

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

**Крейцер Кирилл Олександрович**



УДК 621.74.043

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

Спеціальність 05.16.04 – Ливарне виробництво

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Одеса, 2020.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**Лисенко Тетяна Володимирівна**  
Одеський національний політехнічний  
університет МОН України, м. Одеса, завідувачка  
кафедри

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Шинський Олег Йосипович**  
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів  
НАН України, м. Київ, завідувач відділу фізико-  
хімії ливарних процесів

Доктор технічних наук, доцент  
**Могилатенко Володимир Геннадійович**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського» МОН України, м. Київ, професор  
кафедри ливарного виробництва чорних і  
кольорових металів

Захист відбудеться “21” січня 2021 р. об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.232.01 при Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України за адресою: 03142, м. Київ, бульвар Вернадського, 34/1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України (03142, м. Київ, бульвар Вернадського, 34/1).

Автореферат розісланий “\_\_” \_\_\_\_\_ 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.232.01  
доктор технічних наук



Тарасевич М.І.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** 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 - 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 на 30%. При такій низькій густині магній має високу питому міцність, якою поступається тільки титану, питому вібраційну стійкість і жорсткість. Його питома ударна міцність в 200 разів вище ніж у дюралюмінію і в 300-500 разів вище ніж у титану. Крім високих характеристик цей метал дуже конкурентоспроможний, в рамках ринкової економіки. Магнієві сплави застосовуються в багатьох галузях промисловості (корпусу електроінструментів), біоінженерії та інш. Вироби з магнієвих сплавів легко утилізуються, не завдаючи шкоди навколишньому середовищу і безпечні при контакті з людиною.

Але магній має велику спорідненість з киснем і воднем та низьку корозійну стійкість, що призводить до загоряння при отриманні магнієвих сплавів.

Актуальність та економічна значимість роботи обумовлена зростаючою потребою у якісних легковагих виливках з магнієвих сплавів, а також недосконалістю існуючих методів захисту магнієвих сплавів від загоряння. Незважаючи на велику кількість наукових робіт з удосконалення технології плавки і лиття під тиском магнієвих сплавів, цей науковий напрям має значну кількість проблемних питань прикладної науки. Для створення науково обґрунтованої і перспективної технології одержання виливків з магнієвих сплавів литтям під тиском на основі імпульсної системи захисту необхідно додатково виконати теоретичні та експериментальні дослідження по розробці адаптивної системи захисту від загоряння з визначенням оптимального складу суміші захисних газів та підвищенням динамічних характеристик вузлів машин лиття під тиском з гарячою камерою пресування.

**Зв'язок роботи з науковими 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 залізобуглецевих 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:

1. 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.

2. Встановити закономірності впливу безперервного газового захисту розплаву магнієвих сплавів на основі сірчистого ангідриду  $\text{SO}_2$ , і співвідношення хлору  $\text{Cl}_2$  та водню  $\text{H}_2$  на корозійну стійкість виливків з магнієвого сплаву МЛ5 ГОСТ2856-79.

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

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

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

6. 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.

7. 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.

8. 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.

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

10. 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/м<sup>2</sup>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,  $3,0-4,0 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup>/кг та 0,002-0,004 м<sup>3</sup>/кг, а це дає змогу досягти мінімальну окиснюваність за критерієм масового коефіцієнту корозії виливків з магнієвого сплаву типу МЛ5 ГОСТ2856-79 до значень  $7-8 \cdot 10^{-3}$  г/м<sup>2</sup>год.

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  $\sigma$ , 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  $SF_6, \%$ ,  $T_1$  і  $\sigma$  в межах 660-700 і 520-550 дін/м,  $3,0-4,0 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup>/кг та 0,002-0,004 м<sup>3</sup>/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,  $K_{вар}$  та глибинним показником корозійної стійкості  $\Pi$ , під дією атмосфери навколишнього середовища вказані

характеристики для сплаву МЛ5 ГОСТ2856-79, у одержанні якого використовується газовий захист становлять 0,008 г/м<sup>2</sup>год і 0,04 мм/рік, а за традиційним «флюсовим» методом аналогічні характеристики відповідають значенням 2,01 г/м<sup>2</sup>год 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<sub>2</sub> 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<sub>1</sub> і поверхневий натяг сплаву σ, вміст сірчистого ангідриду SO<sub>2</sub> і гексофториду сірки SF<sub>6</sub>, 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-промислоу 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, Vrnjaska 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 223 сторінках, містить 43 рисунки і 29 таблиць. Загальний обсяг роботи - 168 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність виконання роботи, мета та задачі досліджень, визначено предмет та об'єкти досліджень, представлено наукову новизну та практичне значення результатів досліджень, наведено дані про апробацію та публікацію основних результатів роботи.

**В першому розділі** розглянуто переваги та недоліки виготовлення виливків з магнієвих сплавів. Представлено області використання розглянутих магнієвих сплавів та способи їх отримання з точки зору захисту поверхні розплаву від окислення і загоряння. Розглянуто існуючі методи модифікування та рафінування сплавів з метою одержання якісних виливків. Показано, що 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.

Наведено переваги та недоліки лиття під тиском для виробництва виливків з магнієвих сплавів. Комплексний технологічний процес лиття під тиском розглядається по двом фізичним складовим - плавка і виробництво (в основному на машинах з гарячою камерою пресування).

Магнієві сплави в рідкому стані при існуючому процесі безфлюсового газового захисту мають ряд недоліків. Як кращий варіант захисних газів використовують осушене повітря з активними газами  $SO_2$  і  $SF_6$ , яке проходить стадії фізичної 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 напруги, які руйнують поверхневий шар. Внаслідок сплав забруднюється неметалічними включеннями - це знижує ливарні властивості.

Для забезпечення оптимізації об'ємного уприскування газової суміші і часу такту «ресурсу» захисного стану плівки потрібно вийти з режиму постійної подачі захисної суміші газу і перейти на імпульсну динамічну систему.

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. В якості узагальненого відгуку необхідно 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 другому розділі представлені методики проведення досліджень, матеріали та обладнання. Для визначення поверхневого натягу магнієвих сплавів було використано метод максимального тиску бульбашки газу. Для реалізації даного методу було розроблено методику та створено прилад вимірювання поверхневого натягу (рис.1)

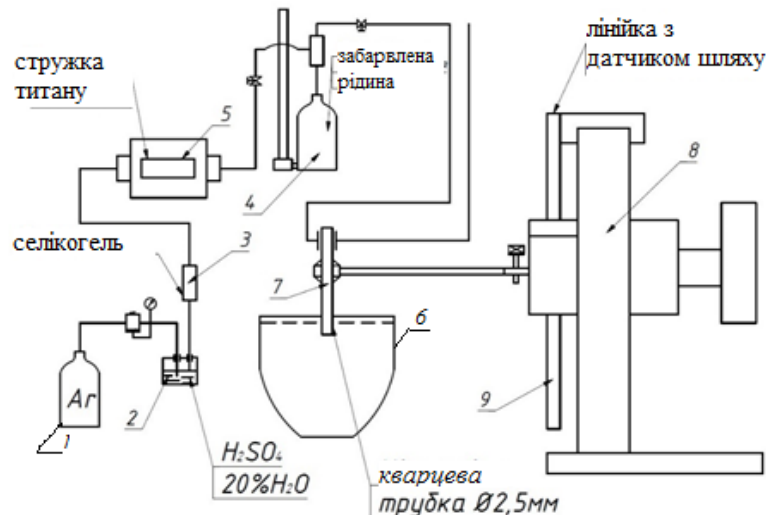


Рис. 1 Схема установки для вимірювання поверхневого натягу: 1 – балон з аргоном; 2 – склянка з сірчаною кислотою; 3 – скляний циліндр, наповнений селікогелем; 4 – склянка з підфарбованою манометричною рідиною; 5 – кварцова трубка, наповнена титановою стружкою; 6 – нагрівальна піч; 7 – кварцова трубка;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

Для дослідження і розробки технологічного процесу лиття магнієвих сплавів з газовим захистом рідкого металу на основі вивчення характеристик поверхневого натягу рідкого сплаву був створений стенд на базі машини лиття під тиском з гарячою камерою пресування мод. CP MGH 400 з системою автоматизованого керування складом захисної газової суміші та її витратами при створенні заданої атмосфери в порожнині плавильних агрегатів, що дало змогу варіювати основними параметрами захисту розплаву магнієвих сплавів.

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 магнієвих сплавів, одержаних за умов газового захисту та за традиційним флюсовим захистом розплаву у плавильному агрегаті.

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.

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.

Використані 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. Зливки та виливки з магнієвих сплавів. Технічні умови», ГОСТ 2856-79 «Сплави магнієві ливарні. Марки».

У **третьому розділі** представлено результати досліджень технологічного процесу виробництва виливків з магнієвих сплавів при литті під тиском з газовим захистом розплаву в металоємних плавильних агрегатах. Розглянуто особливості сучасного технологічного процесу одержання магнієвого сплаву AZ91 (аналог МЛ5) з використанням безфлюсового захисту на базі  $SO_2$ . При цьому встановлено, що на корозійну стійкість магнієвих сплавів істотно впливає вміст  $SO_2$  в захисній атмосфері печі при приготуванні цього типу сплавів, а також вміст і співвідношення хлору та водню у сплаві, що потребує встановлення оптимального співвідношення захисних газів, а також оптимізації технологічних параметрів процесу безфлюсового плавлення магнієвих сплавів.

Тому з метою оптимізації факторів, що впливають на окиснюваність (корозійну стійкість) магнієвих сплавів, було застосовано метод повнофакторного експерименту, 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 (табл. 1).

Таблиця 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 <sup>3</sup> /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                 | -               |

Ефективність газового захисту магнієвих сплавів від окислення при плавці визначався по корозійній стійкості цього сплаву у виливках-зразках за ваговим показником корозії ( $\text{г}/\text{м}^2\text{год}$ ).

Проведення серії натурних експериментів здійснювалася на діючому обладнанні 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 відпрацюванні технології лиття біметалевих радіаторів конвекторів з магнієвого сплаву МЛ5 ГОСТ 2856-79. Розширена матриця планування повнофакторного експерименту для трьох факторів, з фіктивною змінною, яка передбачає  $2^3$  досліджень.

Для визначення технологічних параметрів газового захисту сплаву на корозійну стійкість виливків було проведено три серії однотипних експериментів.

За допомогою рівняння регресії визначення масової корозії магнієвого сплаву МЛ5 ГОСТ 2856-79 у кодовому вигляді набуде наступного вигляду:

$$Y = 48 + 12x_1 + 2x_2 + 9x_3 + 4x_1x_2 + 3x_1x_3 - x_2x_3 + 3x_1x_2x_3, \text{ г}/\text{м}^2\text{год} \quad (1)$$

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

На рис.2 приведена графічна інтерпретація рівняння 1.

Аналіз даних, одержаних за рівняннями регресії (1) 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.

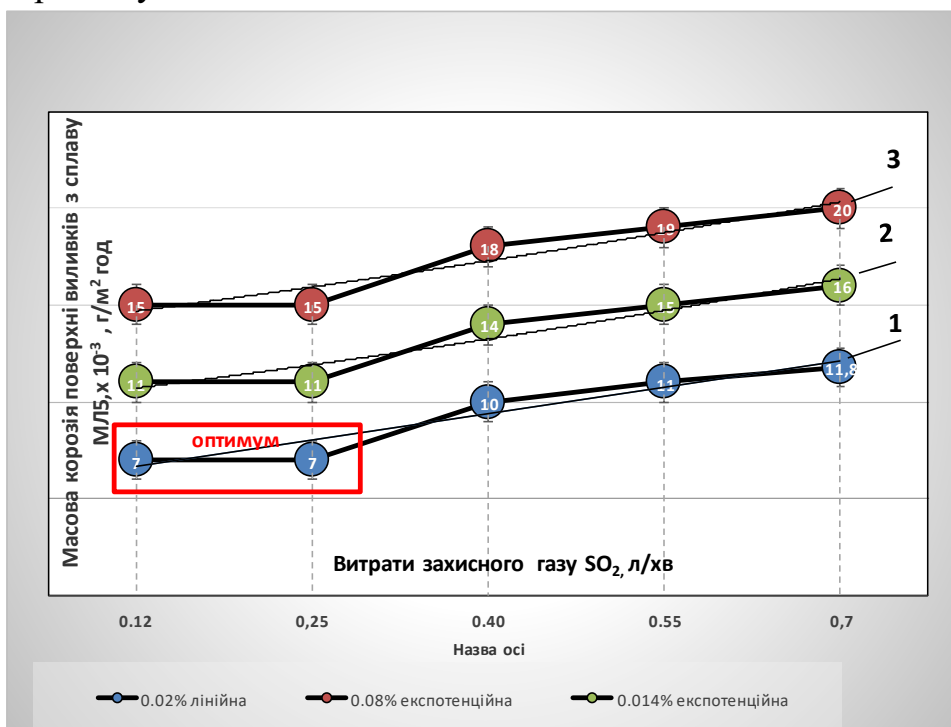


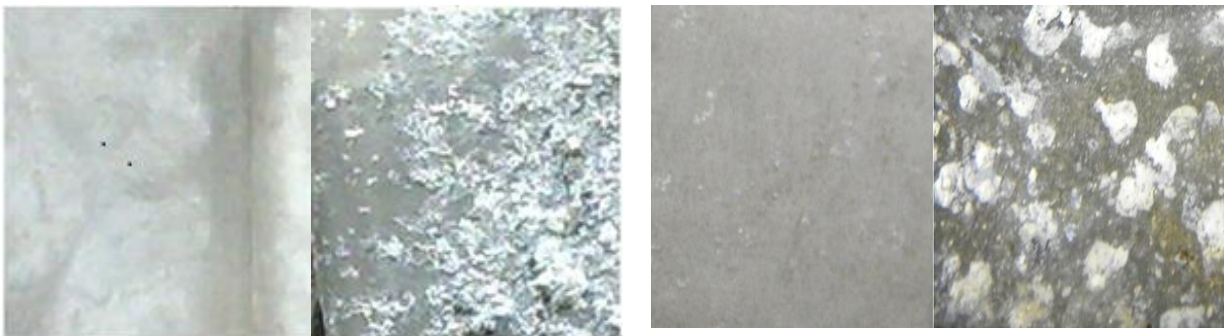
Рис. 2 Вплив захисної суміші газів у плавильному агрегаті при одержанні магнієвих сплавів

За допомогою побудованої регресійної моделі (1) та її графічної інтерпретації (рис. 2) 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.

Так відповідно до аналізу даних наведених на рис. 2 встановлено, що найменша окиснюваність дослідного магнієвого сплаву типу МЛ5 і його масова корозійна стійкість у виливках досягається при мінімальних витратах сірчистого ангідриду  $SO_2$  та вмісту хлору  $Cl_2$  (рис.2. кр.1), значення яких становлять 0,12 л/хв та 0,02% відповідно, а коефіцієнт масової швидкості корозії за цих умов складає  $0,007 \text{ г/ м}^2 \cdot \text{год}$  в цій суміші в захисному газі, що відповідає значенням окиснюваності та корозійної стійкості X (кр.1, рис.2) та Y (кр.2, рис.2). Причому, при зростанні значення витрат  $SO_2$  до 0,7 л/хв коефіцієнт масової швидкості корозії за цих умов зростає до  $0,012 \text{ г/ м}^2 \cdot \text{год}$ , 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.2, кр.1) до 0,014% (рис.2, кр.3) значення масового коефіцієнту корозії зростає з 0,007 (рис.2, кр.1) до 0,015 (рис.2, кр.3)  $\text{г/ м}^2 \cdot \text{год}$ , тобто в 2,1 рази.

З метою отримання розрахункових залежностей для визначення ресурсних показників корозійної стійкості було проведено кліматичні прискорені та атмосферні випробування двох технологічних процесів виготовлення сплаву МЛ5 (рис. 3).



а)

б)

в)

г)

Рис. 3 Випробування двох технологічних процесів: а, б) – прискорені випробування; в, г) атмосферні випробування; а, в) - плавка в захисному газовому середовищі, б, г) - плавка під шаром захисного флюсу ВІ2

Як видно з рис. 4 площа поверхні зразка в) вражена на 1,6%, а поверхня зразка г) вражена на 40%. Після видалення продуктів корозії, уражена поверхня на зразку г) представляла собою плями кратерного типу рис. 4. Площа окремих плям на зразку г) становила  $2,5\text{-}3 \text{ мм}^2$ , а середня глибина 0,8 мм, по периметру спостерігалось деяке здуття, висота якого складала 0,025 мм.

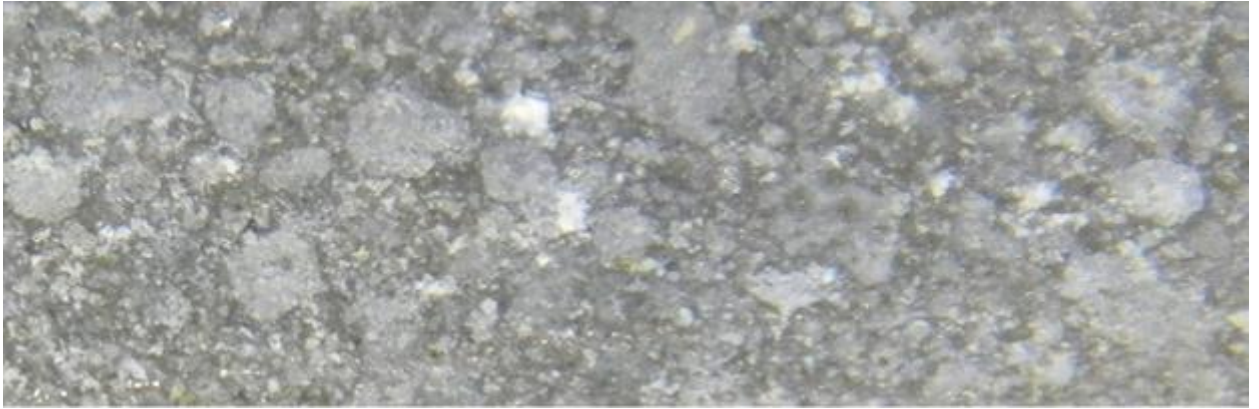


Рис. 4 Уражена поверхня зразка після видалення продуктів корозії

Для кількісної оцінки результатів корозійної стійкості були обрані два показника: ваговий і глибинний. Результати розрахунків представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Оцінка результатів корозійної стійкості

| Показники корозійної стійкості         | Безфлюсовий захист | Флюсовий захист ВІ2 |
|--|--------------------|---------------------|
| $K_{\text{ваг}}$ г/м <sup>2</sup> •год | 0,008              | 2,01                |
| П, мм/рік                              | 0,04               | 10,3                |
| Бали за шкалою корозійної стійкості    | 4                  | 10                  |

Використання захисного ефекту хімічного процесу формуванням поверхневої плівки постійною подачею суміші захисного газу призводить до постійного зростання товщини шару плівки, створення наростаючої напруги в плівці, що приводить до її руйнування та відбувається загоряння та окиснення на поверхні магнієвих сплавів. Для усунення зазначених недоліків доцільно застосувати в безфлюсовому захисті магнієвих сплавів імпульсну систему подачі захисних газів на дзеркало розплавленого металу. Ефективність роботи даної системи забезпечується системою динамічного управління зі зворотним зв'язком по фізичному стану плівки, у якій факторами управління виступають інерційні параметри - поверхневий натяг плівки магнієвого сплаву  $\sigma$ , температура сплаву  $T$ ,  $X_3$  – процентний вміст сірчистого ангідриду  $\text{SO}_2$ ,  $X_4$  – процентний вміст гексофториду сірки  $\text{SF}_6$ . В якості узагальненого відгуку використовується час існування захисної плівки (до появи загоряння)  $Y$  с. Для встановлення закономірностей щодо впливу технологічних факторів захисту магнієвих сплавів при їх плавленні та збереженні за умов використання захисних газів з імпульсною їх подачею була проведена серія експериментів з використанням доопрацьованої конструкції дослідної плавильної установки. 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  $\text{SO}_2$  та гексофториду сірки  $\text{SF}_6$ .

Основне завдання – визначення тісноти і напрямку зв'язку між досліджуваними величинами. Було побудовано рівняння (2), яке показує залежність між часом існування захисної плівки (до загоряння) від температури, поверхневого



натягу, процентного вмісту  $\text{SO}_2$  та  $\text{SF}_6$ , та рівняння (3), яке виражає залежність узагальненого показника якості від температури, поверхневого натягу та вмісту  $\text{SO}_2$ :

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

$$\hat{y} = -2098.14 + 3.41T + 0.95\sigma - 700,08x_3 \quad (3)$$

де  $X_3$  - [0,2; 0,5]%,  $X_4$  - [0,05; 0,08] %

Використовуючи ці рівняння було встановлено закономірність впливу основних технологічних факторів на термін існування захисної плівки  $Y$  (межу загоряння) розплаву магнієвого сплаву МЛ5. Так, при зростанні температури розплаву магнієвого сплаву МЛ5 з 650 до 750  $^{\circ}\text{C}$  величина  $Y$  зростає з 2180 до 2520 с. При зростанні поверхневого натягу розплаву магнієвого сплаву МЛ5 з 480 до 600 дін/см величина  $Y$  зростає з 460 до 570 с. Навпаки, за умов зростання вмісту сірчистого ангідриду  $\text{SO}_2$  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 дії захисної плівки на поверхні розплаву магнієвого сплаву МЛ5 за умов варіювання значеннями перемінних факторів в дослідницькому інтервалі, яка становила відповідно 620 та 460 с відповідно. Тобто варіювання основними факторами в заданому інтервалі можуть змінювати величину  $Y$  в 1,4 рази.

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 із зародків газових бульбашок на базі дефектів торцевої поверхні, також виявлено в безпосередній близькості до крупних неметалевих включень велику кількість дрібних сателітних включень (рис.5 а, б).

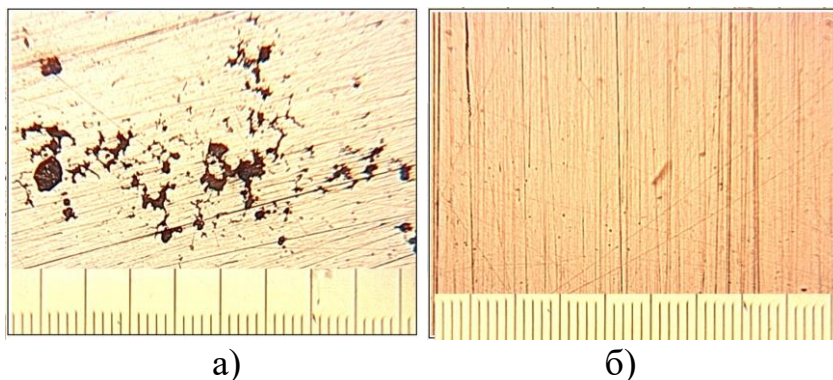


Рис. 5 Поверхня шліфа сплаву, виготовленого: а) з флюсовим захистом; б) за новою технологією

Оскільки швидкість охолодження впливає на формування структури і властивостей вилівка, то незалежними змінними вибрали – поверхневий натяг,

температуру, кількість SO<sub>2</sub> та SF<sub>6</sub>. Межі варіювання вказаних факторів такі ж як в табл. 2.

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 повнофакторного експерименту. 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.

В результаті було отримані наступні рівняння (4 - 6):

- для впливу на міцність сплаву при розтягу,  $\sigma_B$ , МПа

$$y_1 = (-11 + 0.023 \cdot x_1 + 0.027 \cdot x_2 - 10.36 \cdot x_3 + 98.9 \cdot x_4) \cdot 10, \text{ МПа} \quad (4)$$

- для впливу на пластичність сплаву,  $\delta$ , %

$$y_2 = 2.65 + 0.0001 \cdot x_1 - 0.0016 \cdot x_2 + 1.6 \cdot x_3 - 12.19 \cdot x_4, \% \quad (5)$$

- для впливу на твердість сплаву, НВ, од.

$$y_3 = 48.6 + 0.04 \cdot x_1 + 0.0026 \cdot x_2 + 8.6 \cdot x_3 - 68.58 \cdot x_4, \text{ од.} \quad (6)$$

де  $X_1$ - [640; 738]°С,  $X_2$ - [491; 605] дін/см<sup>2</sup>,  $X_3$ - [0,2; 0,5]%,  $X_4$ - [0,05; 0,08] %.

За умов варіювання технологічних параметрами, такими, як вміст сірчистого ангідриду SO<sub>2</sub> та гексофториду сірки SF<sub>6</sub>, поверхневого натягу і температури розплаву, значення міцності, відносного видовження та твердості сплаву МЛ15 *може знаходитись в межах 140-285 МПа, 1,1-3,1, 80-100 НВ відповідно.*

**У четвертому розділі** наведено дані з розробки автоматизованої системи контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском та представлено результати аналізу її експлуатаційної надійності.

Для створення автоматизованої системи контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском використовуються дані дослідження та створення системи рівнянь для регресивного аналізу впливу основних технологічних параметрів (рівняння 2 і 3) на термін існування захисної плівки на поверхні магнієвого розплаву (до загоряння).

Вихідні дані для створення автоматизованої системи контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском включають:  $Y$  – відгук (вихідний параметр техпроцесу - час існування захисної плівки (до загоряння));  $\Delta Y$  – відхилення від оптимального значення через відхилення факторів;  $X_i$  – вхідні параметри техпроцесу;  $X_1$  – температура сплаву (Т);  $X_2$  – поверхневий натяг сплаву ( $\sigma$ );  $X_3$  – % вміст сірчистого ангідриду SO<sub>2</sub>;  $X_4$  – % вміст шестифтористої сірки SF<sub>6</sub>;

$X_i \in [\alpha_i; \beta_i]$  – область визначення функції;  $X_{i0}$  – параметри, що забезпечують оптимальні значення функції математичної моделі техпроцесу.

Стратегія адаптивної системи полягає в тому, щоб технологічний процес ставив оптимальне значення всіх факторів і за їх результатами видавав узагальнений відгук.

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; загальний коефіцієнт використання з статистичною обробкою інформації, яка була отримана в результаті дворічної експлуатації створеної системи керування процесами лиття магнієвих сплавів з газовим захистом розплаву та оброблялась у вигляді варіаційних рядів: 1) за напрацюваннями в цілому, 2, 3) по системі, що підлягає і не підлягає ремонту, який передбачає заміну елементів системи, що вийшли з ладу.

Сумарне напрацювання визначалося як сума напрацювань на всі відмови за трьома варіантами (7):

$$T_{p1} = \sum_{i=1}^n t_i; T_{p2} = \sum_{j=1}^n t_j; T_{p3} = \sum_{k=1}^n t_k; T_{p4} = \sum_{q=1}^n t_q \quad (7)$$

В якості критерію оцінки напрацювання на відмову приймалося середнє арифметичне значення (8):

$$T_{p1,p2,p3,p4} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{i,j,k,q} \quad (8)$$

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  $3 \cdot 10^{-4}$  1/год.

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. 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 (9):

$$\lambda(t_1, E_1) = \varphi[\lambda_m(t, E_2)] \quad (9)$$



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 (10):

$$E_{\text{лаб}} \ll E_{\text{екс}} \ll E_{\text{ф}} \ll E_{\text{екс}} \quad (10)$$

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.

В спеціальній герметичній камері за допомогою системи управління створювались необхідні форсовані режими, забезпечувалось фіксування технологічних параметрів і експлуатаційну безпеку. В якості експлуатаційних впливів були забезпечені такі чинники: запиленість, вологість, загазованість, температура, вібрація.

Аналітичний спосіб зводиться до загальних прийомів отримання статистичних оцінок зв'язку за даними вибірок між інтенсивністю відмов для елемента з відомими експлуатаційними параметрами надійності при відповідних рівнях впливу  $\lambda^{(0)}$  та інтенсивністю відмов досліджуваного елемента  $\lambda^{(1)}$ .

В результаті обробки даних було визначено, що інтенсивності відмов розробленої автоматизованої системи контролю та керування технологічним процесом газового захисту розплаву магнію в плавильних і роздаткових агрегатах комплексів лиття під тиском складає  $\lambda_{\text{нов.приск}}^{(1)} = 30 \times 10^{-4}$ , а існуючої системи  $\lambda_{\text{стар.приск}}^{(0)} = 39 \times 10^{-4}$ , тобто надійність системи вища в 1,3 рази.

Отримані результати дозволили створити систему з додатковими якостями для вирішення важливої вимоги – надійності.

**У п'ятому розділі** представлені результати промислової перевірки створених нових технологій, обладнання та його модернізації, систем управління процесами одержання виливків з магнієвих сплавів з використанням комплексів лиття під тиском.

Для підвищення якості тонкостінного литва з магнієвих сплавів під тиском була додатково розроблена технологія вакуумування форми. Для зниження загазованості в литві автором запропоновано технологічне рішення по вакуумуванню форми в режимі виключення виходу з форми парів магнію з використанням лабіринтового відсмоктування повітря з форми. Схему вакуумування, циклограму роботи, систему герметичності площини 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. 6 а). Завдяки тому, що цей канал мав низьку температуру, повітря з форми видалялось, а магній не проходив. Лабіринтові ущільнення для алюмінієвого і магнієвого варіанту показані на рис. 6 б.

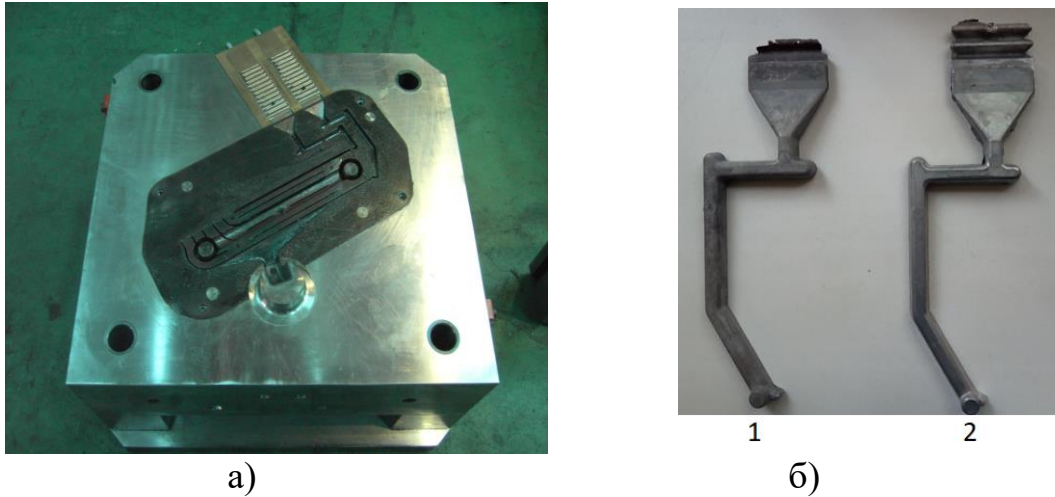


Рис. 6 Лабіринтові канали та лабіринтові ущільнення: а) нерухома частина прес-форми для виготовлення радіаторів з магнієвих сплавів на машині лиття під тиском; б) лабіринтові ущільнення: 1- магнієвий варіант, 2- алюмінієвий варіант

Для ефективної оцінки технології одержання виливків магнієвих сплавів з використанням імпульсного газового захисту металу в плавильних і роздаткових агрегатах комплексу лиття під тиском цілком підходить лита конструкція біметалевого радіатора-конвектора, при виготовленні якого з магнієвого сплаву стане можливим одержати найвищі експлуатаційні характеристики, включаючи: коефіцієнт теплового опору, металоемність, конструктивну міцність і довговічність, в порівнянні з аналогічною продукцією з традиційних алюмінієвих сплавів. Варіанти конструкції радіатора з алюмінієвого і магнієвого сплаву представлені на рис.7.



Рис. 7 Конструкція радіаторів з алюмінієвих і магнієвих сплавів з міжосьовими відстанями 300 мм

В таблиці 3 представлені порівняльні показники ливарних і механічних властивостей магнієвих сплавів при литті радіаторів під тиском при базовому варіанті безфлюсового захисту та новому імпульсному.

Таблиця 3 – Результати порівняльних показників властивостей магнієвих радіаторів

| Характеристики                                   | МЛ15 |      | AZ91 |      |
|--|------|------|------|------|
|  | Баз. | Імп. | Баз. | Імп. |
| Рідкоплинність, мм                               | 208  | 290  | 305  | 310  |
| Горячеламкість, П, г / мм                        | 28   | 28   | 17   | 15   |
| Межа міцності на розтягнення, кг/мм <sup>2</sup> | 20   | 24   | 20   | 27   |
| Відносне подовження при T <sub>4</sub> ,%        | 5,0  | 2,0  | 4,0  | 1,5  |
| Твердість при T <sub>4</sub> по Брінеллю, НВ     | 50   | 62   | 70   | 85   |
| Вміст газу в сплаві, см <sup>3</sup> /100 г      | 31   | 11,0 | 25   | 8,0  |
| Вміст газу в литві, см <sup>3</sup> /100 г.      | 20   | 2,0  | 16   | 3,0  |

Для своєчасного виявлення парів магнію в зоні плавлення було розроблено систему відеоспостереження, яка складається з пульта керування, блоку обробки і сигналізації, камери телевізійної, лазерного освітлювача, монітору.

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 60 % нижчий у порівнянні з виробництвом литих радіаторів з магнієвих сплавів.

## ЗАГАЛЬНІ 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. CP MGH 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  $\text{SO}_2$ , і співвідношення хлору  $\text{Cl}_2$  та водню  $\text{H}_2$  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  $\text{SO}_2$  (0,12 - 0,70 л/хв), значення якої обернено пропорційно змінюється з 7 до  $12 \cdot 10^{-3}$  г/м<sup>2</sup>год, тобто в 1,7 рази; встановлені також оптимальні витрати  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{Cl}_2$  в суміші захисних газів, які знаходяться в межах 0,12-0,25 л/хв,  $3,0-4,0 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/кг та 0,002-0,004 м<sup>3</sup>/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/м<sup>2</sup>год.

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  $\sigma$ , вміст сірчистого ангідриду  $\text{SO}_2$  і гексофториду сірки  $\text{SF}_6$ , 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  $\text{SO}_2$  (0,2-0,8 %), тобто при зростанні вмісту  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  і  $\text{SF}_6$ , % ,  $T_1$  і  $\sigma$  в межах 660-700 і 520-550 дін/м,  $3,0-4,0 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/кг та 0,002-0,004 м<sup>3</sup>/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  $\text{SO}_2$  і  $\text{SF}_6$ , 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 П, під дією атмосфери навколишнього середовища вказані характеристики для сплаву МЛ5, у одержанні якого використаний газовий захист становлять 0,008 г/м<sup>2</sup>год і 0,04 мм/рік, а при використанні традиційного «флюсового методу» аналогічні характеристики відповідають значенням 2,01 г/м<sup>2</sup>год 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<sub>2</sub> 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<sub>1</sub> і поверхневий натяг сплаву σ, вміст сірчистого ангідриду SO<sub>2</sub> і гексофториду сірки SF<sub>6</sub>, 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 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.

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 3x10<sup>-4</sup> 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 радіатора 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ в яких опубліковані 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. Inter Partner 2019 / Tatiana Lysenko, Vladimir 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](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. Київ : НТУУ “КПІ”, 2014. С. 65

12. Magnezium alloys casts quality control at lowpressure casting technology / T. V. Lysenko, V. M. Tonkonogyi, L. V. Bovnegra, **К. О. Kreutzer** // Proceedings 5-th International conference «Economics and Management-Based on New Technologies» emont 2015. Vrnjaska 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.**, Моgetич В. Ю. Сеточный метод защиты магниевых сплавов от возгорания // Литье. Metallургия. 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. Metallургия. 2017 : материалы 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. Metallургия. 2019 : материалы 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. Metallургия. 2019 : материалы 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. Козишкурт, 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** // Metallургическая 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, **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 // Metallургическая 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. №. 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](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/31032020/6981)

## АНОТАЦІЯ

*Крейцер К.О.* **Технологічний процес одержання виливків із магнієвих сплавів литтям під тиском на основі імпульсної системи захисту.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.04 – Ливарне виробництво. – 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.

В роботі були встановлені закономірності, механізми та побудовані системи рівнянь регресії впливу основних технологічних факторів на умови захисту поверхні розплаву магнію з послідуочим їх використанням для розробки технологічних процесів та модернізації обладнання і автоматизованих систем управління комплексів лиття під тиском.

Розроблені технологічні процеси плавлення магнієвих сплавів в захисній газовій атмосфері з безперервною чи імпульсною їх подачею в плавильний та роздатковий агрегат, а також автоматизована система контролю і 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.

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. 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.

**Ключові слова:** магнієві сплави, безфлюсове плавлення, лиття під тиском, поверхневий натяг, газовий захист, захисна плівка, імпульсна система захисту, біметалевий радіатор, вакуумування, мікроструктура.

**ABSTRACT**

*Kreitzer K. The technological process of obtaining castings of magnesium alloys by injection molding based on a pulsed protection system.* – Manuscript.

Thesis for granting Candidate of Technical sciences Degree in specialty 05.16.04 – Foundry. – Physic-technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine. – Kyiv, 2019.

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.

In the work, regularities, mechanisms were established and systems of regression equations were constructed for the influence of the main technological factors on the conditions for protecting the surface of the magnesium melt, followed by their use for the development of technological processes and the modernization of equipment and automated control systems for injection molding complexes.

Technological processes for the melting of magnesium alloys in a protective gas atmosphere with continuous or pulsed supply to the melting and distributing unit, as well as an automated system for monitoring and controlling the technological process of gas protection of magnesium melt in melting and distributing units of injection molding complexes with the assessment of their reliability for long-term operation in industrial conditions in serial and mass production of castings of magnesium alloys.

Pilot tests of the created technological processes and equipment for their implementation using the new design of a radiator made of magnesium alloys instead of analogs of aluminum alloys were carried out. 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 years respectively.

**Keywords:** magnesium alloys, fluxless melting, injection molding, surface tension, gas protection, protective film, impulse protection system, bimetallic radiator, vacuum, microstructure.