

---

## ОТРИМАННЯ І ОБРОБКА РОЗПЛАВІВ

<https://doi.org/10.15407/plit2026.03.003>

УДК 621.74.04:669.721.5

**К.О. Крейцер**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент; email: dakerkir@gmail.com;  
<https://orcid.org/0000-0002-0549-1481>

**Т.В. Лисенко**<sup>1</sup>, докт. техн. наук, проф.; email: tvl@gmail.com;  
<https://orcid.org/0000-0002-3183-963X>

**Є.М. Козішкурт**<sup>2</sup>, докт. філос., старш. викладач;  
email: koziskurtevgen@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-7311-7395>

**М.І. Замятін**<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент; email: zamyatin.m.i@op.edu.ua;  
<https://orcid.org/0000-0001-8458-6341>

<sup>1</sup>Національний університет «Одеська політехніка» (Одеса, Україна)

<sup>2</sup> Одеський національний морський університет (Одеса, Україна)

### ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФЛЮСОВОГО ТА БЕЗФЛЮСОВОГО ЗАХИСТУ НА КОРОЗІЙНУ СТІЙКІСТЬ ВИЛИВКІВ ЗІ СПЛАВУ AZ91D

У роботі представлено результати порівняльного дослідження впливу типу захисту магнієвого розплаву (флюсового з використанням флюсу BI2 та безфлюсового газового на основі суміші SO<sub>2</sub> й SF<sub>6</sub>) на корозійну стійкість, мікроструктуру та механічні властивості виливків зі сплаву AZ91D, отриманих литтям під високим тиском на машині з гарячою камерою пресування. Обґрунтовано доцільність переходу від традиційного флюсового захисту, який є джерелом гігроскопічних хлоридних включень і відповідних мікрогальванічних осередків корозії, до безфлюсової технології плавлення під газовою атмосферою, що ізолює дзеркало розплаву без забруднення сплаву неметалевими включеннями. Методика випробувань включала прискорені кліматичні випробування (4 цикли тривалістю 24 год) й тривалі атмосферні випробування зразків розмірами 40×40×1 мм. Корозійну стійкість оцінювали за ваговим (Кваг, г/м<sup>2</sup>·год) і глибинним (П, мм/рік) показниками, а також за прийнятою 10-бальною шкалою корозійної стійкості металів (терміни — за ДСТУ EN ISO 8044:2018). Експериментальні дані оброблено методами математичної статистики; для встановлення впливу складу захисної газової суміші проведено три серії однотипних експериментів за матрицею повнофакторного плану 2<sup>3</sup>. Встановлено, що застосування безфлюсового газового захисту забезпечує суттєве підвищення корозійної стійкості (Кваг знижується з 2,01 до 0,008 г/м<sup>2</sup>·год, П — з 10,3 до 0,04 мм/рік), зменшення вмісту газів у виливку з 16 до 3 см<sup>3</sup>/100 г та зростання межі міцності з 196 до 265 МПа. Мікроструктурний аналіз підтвердив відсутність неметалевих включень розміром понад 0,5 мкм (за роздільною здатністю оптичної мікроскопії) та формування рівноосної дрібнозернистої структури твердого розчину Al у Mg з рівномірно розподіленою γ-фазою (Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>).

**Ключові слова:** лиття під тиском, магнієвий сплав AZ91D, безфлюсова технологія, газовий захист, корозійна стійкість, мікроструктура, біметалевий радіатор-конвектор.

---

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY license  
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

## Вступ

Завдяки низькій густині магнієвих сплавів ( $1,75\text{--}1,90\text{ г/см}^3$ ), їх високій питомій міцності, демпфуючій здатності і технологічності литтям під тиском зростає їх застосування в авіакосмічній, автомобільній і машинобудівній галузях. Сучасні оглядові роботи [1, 2] свідчать про стабільне зростання частки магнієвих виливків у структурі виробництва легких сплавів та постійне розширення асортименту ливарних магнієвих композицій, що відповідають вимогам конкретних промислових застосувань. Водночас впровадження магнієвих сплавів у серійне виробництво стримує низка технологічних викликів, що систематизовані, зокрема, в роботі [3] стосовно інвестиційного лиття та в роботі [4], присвяченій ливарній здатності магнієвих сплавів при литті під тиском.

Фізико-хімічні особливості магнію — висока хімічна спорідненість до кисню та водню, низький електродний потенціал, схильність до утворення  $\beta$ -фази  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  на межах зерен — зумовлюють підвищену реактивність розплаву та низьку корозійну стійкість виливків [1, 2]. Структурно-фазовий стан виливків із магнієвих сплавів та його зв'язок із корозійною поведінкою детально розглянуто у роботах [5, 6], де показано, що рівномірність розподілу  $\beta$ -фази  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ , її дисперсність і об'ємна частка, а також відсутність екзогенних неметалевих включень є визначальними факторами корозійної стійкості сплавів системи  $\text{Mg}\text{--}\text{Al}\text{--}\text{Zn}$ . Високотемпературне окиснення розплаву супроводжується ризиком займання, тому при плавленні застосовують спеціальні засоби захисту дзеркала розплаву.

Традиційна технологія плавлення магнієвих сплавів передбачає захист розплаву хлорид-вмісними флюсами (зокрема,  $\text{BI2}$  на основі  $\text{MgCl}_2$  і  $\text{KCl}$ ). Незважаючи на ефективність такого захисту з точки зору попередження займання, флюсові включення, що залишаються у виливку, ініціюють локальну (питтінгову) і міжкристалічну корозію, обмежуючи застосування деталей у відповідальних експлуатаційних умовах. Експериментальні дослідження корозійної поведінки сплаву  $\text{AZ91D}$  у різних агресивних середовищах [7, 8] підтверджують, що корозійна стійкість виливка істотно залежить від мікроструктурного стану — наявності, форми та розподілу  $\beta$ -фази  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ , а також від концентрації домішкових і екзогенних включень.

Альтернативою флюсовому захисту виступає безфлюсова плавка магнієвих сплавів під захисною газовою атмосферою на основі сірчастого ангідриду  $\text{SO}_2$  та гексафториду сірки  $\text{SF}_6$ , що формує на поверхні розплаву тонку щільну фторидно-сульфідну плівку без внесення сторонніх включень. Прогрес у розробленні альтернативних методів лиття магнієвих сплавів [9] підтверджує необхідність контролю чистоти розплаву на стадії плавлення. Попередні дослідження авторів [10] продемонстрували можливість суттєвого підвищення корозійної стійкості виливків із магнієвих сплавів за рахунок впровадження новітніх технологій захисту розплаву; проте механізм впливу залишків флюсу на корозійну поведінку, а також одночасний вплив технології захисту на мікроструктуру й механічні властивості виливків зі сплаву  $\text{AZ91D}$ , отриманих литтям під високим тиском, потребують подальшого систематичного обґрунтування.

Відсутність повних кількісних даних, які б одночасно охоплювали показники корозійної стійкості за стандартизованими шкалами, мікроструктурний стан і механічні характеристики виливків зі сплаву  $\text{AZ91D}$ , отриманих за двома альтернативними технологіями захисту розплаву в умовах серійного лиття під високим тиском, формує наукове завдання даної роботи.

### Мета та завдання роботи

Метою роботи є встановлення впливу типу захисту магнієвого розплаву (флюсовий  $\text{BI2}$  / безфлюсовий газовий на основі  $\text{SO}_2 + \text{SF}_6$ ) на корозійну стійкість, мікроструктуру і механічні властивості виливків зі сплаву  $\text{AZ91D}$ , отриманих литтям під високим тиском на машинах із гарячою камерою пресування, а також обґрунтування механізму, що зумовлює спостережувані відмінності між двома технологіями.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання:

- розробити уніфіковану методику корозійних випробувань зразків зі сплаву AZ91D, одержаних за двома технологіями захисту розплаву, з оцінкою стійкості за ваговим, глибинним показниками та 10-бальною шкалою корозійної стійкості металів (за ДСТУ EN ISO 8044:2018);
- провести три серії однотипних експериментів за матрицею повнофакторного плану з подальшою статистичною обробкою результатів;
- встановити кількісні відмінності корозійної стійкості, газонасиченості, мікроструктури та механічних характеристик виливків, отриманих за флюсовою і безфлюсовою технологіями;
- обґрунтувати фізико-хімічний механізм підвищення корозійної стійкості при переході на безфлюсовий газовий захист.

*Матеріали та методи*

*Матеріал дослідження.* Як модельний матеріал використано магнієвий сплав AZ91D — найпоширеніший ливарний магнієвий сплав системи Mg–Al–Zn для лиття під тиском (хімічний склад нормує ДСТУ ISO 16220:2008 «Магній і магнієві сплави. Зливки та виливки з магнієвих сплавів. Технічні умови»). Хімічний склад дослідного сплаву наведено в табл. 1.

**Таблиця 1**

**Хімічний склад сплаву AZ91D (за ДСТУ ISO 16220:2008), мас. %**

| Al      | Zn      | Mn       | Si    | Fe    | Cu    | Ni    | Be     | Zr     | інші | Mg    |
|---------|---------|----------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|------|-------|
| 7,5–9,0 | 0,2–0,8 | 0,15–0,5 | ≤0,25 | ≤0,06 | ≤0,10 | ≤0,01 | ≤0,002 | ≤0,002 | ≤0,5 | решта |

Сплави системи Mg–Al–Zn характеризуються поєднанням високої технологічності, доброї заповнюваності тонкостінних форм при литті під тиском, достатньої міцності та малої густини; фундаментальні характеристики ливарної здатності таких сплавів систематизовано в [4]. Сплав AZ91D розглядається як базовий матеріал для лиття під тиском у дослідженнях нових композицій для роботи в широкому діапазоні температур [11]. Алюміній сприяє підвищенню міцності й утворенню β-фази  $Mg_{17}Al_{12}$ ; марганець знижує негативний вплив залізистих домішок, а вміст домішок Cu, Ni обмежений до значень, що мінімізують катодні центри електрохімічної корозії.

*Технологічні системи захисту розплаву.* Дослідження проводили на двох технологіях:

- традиційна (флюсова) — з використанням флюсу BI2 на основі  $MgCl_2$  та KCl;
- дослідна (безфлюсова) — захист дзеркала розплаву імпульсною подачею суміші захисних газів на основі  $SO_2$  (0,12–0,15 л/хв) і  $SF_6$  з осушеним повітрям-носієм; температурний інтервал витримки розплаву в тиглі плавильного агрегату — 720–750 °C.

*Обладнання.* Зразки одержано на спеціалізованому комплексі лиття під тиском магнієвих сплавів на базі машини CP MGH 400 з гарячою камерою пресування (зусилля замикання 400 тс  $\approx$  3924 кН), оснащеної плавильно-роздатковою піччю з системою імпульсної подачі захисних газів, лабіринтовим вакуумуванням прес-форми, термостатуванням і автоматизованою системою керування на базі контролера Siemens. Машина відповідає європейським стандартам безпеки 98/37 EG і EN 869. Промислові випробування здійснено в умовах серійного виробництва на підприємстві «BAMAX Poland Sp. z o.o.» (Польща) та на Державному підприємстві «Інженерний центр литва під тиском» (Україна). Впровадження результатів роботи на ДП «Інженерний центр литва під тиском» демонструє перспективу організації відповідного виробництва на вітчизняній виробничій базі.

*Методика корозійних випробувань.* Корозійну стійкість визначали за двома кількісними та одним якісним показниками:

- ваговий показник Кваг ( $г/м^2 \cdot год$ ) — за втратою маси зразка, віднесеною до площі поверхні та часу витримки (формула 1);
- глибинний показник П (мм/рік) — за перерахунком вагової втрати в лінійну

(формула 2);

- бальна оцінка корозійної стійкості за прийнятою у практиці ливарного виробництва 10-бальною шкалою корозійної стійкості металів; термінологічна основа — ДСТУ EN ISO 8044:2018 «Корозія металів та сплавів. Основні терміни та визначення понять».

Зразки для випробувань вирізали з робочих ділянок виливків біметалевих радіаторів-конвекторів (зона стінки секції), розміри 40×40×1 мм, кількість зразків — по 6 на кожну технологію (по 2 для кожного режиму випробувань). Випробування виконували в Спеціалізованій лабораторії кліматичних випробувань ДП «Інженерний центр литва під тиском» за двома режимами:

- прискорені кліматичні випробування — 4 цикли тривалістю 24 год кожен (96 год сумарно) у камері з циклічно зміненим температурно-вологісним режимом;
- тривалі атмосферні випробування — витримка протягом 1 місяця в умовах неопалюваного приміщення в зимовий період.

Перед і після випробувань зразки зважували на аналітичних вагах із з точністю до  $1 \cdot 10^{-4}$  г; продукти корозії видаляли за стандартною процедурою (хімічна обробка з подальшим зважуванням і контролем повноти видалення). Розрахунок вагового показника корозії проводили за формулою:

$$K_{\text{ваг}} = (m_0 - m_1) / (S_0 \cdot \tau), \quad (1)$$

де  $m_0$  — початкова маса зразка, г;  $m_1$  — маса зразка після видалення продуктів корозії, г;  $S_0$  — площа поверхні зразка,  $\text{м}^2$ ;  $\tau$  — час корозії, год.

Глибинний показник розраховували за формулою:

$$\Pi = K_{\text{ваг}} \cdot \omega / \rho_{\text{ме}}, \quad (2)$$

де  $\omega = 8,76$  (перевідний коефіцієнт від  $\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$  до  $\text{мм}/\text{рік}$ );  $\rho_{\text{ме}}$  — густина металу,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

**Статистична обробка.** Для встановлення впливу складу захисної газової суміші на корозійну стійкість виконано три серії однотипних експериментів за матрицею повнофакторного плану  $2^3$  (фактори  $X_1$  — вміст  $\text{SO}_2$ ,  $X_2$  — вміст  $\text{H}_2$ ,  $X_3$  — вміст  $\text{Cl}_2$ ; кожна серія — 8 точок плану). Дисперсію відтворюваності оцінювали за паралельними дослідженнями в нульовій точці, значущість коефіцієнтів регресії — за критерієм Стюдента, адекватність рівняння регресії — за критерієм Фішера. Кінцеві значення в табл. 3 подано як середні арифметичні за трьома серіями.

**Дослідження мікроструктури.** Шліфи виготовляли в циліндричних адаптерах діаметром 22 мм; полірування на бічній поверхні абразивного круга; травлення — у 4%-му спиртовому розчині  $\text{HNO}_3$ . Дослідження проводили на мікроскопі МІМ-М з відеокамерою при збільшеннях  $\times 100$  (мікропланар  $F=40$  мм) і  $\times 300$  (планахромат  $F=40$  мм). Зауважимо, що при подальшому викладенні термін «неметалеві вклучення розміром понад 0,5 мкм не виявлено» застосовується в межах роздільної здатності використаної оптичної мікроскопії. Мікротвердість визначали на приладі ПМТ-3.

**Хімічний склад і механічні характеристики виливків.** Визначення хімічного складу та механічних властивостей (тимчасова межа міцності  $\sigma_{\text{в}}$ , відносне видовження  $\delta$ , твердість HB) проводили відповідно до ДСТУ ISO 16220:2008 «Магній і магнієві сплави. Зливки та виливки з магнієвих сплавів. Технічні умови».

Технологічні параметри лиття зразків наведено в табл. 2. На цих же параметрах одержано виливки біметалевого радіатора-конвектора, для якого основні конструктивні параметри подано в табл. 3.

Зазначені числові значення відображають параметри саме експериментального лиття; раніше в тексті подано граничні характеристики обладнання (тиск пресування до 600 МПа, швидкість прес-поршня до 12 м/с, прискорення до 1200  $\text{м}/\text{с}^2$ , потужність вприскування до 3000 кВт) є технічними можливостями машини в цілому.

**Таблиця 2**

**Технологічні параметри лиття зразків і виливків зі сплаву AZ91D  
на машині CP MGH 400**

| Парметр                               | Одиниця<br>вимірювання | Значення      |
|---------------------------------------|------------------------|---------------|
| Сплав                                 | —                      | AZ91D         |
| Зусилля замикання                     | кН                     | 3924 (400 тс) |
| Температура плавильної печі           | °C                     | 720–750       |
| Температура заставної деталі          | °C                     | 230–290       |
| Діаметр стакану пресування            | мм                     | 102           |
| Швидкість прес-поршня (підпресування) | м/с                    | 0,4           |
| Швидкість прес-поршня (запресування)  | м/с                    | 1,6–2,1       |
| Максимальна швидкість поршня          | м/с                    | 4,0           |
| Хід поршня запресування               | мм                     | 85            |
| Повний шлях поршня                    | мм                     | 230           |
| Тиск підпресування                    | МПа                    | 1,34–1,50     |
| Швидкість впуску металу               | м/с                    | 60–80         |
| Вакуумування форми                    | МПа                    | –0,06         |
| Доза сплаву на цикл                   | кг                     | 2,4           |
| Кількість металу, що розплавляється   | кг/год                 | 175           |
| Тривалість циклу                      | с                      | 25–30         |
| Маса вилівка із заставною деталлю     | кг                     | 1,388         |

**Таблиця 3**

**Основні параметри і технічні вимоги до радіатора-конвектора  
зі сплаву AZ91D**

| № | Параметер                                                               | Одиниця | Значенн   |
|---|-------------------------------------------------------------------------|---------|-----------|
| 1 | Номінальний тепловий потік однієї секції (граничні відхилення +4%; –5%) | Вт      | 140       |
| 2 | Максимальний робочий надлишковий тиск                                   | МПа     | ≤ 1,6     |
| 3 | Випробувальний надлишковий тиск                                         | МПа     | ≥ 2,4     |
| 4 | Габаритні розміри секції (Ш×В×Г)                                        | мм      | 80×355×70 |
| 5 | Міжосьова відстань                                                      | мм      | 300       |
| 6 | Маса однієї секції                                                      | кг      | ≤ 1,9     |
| 7 | Лінійна щільність теплового потоку                                      | Вт/м    | 1800      |

*Результати і обговорення*

**1. Корозійна стійкість.** На рис. 1 представлено комплекс лиття під тиском магнієвих сплавів, на базі якого проведено дослідження. Результати кількісної оцінки корозійної стійкості зразків зі сплаву AZ91D після прискорених кліматичних випробувань узагальнено в табл. 4.

Площа поверхні зразка, ураженого продуктами корозії після прискорених кліматичних випробувань, для зразків із безфлюсовим газовим захистом становила



Рис. 1. Загальний вигляд комплексу обладнання для лиття під тиском магнієвих сплавів на базі машини CP MGH 400 з гарячою камерою пресування

**Таблиця 4**

**Показники корозійної стійкості виливків зі сплаву AZ91D  
(середні значення за трьома серіями експериментів)**

| Показник корозійної стійкості                 | Безфлюсовий газовий захист ( $\text{SO}_2 + \text{SF}_6$ ) | Флюсовий захист BI2  | Кратність зниження |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------|
| Площа ураження поверхні, %                    | 1,6                                                        | 40                   | у 25 разів         |
| Ваговий показник Кваг, г/м <sup>2</sup> ·год  | 0,008                                                      | 2,01                 | у 250 разів        |
| Глибинний показник П, мм/рік                  | 0,04                                                       | 10,3                 | у 260 разів        |
| Бал за 10-бальною шкалою корозійної стійкості | 4 (стійкі)                                                 | 10 (цілком нестійкі) | —                  |

1,6 %, тоді як для зразків з флюсовим захистом — 40 %. На зразках із флюсовим захистом після видалення продуктів корозії спостерігалися кратерні дефекти площею 2,5–3 мм<sup>2</sup> і глибиною до 0,8 мм з характерним здуттям по периметру висотою 0,025 мм, що свідчить про локалізований питтінговий характер корозії.

Спостережуване зниження вагового показника корозії в 250 разів і глибинного — в 260 разів зумовлене сукупністю чинників фізико-хімічної природи, які становлять механізм впливу типу захисту розплаву на корозійну поведінку готових виливків:

- при флюсовому захисті залишки флюсу BI2, що вмонтовуються у виливок як неметалеві включення, є джерелами хлорид-іонів  $\text{Cl}^-$  — найактивніших активаторів пітингової корозії магнієвих сплавів. Хлорид-іони руйнують пасивну плівку  $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{MgO}$  на поверхні металу, ініціюючи локальні аноди;
- гігроскопічність флюсу BI2 призводить до підвищеної газонасиченості розплаву воднем; при кристалізації водень виділяється у вигляді мікрорихлот, які виходять на поверхню виливка та формують додаткові корозійні концентратори;
- неметалеві включення флюсу різко локалізують гетерогенність структури, формуючи мікрогальванічні пари з сусідніми ділянками твердого розчину  $\alpha\text{-Mg}$  і  $\beta$ -фази  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ . У безфлюсовій технології ці паразитні мікрогальванічні елементи фактично відсутні, а  $\beta$ -фаза розподілена рівномірно і функціонує як суцільний бар'єр поширенню корозії, а не як локальний катод;
- газовий захист  $\text{SO}_2 + \text{SF}_6$  формує на поверхні розплаву щільну тонку плівку, що

забезпечує меншу контамінацію розплаву і, як наслідок, нижчу густину дислокаційних і включених концентраторів корозії в кристалізованому металі.

Перехід виливків із групи «цілком нестійкі» (10 балів) до групи «стійкі» (4 бали) за 10-бальною шкалою корозійної стійкості при заміні флюсового захисту на безфлюсовий газовий є наслідком зазначених структурних і композиційних змін металу.

**2. Газонасиченість і механічні властивості.** Для верифікації того, що зменшення кількості неметалевих включень безпосередньо позначається на якості виливків, у сертифікованих лабораторіях підприємства «ВАМАХ» проведено вимірювання газонасиченості розплаву та виливка, а також визначення механічних характеристик зразків зі сплаву AZ91D, отриманих за обома технологіями захисту (табл. 5).

Зниження газонасиченості металу в 3–5 разів узгоджується з усуненням

**Таблиця 5**

**Порівняльні характеристики виливків зі сплаву AZ91D,  
отриманих за двома технологіями захисту розплаву**

| Характеристика                                  | Флюсовий захист ВІ2           | Безфлюсовий газовий захист    | Зміна            |
|-------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|
| Рідкоплинність, мм                              | 305                           | 310                           | +1,6%            |
| Гарячеламкість, Пг/мм                           | 17                            | 15                            | –12%             |
| Межа міцності $\sigma_B$ , МПа                  | 196 (20 кгс/мм <sup>2</sup> ) | 265 (27 кгс/мм <sup>2</sup> ) | +35%             |
| Відносне видовження $\delta$ (стан Т4), %       | 4,0                           | 1,5                           | –2,5             |
| Твердість за Брінеллем (стан Т4), НВ            | 70                            | 85                            | +21%             |
| В'язкість, ст                                   | 0,41                          | 0,31                          | –24%             |
| Газонасиченість сплаву, см <sup>3</sup> /100 г  | 25                            | 8                             | у 3,1 рази менше |
| Газонасиченість виливка, см <sup>3</sup> /100 г | 16                            | 3                             | у 5,3 рази менше |

гідроген-генеруючих включень флюсу та обмеженням контакту розплаву з повітрям. Підвищення межі міцності з 196 до 265 МПа (на 35 %) і зростання твердості за Брінеллем з 70 до 85 НВ безпосередньо корелює зі зниженням пористості виливків, відсутністю крупних оксидних і флюсових включень та більш рівномірним розподілом  $\beta$ -фази. Аналогічні висновки щодо домінуючої ролі мікроструктурного стану — чистоти меж зерен і однорідності розподілу  $\beta$ -фази  $Mg_{17}Al_{12}$  — у формуванні корозійної поведінки виливків AZ91D незалежно підтверджено в дослідженнях [7, 8]. Зменшен-



Рис. 2. Варіанти конструкції біметалевого радіатора-конвектора з алюмінієвого сплаву (А) і магнієвого сплаву AZ91D (Б)

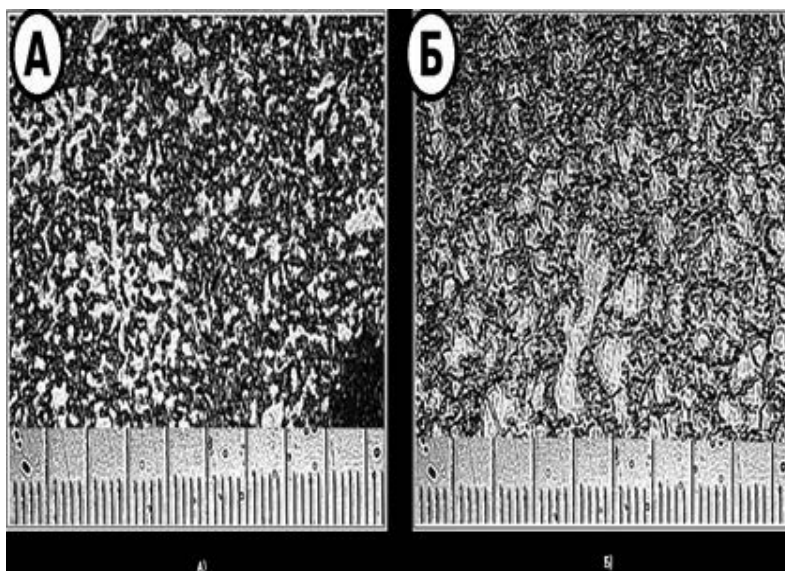


Рис. 3. Мікроструктура сплаву AZ91D: А — традиційна (флюсова) технологія; Б — дослідна (безфлюсова газозахисна) технологія,  $\times 300$

ня відносного видовження  $\delta$  за станом Т4 з 4,0 до 1,5 % відображає закономірний компроміс між міцністю і пластичністю при зменшенні розміру дисипативних дефектів структури.

На рис. 2 показано варіанти конструкції біметалевого радіатора-конвектора з алюмінієвого і магнієвого сплавів, виготовлені на тій самій ливарній оснастці. На рис. 3 представлено мікроструктуру сплаву AZ91D, отриманого за двома технологіями.

**3. Мікроструктурний аналіз.** Мікроструктура зразка, отриманого за традиційною флюсовою технологією (рис. 3, А), характеризується наявністю дрібних світлих кутоподібних зерен твердого розчину Al у Mg та темних включень  $\gamma$ -фази ( $Mg_{17}Al_{12}$ ), нерівномірно розподілених скупчень темно-коричневих неметалевих включень розміром до 500–600 мкм екзогенного походження (продукти флюсу, оксидні плівки), а також численних дрібних сателітних включень того ж складу. Окремі ділянки шліфа містять плівкові включення по межах зерен гострокутної або витягнутої форми. Мікротвердість включень за даними ПМТ-3 становить 387 МПа, тоді як мікротвердість матриці — 161 МПа, що підтверджує їх високу твердість і потенційну роль як концентраторів напружень.

Мікроструктура зразка, отриманого за дослідною (безфлюсовою) технологією (рис. 3, Б), складається зі світлих зерен округлої форми, рівномірно оточених більш дрібнодисперсною  $\gamma$ -фазою; великих темно-коричневих включень не виявлено, а локалізованих включень розміром понад 0,5 мкм у межах роздільної здатності використаної оптичної мікроскопії (мікроскоп MIM-M,  $\times 100$  і  $\times 300$ ) не зафіксовано. Стосовно частинок субмікронного діапазону ( $< 0,5$  мкм) для подальших досліджень доцільно застосовувати методи сканувальної електронної мікроскопії з енергодисперсійним аналізом.

Сукупність результатів свідчить, що технологічна перевага безфлюсового газового захисту реалізується через комплекс взаємопов'язаних структурно-композиційних змін: усунення хлорид-вмісних і оксидних включень, зменшення газонасиченості, формування рівноосної дрібнозернистої структури з рівномірним розподілом  $\beta$ -фази. Ці зміни одночасно забезпечують підвищення корозійної стійкості (на два порядки за шкалою балів) і помірне зростання міцнісних характеристик за рахунок дещо нижчої пластичності.

## Висновки

1. Розроблено уніфіковану методику порівняльної оцінки корозійної стійкості виливків зі сплаву AZ91D, отриманих за флюсовим (BI2) і безфлюсовим ( $\text{SO}_2 + \text{SF}_6$ ) захистом розплаву, яка ґрунтується на трьох показниках — ваговому Кваг, глибинному П і бальному за 10-бальною шкалою корозійної стійкості металів (ДСТУ EN ISO 8044:2018), з обробкою результатів трьох серій експериментів за матрицею повнофакторного плану  $2^3$ .

2. Експериментально встановлено, що перехід від флюсового до безфлюсового газового захисту магнієвого розплаву забезпечує зниження вагового показника корозії з 2,01 до 0,008 г/м<sup>2</sup>-год (у 250 разів), глибинного — з 10,3 до 0,04 мм/рік (у 260 разів) і переведення виливків з групи «цілком нестійкі» (10 балів) до групи «стійкі» (4 бали).

3. Обґрунтовано фізико-хімічний механізм спостережуваного підвищення корозійної стійкості: усунення хлорид-вмісних залишків флюсу як активаторів пітингової корозії, зниження газонасиченості розплаву воднем у 3,1 рази та вилівка у 5,3 рази, формування рівномірно розподіленої  $\beta$ -фази  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  замість локалізованих катодних осередків, відсутність у виливку неметалевих включень розміром понад 0,5 мкм (у межах роздільної здатності оптичної мікроскопії).

4. Покращення структурного стану безпосередньо відображено на механічних властивостях виливків: межа міцності зростає з 196 до 265 МПа (+35%), твердість HB — з 70 до 85 (+21 %), що верифіковано в сертифікованих лабораторіях підприємства «BAMAX Poland Sp. z o.o.»; зростання міцності супроводжує закономірне зниження відносного видовження.

5. Результати промислових випробувань на підприємстві «BAMAX Poland Sp. z o.o.» та на Державному підприємстві «Інженерний центр литва під тиском» підтверджують доцільність впровадження безфлюсової технології газового захисту в серійне виробництво виливків із магнієвих сплавів. Такі приклади технологічного впровадження магнієвих сплавів у відповідальних деталях машин (зокрема дискових коліс) підтверджують технологічну зрілість цього напрямку [12]. Перспективою організації відповідного виробництва в Україні є модернізація наявних ливарних комплексів ДП «Інженерний центр литва під тиском» за схемою машини з гарячою камерою пресування.

## Список літератури

- 1 Song J., She J., Chen D., Pan F. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2020. Vol. 8, № 1. P. 1–41. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.02.003>
- 2 Klakurková L., Juliš M., Gejdoš P., Švejcar J., Čileček J. Production and application of magnesium alloys castings. *Solid State Phenomena*. 2022. Vol. 334. P. 19–25. <https://doi.org/10.4028/p-wru4jl>
- 3 Vyas A.V., Sutar M. Investment castings of magnesium alloys: a road map and challenges. *Archives of Foundry Engineering*. 2022. Vol. 22, № 4. P. 19–23. <https://doi.org/10.24425/afe.2022.140247>
- 4 Weiler J. Exploring the concept of castability in magnesium die-casting alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2020. Vol. 9, № 1. P. 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.05.008>
- 5 Kietbus A. Microstructure and properties of casting magnesium alloys designed to work in elevated temperature. *Magnesium Alloys – Selected Issue* / T. Tański, W. Borek, M. Król (eds.). — IntechOpen, 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80291>
- 6 Cui Y., Wang Y., Cui Z., Qi W., Wang J., Ju P., Zhao Y., Liu B., Zhang T., Wang F. Influence of rare earth element (Y) on microstructure and corrosion behavior of hot extrusion AZ91 magnesium alloy. *Materials*. 2020. Vol. 13, № 16. Art. 3651. <https://doi.org/10.3390/ma13163651>
- 7 Wang Y., Zhen C., Zhang Z., Tao Z. Corrosion behavior of an AZ91D magnesium alloy under a heterogeneous electrolyte layer. *PLOS ONE*. 2020. Vol. 15, № 6. Art. e0234981. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234981>

- 8 Cui L., Liu Z., Hu P., Shao J., Li X., Du C., Jiang B. The corrosion behavior of AZ91D magnesium alloy in simulated haze aqueous solution. *Materials*. 2018. Vol. 11, № 6. Art. 970. <https://doi.org/10.3390/ma11060970>
- 9 Javaid A., Czerwinski F. Progress in twin roll casting of magnesium alloys: a review. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2021. Vol. 9, № 2. P. 362–391. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.10.003>
- 10 Lysenko T., Kreitser K., Kozishkurt E., Dotsenko V., Ponomarenko O. New technology for producing castings from magnesium alloys with increased corrosion resistance. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering / V. Ivanov, J. Trojanowska, I. Pavlenko, E. Rauch, D. Peraković (eds.)*. Springer, Cham, 2022. P. 445–454. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_44)
- 11 Dong X., Feng L., Wang S., Nyberg E., Ji S. A new die-cast magnesium alloy for applications at higher elevated temperatures of 200–300 °C. *Journal of Magnesium and Alloys*. 2020. Vol. 9, № 1. P. 90–101. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.09.012>
- 12 Jiang X., Hu X., Liu H., Ju D.-H., Fukushima Y., Zhenglai Z. Study on casting design and analysis of magnesium alloy wheel. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. 2021. Vol. 17, № 5. P. 882–894. <https://doi.org/10.1108/MMMS-09-2020-0236>

Отримано / Received 30.03.26

Прийнято / Accepted 18.05.26

Опубліковано / Published 07.09.2026

**UDC 621.74.04:669.721.5**

**K.O. Kreitser**<sup>1</sup>, *Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor; email: dakerkir@gmail.com;*

<https://orcid.org/0000-0002-0549-1481>

**T.V. Lysenko**<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Eng.), Professor; email: tvl@gmail.com;*

<https://orcid.org/0000-0002-3183-963X>

**E.M. Kozishkurt**<sup>2</sup>, *PhD, Senior Lecturer; email: koziskurtevgen@gmail.com;*

<https://orcid.org/0000-0002-7311-7395>

**M.I. Zamiatin**<sup>1</sup>, *Cand. Sc. Tech., Associate Professor;*

<http://orcid.org/0000-0001-8458-6341>

<sup>1</sup> Odesa Polytechnic National University (Odesa, Ukraine)

<sup>2</sup> Odesa National Maritime University (Odesa, Ukraine)

## **COMPARATIVE STUDY OF THE INFLUENCE OF FLUX AND FLUXLESS PROTECTION ON THE CORROSION RESISTANCE OF AZ91D ALLOY CASTINGS**

*The paper presents the results of a comparative study of the influence of the magnesium melt protection type (flux protection with the use of VI2 flux and fluxless gas protection based on a SO<sub>2</sub> + SF<sub>6</sub> mixture) on the corrosion resistance, microstructure, and mechanical properties of castings made of the AZ91D alloy obtained by high-pressure die casting on a hot-chamber machine. The expediency of transition from the traditional flux protection — which is a source of hygroscopic chloride inclusions and corresponding micro-galvanic corrosion sites — to a fluxless melt protection technology under a gas atmosphere isolating the melt mirror without contaminating the alloy with non-metallic inclusions is substantiated. The test methodology included accelerated climatic tests (4 cycles of 24 hours each) and long-term atmospheric tests of specimens with dimensions of 40×40×1 mm. The corrosion resistance was evaluated by gravimetric ( $K_{\text{grav}}$ , g/m<sup>2</sup>·h) and depth ( $P$ , mm/year) indicators, as well as by the conventional 10-point corrosion resistance scale for metals (terminology — according to DSTU EN ISO 8044:2018). The experimental data were processed by*

mathematical statistics methods; to establish the influence of the composition of the protective gas mixture, three series of experiments were carried out according to a  $2^3$  full-factorial design matrix. It has been established that the application of fluxless gas protection leads to a substantial increase in corrosion resistance ( $K_{\text{grav}}$  decreases from 2.01 to 0.008 g/m<sup>2</sup>·h,  $P$  — from 10.3 to 0.04 mm/year), a decrease in gas content in the casting from 16 to 3 cm<sup>3</sup>/100 g, and an increase in the tensile strength from 196 to 265 MPa. Microstructural analysis confirmed the absence of non-metallic inclusions larger than 0.5 μm (within the resolution of optical microscopy) and the formation of an equiaxed fine-grained structure of the Al solid solution in Mg with a uniformly distributed  $\beta$ -phase (Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>). The obtained results substantiate the transition of castings from the «completely unstable» group (10 points) to the «stable» group (4 points) of the corrosion resistance scale.

**Keywords:** high-pressure die casting, magnesium alloy AZ91D, fluxless technology, gas protection, corrosion resistance, microstructure, bimetallic radiator-convector.

### *До уваги авторів*

У зв'язку з переходом журналу «Процеси лиття» на новітню платформу *Open Journal Systems* та відповідним оновленням сайту журналу подача статей можлива через сайт <https://plit-periodical.org.ua/>

Після реєстрації в системі вам буде запропоновано покрокову процедуру завантаження статті за стандартами міжнародних журналів.

Спілкування з редакцією та подання статей здійснюється через пошту **plit.periodical@gmail.com**

*Редакція журналу «Процеси лиття»*