інтервалів варіювання температури розплаву в області загального робочого інтервалу температури ливарних сплавів МЛ5 і AZ91 та хімічної активності SO₂ і SF₆.

Сірчистий ангідрид SO₂ при 600°C утворює поверхневу плівку



При підвищенні температури розплаву проходить друга реакція



При нижньому рівні робочого інтервалу температур було прийнято рішення використовувати тільки сухе повітря з рівнем кисню до 5% з відповідним обсягом SO₂.

При 600°C обсяг сірчистого ангідриду в одному рівні імпульсної подачі сплаву прийнятий 0,2% (нижній рівень його використання на практиці). Обсяг гексафториду сірки в одному рівні імпульсної подачі прийнятий 0,05% при температурі 660°C при нестійкому захисту SO₂ мінімального обсягу.

Водночас встановлено, що за умов імпульсної подачі суміші захисних газів, витрати SO₂ у порівнянні з безперервною подачею знижено в 12,2 рази, а гексофториду SF₆ знижено в 18,5 разів.

Результати серії експериментів наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Результати серії експериментів встановлення інтервалів варіювання параметрами імпульсної подачі захисних газів в плавильний агрегат

№	Температура розплаву, °C	Вміст SO ₂ в суміші газів, %	Вміст SF ₆ в суміші газів, %	Вміст SO ₂ +SF ₆ в суміші газів, %	Термін імпульсу подачі газів, хв
1	640	+ 0,2	-	0,2	8+
2	650	-0,2	-	0,2	8+ -
3	660	-0,2	+0,05	0,25	8+
4	670	-0,2	-0,05	0,25	8+ -
5	680	+0,3	0,06	0,36	8+
6	690	-0,3	-0,06	0,36	8+ -
7	700	+0,35	+0,07	0,42	8+
8	710	+0,4	-0,07	0,47	8+
9	720	-0,4	-0,07	0,47	8+ -
10	730	+0,5	+0,08	0,57	8+
11	740	-0,5	+0,08	0,58	8+

У табл. 3.5 наведене співвідношення вмісту у захисній суміші активних газів SO_2 і SF_6 по кроках переходу почергового підвищення при нестійкому стані поточного кроку зміни температури.

Таблиця 3.5

Показники співвідношення вмісту у захисній суміші активних газів SO_2 і SF_6

№	Присутність SO_2 в суміші газів	Вміст SO_2 в суміші газів, %	Присутність SF_6 в суміші газів	Вміст SF_6 в суміші газів, %
1	+	0,2	-	-
2	-	0,2	-	-
3	-	0,2	+	0,05
4	-	0,2	-	0,05
5	-	0,3	+	0,06
6	+	0,3	-	0,06
7	-	0,3	+	0,07
8	+	0,35	-	0,07
9	+	0,4	-	0,07
10	-	0,4	+	0,08
11	+	0,5	-	0,08

3.4. Установка для імпульсної подачі суміші захисних газів в плавильні та роздаткові агрегати одержання магнієвих сплавів

Для дослідження і відпрацювання науково-дослідних завдань щодо впливу технологічних факторів захисту магнієвих сплавів при їх плавленні та збереженні за умов використання захисних газів з імпульсною їх подачею у названі агрегати була доопрацьована конструкція плавильної та роздавальної електричних печей з виймальним тиглем.

Печі додатково були обладнані герметичними кришками, ємність на 200 кг магнієвого сплаву. Герметична кришка обладнана шлюзовим люком для проведення технологічних і профілактичних робіт. Через кришку з герметичними вузлами у зону магнієвого сплаву змонтовані термопари, рухлива вимірювальна головка поверхневого натягу рідкого сплаву, скло для роботи лазерних датчиків визначення появи білого диму (парів магнію). Додані металоводи для подачі під рівень дзеркала металу підігрітих чушок і перекачування рідкого сплаву, а також металовод для перемішування сплаву.

З метою підвищення метрологічної точності дослідних робіт використані:

- для регулювання потоків інертних і активних газів пропорційні апарати витрати сухого повітря, гексофториду сірки і сірчистого ангідриду використовувався сертифікований апарат змішування газів (3-х видів);
- термопари, манометри, датчики тиску і дубльовані термопари;
- сірчистий ангідрид SO_2 повинен використовуватися в суміші з сухим повітрям при температурі вище 800-850 °C.

Одним з основних питань є технологічний процес зниження вмісту кисню в сухому повітрі до 6%. Для вирішення цього завдання використовувався газоаналізатор фірми Siemens - ULTRAMAT 6 для адсорбуючих газів.

В процесі зберігання (міксерному режимі печі) порушується однорідність рідкої фази, що вимагає перемішування знизу - вгору з періодичним модифікуванням.

Установка МСУ5 розділяє повітря, яке проходить через неї, на два потоки: потік з підвищеним вмістом вологи і кисню в атмосферу, та потік, збагачений азотом в ресивер. Волога в ресивері 0,4 - 0,6 г/м³, пара 0,00007 - 0,04%.

На рис. 3.6 наведено принципово нову схему імпульсної подачі газової суміші для захисту магнієвого розплаву в плавильному агрегаті та роздатковій печі, де повітря від компресора з робочим тиском до 1.6 МПа подавалось на вхід адсорбційного осушувача, в системі якого забезпечувалася очищення повітря від вологи до рівня точки роси (-70 °C), оливи та механічних домішок. Осушене повітря потрапляє в систему зниження кисню до 6%. Змішувач (7)

(розд. 3.4). Перемінними факторами в серії експериментів щодо впливу технологічних факторів на час до загорання магнію в плавильному агрегаті були: температура розплаву магнієвого сплаву МЛ5, поверхневий натяг, процентний вміст сірчистого ангідриду SO_2 та гексофториду сірки SF_6 .

Для аналізу експериментальних даних серії експериментів з таблиці 3.6 використовували кореляційний аналіз. Основне завдання - визначення тісноти і напрямку зв'язку між досліджуваними величинами. У таблиці 3.7 міститься кореляційна матриця компонентів.

Таблиця 3.6

Експериментальні дані впливу технологічних факторів на час до загорання магнію в плавильному агрегаті

№	Поверхневий натяг, дін/см	T, °C	SF_6 , %	SO_2 , %	Час до загорання, с
1	2	3	4	5	6
1	581	642	0	0,2	480
2	571	648	0	0,23	474
3	577	645	0	0,21	468
4	586	651	0	0,28	456
5	594	653	0	0,29	486
6	597	657	0	0,26	491
7	551	662	0,04	0,28	576
8	541	665	0,05	0,21	588
9	545	669	0,05	0,25	544
10	564	671	0,06	0,21	600
11	543	674	0,062	0,23	570

Закінч. табл.3.6

1	2	3	4	5	6
12	554	679	0,058	0,28	610
13	533	683	0,06	0,32	588
14	526	686	0,065	0,3	592
15	543	690	0,068	0,3	606
16	519	693	0,07	0,3	558
17	517	697	0,071	0,39	618
18	523	700	0,076	0,32	612
19	510	704	0,073	0,34	582
20	509	706	0,079	0,31	576
21	519	708	0,075	0,35	594
22	495	710	0,074	0,43	528
23	504	715	0,071	0,4	546
24	512	710	0,078	0,47	564
25	484	720	0,08	0,49	468
26	489	726	0,084	0,4	492
27	482	729	0,088	0,42	456
28	483	731	0,081	0,5	516
29	480	735	0,085	0,53	522
30	491	740	0,089	0,56	528

Таблиця 3.7

Кореляційна матриця компонентів

	Температура Т, °С	Поверхневий натяг σ , дін/см ²	SO ₂ , %	Узагальнений показник якості, Y с.
Температура Т, °С	1,00			
Поверхневий натяг σ , дін/см ²	-0,96	1,00		
SO ₂ , %	0,94	-0,88	1,00	
Узагальнений показник якості, Y с.	0,07	-0,05	- 0,06	1,00

Аналіз (табл. 3.7) дає можливість зробити наступний висновок - кореляційна залежність існує тільки між часом існування захисної плівки (до загоряння), температурою, поверхневим натягом, %SO₂ та %SF₆.

Отже, ми зможемо побудувати регресійну модель для визначення аналітичного виразу зв'язку залежної випадкової величини Y- часом існування захисної плівки (до загоряння) з величинами Т- температурою, σ поверхневим натягом, X₃- %SO₂, X₄- %SF₆ (факторами).

Основна особливість регресійного аналізу полягає в тому, що при його допомозі можна отримати конкретні відомості про те, яку форму і характер має залежність між досліджуваними змінними (табл. 3.8).

Таблиця 3.8

Значення коефіцієнтів регресії і їх статистичні оцінки

	Коефіцієнти	Стандартна помилка	t-статистика	P-Значення	Нижні 95%	Верхні 95%	Нижні 95,0%	Верхні 95,0%
Y- узагальн. показ. якості, с	1277,76	341,64	3,74	0,00	599,53	1956,00	599,53	1956,00
Температура T, °C	-2,18	0,40	-5,41	0,00	-2,98	-1,38	-2,98	-1,38
Поверхневий натяг σ , дін/см ²	1,00	0,21	4,84	0,00	0,59	1,41	0,59	1,41
SO ₂ , %	133,34	68,39	1,95	0,05	-2,43	269,10	-2,43	269,10
SF ₆ , %	3652,33	154,33	23,67	0,00	3345,9	3958,7	3345,9	3958,7

Розраховані в таблиці (3.8) коефіцієнти регресії a_i дозволяють побудувати рівняння (3.9), яке показує залежність між часом існування захисної плівки (до загоряння) від температури, поверхневого натягу, процентного вмісту SO₂ та SF₆:

$$\hat{y} = 1277,7 - 2,18T + \sigma + 133,3x_3 + 3652,33x_4 \quad (3.9)$$

Значення множинного коефіцієнта детермінації $R = 0.94$ показує, що 94% загальної варіації результативної ознаки, що пояснюється варіацією факторних ознак. Значить, обрані фактори суттєво впливають на узагальнений показник якості, що підтверджує правильність включення їх до збудованої моделі.

Розрахований рівень значущості $F = 0$ підтверджує значимість R^2 . Коефіцієнти регресії a_i є значущими, про що свідчать $P = 0$ менше заданого рівня значущості $\alpha = 0,05$.

Так як функція регресії визначена, інтерпретована і обґрунтована, і оцінка точності регресійного аналізу відповідає вимогам, можна вважати, що побудована модель володіє достатньою надійністю та може бути використана для вибору оптимальних параметрів процесу.

При нижньому рівні робочого інтервалу температур моделювання здійснювали без SF₆. В таблицях 3.7 та 3.9 наведено кореляційну матрицю компонентів та значення коефіцієнтів регресії.

Таблиця 3.9

Коефіцієнти регресії і їх статистичні оцінки

	Коефіцієнти	Стандарт на помилка	t-статистика	P-Значення	Нижні 95%	Верхні 95%	Нижні 95,0%	Верхні 95,0%
Y-перетин, с	-2098,14	810,91	-2,59	0,01	-3707,78	-488,50	-3707,78	-488,50
Температура T, °C	3,41	0,85	4,00	0,00	1,72	5,10	1,72	5,10
Поверхневий натяг σ, дін/см ²	0,95	0,54	1,75	0,08	-0,13	2,02	-0,13	2,02
SO ₂ , %	-700,08	153,14	-4,57	0,00	-1004,0	-396,11	-1004,6	-396,11

Розраховані в таблиці 3.9 коефіцієнти регресії a_i дозволять побудувати рівняння (3.10), яке виражає залежність узагальненого показника якості від температури, поверхневого натягу та вмісту SO₂.

$$\hat{y} = -2098.14 + 3.41T + 0.95\sigma - 700,08x_3 \quad (3.10)$$

Порівняємо відгуки з рівнянням 3.9

Значення множинного коефіцієнта детермінації $R = 0,43\%$ показує, що 43% загальної варіації результативної ознаки пояснюється варіацією факторних ознак.

Порівняння розрахункових даних з фактичними наведено в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

Результати зіставлення фактичних даних за часом існування захисної плівки (до загоряння) з розрахунковими за моделлю 3.9

№ п/п	Розрахункові	Фактичні	Залишок
1	588,75	582	6,75
2	605,21	600	5,21
3	579,03	582	-2,96
4	618,93	618	0,93
5	614,11	606	8,11
6	587,79	594	-6,20
7	592,34	600	-7,65
8	418.5	420	-1,5

Використовуючи рівняння 3.10 була встановлена закономірність впливу основних технологічних факторів на термін існування захисної плівки Y (межу загоряння) розплаву магнієвого сплаву МЛІ5.

Так при зростанні температури розплаву магнієвого сплаву МЛІ5 з 650 до 750 $^{\circ}\text{C}$ величина Y зростає з 2180 до 2520 с. Слід відзначити, що у цьому випадку приріст величини Y становить 15%.

При зростанні поверхневого натягу розплаву магнієвого сплаву МЛІ5 з 480 до 600 дін/см величина Y зростає з 460 до 570с. Слід відзначити, що у цьому випадку приріст величини Y становить 25%.

Навпаки, за умов зростання вмісту сірчистого ангідриду SO_2 в захисній суміші активних газів величина Y спадає з 420 до 140 с, тобто у цьому випадку величина Y зменшується у три рази.

Також було визначено максимальний та мінімальний термін існування захисної плівки на поверхні розплаву магнієвого сплаву МЛІ5 за умов варіювання значеннями перемінних факторів в дослідницькому інтервалі, яка

становила 620 с та 460 с відповідно. Тобто варіювання основними факторами в заданому інтервалі можуть змінювати величину Y в 1,4 рази.

3.6. Дослідження неметалічних включень і мікроструктури в ливарному сплаві на основі магнію

Об'єкт дослідження: зразки сплаву, отримані за старою і вдосконаленою технологією (два конусних зразка максимальним діаметром 9 мм і 10 мм) і один зразок, отриманий за новою технологією у вигляді масивного сектора, площини якого розташовані під кутом 90° .

При збільшенні зразків на мікропланері до 100 виявили велику кількість темнокоричневих включень розміром до 500 - 600 мкм (рис. 3.7). Включення розподілені нерівномірно. Великий розмір включень зовнішнього походження. Екзогенний механізм - це виникнення зародків газових бульбашок на базі дефектів торцевої поверхні. При більшому збільшенні в безпосередній близькості виявляється велика кількість дрібних сателітних включень з тим же складом фізичного стану (рис. 3.8).

Окремі ділянки шліфа містили плівкові включення по межах зерен (рис. 3.9). Ділянка має гострокутну або витягнуту форму, що позначається на якості лиття.

На мікротвердомірі ПМТ-3 визначили мікротвердість неметалічних включень. Відбитки алмазної піраміди наведені на рис. 3.10, величина мікротвердості - в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11

Мікротвердість сплаву і неметалічного включення

Місце виміру	Діагональ відбитку, мкм	Мікротвердість, МПа
Метал	24,0	161
Включення	16,5	387

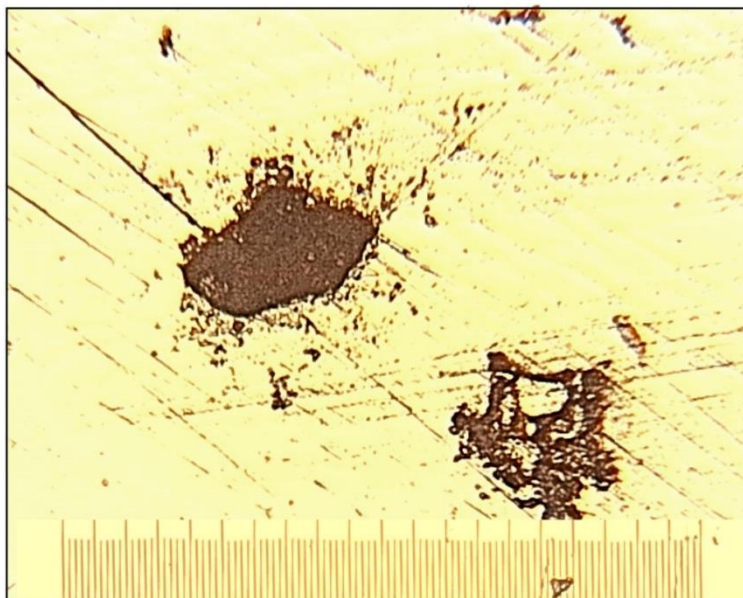


Рис. 3.7 Скупчення неметалевих включень в металі, виплавленому за старою технологією X 100

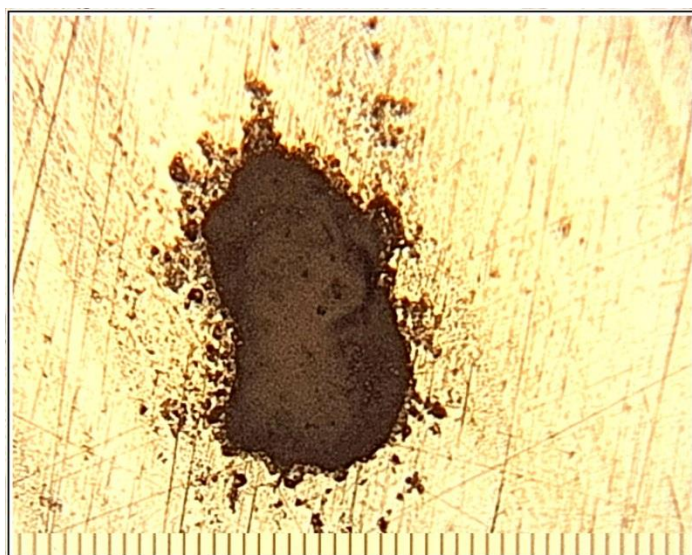


Рис. 3.8 Сателітні включення, що оточують велике неметалеve включення

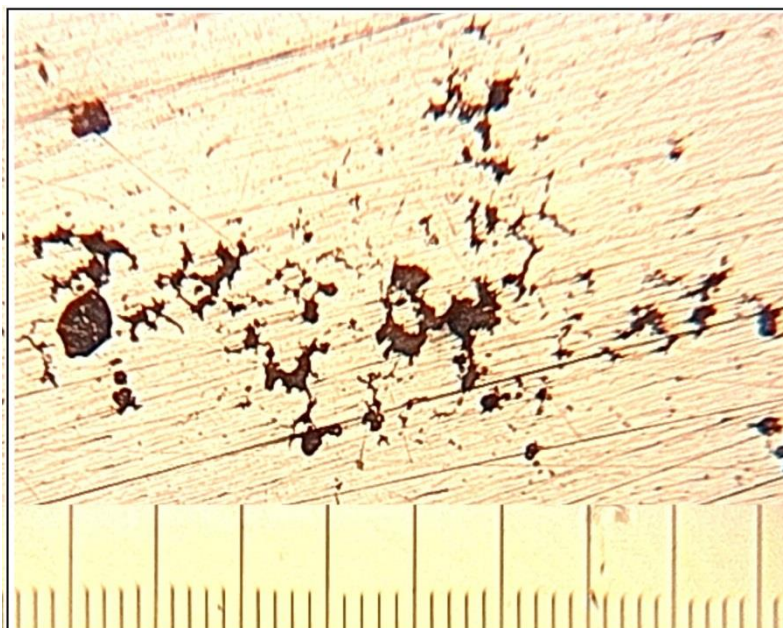


Рис. 3.9 Неметалеві включення, які орієнтовані по межам литих зерен

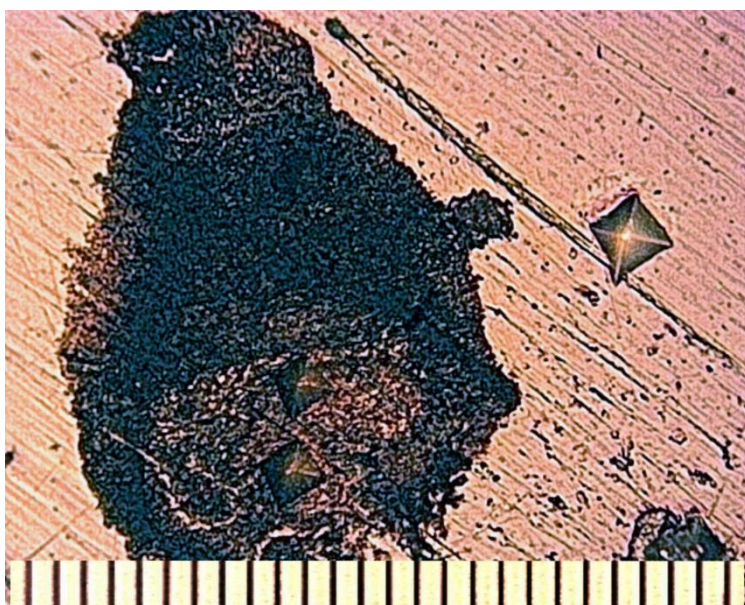


Рис. 3.10 Відбитки алмазної піраміди на поверхні металу і неметалічного включення.

На поверхні сплаву, виплавленого за новою технологією, при зазначених збільшеннях неметалічних включень розміром більше 0,5 мкм не виявлено (рис.3.11).

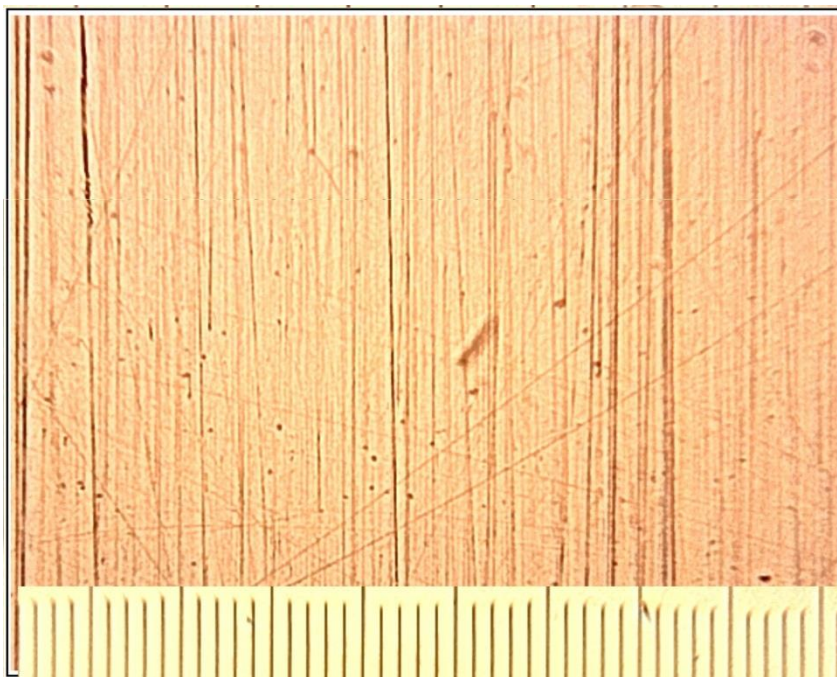


Рис. 3.11 Поверхня шліфа сплаву, виплавленого за новою технологією

Дослідження мікроструктури. Мікроструктура сплаву, виплавленого за старою технологією, складалася з дрібних світлих кутоподібних зерен твердого розчину алюмінію в магнії і темних включень g-фази (рис. 3.12).

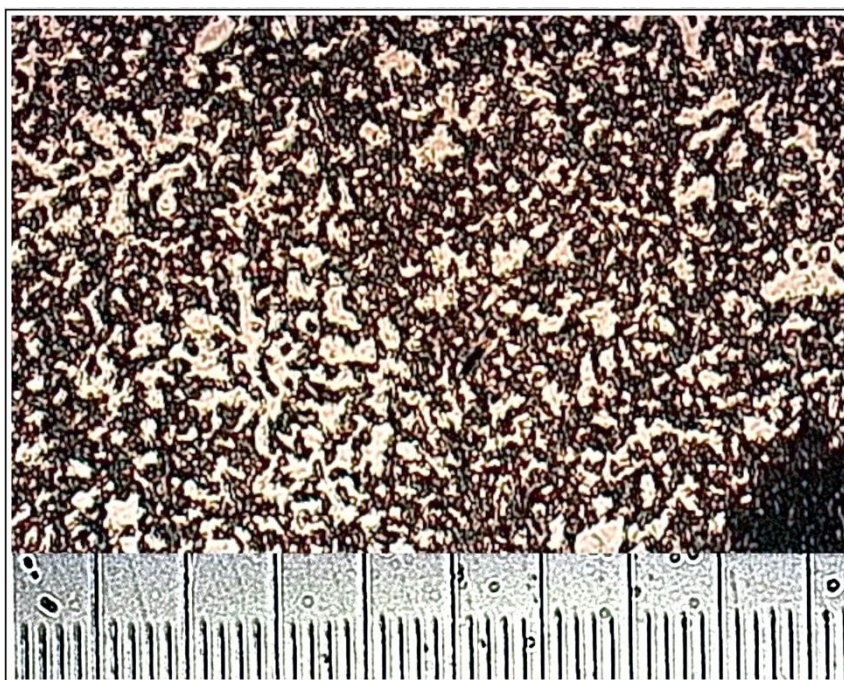


Рис. 3.12 Мікроструктура сплаву, який виплавлено по старій технології

Мікроструктура сплаву, виплавленого за новою технологією, містила світлі зерна округлої форми, оточені менш контрастними неметалічними включеннями округлої форми є концентраторами напруги, з розмірами десятки мкм, тоді як мікроструктура за старою технологією складалася лише з незграбних зерен твердого розчину, які помітно погіршують сплав. (рис. 3.13).

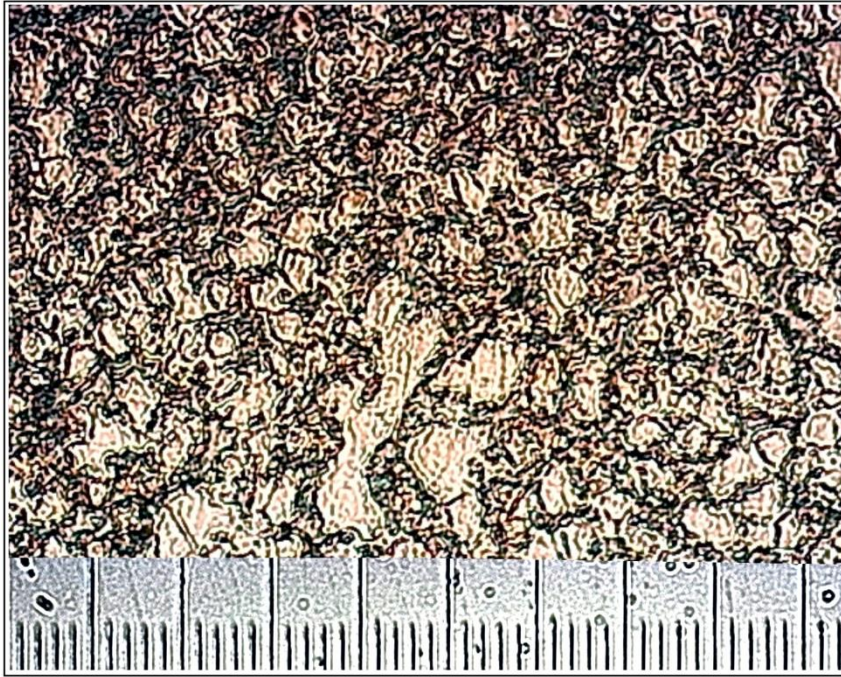


Рис. 3.13 Мікроструктура сплаву, який виплавлено по новій технології

Слід зазначити, що в металі, виплавленому за новою технологією, зустрічалися первинні дендрити α -розчину Al, рис. 3.14

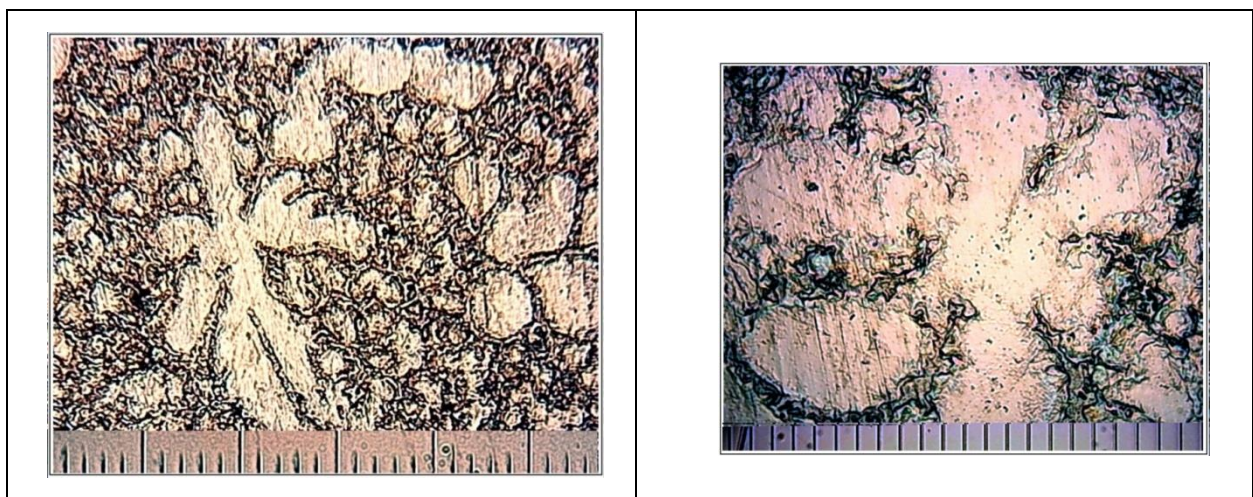


Рис. 3.14 Первинні дендрити в сплаві, виплавленому за новою технологією

3.7. Вплив технологічних параметрів газового захисту на механічні характеристики виливків з магнієвих сплавів

Механічні властивості визначаються мікроструктурою сплаву, яка в свою чергу залежить від хімічного складу та швидкості охолодження (якщо відсутні операції модифікування та термічної обробки). Оскільки хімічний склад для кожної конкретної марки сплаву регламентується ДСТУ, тому його вплив на механічні властивості при побудові математичної моделі не визначався. В рамках даних досліджень основною задачею було визначення залежності механічних властивостей від параметрів процесу.

Оскільки швидкість охолодження впливає на формування структури і властивостей виливка, то незалежними змінними вибрали ті ж змінні, що і в підрозділі 3.1 – поверхневий натяг, температуру, кількість SO_2 та SF_6 . Межі варіювання вказаних факторів такі ж як в підрозділі 3.1 (див. табл. 3.1).

В якості функції відгуку були взяті основні механічні властивості виливків із магнієвих сплавів – межа міцності, відносне видовження та твердість.

Для побудови математичної моделі, яка пов'язує механічні властивості виливка із параметрами процесу, було використано метод планування повно факторного експерименту (див. табл. 3.12). Повна таблиця результатів експериментів наведена у Додатку Л.

Таблиця 3.12

Показники параметрів процесу

№	Фактори				Відгуки		
	T (X_1)	δ (X_2)	X_3	X_4	σ_B	δ	HB
	°C	Дін/см	SO_2	SF_6	x10, МПа	%	70
1	2	3	4	5	6	7	8
1	750	471	0,6	0,05	17	2,8	83

Закінч. табл. 3.12

1	2	3	4	5	6	7	8
2	650	471	0,6	0,08	19	2,4	82
3	750	609	0,6	0,08	27	1,5	86
4	650	609	0,6	0,08	24	1,8	79
5	750	471	0,6	0,08	22	1,8	76
6	650	471	0,6	0,08	20	1,8	79
7	750	609	0,6	0,08	26	1,9	71
8	650	609	0,6	0,08	24	1,2	68
9	750	471	0,6	0,08	17	2,2	80
10	650	471	0,6	0,05	18	1,8	76
11	750	609	0,2	0,05	26	1,4	82
12	650	609	0,2	0,05	19	1,9	69
13	750	471	0,2	0,05	21	1,6	65
14	650	471	0,2	0,05	20	1,8	68
15	750	609	0,2	0,05	27	1,5	80
16	650	609	0,2	0,05	26	1,4	82
17	750	471	0,2	0,05	29	1,1	90

Обробку результатів експерименту і оцінку впливу кожного з параметрів на механічні властивості виливка проводили за допомогою регресійного аналізу. Для визначення коефіцієнтів регресії використовували програмне забезпечення STATISTICA. Результати регресійного аналізу відображені в табл. 3.13.

Таблиця 3.13

Регресійний аналіз оцінки впливу технологічних параметрів на механічні властивості виливка

Показники	σ_B	δ	НВ
b_0	48.6	2.65	48.6
b_1	0.04	0.0001	0.04
b_2	0.0026	-0.0016	0.0026
b_3	8.6	1.6	8.6
b_4	-68.58	-12.19	-68.58
F	0.34	2.03	0.34
R^2	0.1	0.4	0.1
p	0.84	0.15	0.85

В результаті було отримані наступні рівняння (3.11-3.13):

- для впливу на міцність сплаву при розтягу, σ_B , МПа

$$y_1 = (-11 + 0.023 \cdot x_1 + 0.027 \cdot x_2 - 10.36 \cdot x_3 + 98.9 \cdot x_4) \cdot 10, \text{ МПа} \quad (3.11)$$

- для впливу на пластичність сплаву, δ , %

$$y_2 = 2.65 + 0.0001 \cdot x_1 - 0.0016 \cdot x_2 + 1.6 \cdot x_3 - 12.19 \cdot x_4, \% \quad (3.12)$$

- для впливу на твердість сплаву, НВ, од.

$$y_3 = 48.6 + 0.04 \cdot x_1 + 0.0026 \cdot x_2 + 8.6 \cdot x_3 - 68.58 \cdot x_4, \text{ од.} \quad (3.13)$$

Використовуючи рівняння 3.11 була встановлена закономірність впливу основних технологічних факторів на міцність магнієвого сплаву МЛ5 при розтягу, σ_B ,

Так при зростанні температури розплаву магнієвого сплаву МЛ5 з 650 до 750 °С приріст міцності сплаву σ_B , також пропорційно зростає з 108 до 140 МПа. Слід відзначити, що у цьому випадку приріст величини σ_B , досягає 30%.

При зростанні поверхневого натягу розплаву магнієвого сплаву МЛ5 з 470 до 610 дин/см приріст міцності сплаву σ_B , пропорційно

зростає з 110 до 165 МПа . Слід відзначити, що у цьому випадку приріст величини σ_B , досягає 50%.

Навпаки, за умов зростання вмісту сірчистого ангідриду SO_2 в захисній суміші з 0,2 до 0,8% при плавленні магнієвого сплаву МЛ5 міцність сплаву σ_B , знижується з 21 до 82 МПа, тобто майже у 4 рази.

Однак, при зростанні вмісту SF_6 в захисній суміші з 0,05 до 0,08% при плавленні магнієвого сплаву МЛ5 приріст міцності сплаву σ_B , зростає з 49 до 79 МПа . Слід відзначити, що у цьому випадку приріст величини σ_B , досягає 60%.

Також була визначена максимальна та мінімальна міцність сплаву σ_B , за умов варіювання значеннями перемінних факторів в дослідницькому інтервалі, яка становила відповідно 285 МПа та 140 МПа відповідно. Тобто варіювання основними факторами в заданому інтервалі можуть змінювати величину σ_B , вдвічі.

Водночас слід відзначити, що максимальна величина σ_B , для виливків магнієвого сплаву МЛ5 перевищує аналогічні характеристики для цього сплаву, що визначені у ГОСТ 2856-79 для лиття під тиском (175 МПа) в 1,6 рази.

Використовуючи рівняння 3.12 була встановлена закономірність впливу основних технологічних факторів на пластичність (відносне видовження при розтягу) магнієвого сплаву МЛ, δ .

Так, при зростанні температури розплаву магнієвого сплаву МЛ5 з 650 до 750 $^{\circ}C$ приріст величини відносного видовження, δ пропорційно зростає з 0,07 до 0,1 % . Слід відзначити, що у цьому випадку приріст величини δ досягає 30%.

Навпаки, при зростанні поверхневого натягу розплаву магнієвого сплаву МЛ5 з 470 до 610 дін/см величина відносного видовження, δ спадає з 0,65 до 1,0 % . Слід відзначити, що у цьому випадку приріст величини σ_B , досягає 50%.

За умов зростання вмісту сірчистого ангідриду SO_2 в захисній суміші з 0,2 до 0,8% при плавленні магнієвого сплаву МЛ5 величина відносного видовження, δ зростає з 0,32 до 1,3 %, тобто майже у 3 рази.

Однак, при зростанні вмісту SF_6 в захисній суміші з 0,05 до 0,08% при плавленні магнієвого сплаву МЛ5 величина відносного видовження, δ спадає з 0,3 до 1,0 %. Слід відзначити, що у цьому випадку приріст величини σ_B , досягає 300%.

Також була визначена максимальна та мінімальна величина відносного видовження, δ за умов варіювання значеннями перемінних факторів в дослідницькому інтервалі, яка становила 3,1 % та 1,0% відповідно. Тобто варіювання основними факторами в заданому інтервалі можуть змінювати величину δ в 3 рази.

Водночас слід відзначити, що максимальна величина для виливків з магнієвого сплаву МЛ5, δ перевищує аналогічні характеристики для цього сплаву, що визначені у ГОСТ 2856-79 для лиття під тиском (1%) в 3 рази.

Використовуючи рівняння 3.13 була встановлена закономірність впливу основних технологічних факторів на твердість виливків з магнієвого сплаву МЛ5, НВ.

Так, при зростанні температури розплаву магнієвого сплаву МЛ5 з 650 до 750 °С приріст величини твердості виливків з магнієвого сплаву МЛ5 пропорційно зростає з 25 до 30 НВ. Слід відзначити, що у цьому випадку приріст величини НВ досягає 20%.

При зростанні поверхневого натягу розплаву магнієвого сплаву МЛ5 з 470 до 610 дін/см величини твердості виливків з магнієвого сплаву МЛ5 пропорційно зростає з 12 до 16 НВ. Слід відзначити, що у цьому випадку приріст величини НВ досягає 30%.

За умов зростання вмісту сірчистого ангідриду SO_2 в захисній суміші з 0,2 до 0,8% при плавленні магнієвого сплаву МЛ5 величина твердості виливків з магнієвого сплаву МЛ5 зростає незначно, лише з 2 до 6 НВ.

Однак, при зростанні вмісту SF_6 в захисній суміші з 0,05 до 0,08% при плавленні магнієвого сплаву МЛ5 величина твердості виливків з магнієвого сплаву МЛ5 спадає не значно, лише на 3 — 6 НВ.

Також була визначена максимальна та мінімальна величина твердості НВ виливків з магнієвого сплаву МЛ5 за умов варіювання значеннями перемінних факторів в дослідницькому інтервалі, яка становила 100 НВ та 80,0 НВ відповідно. Тобто варіювання основними факторами в заданому інтервалі можуть змінювати величину НВ в 1,25 рази.

3.8. Висновки до розділу 3

1. Вперше встановлені закономірності одержання магнієвих сплавів (досліджуваний сплав МЛ5 ГОСТ 2856-79) з використанням безфлюсового безперервного газового захисту розплаву на базі сірчистого ангідриду SO_2 , і співвідношення хлору Cl_2 та водню H_2 в захисній атмосфері плавильного агрегату, проведений аналіз одержаних результатів натурних і розрахункових експериментів і при цьому визначено, що на зростання корозійної стійкості цих сплавів істотно впливає вміст SO_2 (0,12-0,70 л/хв), значення якої обернено пропорційно змінюється з 7 до $12 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^2\text{год}$, тобто в 1,7 рази; встановлені також оптимальні витрати SO_2 , H_2 , Cl_2 в суміші захисних газів, які знаходяться в межах 0,12-0,25 л/хв, $3,0\text{-}4,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$ та 0,002- 0,004 $\text{ м}^3/\text{кг}$, а це дає змогу досягти мінімізації окиснюваності за критерієм масового коефіцієнту корозії виливків з магнієвого сплаву типу МЛ5 ГОСТ 2856-79 до значень $7\text{-}8 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^2\text{год}$.

2. Вперше встановлені закономірності одержання магнієвих сплавів (досліджуваний сплав МЛ5 ГОСТ 2856-79) з використанням імпульсної подачі газової суміші для захисту магнієвого розплаву, де у якості факторів були

обрані – температура T_1 і поверхневий натяг сплаву σ , вміст сірчистого ангідриду SO_2 і гексофториду сірки SF_6 , а у якості відгуку - час існування захисної плівки (до загоряння), проведений аналітично-регресивний аналіз одержаних результатів і при цьому визначено, що зростання межі руйнування захисної плівки для магнієвих сплавів Y істотно впливає вміст SO_2 (0,2-0,8 %), тобто при зростанні вмісту SO_2 значення Y обернено пропорційно спадає з 420 до 140 с, тобто зменшується втричі, встановлено також оптимальні параметри названих основних факторів впливу на імпульсну обробку розплаву магнію, які знаходяться для значень вмісту SO_2 і $\text{SF}_6, \%$, T_1 і σ в межах 660-700 і 520-550 дін/м, 3,0-4,0 $10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$ та 0,002- 0,004 $\text{ м}^3/\text{кг}$, а це дає змогу досягти підвищення порогу існування плівки на поверхні магнієвого розплаву в межах 560-620 с. Водночас встановлено, що витрати складових захисної суміші, а саме SO_2 і SF_6 , при їх імпульсній подачі в 12 та 19 разів нижча у порівнянні з технологією безперервної подачі цих захисних газів у атмосферу плавильного агрегату.

3. Досліджені також закономірності впливу названих технологічних параметрів імпульсного захисту магнієвих сплавів на прикладі МЛ5 у порівнянні з традиційним «флюсовим», за результатами аналітично-регресивного аналізу одержаних даних встановлено, що за значеннями коефіцієнту вагової корозійної стійкості, $K_{\text{ваг}}$ та глибинним показником корозійної стійкості Π , під дією атмосфери навколишнього середовища вказані характеристики для сплаву МЛ5, у одержанні якого використаний газовий захист становлять 0,008 г/м²год і 0,04 мм/рік, а при використанні традиційного «флюсового методу» аналогічні характеристики відповідають значенням 2,01 г/м²год і 10,3 мм/рік, тобто ступінь при використанні традиційних методів корозії вища в 250 і 260 разів відповідно.

4. При порівнянні результатів дослідження неметалічних включень за новою технологією у зразках з магнієвого сплаву МЛ5 неметалічних включень розмірами більше 0,5 мкм не виявлено, навпаки, у зразках з аналогічного сплаву, який одержаний з використанням традиційного «флюсового методу»

виявлено велику кількість темно-коричневих включень розміром до 500 - 600 мкм, які розподілені нерівномірно, що пов'язано з екзогенним механізмом їх виникнення з зародків газових бульбашок на базі дефектів торцевої поверхні, також виявлено в безпосередній близькості до крупних неметалевих включень велику кількість дрібних сателітних включень, тобто дослідження макро-, мікроструктури магнієвих сплавів, при одержанні яких використовується газовий захист магнієвих сплавів за створеною технологією їх плавлення дає змогу значно підвищити експлуатаційні і механічні властивості виливків з магнієвих сплавів у порівнянні з аналогами за умов використання традиційних технологій одержання високо окиснюваного розплаву з використанням захисту їх під шаром флюсу.

5. Вперше визначено вплив імпульсної дії газової захисної суміші розплаву на механічні властивості виливків з магнієвих сплавів, одержаних під високим тиском і при цьому встановлено, що за умов варіювання технологічних параметрами, такими як вміст сірчистого ангідриду SO_2 та гексофториду сірки SF_6 , поверхневого натягу і температури розплаву, значення міцності, відносного видовження та твердості сплаву МЛ5 *може знаходитись в межах 140-285 МПа, 1,1-3,1, 80-100 НВ відповідно*. Водночас, слід відзначити, що величина міцності, пластичності перевищує аналогічні характеристики для виливків з сплаву МЛ5, що визначені у ГОСТ 2856-79 для лиття під тиском у 1,5 та 3 рази відповідно.

6. Завдяки комплексному дослідженню впливу основних факторів створеної імпульсної технології, включаючи температуру T_1 і поверхневий натяг сплаву σ , вміст сірчистого ангідриду SO_2 і гексофториду сірки SF_6 , а у якості відгуків - час існування захисної плівки (до загоряння) розплаву, корозійна стійкість і механічні властивості виливків з магнієвих сплавів, стало можливим розробити вихідні данні для послідуячого створення автоматизованої системи контролю і регулювання, модернізувати плавильні та роздаткові агрегати для одержання високоякісних виливків з магнієвих сплавів, в першу чергу, за технологією лиття під тиском, включаючи вакуумовані форми.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ГАЗОВОГО ЗАХИСТУ РОЗПЛАВУ МАГНІЮ В ПЛАВИЛЬНИХ І РОЗДАТКОВИХ АГРЕГАТАХ КОМПЛЕКСІВ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ

4.1 Автоматизована система контролю та керування технологічним процесом газowego захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском

Для створення автоматизованої системи контролю та керування технологічним процесом газowego захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском використовуються дані дослідження та створення на цій основі системи рівнянь для регресивного аналізу впливу основних параметрів впливу, включаючи: поверхневий натяг і температуру розплаву магнію, а також склад таких захисних газів, як сірчистий ангідрид та гексафторид сірки (див. розділ 3.2, рівняння 3.9 і 3.10) на термін існування захисної плівки на поверхні магнієвого розплаву (до загоряння) у плавильному чи роздатковому агрегаті комплексів лиття під тиском.

Вихідні дані для створення автоматизованої системи контролю та керування технологічним процесом газowego захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском включають:

Y – відгук (вихідний параметр техпроцесу - час існування захисної плівки (до загоряння);

ΔY – відхилення від оптимального значення через відхилення факторів;

X_i – вхідні параметри техпроцесу:

X_1 – температура сплаву (T);

X_2 – поверхневий натяг сплаву (σ)

X_3 – % вміст сірчистого ангідриду SO_2 ;

X_4 – % вміст шестифтористої сірки SF_6 ;

$X_i \in [\alpha_i; \beta_i]$ – область визначення функції;

X_{i0} – параметри, що забезпечують оптимальні значення функції математичної моделі техпроцесу.

Використання на комплексі лиття під тиском інерційних параметрів температури сплаву X_1 і поверхневого натягу X_2 допомагає визначити момент загоряння. Для компенсації цих коливань в процесі змінюється кількість поданих газів X_3 і X_4 . Виходячи з цього системою створюються значення для регулювання $X_{3,i}$ і $X_{4,i}$, з відповідною областю визначення. Стратегія адаптивної системи полягає в тому, щоб технологічний процес ставив оптимальне значення всіх факторів і за їх результатами видавав узагальнений відгук. На рис. 4.1 - 4.3 представлена блок-схема роботи установки імпульсної подачі газового захисту магнієвих сплавів [131-135].

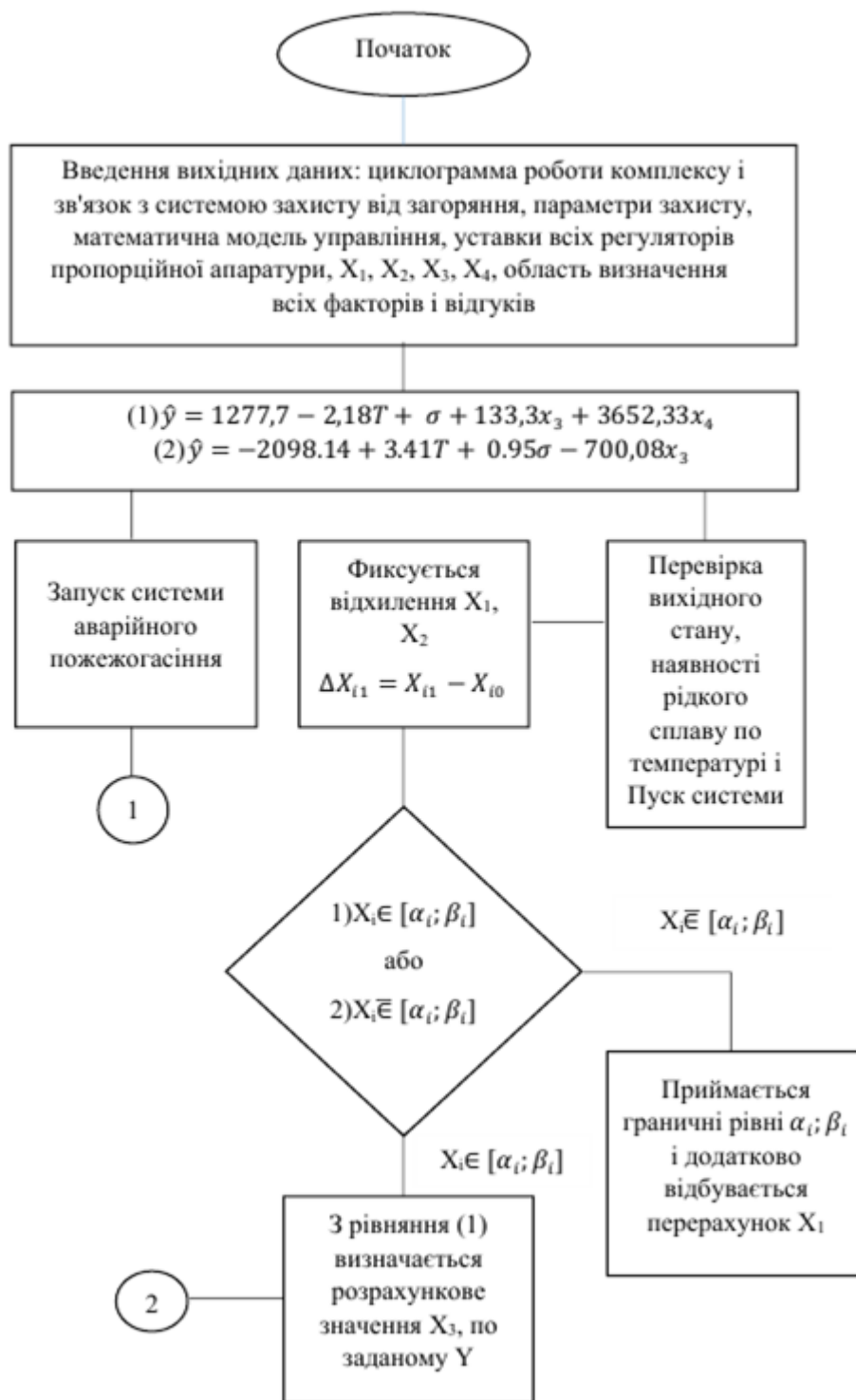


Рис. 4.1 Блок схема імпульсної системи

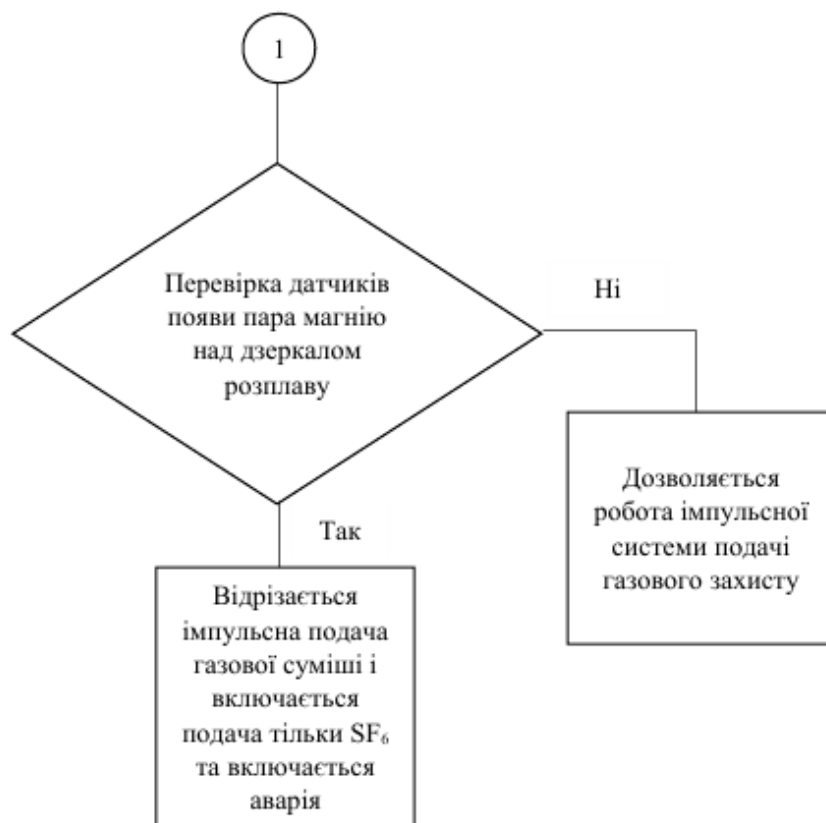


Рис. 4.2 Блок схема імпульсної системи (фрагмент)

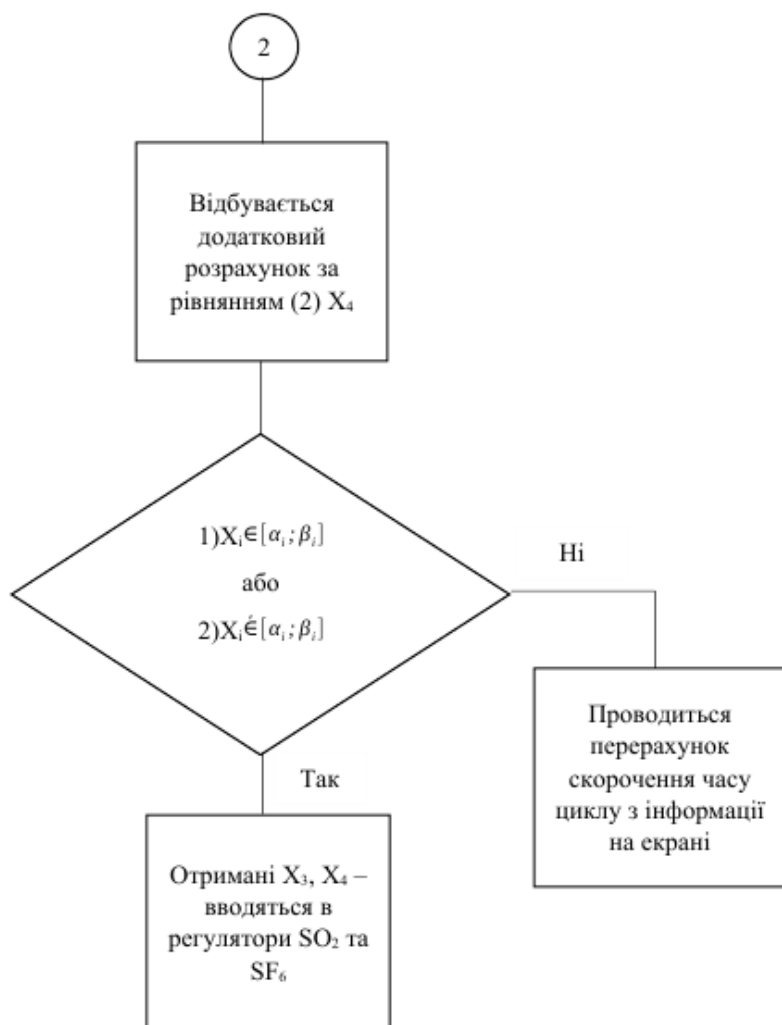


Рис. 4.3 Блок схема імпульсної системи (фрагмент)

4.2 Аналіз експлуатаційної надійності автоматизованої системи контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах

У 2015 р від Польської фірми Batax була отримана статистична інформація по експлуатаційній надійності системи газового захисту магнієвих сплавів, яка використовується на діючому виробництві, від загоряння з постійною подачею активних газів на «дзеркало» рідкого сплаву. Статистична інформація була отримана в результаті обробки експлуатаційних журналів

діючого виробництва за 2 роки роботи. У Додатку И представлено інформація у вигляді варіаційних рядів, за напрацюваннями в цілому, по системі, яка підлягає і не підлягає ремонту, який передбачає заміну елементів системи, що вийшли з ладу.

Система управління характеризується такими параметрами надійності:

- параметр потоку відмов;
- середній час відновлення;
- коефіцієнт технічного використання;
- загальним коефіцієнтом використання.

Сумарне напрацювання визначалося як сума напрацювань на всі відмови за трьома варіантами (4.1)

$$T_{p1} = \sum_{i=1}^n t_i ; T_{p2} = \sum_{j=1}^n t_j ; T_{p3} = \sum_{k=1}^n t_k ; T_{p4} = \sum_{q=1}^n t_q \quad (4.1)$$

В якості критерію оцінки напрацювання на відмову приймалося середнє арифметичне значення (4.2)

$$T_{p1,p2,p3,p4} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{i,j,k,q} \quad (4.2)$$

Обробка отриманої статистичної інформації дозволила отримати параметри експлуатаційної надійності робочої системи: для системи в цілому 334 год, для ремонтуємої системи (4.4)

$$T_{02} = \frac{4727}{16} = 295 \text{ годин} \quad (4.4)$$

- для неремонтуємої системи (4.5)

$$T_{03} = \frac{4557}{12} = 379 \text{ годин} \quad (4.5)$$

- інтенсивність відмов для системи в цілому

$$\lambda = \frac{1}{332} = 3 \times 10^{-4} \quad (4.6)$$

4.3. Дослідження надійності автоматизованої системи контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах за час тривалої експлуатації

З метою отримання показників надійності за більш короткі терміни прийнята методика прискорених випробувань. Суть зазначеної методики полягає в тому, що випробування з посиленими факторами експлуатаційного впливу передбачають одночасні випробування імпульсної подачі захисних газів і базової системи з відомими експлуатаційними показниками надійності. З огляду того, що два таких варіанти мають однакову фізичну природу відмов, а значить і лінійну кореляційну залежність, розроблена і випробувана методика дозволяє перерахувати отримати результати роботи нової системи імпульсної подачі в умовах тривалої експлуатації. Дана методика передбачає, що рівень впливу посилених умов навколишнього середовища і темпу роботи не виходить за рівень фізичної природи відмов.

Для елементів з однаковою фізичною природою відмов функції розподілу щільності ймовірності безвідмовної роботи мають однаковий параметр форми і розрізняються параметрами масштабу. Інтенсивність відмов, як функція часу і властивостей середовища (T , E_1 , E_2) встановлюється виразом (4.7).

$$\lambda(t_1, E_1) = \varphi[\lambda_m(t, E_2)] \quad (4.7)$$

Ця функція неубутна і монотонна. Форсовані випробування, які дозволяють отримати показники надійності перспективних елементів в більш короткі терміни в порівнянні з експлуатаційними, передбачають більш жорсткі режими впливу за умови збереження експлуатаційної природи відмов (4.8).

$$E_{\text{лаб}} \ll E_{\text{екс}} \ll E_{\text{ф}} \ll E_{\text{екс}} \quad (4.8)$$

Для аналізу експлуатаційної надійності в ДП «Інженерний центр» був створений і апробований комплекс лабораторного обладнання для випробувань в умовах посилених експлуатаційних впливів (рис.4.4).

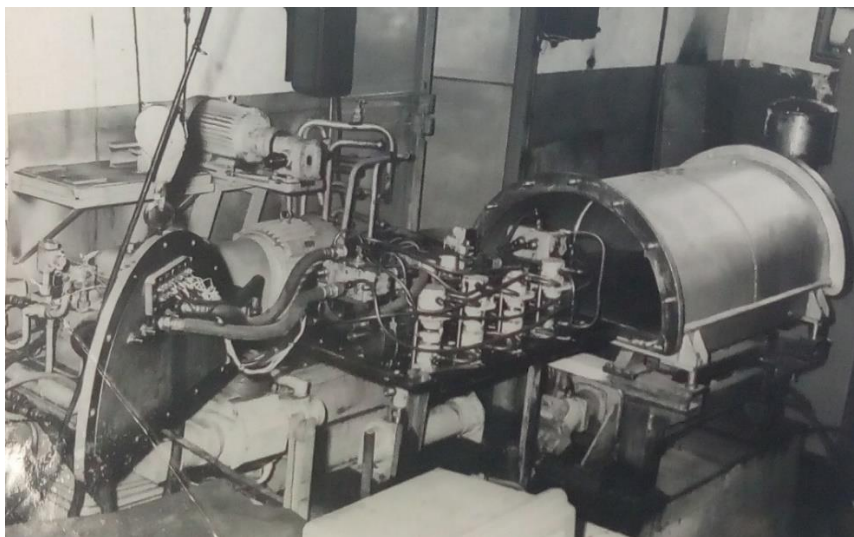


Рис. 4.4 Комплекс для випробувань в умовах експлуатаційних впливів

Герметична камера з висувним столом для монтажу систем для випробування обладнана пристроями автоматичної подачі в камеру складових експлуатаційних впливів: пил, вологість, газ, вібрація і регулювання температури. Кожен з експлуатаційних впливів з урахуванням їх посилення працює за індивідуальним циклом коливання мінімального і максимального рівня. Принципова схема камери з мікрокліматом (рис.4.5).

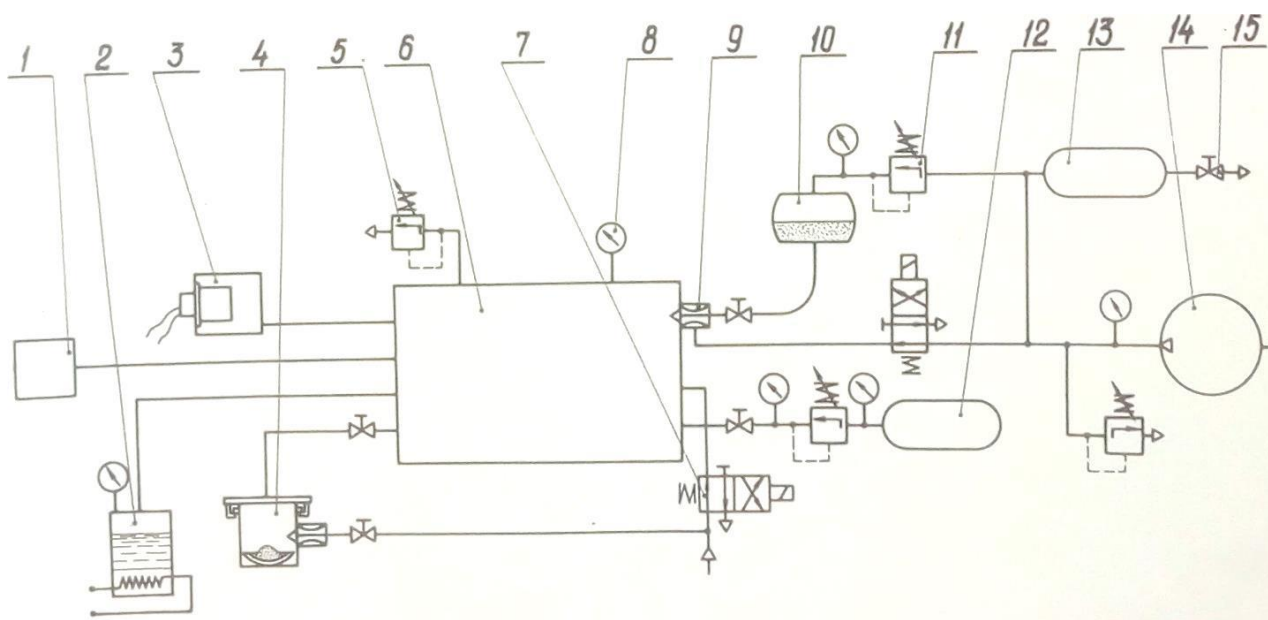


Рис. 4.5 Схема камери з мікрокліматом: 1 - пиліметри, 2 - пристрій для регулювання вологості, 3 - психрометр, 4 - пристрій подачі в камеру оксидів, 5 - запобіжний клапан, 6 - камера, 7 - пневморозподільник для продувки камери

повітрям, 8 - манометр, 9 - пневматичне кероване сопло, 10 - бункер з пилом, 11 - редукційний клапан, 12 - ресивер для загазованого повітря, 13 - ресивер для чистого повітря, 14 - компресор, 15 - вентиль.

Температурний інтервал розбитий на 15-хвилинні цикли, з регулюванням від 20 до 100 °С зі зміною віброзміщення. Всі параметри автоматично регулюються по віброприскоренню до 450 м/с². Система подачі пилу забезпечує визначений програмою рівень запиленості по ваговій кількості в одиниці об'єму та дисперсності. Подача пилу здійснюється через кероване пневматичне сопло. Поточним ультрамікроскопом типу BDK-4 визначається потрібна дисперсність пилу. Показання ультрамікроскопу за кількістю спалахів у всіх положеннях клину повинні бути близькі відповідними показниками в експлуатаційних умовах.

Камера обладнана від рампи засобами подачі сірчистого ангідриду і оксиду магнію, як факторів навколишнього середовища. Подача оксиду магнію створюється підпалом зварювального електрода в спеціальній камері з регульованою подачею повітря. Контроль загазованості здійснюється газоаналізатором, використовується тип УГ-2. Вологість регулюється паровиком, а рівень вологості реєструється психрометром ПЕ. Рівень вологості контролюється автоматичним включенням і відключенням нагрівача. Управління здійснюється електронним пристроєм психрометром ПЕ.

Подача стисненого повітря і електричної напруги для циклового навантаження клапанів забезпечується через передню кришку камери гнучкими рукавами і проводами.

Прискорення випробувань проводиться як за рахунок підвищення рівня впливу атмосфери камери, так і за рахунок зміни циклічного режиму роботи. В якості вихідних даних для прискорених випробувань необхідно досліджувати параметри експлуатаційних впливів - отримати їх мінімальні, середні та максимальні значення.

Експериментальний зразок системи захисту магнієвих сплавів, від загоряння, виготовлений на фірмі «Вамах» в цеху магнієвого лиття при створенні технологічного процесу лиття біметалевих радіаторів - конвекторів з магнієвого сплаву AZ91D (аналог МЛ5 ГОСТ2856-79).

Система управління на базі контролера фірми «Siemens» Simatic S7-1200. Програмування і конфігурацію систем виконано за допомогою пакету програм STEP 7 Basic. Центральний процесор CPU1214C має три входи швидкісного рахунку до 100 гц і три входи до 30 гц, два аналогових входи 0 - 10 В і 14 дискретних = 24В і 10 дискретних виходів - 24В, до 2 А.

Додаткові модулі:

- SM1223 на 16 входів і 16 виходів;
- модуль введення термопарних сигналів на 4 входи;
- модуль напівпровідникових реле.

У комплект системи управління входить панельний комп'ютер.

Система управління камерою дозволяє створити необхідні форсовані режими, фіксування технологічних параметрів і експлуатаційну безпеку. В якості експлуатаційних впливів були забезпечені чинники (табл.4.1).

Таблиця 4.1

Експлуатаційні впливи, що створюються в камері

№	Параметр	Од. виміру	Величина
1	2	3	4
1	Запиленість установки	мг/м ³	50-80
2	Запиленість електрошафи	мг/м ³	15-25
2	Вологість установки	%	70-90
3	Вологість електрошафи	%	60-70
4	Загазованість аерозолем магнію (в печі)	г/с	0,0008

Закінч.табл.4.1

1	2	3	4
5	Температура установки	°C	60-80
6	Температура електрошафи	°C	60-70
7	Вібрація	Гц	До 100
8	Віброзміщення установки	см	$20 \cdot 10^{-4}$
9	Віброзміщення електрошафи	см	$8 \cdot 10^{-4}$
10	Віброшвидкість установки	см/сек	1,26
11	Віброшвидкість електрошафи	см/сек	0,4
12	Віброприскорення установки	см/сек ²	88,8
13	Віброприскорення електрошафи	см/сек ²	21,0

Надійність системи управління і програмного забезпечення визначається з одного боку такими станами як «збій», «зупинка в роботі», так і «часом зниження надійності» в результаті зносу, міцності і хімічних реакцій. Крім того, існує дуже важлива причина зниження надійності - відхилення технологічних параметрів за поле допуску технологічного процесу. Причиною є вплив сукупності навантажень і властивостей середовища [136].

Аналітичний спосіб зводиться до загальних прийомів отримання статистичних оцінок зв'язку за даними вибірок між випадковими величинами $\lambda^{(0)}$ та $\lambda^{(1)}$.

Розглядаються пов'язані значення:

$$(\lambda_{\text{лаб}}^{(0)}; \lambda_{\text{лаб}}^{(1)}), (\lambda_1^{(0)}; \lambda_1^{(1)}), (\lambda_2^{(0)}; \lambda_2^{(1)}) \quad (4.9)$$

де $\lambda^{(0)}$ – інтенсивність відмов для елемента з відомими експлуатаційними параметрами надійності при відповідних рівнях впливу;

$\lambda^{(1)}$ – інтенсивність відмов досліджуваного елемента.

$$\lambda_{\text{лаб}}^{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{лаб}}^{(0)}; \lambda_1^{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{1i}^{(0)}; \lambda_2^{(0)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{2i}^{(0)} \quad (4.10)$$

$$\lambda_{\text{лаб}}^{(1)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{\text{лаб}}^{(1)}; \lambda_1^{(1)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{1i}^{(1)}; \lambda_2^{(1)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_{2i}^{(1)} \quad (4.11)$$

Де значення n визначається заданим рівнем довірчої ймовірності.
Обчислюються кореляційні характеристики:

Середні

$$\bar{\lambda}^{(0)} = \frac{1}{3} (\lambda_{\text{лаб}}^{(0)} + \lambda_1^{(0)} + \lambda_2^{(0)}) \quad (4.12)$$

$$\bar{\lambda}^{(1)} = \frac{1}{3} (\lambda_{\text{лаб}}^{(1)} + \lambda_1^{(1)} + \lambda_2^{(1)}) \quad (4.13)$$

Дисперсії

$$S_{\lambda^{(0)}}^2 = \frac{1}{3} \left[(\lambda_{\text{лаб}}^{(0)})^2 + (\lambda_1^{(0)})^2 + (\lambda_2^{(0)})^2 \right] - (\bar{\lambda}^{(0)})^2 \quad (4.14)$$

$$S_{\lambda^{(1)}}^2 = \frac{1}{3} \left[(\lambda_{\text{лаб}}^{(1)})^2 + (\lambda_1^{(1)})^2 + (\lambda_2^{(1)})^2 \right] - (\bar{\lambda}^{(1)})^2 \quad (4.15)$$

Момент зв'язку

$$m_{\lambda^{(0)}\lambda^{(1)}} = \frac{1}{3} (\lambda_{\text{лаб}}^{(0)} \times \lambda_{\text{лаб}}^{(1)} + \lambda_1^{(0)} \lambda_1^{(1)} + \lambda_2^{(0)} \lambda_2^{(1)}) - \bar{\lambda}^{(0)} \bar{\lambda}^{(1)} \quad (4.16)$$

Коефіцієнт регресії $\lambda^{(1)}$ на $\lambda^{(0)}$

$$\beta_{\lambda^{(1)}/\lambda^{(0)}} = r \frac{S_{\lambda^{(1)}}}{S_{\lambda^{(0)}}} \quad (4.17)$$

Розрахункове значення

$$\lambda_{\text{експ}}^{(1)} = \beta_{\lambda^{(1)}/\lambda^{(0)}} \times \lambda_{\text{експ}}^{(0)} \quad (4.18)$$

Дані тривалих випробувань базової системи, за допомогою, зазначеної вище методики були оброблені і отримані наступні результати:

$$\lambda_{\text{експ}}^{(0)} = 3 \times 10^{-4}; \lambda_{\text{експ}}^{(1)} = 2 \times 10^{-4} \quad (4.19)$$

$$\beta_{\lambda^{(1)}/\lambda^{(0)}} = 0,76 \quad (4.20)$$

В результаті обробки даних (Додаток И) отримано таке значення інтенсивності відмов:

$$\lambda_{\text{нов.приск}}^{(1)} = 30 \times 10^{-4} \quad (4.21)$$

В результаті обробки даних (Додаток К) отримано таке значення інтенсивності відмов:

$$\lambda_{\text{стар.приск.}}^{(0)} = 39 \times 10^{-4} \quad (4.22)$$

Методика, яку використано для визначення експлуатаційної надійності, заснована на форсованих порівняльних випробуваннях. У ній враховуються дані з системи, для якої відомі експлуатаційні показники надійності. Це дозволило з заданим рівнем довірчої безпеки отримати прогнозовані експлуатаційні характеристики надійності нової імпульсної системи подачі захисних газів. Отримані результати дозволили створити систему з додатковими якостями для вирішення важливої вимоги - надійності. При зупинці системи перевіряються стан «входів» і «виходів» по таблиці тактів і виводиться на екран невідповідність. Незважаючи на більш складну функціональну систему прогнозований рівень надійності виявився вищим, ніж в системі, яку ми використовували раніше. Такі результати були отримані за рахунок:

- використання сучасних комплектуючих для контролю витрат активних газів і вмісту кисню;
- введення в систему резервування активних газів з можливістю автоматичного переходу на резервні балони;
- використання коштів програмного управління за рахунок контролю часу кожного робочого такту циклу роботи.

4.4. Висновки до розділу 4

1. Автоматизована система контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском використовує дані щодо дослідження та створення на цій основі системи рівнянь для регресивного аналізу впливу основних технологічних параметрів, включаючи: поверхневий натяг і температуру розплаву магнію, а також складу захисних газів, як сірчистий ангідрид та гексафторид сірки на термін існування захисної плівки на поверхні магнієвого розплаву (до загоряння) у плавильному чи роздатковому агрегаті комплексів

лиття під тиском та реалізована у вигляді блок-схеми впливу, взаємодії і пошуку оптимуму для 4 основних параметрів: температури, поверхневого натягу розплаву, витрати захисних газів, таких як сірчистого ангідриду та гексофториду сірки до заданої межі руйнування (загоряння) захисної плівки магнієвого розплаву.

2. Проведено аналіз експлуатаційної надійності створеної системи контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском за визначеними характерними ознаками надійності: параметр потоку відмов; середній час відновлення; коефіцієнт технічного використання; загальним коефіцієнтом використання з статистичної обробкою інформації, яка була отримана в результаті дворічної експлуатації створеної системи керування процесами лиття магнієвих сплавів з газовим захистом розплаву, яка оброблялась у вигляді варіаційних рядів, за напрацюваннями в цілому, по системі, яка підлягає і не підлягає ремонту, який передбачає заміну елементів системи, що вийшли з ладу. Обробка отриманої статистичної інформації дозволила визначити параметри експлуатаційної надійності робочої системи: для системи в цілому 334 год, для системи, що підлягає ремонту - 295 год, для системи, що не ремонтується 379 год, а інтенсивність відмов для системи в цілому не перевищує значення 3×10^{-4} 1/год.

3. З метою отримання показників надійності автоматизованої системи контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском адаптована методика та створений комплекс для її реалізації в умовах експлуатаційних впливів експлуатації прискорених випробувань, у якій передбачається одночасні випробування імпульсної подачі захисних газів і базової системи з відомими експлуатаційними показниками надійності, що дозволяє розрахувати отримані результати для нової системи імпульсної подачі захисних газів в умовах її тривалої експлуатації.

4. Проведено прискорені випробування системи імпульсної подачі газового захисту, які передбачають одночасні випробування імпульсної подачі захисних газів з відомими експлуатаційними показниками надійності базової системи захисту під флюсом. При цьому встановлено, що інтенсивність відмов для системи захисту поверхні розплаву магнію не перевищу значення 30×10^{-4} 1/год, а аналогічний показник для систем захисту розплаву магнію під флюсом становить 39×10^{-4} 1/год, тобто інтенсивність відмов при використанні базового методу на 30% вища ніж при методі захисту рідкого магнію у газовому захисному середовищі.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ, ОБЛАДНАННЯ І ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА ВИЛИВКІВ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ІМПУЛЬСНОГО ГАЗОВОГО ЗАХИСТУ МЕТАЛУ В ПЛАВИЛЬНИХ І РОЗДАТКОВИХ АГРЕГАТАХ КОМПЛЕКСУ ЛИТТЯ ПІД ТИСКОМ

Відповідно до мети дисертаційної роботи встановлені закономірності одержання магнієвих сплавів на основі дослідження закономірностей впливу безперервного та імпульсного захисту газовою сумішшю, включаючи сірчистий ангідрид SO_2 , хлор Cl_2 , водень H_2 і гексофторид сірки) та варіюванням температурою T_1 і поверхневим натягом сплаву σ на окиснюваність, межі загорання і руйнування поверхневої плівки в металоємних плавильних агрегатах, корозійної стійкості та механічних властивостей виливків з магнієвих сплавів (на основі МЛ5 ГОСТ 2856-79) при їх одержанні литтям під тиском були розроблені технологічні процеси плавлення магнієвих сплавів в захисній газовій атмосфері з безперервною чи імпульсною їх подачею в плавильний чи роздатковий агрегат, а також автоматизована система контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском з оцінкою їх надійності при довготривалій експлуатації в промислових умовах в серійному та масовому виробництві виливків з магнієвих сплавів.

Водночас було створено чи доопрацьовано обладнання і автоматизовані системи управління комплексу лиття під високим тиском магнієвих сплавів для реалізації створених технологічних безперервних та імпульсних процесів газового захисту розплаву магнієвих сплавів при їх плавленні та зберіганні в складі комплексу лиття під тиском. Порівняння старої і нової технології схематично представлено у Додатку Ж.

Також, для підвищення якості тонкостінного лиття з магнієвих сплавів під тиском була додатково розроблена технологія вакуумування форми при

виготовленні виливків з магнієвих сплавів при литті під тиском, яка наведена у розділі 5.1.

Для промислової перевірки вищезгаданих і створених нових технологій, обладнання та його модернізації, систем управління процесами одержання виливків з магнієвих сплавів з використанням комплексів лиття під тиском стало необхідним провести серію експериментів безпосередньо в промислових умовах.

5.1. Технологічний процес та обладнання для одержання виливків з магнієвих сплавів у вакуумованих формах литтям під тиском

Активні гази, такі, як водень, азот надходять у виливок, змішуючись при заповненні форми турбулентним і дисперсним потоками. Використання вакуумування форми, як це робиться при литті алюмінієвих сплавів, не представляється можливим, тому що магній випаровується.

У даній роботі для зниження загазованості в литві автором запропоновано технологічне рішення по використанню вакуумування форми в режимі виключення виходу з форми парів магнію. Технологічний процес передбачає використання лабіринтового відсмоктування повітря з форми.

Експериментом необхідно встановити:

- мінімальний по висоті перетин лабіринту відсмоктування;
- температуру лабіринту для охолодження холодильником, в якості матеріалу використовувати червону мідь;
- визначити кількість хвиль лабіринту і їх ширину;
- визначити достатню температуру лабіринту по контуру охолодження;
- дослідити втрати сплаву при запресовуванні.

Незважаючи на всі переваги вакуумування прес-форми при литті під тиском для лиття магнієвих сплавів техпроцес вакуумування не знаходить практичного застосування. Це пов'язано з тим, що магнієвий сплав починає

випаровуватися, що знижує якість лиття по газонасиченості і втраті сплаву[137-145].

У даній роботі запропонований метод вакуумування, що дозволяє використовувати цей виключно ефективний елемент технологічного процесу.

Для розуміння пропозиції розглянуті два варіанти алюмінієвого лиття і магнієвого. У представленій таблиці вихідних даних очевидна можливість використання процесу вакуумування при литті під тиском. Кристалізація алюмінієвого варіанту радіатора більше 30 сек, тоді як у того ж типорозміру магнієвого радіатора близько 10 сек. У виробництві це означає підвищення продуктивності лиття. У табл.5.1 наведено фізичні характеристики процесу виготовлення радіатора з алюмінієвого і магнієвого сплаву.

Таблиця 5.1

**Фізичні характеристики процесу виготовлення радіатора з
алюмінієвого і магнієвого сплаву**

Фізичні характеристики		
Питома вага, кг/дм ³	2,7	1,7
Прихована теплота плавлення, ккал/кг	92,4	58
Температура плавлення, °C	658	651
Відповідність обсягів, %	100	63

Так як прихована теплота плавлення алюмінієвого і магнієвого сплаву відрізняються в 1,6 рази, було запропоновано підвищити ефективність кристалізації магнієвої виливки за рахунок використання лабіринтового відсікача. Було вирішено виготовити повітрівідвод з мідного сплаву. Максимальне зниження висоти щільного повітрівідводу - 0,6 мм. Контур охолодження підтримує температуру 4 °C.

Необхідно використовувати в якості технологічного обладнання машину з гарячою камерою пресування, що виключає можливість захоплення при вакуумуванні парів і сплавів з холодної камери пресування.

Результати експерименту показали, що ефективність роботи лабіринтового відсікача досить висока. Кристалізація як парів магнію так і дисперсної складової рідкого сплаву забезпечується хвилями відсікача. Розміри лабіринтового відсікача вказані вище. Два паралельних хвильових контуру досить надійно перекривають вакуумний вихід прес-форми. На другу хвилю густина знижується на 15 - 20%, що відповідає фізичному процесу.

Схему вакуумування, циклограму роботи, систему герметичності площині роз'єму форми перевіряли експериментально на ефективність. В результаті експериментів виявилось, що був усунутий такий дефект виливків, як газова пористість.

Прес-форма була обладнана лабіринтовим каналом для вакуумування форми в момент початку запресування (рис.5.1). Надалі це підтвердило правильність рішення, завдяки тому, що цей канал мав низьку температуру, повітря з форми видалялось, а магній не проходив. Лабіринтові ущільнення для алюмінію і магнієвого варіанту показані на рис. 5.2

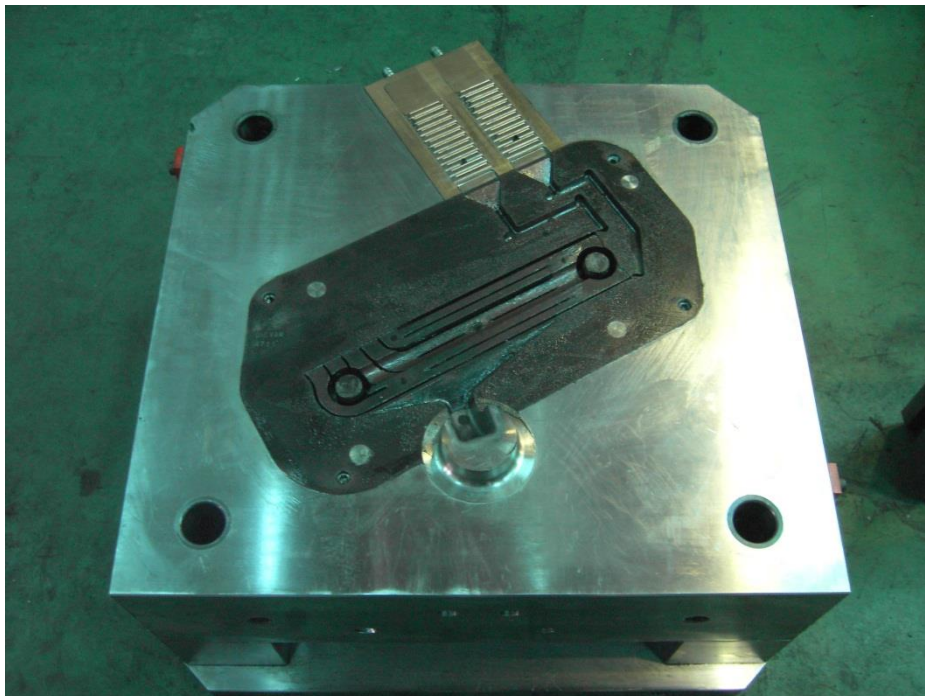


Рис. 5.1 Нерухома частина прес-форми для виготовлення радіаторів з магнієвих сплавів на машині лиття під тиском



Рис. 5.2 Лабіринтові ущільнення. 1- магнієвий варіант, 2- алюмінієвий варіант

Переваги лиття під тиском з використанням вакуумування форми досить відомі:

- зниження газової пористості і як наслідок підвищення герметичності і механічної міцності виливків;
- поліпшення умов заповнення форми (рідкоплинності) і як наслідок можливість зниження температур сплаву і форми, а це зменшення турбулентності, гідравлічного удару і температурних навантажень на форму;
- різке зниження засмічення виливка за рахунок відсмоктування надлишкової складової технологічних захисних мастил - виняток на поверхні виливків слідів, плям і спаїв;
- виключаються промивники, що дає економію металу [146].

Вакуумування форми в цілому, крім зазначених вище переваг, дозволяє використовувати такі технологічні процеси як термообробку, герметичне

зварювання і якісні гальванічні покриття. Схема представлена на рис.5.3.

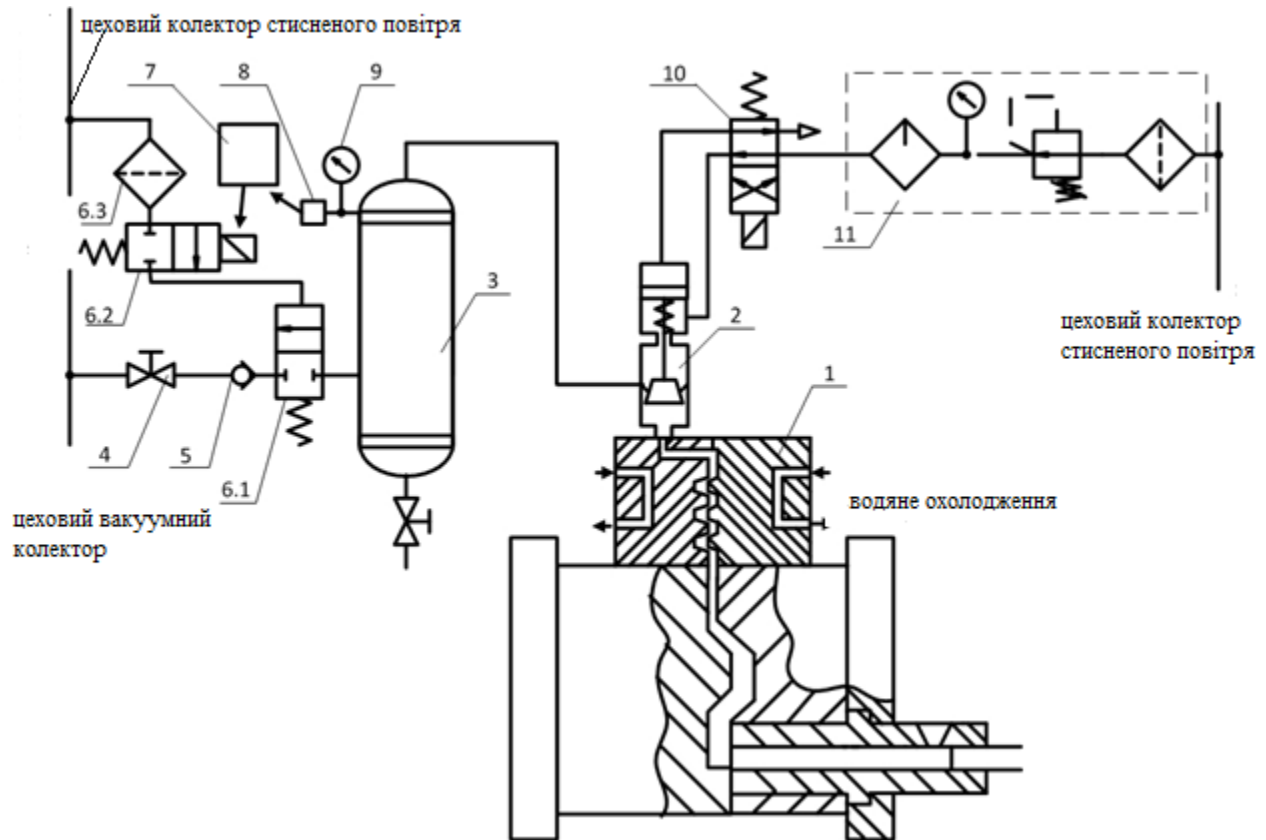


Рис. 5.3 Схема вакуумування прес-форми та роздавальної печі

1 - лабіринтовий відсікач; 2 - вакуумний клапан; 3 - вакуумний ресивер 500 л.; 4 - кульовий кран L100N206; 5 - зворотний клапан VNR201 - 01; 6.1 - відсічний клапан VNC10006; 6.2 - пневморозподільювач серії A A331 - 102; 6.3 - фільтр; 7 - регулятор; 8 - електронне реле вакууму SWDN - V01; 9 - вакуумний манометр; 10 - розподільник серії 9 952 - 000-15-23 IL; 11 - блок підготовки повітря MC238 – C- 25.

З огляду на зазначені переваги виключно важливо мати відпрацьовані елементи вакуумної системи і конструктивні елементи машини, що забезпечують необхідну герметизацію, що встановлюється на машині у прес-формі. З цією метою прес-форма, обладнана вакуумною системою для відпрацювання засобів, що відносяться до машини: ресивер, клапанна система із засобами управління, контролю і охолодження було застосовано для дослідження і відпрацювання засобів герметизації форми.

Форма для виливка була обладнана під час проведення випробувань вакуумним датчиком SITRANS (код 7MF1564-5BA00-1AA1), встановленим на фальшпоршні, як на самій віддаленій ділянці від місця підведення вакууму в форми.

Над прес-формою, встановленою на машину лиття під тиском з датчиком і повністю підключеної до вакуумної системи машини, були проведені дослідження з метою створення засобів доопрацювання форми щодо забезпечення герметичності і параметрів повітревідводу.

Машина ЛПТ працювала в автоматичному циклі на холостому режимі; для забезпечення можливості роботи вузла пресування в такому режимі був видалений подовжувач між штоком і прес-поршнем.

З метою виключення поломки поршня циліндра пресування демпфірування (гальмування) прес-поршня було відрегульовано з досить великим випередженням.

Для вирішення завдання підвищення герметичності форми були розроблені конструктивні елементи периферійної герметизації форми і лабіринтових вставок. В якості еластичного елемента ущільнювача використовувався високотемпературний синтетичний шнур Д14 мм з робочим діапазоном температур до 300 °С.

При проведенні випробувань виконувався запис і зберігання в пакеті кривих шляху прес-поршня і тиску в прес-формі.

Друга серія експериментів проводилася з герметизацією периметра обойми напівформи. При цьому рівень вакууму піднявся до рівня (- 0,025 МПа), що є також недостатнім.

Подальший напрямок по шляху герметизації форми потребував провести герметизацію прес-камери і лабіринтових вставок. Останнє було виконано за допомогою установки еластичної високотемпературної прокладки по контуру змикання форми. При цьому для оцінки впливу тільки ущільнення лабіринтових вставок, ущільнення периметра було демонтовано. Крива тиску, яка схожа на криву тиску в другій серії експериментів. Рівень вакууму був

практично на тому ж рівні ($-0,025$ МПа). На робочих ділянках вакууму: включення, набору рівня, витримки характер кривих збігався з результатами першої серії експериментів [147-152].

Використання всіх передбачених засобів ущільнення як периметра обойми, лабіринтових вставок і прес-склянки дало позитивні результати. Рівень вакууму піднявся до значення ($-0,066$ МПа), що є достатнім. Подальше підвищення рівня вакууму технологічно неприпустимо, тому що викликає випаровування сплаву. Все це відображено на графіку (рис.5.4).

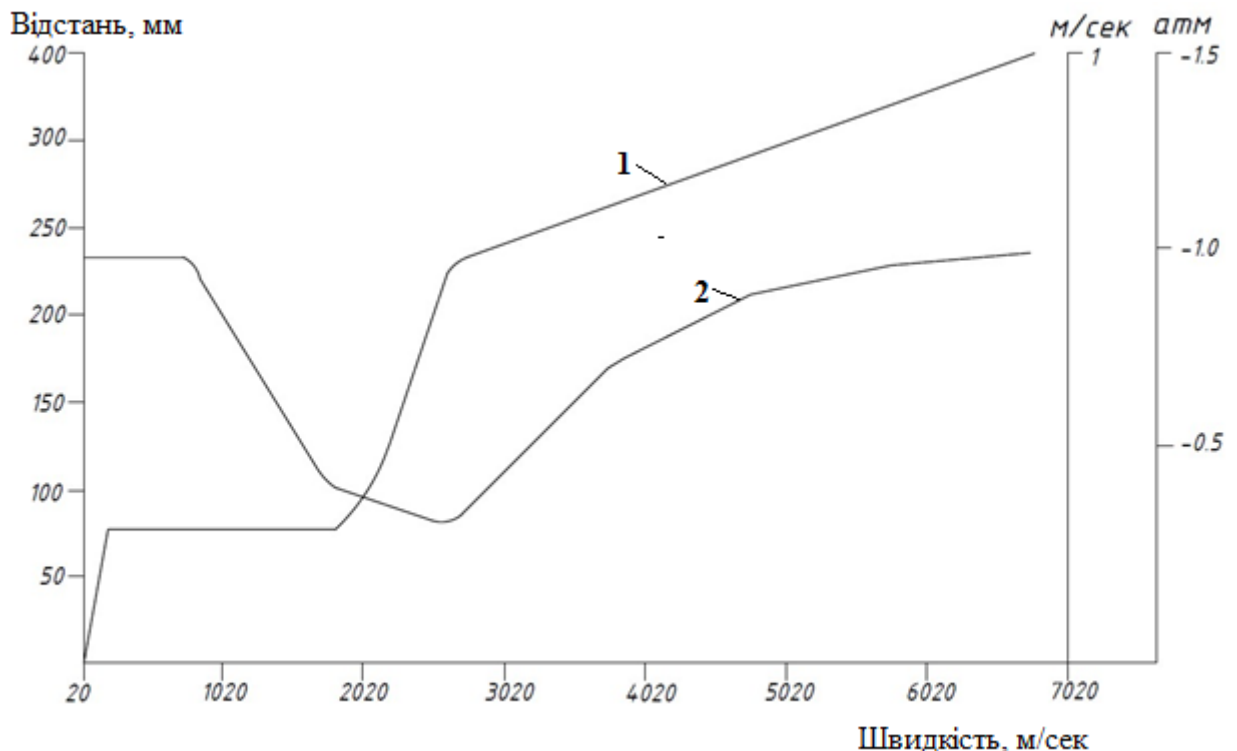


Рис. 5.4. Графік вакуумування форми: 1 - шлях переміщення штоку. 2 – тиск в порожнині форми

5.2. Вибір продукції для реалізації технології одержання виливків магнієвих сплавів з використанням імпульсного газового захисту металу в плавильних і роздаткових агрегатах комплексу лиття під тиском

Для ефективної оцінки технології одержання виливків магнієвих сплавів з використанням імпульсного газового захисту металу в плавильних і

роздаткових агрегатах комплексу лиття під тиском цілковито підходить лита конструкція біметалевого радіатора-конвектора, при виготовленні якого з магнієвого сплаву стане можливим одержати найвищі експлуатаційні характеристики, включаючи: коефіцієнт теплового опору, металоємність, конструктивну міцність і довговічність, в порівнянні з аналогічною продукцією з традиційних алюмінієвих сплавів.

Саме біметалеві радіатори використовуються сьогодні на сучасних будівництвах, у яких робочий тиск теплоносія досягає 3,5 МПа, а допустиме значення рН теплоносія до 9,5, саме з такими характеристиками пропонуються біметалеві радіатори виробниками Англії, Італії, Чехії, Росії та України.

Слабкою стороною біметалевих радіаторів, з точки зору попиту на ринку, є їх вартість, яка в середньому вище на 8-10%, в порівнянні з вартістю аналогів з алюмінієвих сплавів, що визначається додатковими витратами на створення внутрішнього сталевого контуру, хоча потрібно зазначити, що саме цей тип радіаторів є перспективним для споживачів цієї продукції, а тому постійно зростає обсяг виробництва саме біметалевих радіаторів.

Винятково важливим є встановлення обсягів потреби в опалювальних приладах. Так за даними соціологічного опитування 77% населення України хочуть поліпшити свої житлові умови і тому щорічно зростають темпи будівництва, а тому можна зробити очевидний висновок про економічну доцільність використання технічних досягнень в частині збільшення обсягів виробництва і зниження енерговитрат.

Виробництво біметалевих радіаторів всіх без винятку виробників здійснюється із застосуванням алюмінієвих сплавів. В якості ливарного устаткування використовуються машини лиття під тиском з холодною горизонтальною камерою пресування. Створення технологічного процесу магнієвого варіанту ливарної складової радіатора-конвектора обґрунтовано наступним:

- магнієвий сплав по масі на 30% менше;

- нижчий коефіцієнт теплового опору дозволяє при менших перепадах теплового напору передавати більшу кількість тепла;
- використання для лиття обладнання з гарячою камерою пресування забезпечує високу продуктивність в порівнянні з алюмінієвим варіантом (продуктивність в три рази вище);
- енергоспоживання знижується в 5 разів;
- технологічний процес лиття з урахуванням досягнутих в даній роботі результатів дозволяє створити високотехнологічне виробництво з високою техніко-економічною ефективністю.

Конструктивна схема радіатора повинна реалізувати всі переваги магнієвих сплавів в частині прихованої теплоти фазового переходу, рідкоплинності, взаємодії сплаву і матеріалу прес-форми.

Важливим є факт, що протягом останніх п'яти років саме магнієві сплави стабільно зберігають стійку вартість, тоді як вартість алюмінієвих сплавів постійно підвищується при наявності дефіциту і вже перевищує вартість секції біметалевого радіатора 250 грн. (10 USD).

Основні параметри, розміри і технічні вимоги до радіатора з магнієвого сплаву наведені в табл. 5.2. Варіанти конструкції радіатора з алюмінієвого і магнієвого сплаву представлені на рис.5.5.

Таблиця 5.2

Основні параметри, розміри і технічні вимоги радіатора з магнієвих сплавів

№	Найменування параметру	Од. виміру	Міжосьова відстань у радіаторі – 300мм
1	2	3	4
1	Номінальний тепловий потік однієї секції (граничні відхилення + 4%; -5%)	Вт	140
2	Максимальний робочий надлишковий тиск, не більше	МПа	1,6

Закінч. табл. 5.2

1	2	3	4
3	Випробувальний надлишковий тиск, не менше	МПа	2,4
4	Максимальна температура теплоносія, не більше	°С	110
5	Відстань між центрами ніпельних входів	Мм	300 $\pm$ 0,5
6	Габаритні розміри секції, ширина - висота - глибина	Мм	80-355-70
7	Маса однієї секції, не більше	Кг	1,9
8	Лінійна щільність теплового потоку	Вт/м	1800



Рис. 5.5 Конструкція радіаторів з алюмінієвих і магнієвих сплавів з міжосьовими відстанями 300 мм

5.3. Технологічний процес виготовлення литих радіаторів з магнієвих сплавів під тиском з використанням газового захисту розплаву металу

Випуск установчої партії радіаторів з магнієвих сплавів проводився двічі. Перша партія радіаторів була проведена з використовуваною системою захисту магнієвих сплавів сумішшю сухого повітря і активного газу SO_2 в 2008 році. Незважаючи на те, що дослідження самих радіаторів в сертифікованій лабораторії ДП «УкрНДІСПЕЦБУД» було досить позитивним, випуск настановної партії лиття затримався на вісім років. Причина полягала в недостатній надійності газового захисту – велика витрата активних газів SO_2 та аварійного SF_6 . Ця витрата викликана тим, що газ подавався постійно. Така подача викликала зниження якості сплаву за рахунок його засмічення оксидами. Перевищення ГДК навколо машини і печей, концентрація SO_2 досягла 45 - 50 мг/м^3 , допустимий до 10 мг/м^3 , при використанні потужних відсмоктувачів [153].

При виконанні цієї роботи були усунені всі недоліки – різко знизилася споживання активних газів. Плавильна і роздавальна печі були обладнані засобами аналітичного контролю, контролю появи парів магнію над дзеркалом металу і введена імпульсна подача суміші. Кількість SO_2 і SF_6 зменшилось в десятки разів. Використана герметизація печей і створення в них зниженого тиску, що виключає вихід парів активних газів в робочому просторі цеху. Крім того, включено постійне перемішування сплаву знизу - вгору для збереження однорідного стану. Ламінарний потік контуру до 1 м/сек. Ці роботи дозволили провести відповідну модернізацію і дали можливість відпрацювати в нових умовах техпроцес.

За результатами першого етапу роботи фірма «Бамакс» надала можливість відпрацювання нового технологічного процесу.

Наявність в Польщі прес-форми алюмінієвого біметалічного радіатора з міжосьовою відстанню 300 мм і технологічним процесом лиття з використанням машини з холодною камерою пресування, було погоджено

рішення на переробку прес-форми під машину лиття під тиском з гарячою камерою пресування. Фото нерухомої частини прес-форми наведено на рис.5.1.

Крім того, прес-форма була обладнана лабіринтовим каналом для вакуумування форми в момент початку запресування. Надалі це підтвердило правильність рішення, завдяки тому, що цей канал мав низьку температуру, повітря з форми віддалявся, а магній не проходив. Лабіринтові ущільнення для алюмінію і магнієвого варіанту (рис. 5.2).

Система захисту магнієвих сплавів від загоряння, яку виконано і описано в розділах вище, використовувалася в повному обсязі. Як показали результати дослідження витрата активних газів SF_6 і SO_2 скоротилася на 30 - 40%. Ці результати передбачалося уточнити дослідно-промисловими випробуваннями.

Відпрацювання технологічного процесу проводилось з рівня розрахункових значень факторів. Отриманий аналіз якості лиття показав, що техпроцес мав ряд відхилень, передбачених за вимогами якості лиття. Дефекти ділилися на виправний брак і остаточний. При цьому головне: система захисту від загоряння працювала з коливаннями параметрів обсягів і часу затримки чергового такту в значеннях:

- середній час циклу імпульсу нової подачі газової суміші 350 сек;
- обсяг витрат активних газів, л/год:
- SF_6 - 1,0 при витримці, до 2,1 - при переливі та литті;
- SO_2 - 0,6 при витримці, до 1,1 - при переливі та литті.

Було відсутнє різке запалення, це свідчить про те, що масштаб часу циклу перезарядки можна збільшити.

Однак результати були досить задовільні, тому що, витрата активних газів знизилася.

Робота адаптивної системи захисту магнієвого сплаву велася поза циклом роботи машини. На початку запускалась плавильна піч. Вона наповнювалась висушеним повітрям зі зниженим вмістом кисню. Піч заповнювалась шихтою при температурі 350°C. Розплавлення сплаву до рідкого стану проводилось без використання фактора поверхневого натягу. Регулювання вмісту газової суміші

проводилась тільки по температурі нагріву. Автоматичний цикл включався при температурі розплаву понад 650°C.

Аналогічно виконувався початковий запуск роздавальної печі до заданого рівня. Рівень встановлювався нижче циліндра пресування.

При досягненні температури повного тигля плавильної печі проводилася операція зняття шлаку через люк кришки, рафінування і модифікування. Кожна з операцій виконувалася за температурними вимогам. Після відбувалося взяття проб і перегляд результатів аналізу. Далі проводилося перекачування частини рідкого сплаву по металопроводу насосом в роздавальну піч. Тільки після повного заповнення роздавальної печі, вирівнювання температури в плавильній і роздавальній печах запускався технологічний процес лиття.

Технологічні параметри лиття:

Сплав AZ91;

Температура плавильної печі, °C - 656;

Температура роздавальної печі, °C - 656;

Ø стакану, мм - 102

Ø сопла, мм - 19

Температура сопла, °C - 617;

Температура форми, °C - 217;

Хід поршня, мм - 20;

Швидкість прес - поршня, м/сек - 0,4;

Хід поршня запресування, мм - 85;

Швидкість запресування, м/с - 1,6 - 2,1;

Тиск підпресування, МПа – 1,34 – 1,50;

Вакуумування форми, МПа - (-0,06);

Час до підпресування сопла, сек - 1;

Температура заставної деталі, °C - 230-290;

Кількості металу, який розплавляється, кг/год - 175;

Ємність печі, кг - 610;

Швидкість впуску, м/сек - 60-80;

Цикл, сек – 25-30;

Повний шлях поршня, мм - 230;

Максимальна швидкість поршня, м/с - 4,0;

Доза сплаву, кг - 2.4;

Зусилля замикання, тс - 400;

Вага вилівка з заставної деталлю, кг - 1,388;

Вага куца з ливникової системою, кг - 1,892;

Вага заставної деталі, кг – 815.

Результати першої плавки:

- з 1-го вилівка по 6-ий - незаповнені ребра;
- 7-ий вилівок - рихлоти на кінці ребер передніх і задніх (недостатня швидкість впуску і температура сплаву). Підвищено температуру сплаву до 655 °С;

- 8-ий вилівок - якість задовільна по ребрах, є тріщини по задньому ребру і по нижніх бобишках. Підвищено температуру форми і знижено час кристалізації;

- 9-ий вилівок - якість краще, але ще є деякі тріщини;

Продовжили без змін параметрів.

10-ий вилівок - тріщин немає.

На 15-му вилівку є мала газова раковина.

Знизили швидкість на уприскуванні до 1,5 м/сек;

На 26-му вилівку перехід з ливника рваний.

Зупинили роботу і на прес-формі збільшили радіуси на підставі ребер і переходи від ливника до вилівка.

У зв'язку з тим, що машина з гарячою камерою має ухил у бік вузла пресування, заставна деталь на рухомій формі при русі зміщується зі свого положення. Ця проблема була вирішена перенесенням її на нерухому половину прес-форми.

Через дві зміни роботи в нестабільному режимі за програмою дослідження з'ясувалося підвищення витрати активних газів на 6%. Причина заключалась в

постійному замішуванні захисної плівки. Прийнято було рішення про виключення металу при динамічних сплесках роботи вузла пресування, а також підвищити рівень сплаву в роздавальній печі і ввести розгін поршня з постійним прискоренням з початку руху і при переході на уприскування. При введенні прийнятих рішень знизилася кількість шлаку, що знімається з поверхні.

При спробі ввести зміни по кореляції коефіцієнта масштабу часу одного такту з'явилися тимчасові язики займання, які самостійно загасали. Прийнято рішення відновити колишній варіант.

5.4. Випробування надійності основних технологічних вузлів устаткування лиття під тиском магнієвих сплавів

Основною метою дослідження надійності технологічних вузлів є, саме для магнієвого лиття, оцінка ресурсу критичних параметрів для підвищення динамічних характеристик. Основний технологічний вузол пресування, відповідно до Держстандарту 23.203 - 79.

Технологічний процес лиття під тиском магнієвих сплавів на машинах з гарячою камерою пресування передбачає роботу вузла пресування в технологічних фазах:

- перша фаза - перекриття отвору заповнення камери пресування на швидкості 0,5 м/сек і включення вакуумування форми,
- друга фаза – розгін прес-поршня з постійним прискоренням до заданої швидкості уприскування;
- третя фаза – заповнення форми сплавом з постійною швидкістю до 2/3 обсягу по шляху прес-поршня зі швидкістю до 7 м/сек.
- четверта фаза – різке зниження швидкості поршня до рівня переходу на швидкість до 1 м/сек (запобігання гідравлічного удару і перехід на ламінарний режим заповнення форми до повного обсягу);

- п'ята фаза – заповнення повного обсягу форми з підвищенням тиску в рідкому сплаві в умовах початку кристалізації.

- шоста фаза – підпресування для отримання щільних виливків виробляється для інфільтрації достатньої кількості розплаву (рідкої фази) через мережу зростаючих кристалів. Фактори від яких залежить величина інфільтрації виражаються фізично:

- припиняється виділення розчинених газів;
- відповідним підвищенням тиску забезпечується запобігання пористості по всьому об'єму вилівка за рахунок пластичної деформації окремих кристалів при температурі близькій до лінії солідусу.

Фізичне розуміння цього процесу досить добре видно з формули Дарсі (5.1).

$$\Delta W = \frac{k \times \Delta P^{III}}{m \times \Delta l} \quad (5.1)$$

де ΔW – величина інфільтрації;

m – динамічна в'язкість;

Δl – глибина інфільтрації;

ΔP^{III} – величина тиску;

k – коефіцієнт, що враховує характеристику виливка.

Як узагальнений відгук використовується рівень підкоркової пористості виливка і відключення вакууму.

Швидкість наростання тиску повинно не просто піднятися до свого можливого рівня. Тиск інфільтрації має підвищуватися з постійним наростанням за величиною таким чином, щоб виключити можливість «перемерзання» і забезпечити рух рідкого сплаву, який підвищує температуру від опору, наростаючого при кристалізації та усадці.

Випробування були проведені при таких параметрах:

- тиск гідросистеми до 3 Мпа;
- гідродинамічний удар в гальмівній частині циліндра пресування, до 7 Мпа;

- час наростання вакууму в прес-формі до 0,3 абсолютного тиску до 0,1 сек;

- швидкість прес-поршня до 10 м/сек.

В якості експлуатаційних впливів використовувалися описаний вище контроль динамічних параметрів, а візуалізація графіків забезпечувалася сенсорним ПК. Використовувалися датчики надлишкового тиску R63 з класом точності 0,25 і абсолютного тиску P3 для реєстрації тиску в штоковій і поршневій порожнинах та вакуумному колекторі. Дослідження проводилися як на холостому ході в замкнутому автоматичному циклі, так і в напівавтоматичному циклі під навантаженням.

Клапан уприскування. Витрата 12000 л/хв, при швидкості прес-поршня до 10 м/сек, прохідний перетин 78 см² ($d = 100$ мм).

Зафіксована відмова, по команді відкриття клапана на повний переріз штокової порожнини циліндр з'єднується зі зливом. Поршнева порожнина під тиском, зі зливом з'єднується і порожнина клапана уприскування з боку пружини клапана (його поршень), але його відкриття на повний переріз не відбувається. Це пояснюється тим, що на початку відкриття клапана тиску в поршневій порожнині циліндра пресування різко падає, а так як дросельні пази гільзи клапана знаходяться на рівні діаметру поршня, зусилля на стиск пружини не вистачає. У доопрацьованій конструкції діаметр гільзи і клапана виконані східчасто з діаметром 95 і 105 мм. Конструкція клапана забезпечує постійну швидкість відкриття, а значить постійне прискорення поршня циліндра пресування.

У модернізованому варіанті гільза демпфера розвантажена за рахунок перенесення ущільнення в кінець гільзи.

Система вакуумування. Складність використання вакууму для магнієвого лиття виникає через його випаровування. Для вирішення цього завдання прийнято рішення використовувати в якості попередження випаровування магнію лабіринтовий відсікач з низькою температурою. Прес-форма має робочу температуру до 290 °С, а елементи лабіринтового відсікача потрібно

охолоджувати зниженою температурою робочого середовища (мастило) до 6 °С. Крім цього, знижено розмір лабіринтового проходу по висоті і збільшено ширину. При перетині проходу $0,8 \times 50$ і числу кроків 6, пари магнію далі третього кроку не проходили.

5.5 Дослідження технологічного процесу одержання радіаторів з магнієвих сплавів на машині лиття під тиском на стадіях подачі і допресування металу у формі

Безударний вузол пресування - результати ресурсних випробувань.

Клапан вприскування. Витрата до 12 000 л/хв при швидкості уприскування 10 м/с, прохідний перетин $\sim 78 \text{ см}^2$ ($d = 100 \text{ мм}$).

Зафіксовано наступну відмову. За командою на відкриття клапана уприскування (фаза збору розплаву в прес-камері) штокова порожнина циліндру пресування з'єднується зі зливом (поршнева порожнина під тиском), зі зливом з'єднується і порожнина клапана уприскування з боку пружини - клапаном (його поршень) відкривається, проте, відкриття на повний прохідний перетин не відбувається. Це пояснюється тим, що на початку відкриття клапана тиск в поршневій порожнині циліндру пресування різко падає, а так як дросельні пази гільзи клапану знаходяться на рівні діаметру поршня клапана, зусилля на стиск пружини не вистачає. Працює така конструкція клапана тільки при диференціальній схемі підключення порожнин циліндра пресування. Однак, режим роботи з диференціальною схемою включення циліндра пресування не вирішує належним чином режим збору розплаву з постійним прискоренням і, крім того, перевантажує високим тиском силові елементи - демпфер і гільзу. На рис. 5.6 представлена схема нового удосконаленого варіанту клапана.

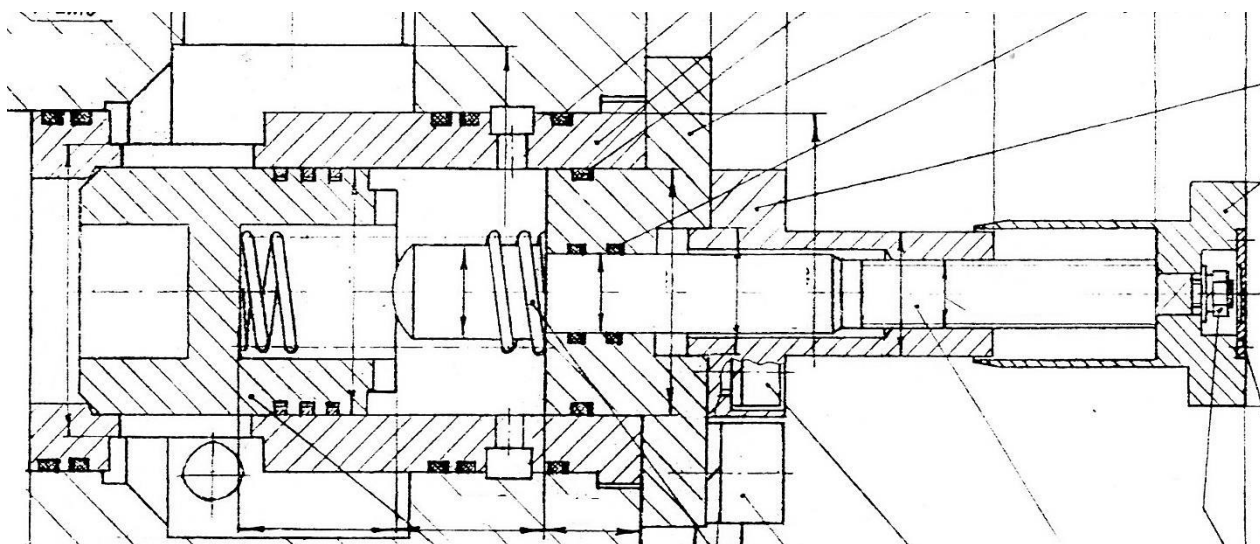


Рис. 5.6 Схема клапану впрыскування

У переробленої конструкції гільза 1 і клапан 2 виконані східчасто – з діаметрами 95 мм і 109 мм. При цьому перетин площею 23 см² (кільця з діаметрами 95 мм і 109 мм) має забезпечувати у всіх режимах нормальну роботу клапана. Конструкція клапана при постійній швидкості його відкриття забезпечує постійне прискорення силового блоку циліндра пресування, що технологічно необхідно на фазі збору сплаву в камері пресування.

Демпфер. Схема демпфера представлено на рис. 5.7

Результати випробувань показали, що для забезпечення достатньої міцності при фактичних динамічних навантаженнях конструкція демпфера повинна бути доопрацьована. Ситуація стосується фази жорсткого гальмування при швидкості уприскування розплаву вище 6 м/с. Гідравлічний удар в штоковій порожнині циліндру пресування викликає зусилля розпирання у внутрішній порожнині демпфера (діаметр 100 мм, довжина 165 мм) і залишкову деформацію зовнішньої поверхні на цій ділянці. Демпфер виходить з ладу, до подальшої експлуатації не придатний.

Створено схему нової конструкції демпфера, яка виключає деформацію циліндра демпфера на ділянці 165 мм. У цій конструкції ущільнення штока перенесено в кінець демпфера з боку поршня циліндра пресування, що виключає тиск у внутрішній порожнині демпфера в період жорсткого

гальмування. Робочим тиском є зовнішній тиск, що виникає в штоковій порожнині циліндру пресування на фазах, до початку фази жорсткого гальмування, яке за величиною менше, ніж тиск при гідроударі.

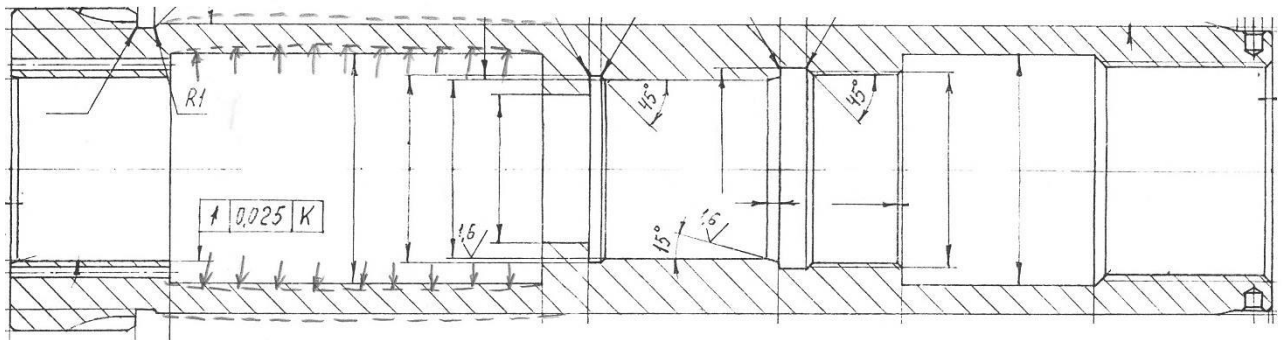


Рис. 5.7 Схема демпфера

Для збільшення міцності демпфера рекомендується замінити матеріал сталь 40Х на сталь 30ХГСА, з межею міцності вище на 26%. Невелике збільшення товщини стінки при цьому дозволить отримати достатню міцність.

У зв'язку з тим, що в демпферному гнізді корпусу циліндра пресування і на відповідній поверхні демпфера на швидкостях до 5 м/с має місце зминання, необхідно його демпферну частину посилити.

Подовжувач. Є проблема в ситуації заклинювання прес-поршня в прес-камері з розплавом на початку руху прес-поршня. Також є проблема в ситуації виконання налагоджувальних робіт при включеному русі силового блоку циліндра пресування без подовжувача.

При поверненні штока в початкове положення, демпфер без опори переміщається в крайнє висунуте положення, а поршень – в крайнє всунуте положення, що неприпустимо з техніки безпеки.

Розроблено схему вузла, який зв'язує подовжувач зі штоком циліндру пресування, яка виключає зазначені вище недоліки [154].

Ущільнювач. За результатами проведених форсованих випробувань і аналізу станів елементів ущільнювачів вузла пресування встановлено, що при підвищених швидкостях пресування необхідно:

- замінити використовувані чавунні поршневі кільця ГОСТ 2А54-1-72 на нові конструкції ущільнень з ECOFLONa для швидкостей 10 м/с з переднатягненням;
- ущільнення штока також замінити на ущільнення з ECOFLONa з переднатягненням;
- поршень циліндра пресування для ущільнення необхідно бронзовані, так як бронзовані стрічки і кільця з ECOFLONa допускають швидкість тільки до 5 м/с; матеріал покриття БрО5Ц5С5 ГОСТ 613-79 (рис. 5.8);
- поршень акумулятора ущільнюється аналогічно поршню циліндру пресування.

Швидкодіючий вузол замикання. Гідропривід, який забезпечує більш ніж в 2 рази зниження часу на відкриття - закриття прес-форми, а також виключення можливості поломки форми в разі наявності облою на площині роз'єму, працює наступним чином: до початку руху плити з рухомою напівформою акумулятор з тиском попередньої зарядки на рівні 0,1 – 0,15 МПа заповнюється від насоса високого тиску необхідним маневровим обсягом.

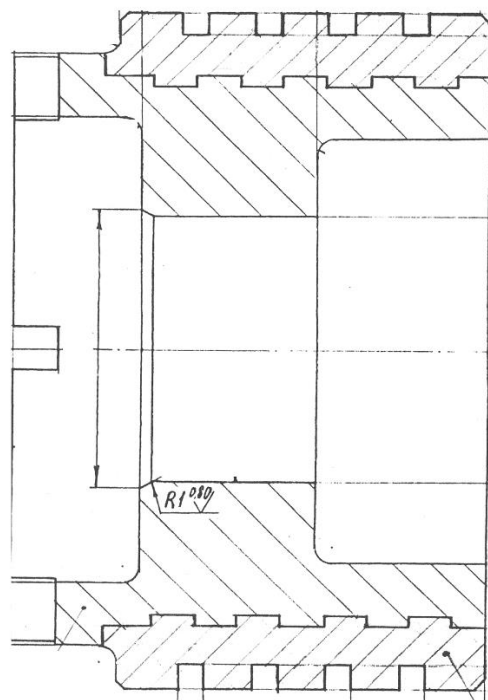


Рис. 5.8 Поршень циліндра

Початок руху рухомої плити в робочому режимі забезпечується насосом високого тиску і акумулятором, це швидкий розгін рухомої плити з напівформою до заданої швидкості змикання. При швидкому переміщенні рухомої плити акумулятор розряджається з різким падінням тиску і при підході до площини дотику напівформ маневровий обсяг повністю витрачається і переміщення переходить на безакумуляторний привід з тиском КН – 0,15 МПа, тобто практично за інерцією і без зусиль. При торканні напівформ, в разі наявності облоя в роз'ємі, рухлива плита зупиняється, а насос починає працювати на зарядку акумулятора з тиском КН – 0,15 МПа, який протягом перших секунд не змінюється. Цього часу достатньо для того, щоб за умови відсутності повного контакту прес-форма розкрилася. Робота при розкритті форми також вимагає в кінці ходу плити її гальмування, щоб уникнути удару великої маси рухомої плити з напівформою на «упорі». Всі спроби збільшити швидкість рухомої плити більше 400 мм/с приводили до сильних ударів. Тому зазначений режим можна вважати достатнім для форсованих випробувань [155].

Аналіз результатів форсованих випробувань показав наступне:

- при включенні замикання фіксувався сильний удар, викликаний вибором всіх зазорів. Для усунення цього удару в програму введено цикл включення акумулятора в момент звільнення вихідного положення кінцевого вимикача. (Початок руху рухомої плити відбувається з малою витратою, без акумулятора). Зафіксована нестабільність маневрового обсягу акумулятора. Це викликано коливаннями температури робочої рідини гідроприводу і відповідною зміною робочого тиску (в результаті - маневрового обсягу акумулятора). В ході випробувань отримано діапазон зміни маневрового акумулятора і максимального тиску його зарядки. Рівень тиску коливався в межах $\pm 0,6$ МПа, а маневровий обсяг в межах $\pm 2,5\%$;
- в процесі випробувань зафіксовані збої, як по стабільності роботи, так і по надійності елементів ущільнювачів (в основному для апаратури гідного виконання). В результаті встановлено вимоги до системи регулювання

температури робочої рідини. Необхідно використовувати ПНД-регулятор з термометром опору і забезпечувати коливання температури $\pm 1^\circ\text{C}$. Абсолютна температура робочої рідини повинна бути на рівні $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

Система вакуумування прес-форми. Переваги лиття під тиском з використанням вакуумування форми досить відомі:

- зниження газової пористості і, як наслідок, підвищення герметичності і механічної міцності виливків;
- поліпшення умов заповнення форми (рідкоплинності) і, як наслідок, можливість зниження температур сплаву і форми, а це веде до зменшення турбулентності, гідравлічного удару і температурних навантажень на форму;
- різке зниження засмічення виливка за рахунок відсмоктування надлишкової складової технологічних захисних мастил - відсутність на поверхні виливків слідів, плям і спаїв;
- виключаються промивники, що дає економію металу.

Вакуумування форми в цілому, крім зазначених вище переваг, дозволяє використовувати такі технологічні процеси як термообробку, герметичне зварювання і якісні гальванічні покриття. Схема представлена на рис.5.9.

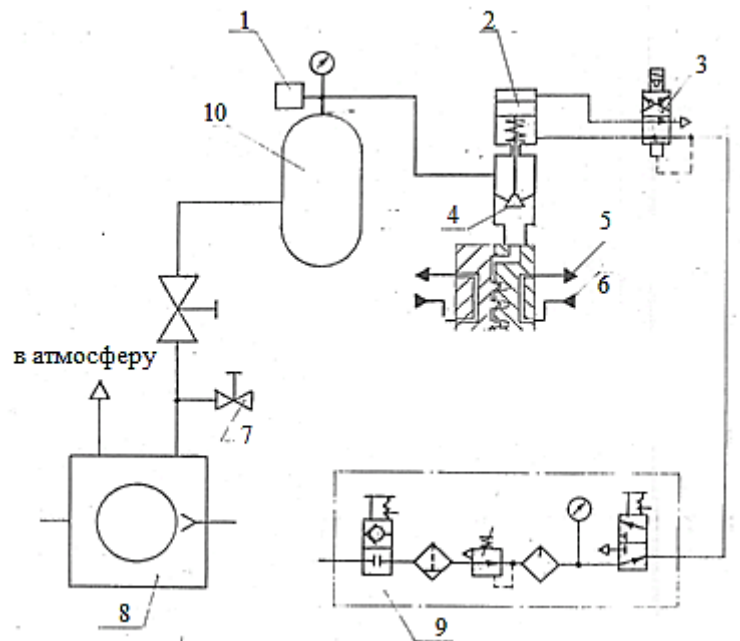


Рис. 5.9 Схема вакуумування прес-форми і роздавальної печі: 1 – датчик тиску; 2 – пневмоциліндр; 3 – пневморозподільник; 4 – клапан; 5 – відведення

води; 6 – підведення води; 7 – клапан налаштування тиску; 8 – насос вакуумний; 9 – блок підготування повітря; 10 – ресивер.

Результати проведених досліджень, які склались з двох серій експериментів, з метою створення засобів доопрацювання форми щодо забезпечення герметичності і параметрів повітревідводу наведено у розділі 5.2, було наведено графік кривих вакуумування прес-форми та шляху прес-поршня (рис. 5.4).

Аналіз результатів ресурсних випробувань системи вакуумування (клапанна система, ресивер, засоби охолодження, засоби управління і контролю) показав наступне:

- клапан по своїх геометричних розмірах прохідних перетинів гарантовано забезпечує весь діапазон прес-форм на машинах лиття під тиском 250 т.с. замикання;

- конструкція клапана для підвищення працездатності потребує введення внутрішнього демпфування пневмоприводу, так як при збільшенні швидкості спрацьовування поршень клапана сильно «стукає» по передній кришці;

- ущільнення поршня і штока клапана необхідно замінити на ущільнення з пербутана або поліуретану;

- матеріал гільзи замінити на сталь 40Х з хромуванням робочої поверхні гільзи, матеріал пружини - на сталь 17ХНГТ, матеріал пари клапан-сідло – на анодовану сталь.

- у зв'язку з тим, що мали місце випадки затягування в район «клапан-сідло» дрібнодисперсного сплаву, необхідно переробити конструктивно зв'язок клапана зі штоком приводу для спрощення його розбирання, а також доопрацювати лабіринтову систему з метою виключення випадків потрапляння сплаву в вакуумний клапан;

- ресивер необхідно періодично, в залежності від технології і завантаження, промивати, так він виконує функцію фільтру і все, що відсмоктується з форми, залишається в ньому.

Дослідження параметрів механізму пресування в режимі реального робочого циклу машини лиття під тиском. У режимі реального робочого циклу при отриманні виливки деталі «Корпус магістрального підсилювача» (для кабельного телебачення) досліджувалася стабільність зусилля прес-поршня, його швидкості та протитиску в штоковій порожнині циліндра пресування на фазах запресовування.

Статистика по зусиллю прес-поршня, його швидкості, протитиску зібрана в різних контрольних точках по шляху від початку руху прес поршня протягом ~ 520 циклів отримання виливки:

Фаза збору розплаву	- точки, що відповідають: 80 мм, 90 мм, 110 мм, 130 мм
Фаза заповнення розплавом 95 - 97%	- точки, що відповідають: 160 мм, 190 мм,
Фаза жорсткого гальмування прес-поршня	- точки, що відповідають: 210 мм, 230 мм

Виходячи з обсягу статистики в кожній точці будувалися гістограми: вісь абсцис - значення зусилля в т.с., вісь ординат - відсоток однакових значень досліджуваних параметрів (щодо загального числа цих значень), причому однаковими вважалися значення в межах кожного інтервалу осі абсцис.

У таблиці 5.2 представлено результати обробки статистики по зусиллю прес-поршня. На рис. 5.10 представлено гістограму розподілу зусилля в контрольній точці 90 мм.

У табл. 5.3 представлено результати обробки статистики по швидкості прес - поршня. На рис. 5.11 представлено гістограму розподілу швидкостей в контрольній точці 230 мм.

Таблиця 5.2

Результати обробки статистики по зусиллю прес-поршня

№№ п/п	Контроль- на точка, мм*	Зосереджений обсяг вибірки						Р _{макс.} вибор- ки, т.с.	% Р _{макс.} выбор- ки	Примітка
		Р _{сер.} , т.с.	% Р _{ср.} ***	Р _{мін.} , т.с.	% Р _{мін.}	Р _{макс.} , т.с.	% Р _{макс.}			
1	80	0,4	90,1	0,1	10,2	0,7	12,3	2,5	0,4	фаза збору розплаву
2	90	0,7	79,5	0,3	12,3	1,1	13,2	2,7	0,2	
3	110	0,7	92,3	0,3	-	1,3	13,0	5,3	0,2	
4	130	0,9	76,6	0,5	11,7	1,5	7,9	3,7	0,2	
5	160	0,5	83,2	0,1	12,5	0,9	9,6	4,3	0,2	фаза заповнення (95÷97)% положнини форми
6	190	0,4	77,3	0,3	32,4	0,7	12,3	3,5	0,2	
7	230	0,5	88,4	0,3	48,9	0,8	39,5	5,3	0,2	

*) від початку руху прес-поршня

**) обсяг вибірки зі значеннями, величина яких приблизно одного порядку

***) % Р – процентний вміст значень вибірки величиною Р в загальному обсязі вибірки

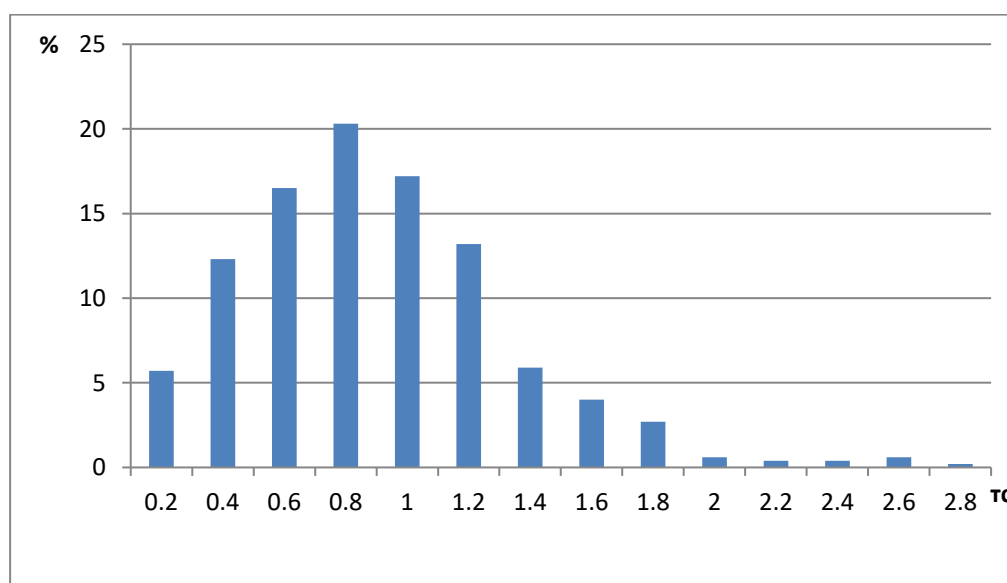


Рис. 5.10 Гістограма розподілу зусилля в контрольній точці 90 мм

Таблиця 5.3

Результати обробки статистики по швидкості прес-поршню

№№ п/п	Контроль- на точка, мм*	Зосереджений обсяг виборки						$V_{\text{макс.}}$ вибор- ки, м/с	% $V_{\text{макс.}}$ вибор- ки	Примітка
		$V_{\text{ср.}}$, м/с	% $V_{\text{ф.}}^{***}$	$V_{\text{мин.}}$, м/с	% $V_{\text{мин.}}$	$V_{\text{макс.}}$, м/с	% $V_{\text{макс.}}$			
1	80	0,165	82,8	0,160	-	0,170	-	0,355	0,2	фаза збору розплаву
2	90	0,475	87,5	0,425	25,5	0,525	34,9	0,575	6,7	
3	110	0,702	88,2	0,675	41,6	0,725	46,6	0,775	0,4	
4	130	0,537	95,9	0,225	14,9	0,775	26,8	0,825	3,1	
5	160	0,728	86,9	0,550	17,4	0,950	19,7	1,350	0,4	фаза заповнення (95÷97)% порожнини форми
6	190	0,676	91,7	0,550	29,9	0,950	8,6	1,750	0,2	
7	230	0,600	92,9	0,550	68,0	0,750	21,1	1,45	0,2	

*) від початку руху прес-поршню

**) обсяг виборки зі значеннями, величина яких приблизно одного порядку

***) % V – процентний вміст значень вибірки величиною V в загальному обсязі вибірки

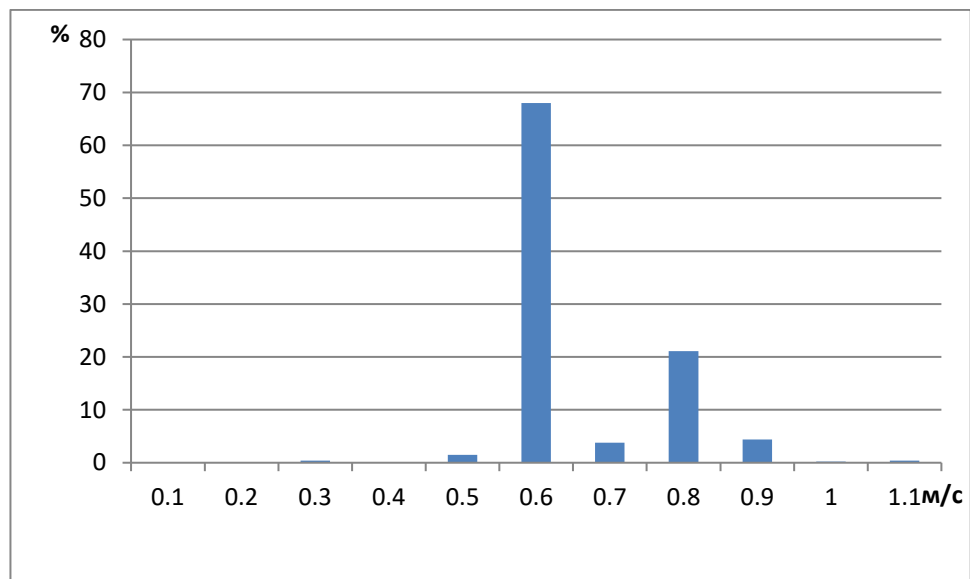


Рис. 5.11 Гістограма розподілу швидкостей в контрольній точці 230 мм

Фаза збору розплаву в прес-камері – рівноприскореному русі прес-поршня до заданої швидкості початку заповнення форми.

Теоретично зусилля з боку прес-поршня має бути постійним.

В результаті зафіксовано:

- з ймовірністю (77,4-92)% середнє зусилля близько 0,7 т.с.;
- з ймовірністю (10,4-12)% середнє мінімальне зусилля близько 0,3 т.с.;
- з ймовірністю (8,4-13)% середнє максимальне зусилля близько 1,1 т.с.

При цьому швидкість на цій фазі зростає від близько 0,2 м/с в початку збору розплаву до 0,7 м/с на початку заповнення форми з ймовірністю (83,4-96)%.

Так само стабільно з ймовірністю (91-97)% зростає протитиск від 0,7 МПа до 3 МПа в штоковій порожнині циліндру пресування, що компенсує збільшення тиску в його поршневої порожнині.

Фаза заповнення прес-форми розплавом (обсяг заповнення (95-97)% порожнини форми) [157].

Конкретний технологічний режим – ламінарний, задана швидкість заповнення $\sim 0,6$ м/с.

Зафіксовано:

- з вірогідністю (87,4-93)% середня швидкість близько 0,64 м/с;
- з вірогідністю (66,4-68)% середня мінімальна швидкість близько 0,55 м/с;
- з вірогідністю (18,4-24)% середня максимальна швидкість близько 0,82 м/с.

При цьому зусилля на прес-поршні (як сума зусиль з боку поршневої порожнини циліндра пресування і противозусилля з боку його штокової порожнини) змінюється від 0,5 т.с. до 1,2 т.с. з ймовірністю (59-83)%, протитиск в штоковій порожнині змінюється від 0,5 МПа до 0,7 МПа з ймовірністю (68,4-97)%.

Фаза жорсткого гальмування.

На заданому ламінарному режимі заповнення форми при низькій заданій швидкості 0,6 м/с фактично жорстке гальмування не є необхідним. Зафіксовано

деяке підвищення протитиску в штоковій порожнині і незначне зниження швидкості в порівнянні з попередньою фазою заповнення форми.

За стабільністю зафіксовано наступне:

- швидкість прес-поршня: середня 0,6 м/с з ймовірністю (93-99)%, мінімальна 0,45 м/с з вірогідністю (6-8)%, максимальна 0,75 м/с з вірогідністю (14- 15)%;

- тиск в штоковій порожнині циліндру пресування: середня 0,12 МПа з вірогідністю (77-84)%, мінімальне – 0,8 МПа з вірогідністю (4-7)%, максимальне близько 1,8 МПа з вірогідністю (3-4) %.

Фази пресування від «збору розплаву» до «жорсткого гальмування» включно.

Для конкретного техпроцесу по всіх фазах пресування зафіксовані граничні зусилля прес-поршня:

- фаза збору розплаву 0,1 т.с. і 5,3 т.с.;
- фаза заповнення 0,3 т.с. і 7,3 т.с. ;
- фаза гальмування 0,5 т.с. і 19,5 т.с.

Ідеальний режим пресування – це якісне змащування, що забезпечує стабільність стану робочих поверхонь прес-камери і прес-поршня, відсутність елементів, що засмічують розплав, відсутність фактів підклинювання прес-поршня фрагментами кристалізації розплаву.

Розкид зусиль прес-поршня при реальному техпроцесі:

- по мінімальному зусиллю відповідає рівню потужності гідроприводу вузла пресування;
- перевищення максимальних значень щодо мінімальних пояснюються неконтрольованим випадковим характером опору і недостатнім значенням розрахункової потужності вузла пресування, необхідністю значного перевищення практичної потужності над розрахунковою.

Силовий гідравлічний привід, який виконує компенсацію за можливістю всіх факторів опору повинен зберегти жорсткість характеристик з необхідним градієнтом, щоб забезпечити стабільність головного параметру – швидкості

заповнення розплаву в форму, зміни якої при всіх режимах заповнення форми (ламінальному, турбулентному, дисперсному) призводить до браку лиття .

Розкид для конкретного техпроцесу швидкості прес-поршня (задана швидкість 0,6 м/с; фактична середня 0,64 м/с) з вірогідністю близько 90% становить:

- фаза заповнення форми 0,55 м/с і 1,75 м/с;
- фаза гальмування 0,45 м/с і 1,25 м/с;

Причому ймовірність максимальних значень близько (0,2 - 0,4)% від обсягу всієї вибірки.

Стабільність на фазі заповнення фактичної середньої швидкості, її відповідність заданому значенню (при фазових переходах з різкою зміною навантаження) досить висока - (92,4-93)% вірогідності.

Крім того, аналіз на фазі заповнення відповідних відхилень за швидкістю і зусиллю прес-поршня показав, що відхилення зусилля для одних і тих же контрольних точок на порядок більше, ніж відхилення по швидкості, і чим більше змінюється зусилля, тим менше змінюється швидкість.

Для заданого техпроцесу з ламинарним режимом заповнення форми потужність вузла пресування була достатньою, що і забезпечило з вірогідністю (92-93)% стабільність швидкості заповнення форми[158].

Розкид швидкості прес-поршня на фазі гальмування пояснюється розкидом дози розплаву, який заливається, (ручне заливання). Заміна ручного заливання на механізоване дозволяє за даними статистики фірм-виробників лиття досягти точності дози в межах $\pm (1,5-2)\%$.

Аналіз статистики по параметру «протитиск в штоковій порожнині циліндра пресування» необхідний на фазі гальмування, коли в кінці заливання форми швидкість прес-поршня різко падає, а удар на розплав компенсується за рахунок різкого підйому тиску в штоковій порожнині циліндру пресування.

Для конкретного процесу жорстке гальмування фактично не є необхідним, тому що задана швидкість прес-поршня досить низька і становить близько 6 м/с.

Усунення гідроудару на розплав, компенсація його за рахунок протитиску в штоковій порожнині необхідні при швидкості вище 2 м/с і до 6 м/с. На цих швидкостях прес-поршня випробування були проведені при холостих циклах машини, при цьому зафіксовано тиск в штоковій порожнині до 700 кгс/см², що перевищує допустиме навантаження на демпферну пару по міцності.

На швидкостях від 6 м/с до 10 м/с гальмування прес-поршня виконується в «м'якому» режимі: на шляху останніх 150 мм до кінця основного заповнення форми використовувалося апаратне демпфування одночасно до сторони загальних порожнин циліндра пресування, а на шляху останніх 50 мм - за рахунок демпфування тільки з боку штокової порожнини[159-160].

5.6. Порівняльні показники властивостей магнієвого виливка

В таблиці 5.4 представлені порівняльні показники ливарних і механічних властивостей магнієвих сплавів при литті радіаторів під тиском. Розглянуто базовий варіант безфлюсового захисту і новий імпульсний. Всі вимірювання проводилися в сертифікованих лабораторіях на фірмі «BAMAX»

Таблиця 5.4

Результати порівняльних показників властивостей магнієвих радіаторів

Характеристики	МЛ5		AZ91	
	Баз.	Імп.	Баз.	Імп.
Рідкоплинність, мм	208	290	305	310
Горячеламкість, Пг / мм	28	28	17	15
Межа міцності на розтягнення, кг/мм ²	20	24	20	27
Відносне при Т ₄ подовження, %	5,0	2,0	4,0	1,5
Твердість при Т ₄ по Брінеллю, НВ	50	62	70	85
Вміст газу в сплаві, см ³ /100 г	31	11,0	25	8,0
Вміст газу в литві, см ³ /100 г.	20	2,0	16	3,0

5.7. Система виявлення парів магнію

Система відеоспостереження і виявлення парів магнію призначена для:

- забезпечення перегляду обстановки в зоні плавлення сплаву на моніторі (ВПУ - відео переглядовому пристрої);
- виявлення наявності парів магнію над дзеркалом металу з автоматичним виведенням повідомлення оператору на екран монітора і в систему аварійної сигналізації (САС);
- реєстрації відеоінформації, яку одержують від відеокамер, встановлених в зоні плавлення.

Система відеоспостереження і виявлення парів магнію забезпечує:

- формування телевізійного зображення від відеокамер, що розміщені в зоні плавлення;
- можливість вибору з пульта управління зони перегляду з автоматичним перемиканням відеокамер (режим гортання) в межах обраної зони;
- можливість вибору з пульта управління певної відеокамери в кожній зоні для детального перегляду зображення;
- включення з пульта управління лазерних освітлювачів;
- реєстрацію відеоінформації від відеокамер на знімний твердотільний накопичувач (SSD диск).

Основні технічні характеристики

Час готовності до роботи не більше 60 с;

Номінальний розмах повного відеосигналу $1 \pm 0,1$ В;

Роздільна здатність відеокамер не менше 500 твл;

Монітор на базі LCD панелі 10";

Час запису відео від 4 ТВ камер в реальному масштабі часу на SSD диск об'ємом 512 Гб не менше 36 год;

Режим реєстрації кільцевий;

Частота кадрів при записі зображення 25 кадрів в сек;

Живлення від мережі постійного струму $24 \pm 2,7$ В;

Споживана потужність не більше 80 Вт.

Пульт управління та монітор розміщуються на робочому місці оператора.

Відеокамери і лазерні освітлювачі встановлюються в зоні плавлення, місця установки визначає розробник з урахуванням вимог з безпеки.

Блок обробки і сигналізації розміщується в технічному відділі цеху. При цьому повинно бути забезпечено доступ до відкидних дверцят на корпусі, за якими розташована лицьова панель відеореєстратора. Склад системи відеоспостереження наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5

Склад системи відеоспостереження

Найменування і тип	Кількість	Вага, кг
Пульт керування	1	0,57
Блок обробки і сигналізації	1	7,00
Камера телевізійна	4	0,45
лазерний освітлювач	4	0,15
монітор	1	0,8

При подачі живлення + 24В на систему протягом однієї хвилини відбувається тестування всіх блоків, що входять в систему. Після закінчення тестування виріб переходить в режим відеоспостереження обставин в зоні плавлення із записом відеоінформації в реальному масштабі часу від всіх камер одночасно на знімний твердотільний накопичувач (SSD диск). На моніторі в режимі автоматичного перемикавання буде відтворюватися зображення від 1, 2, 3, 4 відеокамер, з інтервалом $3,5 \pm 0,5$ с. Перемикавання відеокамер здійснюється в межах обраної зони.

При виявленні системою над дзеркалом металу парів магнію відбувається автоматичне перемикавання і виведення на екран монітора зображення від відеокамери, що виявила пари магнію. Одночасно загоряється сигнальне поле кнопки цієї камери, і сигнал про виявлення парів магнію надходить в систему.

На моніторі спостерігається характерний промінь лазерного підсвічування, висвічується номер камери і миготливе повідомлення «Магній», також на екран монітора виводиться таблиця у вигляді матриці з мітками по горизонталі - № відеокамери, по вертикалі - № зони.

Відеореєстратор, що входить до складу системи обробки сигналу, забезпечує реєстрацію відеоінформації від відеокамер на знімний твердотільний накопичувач (SSD диск). Незалежно від обраної оператором зони перегляду запис на відеореєстратор проводиться одночасно від всіх відеокамер в реальному масштабі часу. Відеореєстратор працює в кільцевому режимі - після заповнення всього обсягу SSD диска проводиться стирання (заміщення) раніше записаної інформації новою.

Оперативний перегляд відеофайлів, записаних на SSD диск, виконують на комп'ютері (ноутбуці) за допомогою програми DVR Player. Програма DVR Player дозволяє вивести на екран ноутбука відеозапису як у моно- так і в поліекранному (від 1 до 4) режимі. На кожному зображенні є службова інформація (номер камери, дата, час).

При необхідності копіювання відеозаписів для подальшого перегляду в центрі обробки інформації необхідно підключити ноутбук до гнізда USB відеореєстратора і керуючись інструкцією по експлуатації вибрати з архіву, збереженого на SSD диску, за датою та номером відеокамер, записи, які потрібно скопіювати. Фото блоків, що входять до складу виробу, представлені на рисунках 5.12 – 5.16.



Рис. 5.12. Пульт управління



Рис. 5.13. Монітор



Рис. 5.14. Камера телевізійна



Рис. 5.15. Лазерний освітлювач



Рис. 5.16. Пульт контролю та запису інформації: 1 – дверця ; 2 – замок блокування; 3 – відкидна кришка; 4 – накопичувач SSD; 5 – індикатори REC (записування) та PWR (живлення); 6 – ключ блокування.

5.8. Порівняльна оцінка різних видів радіатору і економічна ефективність створеної системи

З метою об'єктивної оцінки магнієвого варіанту біметалічного радіатора конвектора до теплових випробувань було задіяне «Державне підприємство «Український науковий дослідний інститут спеціальних будівельних робіт (ДП «УкрНДІспецбуд»)). Результати проведених ними досліджень представлені в таблиці 5.7. На рис. 5.17 представлено фото з лабораторії інституту, в якій проводилися дослідження.



Рис. 5.17 Стенд для дослідження експлуатаційних характеристик радіаторів з магнієвих та алюмінієвих сплавів

При аналізі освоєння виробництва алюмінієвих біметалевих радіаторів на Україні (модель Темакс, фірма «Інтерметал», Одеса) і магнієвих (модель «MEGABIT», фірма КЗМО «Ропчице», Польща, Кривий Ріг) встановлено, що використання магнієвого сплаву становить значний інтерес як з точки зору технічних результатів, так і з питань економічної доцільності.

Основні параметри радіаторів представлені в табл. 5.6. Результати досліджень представлені в таблиці 5.7.

Таблиця 5.6

**Основні конструктивні та експлуатаційні параметри радіаторів з
магнієвих та алюмінієвих сплавів**

	Параметри	Од. виміру	Радіатор з магнієвого сплаву	Радіатор з алюмінієвого сплаву
1	Сплав		МЛ5 ГОСТ2856-79 (AZ91)	АК12 ДСТУ 2938-94
2	Температура заливання	°С	640	720
3	Вага секції по сплаву	г	407	800
4	Час кристалізації	Сек	7	35
5	Хід перекриття заливального вікна	Мм	20	60
6	Хід запресування сплаву	Мм	85	160
7	Продуктивність	Запр/год	130	40
8	Вага ливників	г	114	280
9	Витрата електроенергії	кВт- год/секц	0,24	0,75
10	Угар і безповоротні втрати	г	37	95

Таблиця 5.7

Результати досліджень конструктивних та експлуатаційних характеристик радіаторів з магнієвих і алюмінієвих сплавів

Показники якості	Базовий зразок №1 МЛ5, 5 секцій	Зразок №2 МЛ5, 5 секцій	Базовий зразок №3 АК12, 5 секцій
Міжосьова відстань, мм	300	300	300
Габаритні розміри, мм	380-70-355	382-70-355	400-70-355
Вага радіатору	7.2	7.4	9.2
Секції	1,44	1,48	1,84
Номінальний тепловий потік (Вт)			
Радіатору	800	785	731
Секції	160	157	146
Питома маса кг/кВт	9	9.4	12.6
Співвідношення питомої маси, %	100	96	112

З огляду на отриманий досвід з виробництва масового лиття алюмінієвих опалювальних радіаторів було прийнято рішення виконати розрахунок порівняльних техніко-економічних показників з урахуванням переваги цієї роботи. Результати представлені в табл. 5.8 і на порівняльних діаграмах рис. 5.18 і рис. 5.19.

Таблиця 5.8

**Техніко-економічні показники організації виробництва радіаторів з
магнієвих та алюмінієвих сплавів в обсязі 1100 000 секцій в рік**

№	Параметри	Одиниці виміру	Радіатор з магнієвого сплаву МЛ5	Радіатор з алюмінієвого сплаву АК12
1	2	3	4	5
1	Капітальні витрати (будівля, споруда, обладнання, інженерні мережі та оборотні кошти) і додаткові витрати з модернізації системи захисту магнію	грн.*(USD)	145 000 000 (5 800 000)	157 500 00 (6 300 000) +9,16%
2	Валовий випуск секції	штук	1 100 000	1 100 000
3	Теплова потужність однієї секції (при однаковому обсязі сплаву)	кВт	0,22 +12,9%	0,17
4	Вартість одного кВт/год радіатора	грн.(USD)	45 (1,8)	45 (1,8)
5	Річна виручка від продажів	грн.(USD)	1 100 000 (44 000)	1 100 000 (44 000)
Собівартість				
6	Матеріали основні та допоміжні	грн.(USD)	68 750 000 (2 750 000)	110 000 000 (4 400 000)+40%
7	Зарплата основна та допоміжна	грн.(USD)	8 750 000 (350 000)	13 000 000 (520 000) +48%
8	Нарахування на зарплату	грн.(USD)	150 000 (6000)	220 000 (8 800)

Закінч. табл. 5.8

1	2	3	4	5
9	Електроенергія	грн.(USD)	2 250 000 (90 000)	1 000 000 (400 000) +344%
10	Амортизація	грн.(USD)	430 000 (17 200)	470 000 (18 800)
11	Інші витрати	грн.(USD)	500 000 (20 000)	500 000 (20 000)
12	Собівартість	грн.(USD)	120 000 000 (4 800 000)	167 500 000 (6 700 000)
13	Прибуток	грн.(USD)	5 200 000 (208 000)	3 300 000 (132 000)
14	Чистий прибуток	грн.(USD)	3 200 000 (128 000)	2 500 000 (100 000)
15	Чистий прибуток (витрати підприємства)	грн.(USD)	82 000 000 (3 280 000)	52 500 00 (2 100 000)
15	Термін окупності з часу введення в дію виробництва	рік	1	1,5

Примітка: 1 USD=25 грн.

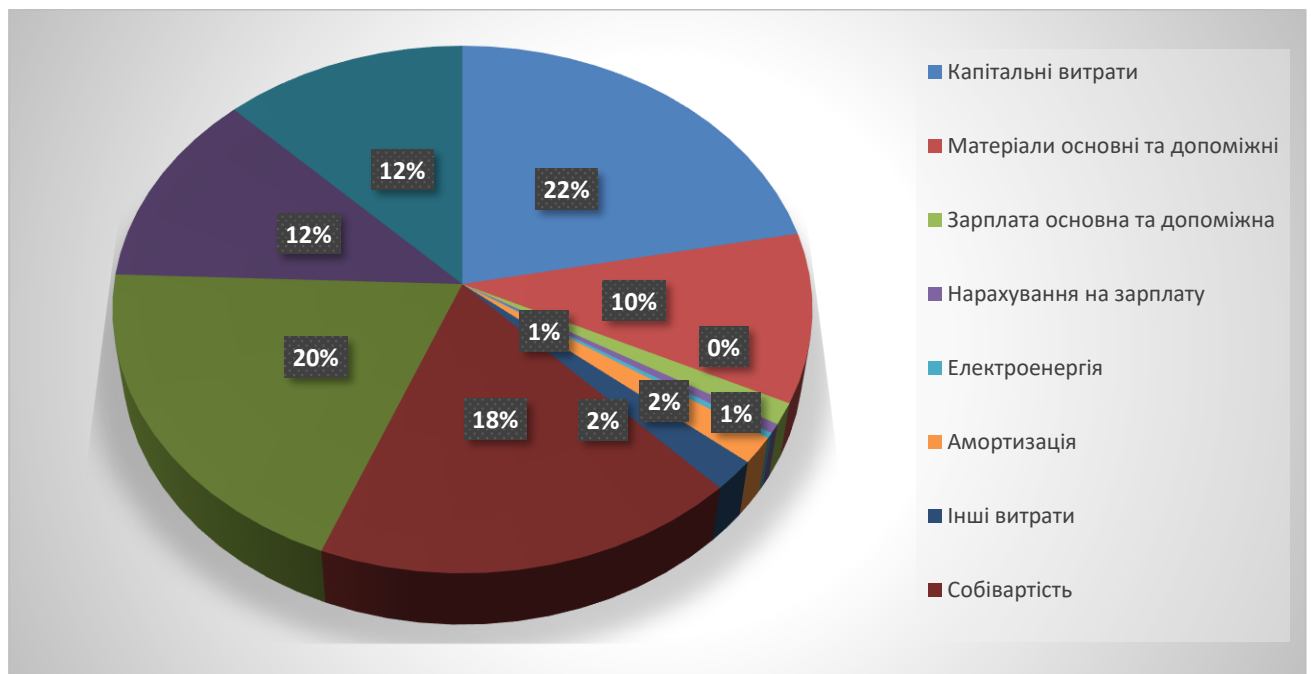


Рис. 5.18 Діаграма техніко-економічної ефективності виробництва радіаторів з магнієвого сплаву МЛ5 ГОСТ2856-79

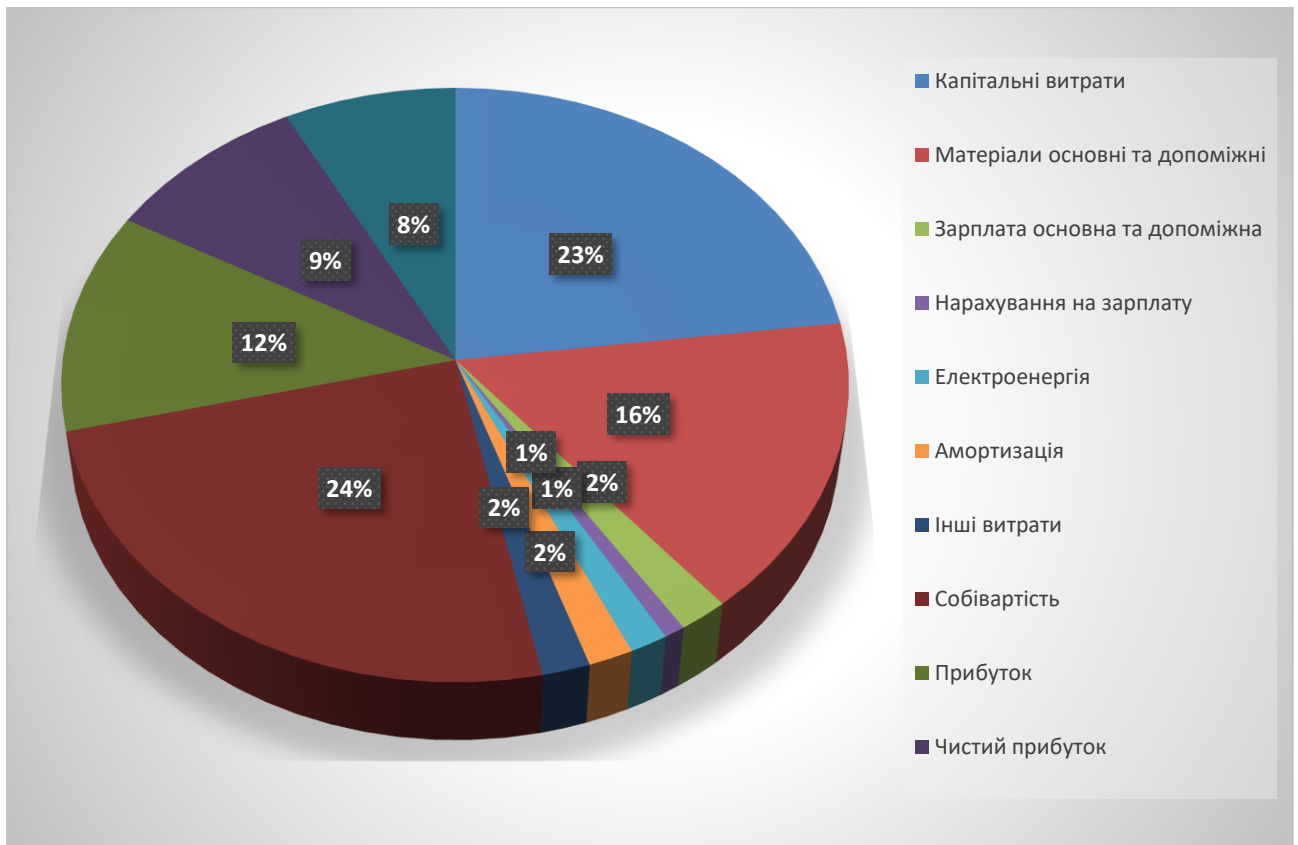


Рис. 5.19. Діаграма техніко-економічної ефективності виробництва радіаторів з алюмінієвого сплаву АК12 ДСТУ 2938-94

Аналіз даних щодо організації виробництва радіаторів з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів, економічної ефективності наведених у табл. 5.8 і на рис.5.18 показав, що при реалізації проекту виробництва литих радіаторів з магнієвих сплавів основні економічні показники витрат основних і допоміжних матеріалів, електроенергії, фонду заробітної плати, собівартості, чистого прибутку та капітальних витрат і окупності становитимуть 68 750 000 грн. (2 750 000 USD), 2 250 000 грн. (90 000 USD), 8 750 000 грн. (350 000 USD), 120 000 000 грн. (4 800 000 USD), 82 000 000 грн. (3280 000 USD) та 145 000 000 грн. (5 800 000 USD) і 1 рік відповідно

Аналіз даних щодо організації виробництва радіаторів з алюмінієвих сплавів, економічної ефективності наведених у табл. 5.8 і на рис.5.19 показав, що при реалізації проекту виробництва литих радіаторів з алюмінієвих сплавів основні економічні показники витрат основних і допоміжних матеріалів,

електроенергії, фонду заробітної плати, собівартості, чистого прибутку та капітальних витрат і окупності становитимуть 110 700 000 грн. (4 4000 000 USD), 1 000 000 грн. (400 000 USD), 13 000 000 грн. (520 000 USD), 52 500 000 грн. (2 100 000 USD) та 157 500 000 грн.(6 800 000 USD) і 1.5 років окупності відповідно.

Порівняльний аналіз економічних показників організації виробництва радіаторів з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів показав, що при реалізації проекту виробництва литих радіаторів з магнієвих сплавів витрати основних і допоміжних матеріалів, електроенергії, фонду заробітної плати, собівартість, чистий прибуток та капітальні витрати і окупність знижуються у порівнянні з виробництвом аналогів з алюмінієвих сплавів у 1,6 рази, 1,15 разів, 1,5 рази, 1,3 рази, 1,6 рази та 1,1 і 1,5 рази відповідно.

Таким чином, порівняльний аналіз економічних показників організації виробництва радіаторів з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів показав, що при реалізації проекту виробництва литих радіаторів з магнієвих сплавів річний чистий прибуток становить 82 000 000 грн. (3280 000 USD) проти аналогічного виробництва радіаторів з алюмінієвих сплавів, де чистий прибуток становить 52 500 000 грн. (2 100 000 USD), тобто на 160 % нижчий у порівнянні з виробництвом литих радіаторів з магнієвих сплавів.

5.9 Висновки до розділу 5

1. Відповідно до мети дисертаційної роботи і встановлених закономірностей одержання магнієвих сплавів з використанням безперервного та імпульсного захисту газовою сумішшю на якість розплаву та виливків литтям під тиском були розроблені технологічні процеси плавлення магнієвих сплавів в захисній газовій атмосфері з безперервною чи імпульсною їх подачею в плавильний чи роздатковий агрегат, а також автоматизована система контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском з

оцінкою їх надійності при довготривалій експлуатації в промислових умовах в серійному та масовому виробництві виливків з магнієвих сплавів.

2. Для реалізації створених технологій захисту розплаву магнію було створено чи доопрацьовано обладнання і автоматизовані системи управління комплексу лиття під тиском з безперервним та імпульсним процесом газового захисту розплаву магнієвих сплавів, а також для реалізації технологічного процесу лиття магнієвих сплавів у вакуумовані прес-форми.

3. Проведені дослідно-промислові перевірки створених технологічних процесів і обладнання для їх реалізації з використанням нової конструкції радіатору з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів, які є перспективною продукцією на внутрішньому та зовнішньому ринку споживання. Водночас проведені дослідження щодо стабільності, надійності, довговічності технологічних процесів та обладнання для їх реалізації, що дало змогу розробити техніко-економічне обґрунтування щодо організації виробництва радіаторів з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів у обсязі 1 000 000 шт./рік.

4. Порівняльний аналіз ефективності організації виробництва радіаторів з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів у обсязі 1 000 000 шт./рік показав, що при реалізації проекту виробництва литих радіаторів з магнієвих сплавів основні за рахунок зменшення витрат основних і допоміжних матеріалів, електроенергії, фонду заробітної плати, собівартості показники річного чистого прибутку становлять 82 000 000 грн.(3 280 000 USD) і термін окупності проекту 1 рік, проти аналогічних показників лиття продукції з алюмінієвих сплавів у 52 500 000 грн. (2 100 000 USD) і 1,5 року відповідно.

За розрахунком на одиницю продукції литих радіаторів з магнієвих сплавів типу МЛ5 ГОСТ2856-79 собівартість і чистий прибуток становитимуть 110 грн.(4,5 USD) і 85 грн.(3,5 USD).

ВИСНОВКИ

1. Вперше розроблено методику для досліджень поверхневого натягу розплавів магнію безпосередньо у промислових металоємних плавильних та роздаткових агрегатах з газовим захистом розплаву магнію, визначено основні фактори впливу на поверхневий натяг, а також на експериментальний сплав, в якості якого прийнято сплав МЛ5 ГОСТ 2856-79.

2. Вперше для розробки технологічного процесу лиття магнієвих сплавів з газовим захистом рідкого металу, дослідження впливу та оптимізації складу захисної газової суміші на окиснюваність, механічні властивості магнієвих сплавів при їх одержанні в металоємних плавильних агрегатах був створений стенд на базі машини лиття під тиском з гарячою камерою пресування мод. СР МГН 400 з системою автоматизованого керування складом захисної газової суміші та їх витратами при створенні заданої атмосфери в порожнині плавильних агрегатів.

3. Вперше встановлені закономірності одержання магнієвих сплавів з використанням безфлюсового безперервного газового захисту розплаву на базі сірчистого ангідриду SO_2 , і співвідношення хлору Cl_2 та водню H_2 в захисній атмосфері плавильного агрегату, проведений аналіз одержаних результатів натурних і розрахункових експериментів і при цьому визначено, що на зростання корозійної стійкості цих сплавів істотно впливає вміст SO_2 (0,12 - 0,70 л/хв), значення якої обернено пропорційно змінюється з 7 до $12 \cdot 10^{-3}$ г/м²год, тобто в 1,7 рази; встановлені також оптимальні витрати SO_2 , H_2 , Cl_2 в суміші захисних газів, які знаходяться в межах 0,12-0,25 л/хв, $3,0-4,0 \cdot 10^{-3}$ м³/кг та 0,002-0,004 м³/кг, а це дає змогу досягти мінімізації окиснюваності за критерієм масового коефіцієнту корозії виливків з магнієвого сплаву типу МЛ5 ГОСТ 2856-79 до значень $7-8 \cdot 10^{-3}$ г/м²год.

4. Вперше встановлені закономірності одержання магнієвих сплавів з використанням імпульсної подачі газової суміші для захисту магнієвого розплаву, де у якості факторів були обрані – температура T_1 і поверхневий

натяг сплаву σ , вміст сірчистого ангідриду SO_2 і гексофториду сірки SF_6 , а у якості відгуку – час існування захисної плівки (до загоряння), проведений аналітично-регресивний аналіз одержаних результатів і при цьому визначено, що на зростання межі руйнування захисної плівки для магнієвих сплавів Y істотно впливає вміст SO_2 (0,2-0,8 %), тобто при зростанні вмісту SO_2 значення Y обернено пропорційно спадає з 420 до 140 с, тобто зменшується втричі, встановлено також оптимальні параметри названих основних факторів впливу на імпульсну обробку розплаву магнію, які знаходяться для значень вмісту SO_2 і SF_6 , %, T_i і σ в межах 660-700 і 520-550 дін/м, $3,0-4,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$ та 0,002-0,004 $\text{м}^3/\text{кг}$, а це дає змогу досягти підвищення порогу існування плівки на поверхні магнієвого розплаву в межах 560-620 с. Водночас встановлено, що витрати складових захисної суміші, а саме SO_2 і SF_6 , при їх імпульсній подачі в 12 та 19 разів нижча у порівнянні з технологією безперервної подачі цих захисних газів у атмосферу плавильного агрегату.

5. Досліджені закономірності впливу названих технологічних параметрів імпульсного захисту магнієвих сплавів у порівнянні з традиційним «флюсовим», за результатами аналітично-регресивного аналізу одержаних даних встановлено, що за значеннями коефіцієнту вагової корозійної стійкості $K_{\text{ваг}}$, та глибинним показником корозійної стійкості Π , під дією атмосфери навколишнього середовища вказані характеристики для сплаву МЛ5, у одержанні якого використаний газовий захист становлять 0,008 г/м²год і 0,04 мм/рік, а при використанні традиційного «флюсового методу» аналогічні характеристики відповідають значенням 2,01 г/м²год і 10,3 мм/рік, тобто ступінь корозії при використанні традиційних методів вища в 250 і 260 разів відповідно.

6. Вперше визначено вплив імпульсної дії газової захисної суміші розплаву на механічні властивості виливків з магнієвих сплавів, одержаних під високим тиском і при цьому встановлено, що за умов варіювання технологічними параметрами, як вмісту сірчаного ангідриду SO_2 та поверхневого натягу і температури розплаву, значення міцності, відносного

видовження та твердості МЛ5 може знаходитись в межах 140-285 МПа, 1,1-3,1, 80-100 НВ відповідно. Водночас слід відзначити, що величина міцності, пластичності перевищує аналогічні характеристики для виливків з сплаву МЛ5, що визначені у ГОСТ 2856-79 для лиття під тиском у 1,5 та 3 рази відповідно.

7. Завдяки комплексному дослідженню впливу основних факторів створеної імпульсної технології, включаючи температуру T_1 і поверхневий натяг сплаву σ , вміст сірчистого ангідриду SO_2 і гексофториду сірки SF_6 , а у якості відгуків – час існування захисної плівки (до загоряння) розплаву, корозійна стійкість і механічні властивості виливків з магнієвих сплавів, стало можливим розробити вихідні данні для послідуячого створення автоматизованої системи контролю і регулювання, модернізувати плавильні та роздаткові агрегати для одержання високоякісних виливків з магнієвих сплавів, в першу чергу, за технологією лиття під тиском, включаючи у вакуумовані форми.

8. Створено автоматизовану систему контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском з використанням механізму та регресивних моделей впливу основних технологічних параметрів, включаючи: поверхневий натяг і температуру розплаву магнію, складу суміші захисних газів на термін існування захисної плівки на поверхні магнієвого розплаву у плавильному чи роздатковому агрегаті лиття під тиском

9. Проведено аналіз експлуатаційної надійності створеної системи контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском за визначеними характерним ознаками надійності: параметр потоку відмов; середній час відновлення; коефіцієнт технічного використання; загальний коефіцієнт використання зі статистичною обробкою інформації, яка була отримана в результаті дворічної експлуатації створеної системи керування процесами лиття магнієвих сплавів з газовим захистом розплаву. Обробка

отриманої статистичної інформації дозволила визначити параметри експлуатаційної надійності робочої системи: для системи в цілому 334 год, для системи, що підлягає ремонту - 295 год, для системи, що не ремонтується 379 год, а інтенсивність відмов для системи в цілому не перевищує значення 3×10^{-4} 1/год.

10. Для визначення надійності автоматизованої системи контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском адаптовано методику та створено комплекс для її реалізації в умовах прискорених випробувань, що дозволяє розрахувати отримані результати для нової системи імпульсної подачі захисних газів в умовах її тривалої експлуатації.

11. Проведено прискорені випробування системи імпульсної подачі газового захисту, які передбачають одночасні випробування імпульсної подачі захисних газів з відомими експлуатаційними показниками надійності базової системи захисту під флюсом, при цьому встановлено, що інтенсивність відмов для системи захисту поверхні розплаву магнію не перевищує значення $30 \cdot 10^{-4}$ 1/год, а аналогічний показник для систем захисту розплаву магнію під флюсом становить $39 \cdot 10^{-4}$ 1/год, тобто інтенсивність відмов при використанні базового методу на 30% вища ніж при методі захисту рідкого магнію у газовому захисному середовищі.

11. Розроблені технологічні процеси плавлення магнієвих сплавів в захисній газовій атмосфері з безперервною чи імпульсною їх подачею в плавильний чи роздатковий агрегат, а також автоматизована система контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском з оцінкою їх надійності при довготривалій експлуатації в промислових умовах в серійному та масовому виробництві виливків з магнієвих сплавів.

12. Для реалізації створених технологій захисту розплаву магнію було доопрацьовано обладнання і автоматизовані системи управління комплексу лиття під тиском з безперервним та імпульсним процесом газового захисту

розплаву магнієвих сплавів, а також для реалізації технологічного процесу лиття магнієвих сплавів у вакуумовані прес-форми.

13. Проведені дослідно-промислові перевірки створених технологічних процесів і обладнання для їх реалізації з використанням нової конструкції радіатору з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів, які є перспективною продукцією на внутрішньому та зовнішньому ринку споживання. Водночас проведені дослідження щодо стабільності, надійності, довговічності технологічних процесів та обладнання для їх реалізації, що дало змогу розробити техніко-економічне обґрунтування щодо організації виробництва радіаторів з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів у обсязі 1 000 000 шт./рік .

14. Порівняльний аналіз ефективності організації виробництва радіаторів з магнієвих сплавів взамін аналогів з алюмінієвих сплавів у обсязі 1 000 000 шт./рік показав, що при реалізації проекту виробництва литих радіаторів з магнієвих сплавів за рахунок зменшення витрат основних і допоміжних матеріалів, електроенергії, фонду заробітної плати, собівартості показники річного чистого прибутку становлять 82 000 000 грн (3 280 000 USD) і термін окупності проекту 1 рік, проти аналогічних показників лиття продукції з алюмінієвих сплавів у 52 500 000 грн (2 100 000 USD) і 1,5 року відповідно.

15. За розрахунком на одиницю продукції литих радіаторів з магнієвих сплавів типу МЛ5 ГОСТ2856-79 собівартість і чистий прибуток становитимуть 110 грн (4,5 USD) і 85 грн (3,5 USD). Результати роботи пройшли промислові випробування в “BAMAX Poland Sp.zoo”, Польща (акт від 22.10.2015) та ДП ІЦЛПД, Україна (акт від 20.11.2017).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Magnesium Die Casting Handbook (1998) NADACA.
2. Deetz, J. (2005). The Use of Wrought Magnesium in Bicycles, *Journal of Metals*, pp50-53.
3. F. Czerwinski (Ed.), *Magnesium Alloys-Design, Processing and Properties*, Rijeka:INTECH, 2011.
4. B. L. Mordike and T. Ebert (2001) *Magnesium: properties—applications—potential*. Materials Science Engineering A.
5. Erickson Sterhen C, *Magnesium: aproven material for light automotive die castings* «SAE Prepr». 1977. № 770323, 12 pp., ill.
6. J. J. Kim and D. S. Han (2008) Recent development and applications of magnesium alloys in the Hyundai and Kia Motors Corporation. *Materials Transactions*, 49,894–897.
7. Преимущества производства отливок из магниевых сплавов / А. А. Крейцер, **К. А. Крейцер**, Т. И. Капацिला, Т. В. Лисенко // V Международная научно-практическая конференция «Литье 2010». Запорожье: ТПП, 2010. С.140 – 142.
8. P. Lyon, I. Syed, and S. Heaney. Elektron 21—an aerospace magnesium alloy for sand cast and investment cast applications. *Advanced Engineering Materials*, 9(9),793–798.
9. Мухина И.Ю., Сарыгихин Н.А., Репин В.Н. Основы бесфлюсовой плавки магниевых сплавов. В сб. «Высокопрочные цветные сплавы и производство отливок из них». - М.: ДНТП. -1978. -С. 98.
10. LI W X. (2005). *Magnesium and Magnesium Alloys*, Chang sha: Central South University Press, 2005:87-210.
11. M. Paramsothy, M. Gupta, and N. Srikanth (2008) Improving compressive failure strain and work of fracture of magnesium by integrating it with millimeter lengthscale aluminum. *Journal of Composite Materials*, 42(13),

12. GUO X T, LI P J, LIU S X et al.(2002).Development status and prospect of heat resistant rareearth-magnesium Alloy. Foundry, 2002, 51(2):68.
13. H. E. Friedrich and B. L. Mordike (ed.) (2006) Magnesium Technology—Metallurgy, Design Data, Applications. Springer.
14. Шаров М.В., Александрова Ю.П., Бобрышев Б.Л. Газовые защитные среды для плавки магниевых сплавов. В кн.: Магниевые сплавы /-М.: Наука. - 1978. - С.152-158.
15. Мухина И.Ю. Получение фасонного литья из магниевых сплавов при плавке без флюса в открытых печах. В кн.: Магниевые сплавы. М.: Наука. - 1978. -С. 130-133.
16. S. K. Thakur, M. Paramsothy, and M. Gupta (2010) Improving tensile and compressive strengths of magnesium by blending it with aluminium. Materials Science and Technology, 26(1), 115–120.
17. M. P. Staiger, A. M. Pietak, J. Huadmai, and G. Dias (2006) Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: a review. Biomaterials, 27, 1728–1734.
18. Y. W. Song, D. Y. Shan, and E. H. Han (2008) Electrodeposition of hydroxyapatite coating on magnesium alloy for biomaterial application. Materials Letters, 62, 3276–3279.
19. Плавка магниевых сплавов с применением защитной атмосферы и особенности технологии производства новых магниевых сплавов / Бондарев Б.И., Иванов В.С., Пономаренко А.М. и др. В кн.: Магниевые сплавы. М.: Наука. -1978. -С.124-129
20. PEI L X, ZHANG J S, GAO Y B.(2005). The effect of La on microstructure and macrohardness of AZ91 Magnesium alloy. Research Studies on Foundry Equipment, 2005, 2(1):20-22.
21. Каинов В.М. Перспективы производства отливок из алюминиевых и магниевых сплавов // Приложение к журналу «Авиационная промышленность». -1989. -56. -№1.-С.2-4.

22. Дуюнова В.А., Уридия З.П. Исследование воспламеняемости литейных магниевых сплавов системы Mg-Zn-Zr // Литейщик России. 2012. №11. С. 21-23.

23. Гольдшлегер У.И., Амосов С.Д. Режимы горения и механизмы высокотемпературного окисления магния в кислороде // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, №3.

24. W. E. Mercer II (1990) Magnesium die cast alloys for elevated temperature applications. SAE Technical Paper 900788. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.

25. Якимов В.И., Калинин А.Т. Исследование газовых защитных атмосфер, разработка технологического процесса и конструкторской документации для бесфлюсового приготовления магниевых сплавов. Отчет № 291-1725. / Комсомольск-на-Амуре: НИАТ - 1989. -46 с.

26. BERKMORTEL J, HENRY H, JAMES E K. (2000). Die cast ability assessment of magnesium alloys for high temperature applications: Part 1 of 2 [J]. SAE Transactions, 2000, 109:574- 581.

27. Корнышева И.С., Волкова Е.Ф. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 212 – 222

28. Волкова Е.Ф., Мухина И.Ю. Новые материалы на магниевой основе и высокоресурсные технологии их производства // Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 28 – 34

29. R. E. Brown (2006) Magnesium and Its Alloy. In M. Kutz (ed) Mechanical Engineers Handbook: Materials and Mechanical Design, New York, Wiley. vol. 1, 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc.

30. Уридия З.П., Мухина И.Ю. Исследование микроструктуры магниевое – циркониевой лигатуры и жаропрочного литейного магниевых сплава МЛ10 // ВИАМ, №10, 2015

31. MORDIKE B L, EBERT T. (2001). Magnesium properties-applications potential [J]. Materials Science and Engineering, 2001, A302: 37-45.

32. Мухина И.Ю. Структура и свойства новых литейных магниевых сплавов, ВИАМ, №7, 2011
33. G. Wu, J. Dai Non-flux purification behavior of AZ91 magnesium alloy. National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China. 2010
34. X.Xie, J. Shen, L. Cheng, Y. Li Effects of nano-particles strengthening activating flux on the microstructures and mechanical properties of TIG welded AZ31 magnesium alloy joints. Materials & Design, Volume 81, 15 September 2015, Pages 31-38
35. X. Wang, S.Xiong. Protection behavior of SO₂-containing cover gases to molten magnesium alloy. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 21, Issue 4, April 2011, Pages 807-813
36. J.W. Freuling, Protective Atmospheres for Molten Magnesium, Ph.D. Dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA, 1970.
37. Гини Э.Ч., Зарубин А.М., Рыбкин В.А. Технология литейного производства: Специальные способы литья – М.: Издательский центр «Академия» 2005 -352с.
38. Иванов В.Н. Специальные виды литья /Учебное пособие/ – М.:МГИУ – 2007 – 316с.
39. E.J. Vinarcik High Integrity Die Casting Processes John Wiley & Sons, Inc., New York, NY (2003)
40. A.A. Luo, K. Sadayappan Technology for Magnesium Castings American Foundry Society, Schaumburg, IL (2011) pp. 29–47
41. A.A. Luo, P.H. Fu, Y.D. Yu, L.M. Peng, H.Y. Jiang, C.Q. Zhai, A.K. Sachdev Low Pressure Die Casting of AZ91 and AM50 Magnesium Alloys AFS Paper 08-147 American Foundry Society, Schaumburg, IL (2007)
42. Лисенко Т. В., **Крейцер К. А.**, Моветич В. Ю. Сеточный метод защиты магниевого сплава от возгорания // Литье. Metallurgy. 2016 : материалы XII междунар. науч.-практ. конф. (г. Запорожье, 24-26 мая 2016 г.) / под общ. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.И. Запорожье, ЗТПП. С.142 – 144.

43. Л.В. Никулин Литье под давлением магниевых сплавов. –М.: Машиностроение, 1978. – 181 с.
44. Исследование защитных газовых сред при плавке некоторых магниевых сплавов М.В. Шаров, Б.Л. Бобрышев, Л.В. Кузьмичев, Ю.П. Александрова. В сб. «Повышение качества и надежности литых изделий», Ярославль. -1976. - С. 51-57.
45. WANG M X, ZHOU H et al.(2007). Effect of Y and Ce addition on microstructure and mechanical properties of AZ91D Magnesium alloy. Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition, 2007, 37(1): 7-10.
46. Мухина И.Ю., Сарыгихин Н.А., Репин В.Н. Основы бесфлюсовой плавки магниевых сплавов. В сб. «Высокопрочные цветные сплавы и производство отливок из них». - М.: ДНТП. -1978. -С. 98.
47. Альтман, М.В. Плавка и литье легких сплавов. [Текст]. - М.: Машиностроение, 1998. - 680 с.
48. Чурсин, В.М. Технология цветного литья. [Текст] / В.М.Чурсин, Бидуля П.Н. .. - М.: Машиностроение, 2001. - 250 с.
49. Колобнев И.Ф., Крымов В.В., Мельников А.В. Справочник литейщика. Цветное литье из легких сплавов. - М.: Машиностроение, 1974. - С. 175, 235, 261
50. Кривошеев А.Е., Основы научных исследований и литейном производстве, -Киев, 1979. – 168с.
51. Гини Е.Ч. Технология литейного производства. Специальные виды литья [Текст] Е.Ч. Гини Е.Ч., А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин - М.: Академия, 2005. -352 С.
52. Чухров М.В. Модифицирование магниевых сплавов. - М.: Металлургия, 1972. -176 с.
53. Якимов В.И., Калинин А.Т. Исследование газовых защитных атмосфер, разработка технологического процесса и конструкторской документации для бесфлюсового приготовления магниевых сплавов. Отчет № 291-1725. / Комсомольск-на-Амуре: НИАТ - 1989. -46 с.

54. Бесфлюсовая плавка магниевых сплавов в открытых печах / А.А. Лебедев, И.Ю.Мухина, Н.А. Сарычихин и др. // «Литейное производство». - 1976. -№ 11. -С. 16.

55. Дружинин Б.Н., Мухина И.Ю. Технология и оборудование для плавки магниевых сплавов в защитных газовых средах Приложение к журналу «Авиационная промышленность». -1989. -№ 1. -С. 9-13.

56. Исследование защитных газовых сред при плавке некоторых магниевых сплавов / М.В. Шаров, Б.Л. Бобрышев, Л.В. Кузьмичев, Ю.П. Александрова. В сб. «Повышение качества и надежности литых изделий», Ярославль. -1976. - С. 51-57.

57. Мухина И.Ю., Широков Ю.Г., Лебедев А.А. Особенности плавки магниевых сплавов в защитной атмосфере, содержащей элегаз // Авиационная промышленность, 1984. № 4. -С. 63-65.

58. Бобрышев Б.Л., Александрова Ю.П. Управляемый технологический процесс защиты магниевых сплавов от окисления // Авиационная промышленность. 1985. № 7. С. 73-75.

59. РТМ 1.4. 1715-87. Плавка и разливка магниевых сплавов без применения флюсов в производстве фасонных отливок / Дружинин Б.Н., Мухина И.Ю. -М.: НИАТ, 1987. 60 с.

60. Исследование газовых защитных атмосфер, разработка технологического процесса и конструкторской документации для бесфлюсового приготовления магниевых сплавов (отчет) № 291 - 1725. НИАТ. Якимов В.И., Беляуш СИ., Калинин А.Т., Середнякова Э.Ф. Комсомольск - на - Амуре. 1989. 46 с.

61. Дружинин Б.И., Бычкова Л.В. Плавка и разливка магниевых сплавов без применения флюсов в производстве фасонных отливок. РТМ 1.4.1715 - 87. 60 с

62. Патент 2154689, С22В 26/22, С22С 23/00, RU. Способ приготовления магния и его сплавов в открытых печах / Якимов В.И., Калинин А.Т., Якимов А.В. Заявка № 99114138/02 от 28.06.1999. Бюл. № 23 от 20.08.2000

63. Якимов В.И., Калинин А.Т., Якимов А.В. Заливка магниевых сплавов в струе защитного газа. Межрегиональная конференция. Роль науки, новой

техники и технологий в экономическом развитии регионов. Сборник научных трудов научных сотрудников КНААПО. М., ЭКОМ. 2001. с. 119 – 121

64. Albright DA, Haagensen JO (1997) Life cycle inventory of magnesium. 54th IMA Conference, June

65. Franke G. (2000) Industrial recycling of magnesium alloys. Automotive Light Metals 1 (2), pp. 48–54

66. King J.F., Thistlethwaite S (1994) Magnesium recycling for the European die casting industry. EFM-Aalen Magnesium Abnehmerseminar, Sept. 15–16, Aalen Germany

67. Berkmortel R, Wang GG, Bakke P (2000) Fluxless in-house recycling of high purity magnesium die cast alloys at Meridian operations. 57th IMA Conference, Vancouver BC, Canada, May, pp. 22–27

68. Magnesium alloys casts quality control at low pressure casting technology / T. V. Lysenko, V. M. Tonkonogiy, L. V. Bovnagra, **K. O. Kreutzer** // Proceedings 5-th International conference «Economics and Management-Based on New Technologies» emont 2015. Vrnjacka Banja, Serbia, 2015. P. 307 – 311.

69. Berkmortel R, Wang GG, Bakke P (2001) Continuous fluxless recycling of high purity magnesium die cast alloys, Paper to be published at CIM, Ottawa, Ontario, Canada, August

70. Морозова, Г. И. Влияние водорода на фазовый состав и коррозию магниевых сплавов / Г. И. Морозова, Е. А. Лукина // Коррозия: материалы, защита. - 2015. - № 12. - С. 10-14

71. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники / В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 20–26.

72. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.

73. Дуюнова В.А., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. и др. Научное наследие академика И.Н. Фридляндера. Современные исследования магниевых и

литейных алюминиевых сплавов в ВИАМ //Цветные металлы. 2013. №9. С. 71–78.

74. Козлов И.А., Каримова С.А. Коррозия магниевых сплавов и современные методы их защиты //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 15–20.

75. Дуюнова В.А., Уридия З.П. Исследование воспламеняемости литейных магниевых сплавов системы Mg–Zn–Zr //Литейщик России. 2012. №11. С. 21–23.

76. Мухина И.Ю., Дуюнова В.А., Уридия З.П. Перспективные литейные магниевые сплавы //Литейное производство. 2013. №5. С. 2–5.

77. Дуюнова В.А. Методы защиты магниевых сплавов в отечественном литейном производстве с 1930-х гг. до настоящего времени //Литейщик России. 2010. №10. С. 35–37.

78. Мельников Н.А. Об образовании газовой пористости в отливках из алюминиевых и магниевых сплавов //Литейное производство. 2006. №2. С. 4.

79. Мухина И.Ю., Уридия З.П. Магний – основа сверхлегких материалов //Металлургия машиностроения. 2005. №6. С. 29–31.

80. Садков В.В., Лапонов Ю.Л., Агеев А.П. и др. Перспективы и условия применения магниевых сплавов в самолетах ОАО «Туполев» //Металлургия машиностроения. 2007. №4. С. 19–23.

81. Holta O, Hustoft OM, Strømhaug SI, Albright DL (1993) Two furnace melting system formagnesium, NADCA 93, Cleveland Ohio, USA, October. NADCA, Rosemont, Illinois, USA, pp. 49–53

82. Barannik IA, Devyatkin VN (1992) Magnesium alloys usage in the USSR. Secondary metalprocessing, In Mordike BL, Hehmann F (eds) Magnesium Alloys and their applications DGM Informationsgesellschaft, Oberursel, Germany, pp. 43–49

83. Housh SE, Petrovich V (1992) Magnesium refining: A fluxless alternative. SAE Technical Paper, 920071, SAE International, Warrendale, PA, USA

84. Методи підвищення якості товстостінних виливків, отриманих литтям під тиском / Т. В. Лисенко, В. В. Ясюков, **К. О. Крейцер**, Е. М. Козішкурт,

Ю. Д. Пономаренко // Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві: матеріали VIII міжнар. наук.-техн. конф. (м. Краматорськ, 15-18 жовтня 2019 р.). / за заг. ред. А.М. Фесенка, М.А. Турчаніна. Краматорськ. ДДМА, 2019. С.135 – 136.

85. Bakke P, Karlsen DO (1997) Inclusion assessment in magnesium and magnesium base alloys. SAE Technical Paper 970330. SAE International, Warrendale, PA, USA

86. Holta O, Westengen H, Røen J (1996) High purity magnesium die casting alloys. Impact of metallurgical principles on industrial practice. In Lorimer GW (ed) Proceedings of the 3rd Intl. Magnesium Conference. Inst. of Materials, London, UK, pp. 75–88

87. H. E. Friedrich and B. L. Mordike, "Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications" (2006), Springer.

88. A. Krishnan, U. B. Pal and X. G. Lu, "Solid Oxide Membrane Process for Magnesium Production Directly from Magnesium Oxide," Metallurgical and Materials Transaction B, 36 (4) (2005), 463-473.

89. E. Gratz et al., "Efficiency and Stability of Solid Oxide Membrane Electrolyzers for Magnesium Production," Magnesium Technology 2011 (Wiley-TMS, 2011), 39-42.

90. Лысенко Т. В., **Крейцер К. О.**, Тончук Н. Комплексы оборудования для газовой защиты магниевых сплавов // Литво. Металургія. 2017: матеріали XIII міжнар. наук.-практ. конф. (м. Запоріжжя, 23-25 травня 2017 р.). під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. Запоріжжя, 2017. АА Тандем. С.156 – 158.

91. United States Automotive Materials Partnership (USAMP), Magnesium Vision 2020: A North American Automotive Strategic Vision for Magnesium, Technical Report, USCAR, November 2006.

92. LI Y Z, WANG Q D, Ding W J, et al. (2000). Fracture behavior of AZ91 magnesium alloy. Materials Letters, 2000, 44 (15): 265- 268.

93. A. Kielbus, "Microstructure of AE44 magnesium alloy before and after hot-chamber die casting," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 20(1-2), (2007), 459-462.

94. W. Huang, B. Hou, Y. Pang, and Z. Zhou, "Fretting wear behavior of AZ91D and AM60B magnesium alloys," *Wear*, Vol. 260, (2006), 1173-1178.

95. A.J. Gesing, N.D. Reade, J.H. Sokolowski, and C. Blawert, "Solidification Behavior of Recyclable Mg Alloys - AZ91 and AZC1231," *Magnesium Technology 2009*, (San Francisco, CA: The Minerals, Metals & Materials Society, 2009), 117-128.

96. Лысенко Т. В., **Крейцер К. А.** Влияние технологического процесса плавки магниевых сплавов на коррозионную стойкость отливок // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве – Краматорск : ДГМА, 2013. С. 137 – 138

97. Skar JI, Willekens J (2001) Perspective in Magnesium Applications. *Leichtmetall-Anwendungen. Neue Entwicklungen in der Oberflächentechnik. Berichtsband – Nr 46, der Tagung am 13. und 14 März 2001, Münster. Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung*. V.

98. Inoue M, Iwai M, Kamado S, Kojima Y, Itoh T, Sugama M (1998) A new recycling process for thin walled AZ91D magnesium alloy die castings with paint finishing. In Mordike BL, Kainer KU (eds) *Magnesium Alloys and their Applications. Werkstoff-Informationen gesellschaft mbh*, Frankfurt, Germany, pp. 697–702

99. Skar JI, Bakke P (2001) Effect of phosphorus on the corrosion properties of magnesium alloy AM60, To be published

100. Emley, E.F. (1996). *Principles of Magnesium Technology*, Pergamon Press, 978-0849355547, London.

101. Усовершенствование оборудования и технологии литья под давлением для получения тонкостенных отливок / Т. В. Лысенко, М. П. Тур, **К. А. Крейцер**, Е. Н. Козишкурт // *Металл и литье Украины*. 2018. № 9-10. С. 54–59.

102. Ishikawa, K., Watanabe, H., Mukai, T. (2005). High temperature compressive properties over a wide range of strain rates in an AZ31 magnesium alloy, *J. Mater. Sci.*, 40, 1577–1582.
103. Braszczyńska-Malik K.N. (2005). The study on the shaping of the microstructure of magnesium-aluminium alloys, Publisher: WIPMiFSPCz., ISBN 83-87745-72-3, Częstochowa (in Polish)
104. Braszczyńska-Malik K.N. & Froyen L. (2005). Microstructure of AZ91 alloy deformed by equal channel angular pressing, *Zeitschrift fuer Metallkunde*, Vol. 96, Issue 8, (August 2005) pp. 913-917, ISSN: 00443093
105. Braszczyńska-Malik K.N., Zawadzki I., Walczak W. & Braszczyński J. (2008). Mechanical properties of high-pressure die casting AZ91 magnesium alloy, *Archives of Foundry Engineering*, Vol. 8, Issue 4, (October-December 2008) pp. 15-18, ISSN 1897-3310
106. Máthis K., Gubicza J. & Nam N.H. (2005). Microstructure and mechanical behavior of AZ91Mg alloy processed by equal channel angular pressing, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 394, Issue 1-2, (May 2005) pp. 194-199, ISSN: 09258388
107. POLMEAR I J. (1994) Magnesium alloys and applications. *Materials Science and Technology*, 1994 (1): 1- 16.
108. Mordike B. & Ebert T. (2001). Magnesium properties-applications-potential, *Materials Science and Engineering A*; Vol. 302, Issue 1, (April 15, 2001) pp. 37-45, ISSN 0921-5093
109. Ravi Kumar N.V., Blandin J.J., Desrayaud C., Montheillet F. & Surey M. (2003) Grain refinement in AZ91 magnesium alloy during thermomechanical processing, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 359, Issue 1-2, (October 2003) pp. 150-157, ISSN: 09215093
110. Bursk R.S. (1987). *Magnesium Products Design*, Marcel Dekker, New York.
111. Shibusawa, T ; Kobayashi, Y. & Ishikawa, K. (1997). Fatigue Crack Propagation in Die – cast AZ 91D Magnesium Alloy. *Nippon Kinzoku Gakkaishi* -

Journal of the Japan Institute of Metals, Vol. 61, No. 4, (September, 1997) 298-302, ISSN 0021-4876

112. Крейцер А. А., **Крейцер К. А.**, Лисенко Т. В. Магннеевое литье одно из основных ресурсосберегающих направлений развития литейного производства // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейной индустрии : тезисы докл. VI междунар. науч.-практич. конф. (г. Киев, 21-23 апреля 2010 г.). Киев, 2010. С.44 – 45.

113. Höllrigl-Rosta F, Just E, Köhler J, Melzer HJ (1980) Magnesium in Volkswagen. 37th IMA Conference, pp. 38–45

114. Galiyev, A., Kaibyshev, R. & Gottstein, G. (2001). Dynamic recrystallization in pure magnesium. *Acta Mater.* 49, 1199-1207.

115. Mordike, B.L. & Ebert, T. (2001). Magnesium properties - applications - potential. *Mater. Sci. Eng. A.* 302, 37-45.

116. SHI Y. (2003). Magnesium alloy industry point of no return. *New Economy Weekly*, 2003(9): 66- 68.

117. LIU Haifeng, HOU Jun, LIU Yaohui. (2002). Status and development of study on creep problems of die cast magnesium alloys at high temperature [J]. *Foundry*, 2002, 51(6):330 - 335.

118. REGEV M, PAHUTOVA M, KUCHARAVA K et al. (2002). The role of matrix microstructure in the creep behavior of discontinuous fiber reinforced AZ91 magnesium alloys [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, A324 (1 - 2)151 - 156.

119. Kim, Shae K.; Lee, J. K.; Jang D. I.; Yoon, Y. O.; Ha, S. H.; Yoo, H. J.; Park, S. M.; Lee, C. H. & Kim, Y. J (2009). Eco-Mg for magnesium future. *Proceedings of 66th Annual World Magnesium Conference (IMA-2009)*, San Francisco, May 2009, IMA, USA

120. Лисенко Т. В., **Крейцер К. А.**, Бабилунга А. В. Исследование и выбор оптимального технологического процесса бесфлюсовой плавки магниевых сплавов // *Металл и литье Украины*. 2014. № 7. С. 19 – 23.

121. Westphal, K., Mulherkar, T. and Schneiding, W. (2005) Joining of magnesium components using Al fasteners, *Light Metal Age*, 4, 2-3
122. Marya, M. and Edwards, G. R. (2000) The laser welding of magnesium alloy AZ91D, *Welding World*, 44, 2, 31-37
123. Лисенко Т. В., **Крейцер К. А.**, Худенко Н. П. Методы повышения точности результатов эксперимента в литейном производстве // *Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов*. 2013. № 1(152). С. 146 – 148.
124. Выбор оптимального комплекса оборудования для безфлюсовой защиты магниевых сплавов / Т. В. Лисенко, **К. А. Крейцер**, В. В. Ясюков, А. А. Бондарь // *Металл и литье Украины*. 2016. № 8-9. С. 283 – 286.
125. Импульсная система безфлюсовой защиты магниевых сплавов от возгорания / Т. В. Лисенко, А. А. Бондарь, **К. А. Крейцер**, Е. Н. Козишкурт, О. Ю. Морозов // *Литво. Металургія*. 2019 : матеріали XV міжнар. наук.-практ. конф. (м. Запоріжжя, 21-23 травня 2019 р.) / під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. Запоріжжя, АА Тандем. 2019. С.130 – 131.
126. Chen, Y. C. and Nakata, K. (2009) Effect of tool geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir lap welded magnesium alloy and steel, *Materials and Design*, 30, 3913-3919
127. Avedesian, M. M. (1999) *Magnesium and Magnesium Alloys*, ASM International, Materials Park, Ohio
128. K.U. Kainer: *Magnesium Alloys and Their Applications*, Willey-VCH, 2000.
129. William D Callister Jr: *Materials Science and Engineering, An Introduction*, John Wiley & sons, Inc. (2006) 577.
130. M. M. Avedesian and H. Baker (ed.) (1999) *ASM Specialty Handbook—Magnesium and Magnesium Alloys*. Materials Park, OH: ASM International.
131. B. L. Mordike and K.U. Kainer (ed.) (1998) *Magnesium Alloys and Their Applications*. Frankfurt, Germany: Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH.
132. J. F. King (2007) Magnesium: commodity or exotic? *Materials Science and Technology*, 23(1), 1–14.

133. A. Tissier, D. Apelian, and G. Regazzoni (1990) Magnesium rheocasting: a study of processing-microstructure interactions. *Journal of Materials Science*, 25(2), 1184–1196.

134. Z. Fan (2005) Development of the rheo-diecasting process for magnesium alloys. *Materials Science and Engineering A*, 413–414, 72–78.

135. S. F. Hassan and M. Gupta (2002) Development of a novel magnesium-copper based composite with improved mechanical properties. *Materials Research Bulletin*, 37, 337–389.

136. Е.Ф. Волкова, И.Ю. Мухина «Новые материалы на магниевой основе и высокоресурсные технологии их производства» // *Технология легких сплавов*, ВИЛС, 2007, №2, стр. 28–34.

137. K. U. Kainer (ed.) (2003) *Magnesium-Alloys and Technologies*. Weinheim, Cambridge: Wiley-VCH.

138. F. S. Pan, A. T. Tang, S. Y. Long, and M. B. Yang (2007) Development and application of wrought magnesium alloys in China. In K. U. Kainer (ed.) *Magnesium, Proceedings of the 7th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications*, Pp. 297–304.

139. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 157–167.

140. Aghion, E., Bronfin B, Von Buch, F. (2003). Newly developed magnesium alloys for powertrain applications. *Journal of Metals*, 55, 2003, vol. 11, pp. 30–33.

141. A. A. Luo (2000) Materials comparison and potential applications of magnesium in automobiles. In H. I. Kaplan, J. N. Hryn, and B. B. Clow (eds) *Magnesium Technology 2000*. Warrendale, PA: TMS, pp. 89–98.

142. A. Luo and T. Shinoda (1998) A new magnesium alloy for automotive powertrain applications. SAE Technical Paper 980086. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.

143. K. Sakamoto, Y. Yamamoto, N. Sakate, and S. Hirabara (1997). Heat-resistant magnesium alloy member. European Patent Application, EP 0 799 901 A1, filed 4 April 1997, published 10 Aug 1997.

144. B. Bronfin, E. Aghion, F. von Buch, S. Schumann, and M. Katsir (2001) Diecasting magnesium alloys for elevated temperature applications. In J. N. Hryn(ed.), Magnesium Technology 2001. Warrendale, PA: TMS, pp. 127–130.

145. MRI 153–New Magnesium Alloy for High Temperature Applications (2001)Beersheva, Israel: Dead Sea Magnesium.

146. Особенности вакуумирования формы при литье под давлением магниевых сплавов / Т. В. Лисенко, **К. А. Крейцер**, В. В. Ясюков, Е. Н. Козишкурт, А. Л. Морозов // Литво. Металургія. 2019 : матеріали XV міжнар. наук.-практ. конф. (м. Запоріжжя, 21-23 травня 2019 р.) / під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. Запоріжжя, АА Тандем. 2019. С.132 – 133.

147. C. S. Goh, J. Wei, L. C. Lee, and M. Gupta (2006) Simultaneous enhancement instrength and ductility by reinforcing magnesium with carbon nanotubes. MaterialsScience and Engineering A, 423, 153–156.

148. Beals, R. S., Tissington, C., Zhang, X., Kainer K., Petrillo J., Verbrugge, M. &Pekguleryuz, M.(2007). Magnesium Global Development: Outcomes from the TMS 2007 AnnualMeeting, Journal of Metals, pp. 39 - 42.

149. Easton, M., Beer, A., Barnett, M., Davies, C., Dunlop, G., Durandet, Y., Blacket, S., Hilditch,T. &Beggs, P. (2008). Magnesium Alloy Applications in Automotive Structures. Journalof Metals. November 2008, Vol. 60, No. 11, 57-62.

150. Erhard, N. and Schlotterbeck, M. (2009). Die Casting for the Future Economically andEcologically. Proceedings of IMA Annual World Magnesium Conference, Fremont, USA,May 31 - June 2, 2009.

151. Munitz A., Cotler C., Stern A. and Kohn G. (2001). Mechanical properties andmicrostructure of gas tungsten arc welded magnesium AZ91D plates, Materials Scienceand Engineering A, Vol. 302, pp. (68–73).

152. Zhu J., Li L. and Liu Z. (2005). CO2 and diode laser welding of AZ31 magnesium alloy,Applied Surface Science, Vol. 247, pp. (300–306).

153. Lathabai S., Barton K. J. and Harris D. (2003). Welding and weldability of AZ31B by gas tungsten arc and laser beam welding processes, *Magnesium Technology*, Vol. 157.
154. Hwang I. S., Kim D. C. and Kang M. J. (2011). Inverter DC resistance spot welding of magnesium alloy AZ31, *Materials Manufacturing and Processing*, Vol. 48, No. 2, pp. (112-117).
155. Marya M. and Edwards G. R. (2000). The laser welding of magnesium alloy AZ91, *WeldingWorld*, Vol. 44, No. 2, pp. (31–37).
156. Czerwinski F. (2010). Welding and joining of magnesium alloys, In: *Magnesium Alloys - Design, Processing and Properties*, chapter 21, pp. (469-490).
157. Dilthey U., Haferkamp H., Niemeyer M. and Trager G. (1998). Laser and EB welding of magnesium alloys, American Institute of Welding, IIW Document No. IV-701-98.
158. Witte F, Ulrich H, Rudert M, Willbold E (2007) Biodegradable magnesium scaffolds: Part1: appropriate inflammatory response *J Biomed Mater Res A* 81: 748–756.
159. Xu L, Yu G, Zhang E, Pan F, Yang K (2007) In vivo corrosion behavior of Mg-Mn-Zn alloy for bone implant application *J Biomed Mater Res A* 83: 703–711.
160. Catrin Kammer (2000) *Magnesium-Taschenbuch*. Düsseldorf: Aluminium-Verlag.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Статті, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Получение отливок в замороженных формах под низким давлением / Н. И. Замятин, Т. В. Лисенко, **К. А. Крейцер**, А. А. Бондарь // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2013. № 2/5 (62). С. 50 – 54.

2. Лисенко Т. В., **Крейцер К. А.**, Бабилунга А. В. Исследование и выбор оптимального технологического процесса бесфлюсовой плавки магниевых сплавов // Металл и литье Украины. 2014. № 7. С. 19 – 23.

3. Лысенко Т. В., **Крейцер К. А.**, Воронова О. И. Модернизация средств управления технологическим процессом изготовления магниевых дисков для установки литья под низким давлением // Металл и литье Украины. 2014. № 11. С. 25–28 .

4. Выбор оптимального комплекса оборудования для безфлюсовой защиты магниевых сплавов / Т. В. Лисенко, **К. А. Крейцер**, В. В. Ясюков, А. А. Бондарь // Металл и литье Украины. 2016. № 8-9. С. 283 – 286.

5. Усовершенствование оборудования и технологии литья под давлением для получения тонкостенных отливок / Т. В. Лисенко, М. П. Тур, **К. А. Крейцер**, Е. Н. Козишкурт // Металл и литье Украины. 2018. № 9-10. С. 54–59.

Статті в іноземних фахових виданнях:

6. Использование нанотехнологий при изготовлении отливок / Т. В. Лысенко, В. В. Ясюков, О. И. Воронова, Е. Н. Козишкурт, **К. А. Крейцер** // Литье и металлургия. 2019. № 4. С. 94–99. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2019-4-94-99>.

Статті в Міжнародній наукометричній базі Scopus:

7. New Binding Materials Based on Recycling Polystyrene Foam for Foundry. Inter Partner 2019 / Tatiana Lysenko, Vladimyr Shinsky, **Kyryll Kreitser**,

Vadym Dotsenko, Predrag Dašić // Advanced Manufacturing Processes. pp 424 – 432. 28 March 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40724-7_43

Тези доповідей на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях:

8. Преимущества производства отливок из магниевых сплавов / А. А. Крейцер, **К. А. Крейцер**, Т. И. Капацिला, Т. В. Лисенко // V Международная научно-практическая конференция «Литье 2010». Запорожье: ТПП, 2010. С.140 – 142.

9. Крейцер А. А., **Крейцер К. А.**, Лисенко Т. В. Магнелие одно из основных ресурсосберегающих направлений развития литейного производства // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейной индустрии : тезисы докл. VI междунар. науч.-практич. конф. (г. Киев, 21-23 апреля 2010 г.). Киев, 2010. С.44 – 45.

10. Лисенко Т. В., **Крейцер К. А.** Влияние технологического процесса плавки магниевых сплавов на коррозионную стойкость отливок // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве – Краматорск : ДГМА, 2013. С.137 – 138

11. Лисенко Т. В., Ясюков В. В., **Крейцер К. А.** Формирование поверхностей раздела в композиционных отливках // Нові матеріали і технології в машинобудуванні Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Киев : НТУУ “КПІ”, 2014. С. 65

12. Magnesium alloys casts quality control at lowpressure casting technology / T. V. Lysenko, V. M. Tonkonogiy, L. V. Bovnegrа, **K. O. Kreutzer** // Proceedings 5-th International conference «Economics and Management-Based on New Technologies» emont 2015. Vrnjacka Banja, Serbia, 2015. P. 307 – 311.

13. Лисенко Т. В., **Крейцер К. А.**, Пархоменко Е. А. Улучшение качества отливок из магниевых сплавов при литье под низким давлением // Литье. Металлургия. 2015 : материалы XI междунар. науч.-практич. конф. (г. Запорожье, 26-28 мая 2015 г.). Запорожье, 2015. С.161.

14. Лисенко Т. В., **Крейцер К. А.**, Моветич В. Ю. Сеточный метод защиты магниевого сплава от возгорания // Литье. Металлургия. 2016 : материалы XII междунар. науч.-практ. конф. (г. Запорожье, 24-26 мая 2016 г.) / под общ. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.И. Запорожье, ЗТПП. С.142 – 144.

15. Лысенко Т. В., **Крейцер К. О.**, Тончук Н. Комплексы оборудования для газовой защиты магниевых сплавов // Литво. Металургія. 2017 : матеріали XIII міжнар. наук.-практ. конф. (м. Запорожжя, 23-25 травня 2017 р.). під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. Запоріжжя, 2017. АА Тандем. С.156 – 158.

16. Импульсная система безфлюсовой защиты магниевых сплавов от возгорания / Т. В. Лисенко, А. А. Бондарь, **К. А. Крейцер**, Е. Н. Козишкурт, О. Ю. Морозов // Литво. Металургія. 2019 : матеріали XV міжнар. наук.-практ. конф. (м. Запорожжя, 21-23 травня 2019 р.) / під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. Запоріжжя, АА Тандем. 2019. С.130 – 131.

17. Особенности вакуумирования формы при литье под давлением магниевых сплавов / Т. В. Лисенко, **К. А. Крейцер**, В. В. Ясюков, Е. Н. Козишкурт, А. Л. Морозов // Литво. Металургія. 2019 : матеріали XV міжнар. наук.-практ. конф. (м. Запорожжя, 21-23 травня 2019 р.) / під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. Запоріжжя, АА Тандем. 2019. С.132 – 133.

18. Методи підвищення якості товстостінних виливків, отриманих литтям під тиском / Т. В. Лисенко, В. В. Ясюков, **К. О. Крейцер**, Е. М. Козішкурт, Ю. Д. Пономаренко // Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві : матеріали VIII міжнар. наук.-техн. конф. (м. Краматорськ, 15-18 жовтня 2019 р.). / за заг. ред. А.М. Фесенка, М.А. Турчаніна. Краматорськ. ДДМА, 2019. С.135 – 136.

Статті, які додатково відображають наукові результати дисертації:

19. Управление процессами литья под низким давлением цветных сплавов / Т. В. Лысенко, В. В. Ясюков, Е. Н. Козишкурт, **К. А. Крейцер** // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2018. №1. С. 27 – 31.

20. The management of processes of casting under low pressure non – ferrous

alloys / T. V. Lysenko, V. V. Yasyukov, E. N. Kozishkurt, **K. A. Kreitser** // Metallurgical and Mining Industry. 2018. №8. С. 36 – 41

21. Управление скоростью затвердевания отливок из сплава АК7 за счет зонального охлаждения при литье под низким давлением / Т. В. Лысенко, Е. Н. Козишкурт, **К. А. Крейцер**, Л. И. Солоненко // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2018. №2. С. 41 – 44.

22. Control of the solidification rate of casting from alloy AL9 due to zonal cooling during low – pressure casting / T. V. Lysenko, E. N Kozishkurt, **K. A. Kreitser**, L. I. Solonenko // Metallurgical and Mining Industry. 2018. №. С.32–35.

23. Using the sph method for modeling the crystallization process of aluminium alloys / T. V. Lysenko, Y. Morozov, K. A. Kreitser, E. N Kozishkurt //World Science. pp 26 – 33. №3(55), Vol.1 March 2020. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31032020/6981

ДОДАТОК Б

Відомості про апробацію результатів дисертації на міжнародних та
всеукраїнських конференціях

Відомості про апробацію результатів дисертації на міжнародних та всеукраїнських конференціях

№ з/п	Назва конференції	Місце проведення	Дата проведення	Форма участі
1	2	3	4	5
1	VI Міжнародна науково-практична конференція «Литьє-2010»	м. Запоріжжя	21 – 23 квітня 2010 р.	заочна
2	VI міжнародна науково-практична конференція «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейной индустрии»	м. Київ	21-23 квітня 2010 р.	очна
3	II міжнародна науково-технічна конференція «Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві»	м. Краматорськ	2013	заочна
4	Міжнародна науково-практичної конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні»	м. Київ	2014	заочна
5	Proceedings 5-th International conference «Economics and Management-Based on New Technologies» emont 2015	Vrnjacka Banja, Serbia	2015	заочна

1	2	3	4	5
6	XI Міжнародна науково-практична конференція «Литве 2015»	м. Запоріжжя, ЗТІП	26 – 28 травня 2015 р	заочна
7	XII Міжнародна науково-практична конференція «Литво 2016»	м. Запоріжжя, ЗТІП	26 – 28 травня 2016 р.	заочна
8	XIII Міжнародна науково-практична конференція «Литво 2017»	м. Запоріжжя, ЗТІП	23-25 травня 2017 р	заочна
9	XV Міжнародна науково-практична конференція «Литво 2019»	м. Запоріжжя, ЗТІП	21-23 травня 2019	заочна
10	VIII міжнародна науково-технічна конференція «Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві»	м. Краматорськ	15-18 жовтня 2019 р	заочна

ДОДАТОК В

Акт промислових випробувань на підприємстві “BAMAX Poland Sp.zoo”,
Польща

ЗАТВЕРДЖУЮ

President of BAMAX Poland Sp. z o.o.

Jadwiga Balawender

PREZES ZARZĄDU

Jadwiga Balawender

«15» березня 2018 р.

АКТ

Ми, що підписалися нижче, від Bamax Poland Sp. z o.o. («Bamax») prezes zarządu Jadwiga Balawender, technolog odlewnik Grzegorz Gadzinski і від Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології та управління ливарними процесами Лисенко Т.В. та завідувач лабораторією НДЛ ССЛ Крейцер К.О. склали цей акт в тому, що в 2018 році в ливарному цеху «Bamax» були проведені випробування технології виготовлення виливків «Радіатор» зі сплаву AZ91D з використанням імпульсної системи захисту магнієвих сплавів, розробленою за рекомендаціями К.О. Крейцера.

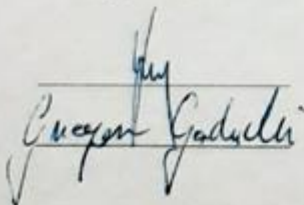
Розроблено блок-схеми роботи імпульсної системи управління процесом. Як основні чинники прийняті: температура сплаву, поверхнєве натягнення та склад захисного газу. Як параметри оптимізації прийняті об'ємний зміст в імпульсі газової суміші сірчистого ангідриду і шестифтористої сірки. В якості узагальненого відгуку при дослідженні і розробці системи управління використали час від подання імпульсу газовій захисній суміші до появи займання. Алгоритм дозволяє за даними інерційних параметрів температури сплаву і поверхневого натягнення визначити значення питомого об'єму подання сірчистого ангідриду та шестифтористої сірки. Таким чином, створена нова технологія виготовлення виливків із магнієвих сплавів з використанням адаптованої імпульсної системи управління дозволяє в 40 і більше разів знизити витрати активних газів, що позитивно позначаються на якості литва.

Встановлено, що всі виливки, отримані відповідно до розробленої технології виготовлення, мають гладку поверхню і характеризуються відсутністю гарячих тріщин, раковин та неметалевих включень. При цьому, використання нової системи на 15...20 % покращило механічні властивості виливків «Радіатор» у порівнянні з аналогічними виливками, що виготовляють з використанням бесфлюсового захисту.

Всі виготовлені виливки-представники пройшли всі види контролю якості, передбачені технологічним процесом ливарного цеху, визнані придатними і передані в механічний цех для подальшої механічної обробки.

Від «Bamax»:

Від ОНПУ:



Balawender J.

Gadzinski G.



Лисенко Т.В.

Крейцер К.О.

ДОДАТОК Г

**Акт перевірки технології на надійність ДП«Інженерний центр литва під
тиском»**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зам. директора ДП «ІЦЛПТ»

Куперман О.Я.

«20» листопада 2017 р.



АКТ

Ми, що підписалися нижче, від ДП «Інженерний центр литва під тиском» («ІЦЛПТ») провідний технолог Конюхова Жанна Олександрівна, завідувач лабораторії Михайлик Михайло Васильович і від Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології та управління ливарними процесами Лисенко Т.В. та завідувач лабораторії НДІ СЛЛ Крейцер К.О. склали цей акт в тому, що в 2017 році в ливарному цеху «ІЦЛПТ» були проведені випробування на надійність технології плавки магнієвих сплавів завдяки використанню імпульсної системи захисту, виготовленою за рекомендаціями К.О. Крейцера.

З метою отримання показників надійності за більш короткі терміни прийнята методика прискорених випробування. Суть зазначеної методики полягає в тому, що випробування з посиленними факторами експлуатаційного впливу передбачає одночасні випробування імпульсної подачі захисних газів і базовою системою з відомими експлуатаційними показниками надійності.

Надійність системи управління і програмного забезпечення визначається з одного боку такими станами як «збій», «зупинка в роботі», так і «часом зниження надійності» в результаті зносу, міцності і хімічних реакцій. Крім того, існує дуже важлива причина зниження надійності - відхилення технологічних параметрів за поле допуску технологічного процесу. Причиною є вплив сукупності навантажень і властивостей середовища. Аналітичний спосіб зводиться до загальних прийомів отримання статистичних оцінок зв'язку за даними вибірок між випадковими величинами потоками відмов.

Отримано таке значення інтенсивності відмов для нової системи $\lambda_{\text{нов.уск}}^{(1)} = 30 \times 10^{-4}$, та отримано значення інтенсивності відмов для старої системи $\lambda_{\text{стар.уск}}^{(0)} = 39 \times 10^{-4}$. Незважаючи на більш складну функціональну систему прогнозований рівень надійності виявився вищим, ніж в системі, яку Крейцер К.О. використовував раніше.

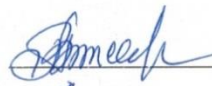
Від ДП «ІЦЛПТ»:

Від ОНПУ:




Конюхова Ж.О.

Михайлик М.В.




Лисенко Т.В.

Крейцер К.О.

ДОДАТОК Д

Акт про впровадження результатів роботи в навчальний процес

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової та науково-педагогічної роботи

Одеського національного політехнічного університету,

доктор технічних наук, професор

 Д.В. Дмитришин
«__» _____ 20__ р.

АКТ

про впровадження результатів кандидатської дисертації

Крейцера Кирилла Олександровича

«ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС ОДЕРЖАННЯ ВИЛИВКІВ ІЗ МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ
ЛИТТЯМ ПІД ТИСКОМ НА ОСНОВІ ІМПУЛЬСНОЇ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ»

в навчальний процес

Ми, що нижче підписалися, заст. завідувача кафедрою «Технології та управління ливарними процесами», кандидат технічних наук, доцент Ясюков В.В., вчений секретар кафедри «Технології та управління ливарними процесами», старший викладач Воронова О.І., склали цей акт у тому, що результати досліджень, методики і моделі, які, відповідно, отримані та розроблені в кандидатській дисертації завідувача лабораторії НДІ ССЛ Крейцера К.О., впроваджені в навчальний процес Одеського національного політехнічного університету при вивченні дисциплін «Теоретичні основи ливарного виробництва», «Моделювання та оптимізація технологічних систем», «Спеціальні способи литва», а також у курсовому і дипломному проектуванні.

Заст. завідувача кафедрою
«Технології та управління ливарними
процесами», к.т.н., доц.

 В.В. Ясюков

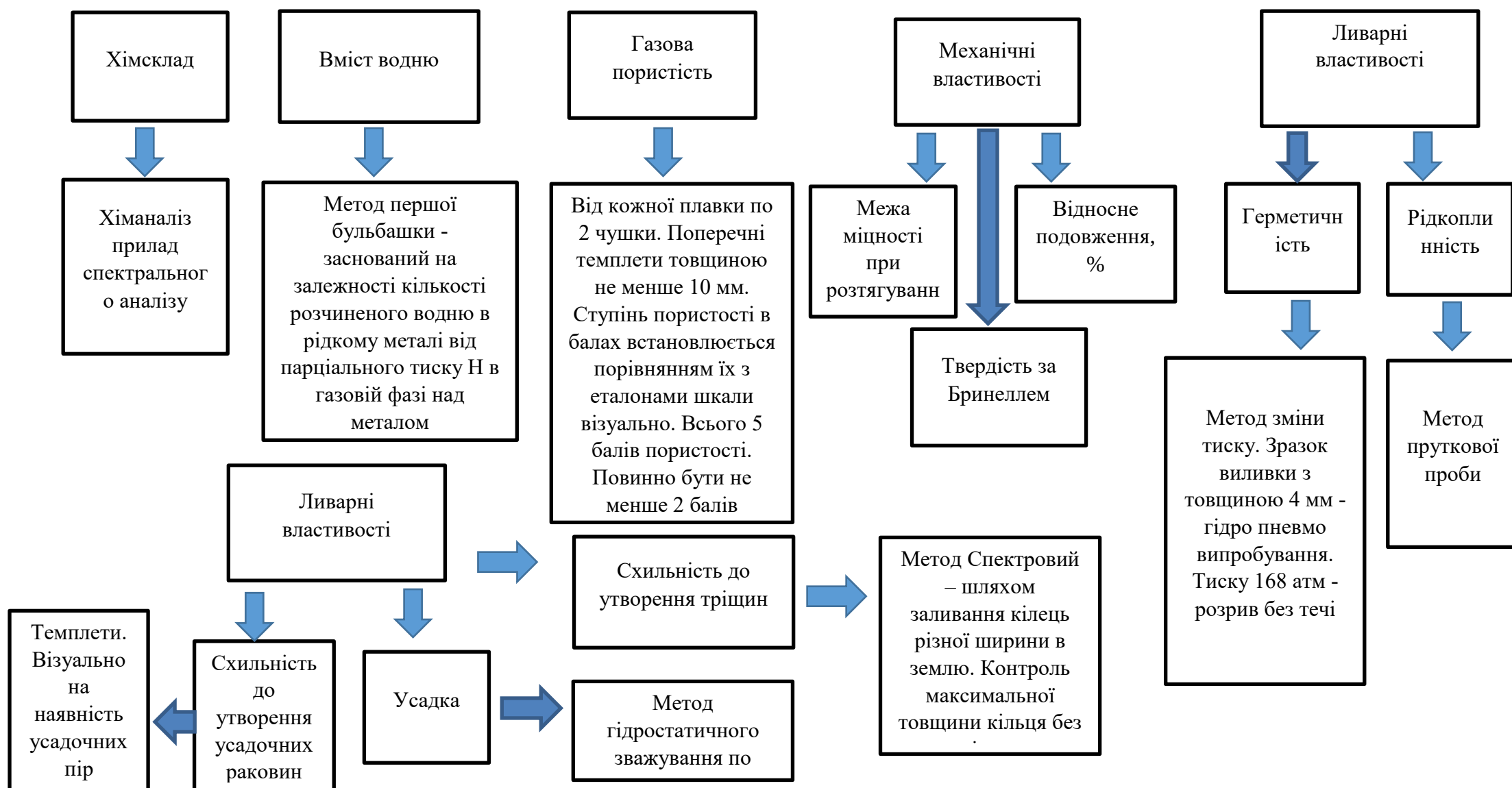
Вчений секретар кафедри
«Технології та управління ливарними
процесами», ст. викл.

 О.І. Воронова

ДОДАТОК Е

Схема контролю хімічного складу, механічних і ливарних властивостей магнієвих сплавів для виливків

Схема контролю хімічного складу, механічних і ливарних властивостей магнієвих сплавів для виливків

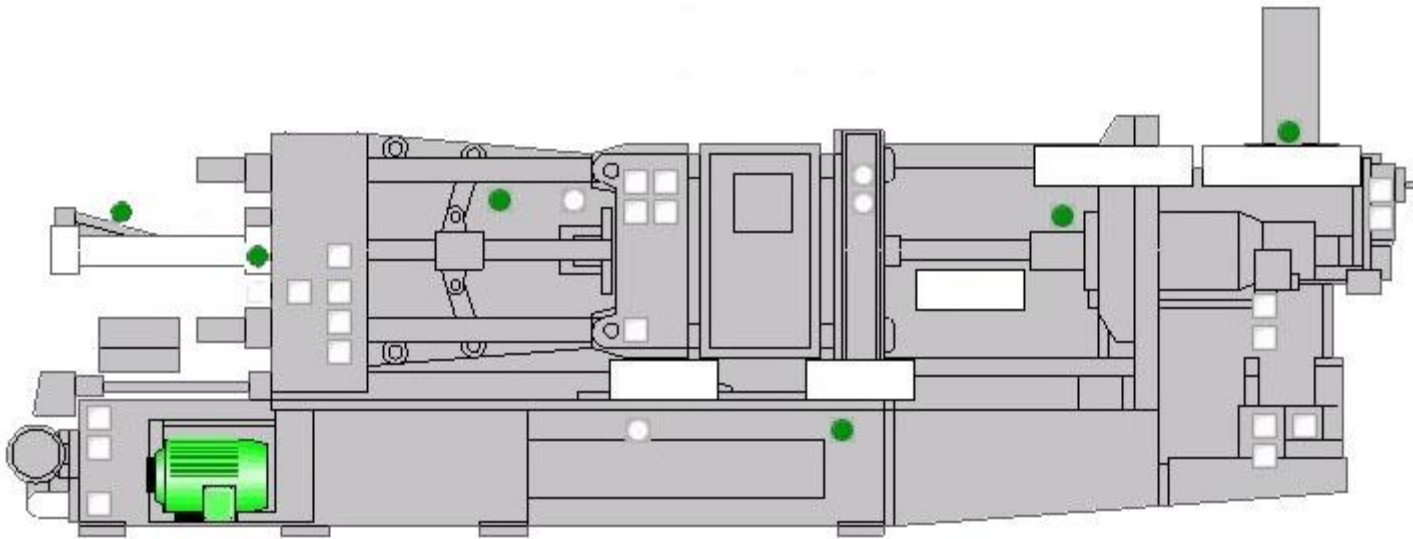
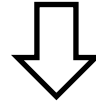


ДОДАТОК Ж

Базова та нова технології системи подачі газової суміші

Стара технологія (Базова)

Безфлюсова система
подачі газової суміші

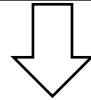


Якість виливка

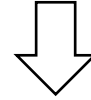
$K_1, K_2, K_3 \dots K_n$

Нова технологія

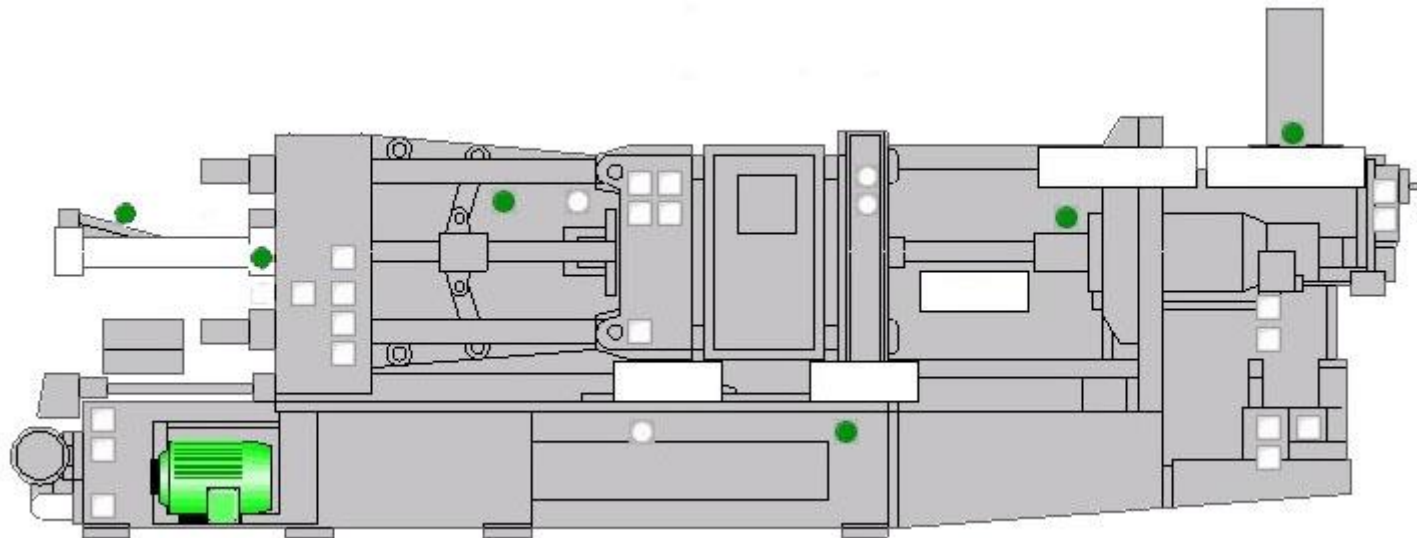
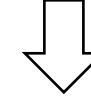
Імпульсна безфлюсова
система подачі газової
суміші



Вакуумування прес -
форми



Модернізація вузла
пресування машини



Якість виливка

$K_1, K_2, K_3 \dots K_n$

ДОДАТОК И

Статистика прискорених випробувань базовим методом бесфлюсового захисту

Статистика прискорених випробувань базовим методом бесфлюсового захисту

	Моменти відмов протягом часу		Моменти відмов протягом часу		Моменти відмов протягом часу
1	32	14	488	27	781
2	56	15	510	28	802
3	101	16	555	29	823
4	143	17	594	30	830
5	221	18	612	31	867
6	235	19	633	32	876
7	272	20	674	33	880
8	301	21	692	34	899
9	334	22	703	35	909
10	389	23	711	36	915
11	404	24	728	37	928
12	415	25	741	38	955
13	430	26	750	39	993
				40	1011
				41	1032

ДОДАТОК К

Статистика прискорених випробувань новим методом імпульсного
бесфлюсового захисту

Статистика прискорених випробувань новим методом імпульсного
бесфлюсового захисту

	Моменти відмов протягом часу		Моменти відмов протягом часу		Моменти відмов протягом часу
1	48	14	462	27	922
2	82	15	476	28	938
3	166	16	552	29	942
4	224	17	576	30	982
5	266	18	604	31	1032
6	288	19	628		
7	320	20	662		
8	348	21	672		
9	380	22	724		
10	414	23	794		
11	444	24	816		
12	450	25	826		
13	456	26	870		

ДОДАТОК Л

Статистика випробувань на новій системі імпульсної подачі захисних газів

Статистика випробувань на новій системі імпульсної подачі захисних газів

№	температура Т	ПН σ	SO ₂ ,%	SF ₆ , %	Час до загоряння Y, сек.
1	2	3	4	5	6
1	648	577	0,2		474
2	642	581	0,2		480
3	644	587	0,2		486
4	640	597	0,2		492
5	650	571	0,2		474
6	640	605	0,2		498
7	643	600	0,2		486
8	641	570	0,2		474
9	640	591	0,2		504
10	642	590	0,2		504
№	температура Т	ПН σ	SO ₂ ,%	SF ₆ , %	Час до загоряння Y, сек.
1	657	585	0,2		456
2	660	553	0,2		420
3	652	577	0,2		474
4	650	597	0,2		480
5	654	570	0,2		450
6	652	593	0,2		492
7	650	595	0,2		492
8	658	558	0,2		438
9	655	570	0,2		456
10	654	567	0,2		450
№	температура Т	ПН σ	SO ₂ ,%	SF ₆ , %	Час до загоряння Y, сек.
1	661	573	0,2	0,05	594
2	662	549	0,2	0,05	582
3	662	545	0,2	0,05	582
4	665	568	0,2	0,05	600
5	660	551	0,2	0,05	576
6	665	556	0,2	0,05	588
7	665	552	0,2	0,05	594
8	666	544	0,2	0,05	582
9	661	573	0,2	0,05	594
10	666	545	0,2	0,05	582

№	температура Т	ПН σ	SO ₂ ,%	SF ₆ , %	Час до загоряння Y, сек.
1	678	544	0,2	0,06	552
2	675	567	0,2	0,06	618
3	676	562	0,2	0,06	606
4	675	554	0,2	0,06	600
5	674	567	0,2	0,06	612
6	675	565	0,2	0,06	660
7	674	559	0,2	0,06	612
8	678	547	0,2	0,06	564
9	678	543	0,2	0,06	570
10	674	560	0,2	0,06	606
№	температура Т	ПН σ	SO ₂ ,%	SF ₆ , %	Час до загоряння Y, сек.
1	684	543	0,3	0,06	606
2	683	531	0,3	0,06	588
3	684	526	0,3	0,06	588
4	682	552	0,3	0,06	552
5	684	543	0,3	0,06	606
6	683	528	0,3	0,06	582
7	683	535	0,3	0,06	594
8	684	526	0,3	0,06	582
9	684	543	0,3	0,06	600
10	683	540	0,3	0,06	594
№	температура Т	ПН σ	SO ₂ ,%	SF ₆ , %	Час до загоряння Y, сек.
1	700	519	0,3	0,07	558
2	690	541	0,3	0,07	624
3	695	532	0,3	0,07	612
4	698	522	0,3	0,07	564
5	694	532	0,3	0,07	600
6	694	530	0,3	0,07	606
7	695	531	0,3	0,07	612
8	698	520	0,3	0,07	594
9	692	537	0,3	0,07	612
10	691	539	0,3	0,07	624

№	температура Т	ПН σ	SO ₂ ,%	SF ₆ , %	Час до загоряння Y, сек.
1	702	525	0,35	0,07	588
2	701	522	0,35	0,07	570
3	702	519	0,35	0,07	594
4	704	515	0,35	0,07	582
5	700	524	0,35	0,07	594
6	710	510	0,35	0,07	582
7	706	513	0,35	0,07	598
8	705	520	0,35	0,07	606
9	704	518	0,35	0,07	564
10	702	523	0,35	0,07	570
№	температура Т	ПН σ	SO ₂ ,%	SF ₆ , %	Час до загоряння Y, сек.
1	712	504	0,4	0,07	540
2	720	496	0,4	0,07	534
3	717	514	0,4	0,07	570
4	716	506	0,4	0,07	546
5	716	505	0,4	0,07	540
6	716	508	0,4	0,07	552
7	717	512	0,4	0,07	564
8	720	503	0,4	0,07	540
9	720	506	0,4	0,07	540
10	719	508	0,4	0,07	546
№	температура Т	ПН σ	SO ₂ ,%	SF ₆ , %	Час до загоряння Y, сек.
1	728	486	0,4	0,08	462
2	727	484	0,4	0,07	468
3	725	498	0,4	0,07	498
4	724	493	0,4	0,07	486
5	727	488	0,4	0,07	474
6	725	495	0,4	0,07	474
7	728	486	0,4	0,07	480
8	724	489	0,4	0,07	492
9	725	500	0,4	0,07	516
10	726	482	0,4	0,07	456

№	температура Т	ПН σ	SO ₂ ,%	SF ₆ , %	Час до загоряння Y, сек.
1	738	507	0,5	0,08	540
2	735	491	0,5	0,08	528
3	734	501	0,5	0,08	534
4	735	496	0,5	0,08	522
5	734	499	0,5	0,08	516
6	732	503	0,5	0,08	534
7	732	503	0,5	0,08	528
8	725	495	0,5	0,08	522
9	730	508	0,5	0,08	534
10	734	494	0,5	0,08	510