

Методика виробничої верифікації параметрів флюсово-газового рафінування розплаву сплаву АК12

Мета роботи — розробити відтворювану методику виробничої верифікації параметрів флюсово-газового рафінування розплаву ливарного алюмінієвого сплаву АК12 перед заливанням у форми для одержання фасонних виливків. Запропоновано двофакторний план 2^2 , у якому флюсову обробку F та роторне продування аргоном G варіюють незалежно, а первинне зняття дросу, кінцеве відстоювання, повторне зняття дросу й умови заливання залишають однаковими. Для початкового скринінгу визначено перевірювані, а не оптимальні рівні: температура $720\text{—}740\text{ }^{\circ}\text{C}$, доза флюсу $0,10\text{—}0,20\text{ }\%$, витрата $\text{Ar } 8\text{—}12\text{ л/хв}$, тривалість продування $6\text{—}10\text{ хв}$ і відстоювання $8\text{—}12\text{ хв}$. Фізичну основу дегазації подано через перенесення розчиненого водню до диспергованих бульбашок, питому міжфазну площу, діаметр d_{32} та коефіцієнт k_{La} . Передбачено відбір проб у точках $M0\text{—}M5$ і розмежовано пряме визначення водню C_H , непрямі RPT/DI та BI , площинну пористість V_p , видиму площинну щільність включень N_A і спеціалізоване оцінювання чистоти C_{inc} . Для кожної плавки реєструють хімічний склад, частку звороту, партію флюсу, чистоту аргону, геометрію ротора, витрату газу та температуру металу перед заливанням; технологічні відхилення кодують і аналізують окремо. Статистична модель оцінює головні ефекти F і G , коефіцієнт взаємодії β_{FG} та блоковий вплив шихти або виробничого дня; оцінки подають із $95\text{ }\%$ довірчими інтервалами. Методика не ототожнює DI з концентрацією водню, а N_A — із загальною чистотою розплаву, і вимагає єдиного протоколу RPT , карти шліфів та фіксації температурно-часової траєкторії. Результатом є протокол вибору допустимого параметричного вікна за сукупністю показників якості, втрат температури, тривалості циклу та ознак надмірної турбулізації. Остаточне технологічне рішення має підтверджуватися у незалежних плавках за незмінних шихти, обладнання, форми та ливникової системи.

Ключові слова: АК12; Al-Si; флюсово-газове рафінування; роторна дегазація; аргон; масоперенесення водню; факторний план 2^2 ; RPT ; біфільм-індекс; площинна пористість; видимі включення; виробнича верифікація.

Вступ. Сплав АК12 належить до евтектичних або близьких до евтектичного Al-Si-сплавів із паспортним вмістом кремнію близько $10\text{—}13\text{ }\%$. Залежно від фактичного складу плавки та швидкості охолодження разом з евтектикою $\langle\text{-Al+Si}\rangle$ можуть формуватися первинні кристали $\langle\text{-Al}\rangle$ або $\langle\text{-Si}\rangle$. Тому числові режими, отримані для доевтектичного А356 чи інших Al-Si-Mg-сплавів, не можна безпосередньо переносити на АК12 без виробничої перевірки [1—4, 30—35].

Під час тверднення розчинність водню в алюмінії різко зменшується. За локального пересичення водень переноситься до наявних газових порожнин або внутрішніх поверхонь оксидних плівок і сприяє росту пор. Одночасно на форму та розмір пор впли-

вають усадкова нестача живлення і локальний тиск у двофазній зоні. Отже, воднева, усадкова й біфільмна складові дефекту взаємопов'язані, але не тотожні; за зовнішнім виглядом пори не можна однозначно встановити механізм її утворення [5—26, 36, 37].

Невирішеною для конкретної плавильно-заливальної дільниці є не послідовність загальновідомих операцій, а спосіб експериментального встановлення обладнання- і виробничо-специфічного параметричного вікна. Для цього потрібні сталі зовнішні умови, парні проби однієї плавки, пряме або коректно обмежене непряме оцінювання відгуків та статистичне розділення ефектів флюсу, аргону і їх взаємодії.

Аналіз джерел і постановка задачі. RPT ,

індекс густини DI та біфільм-індекс BI застосовують як порівняльні характеристики поведінки стандартизованої проби за зниженого тиску [5–7]. DI залежить не тільки від розчиненого водню, а й від біфільмів та умов випробування, тому не є прямим вимірюванням концентрації водню. Для кількісного висновку про C_H потрібен спеціалізований аналізатор; за його відсутності висновки обмежують зміною DI за незмінного протоколу RPT.

Модифікування евтектичного кремнію впливає на морфологію мікроструктури та властивості, але не є операцією очищення розплаву [30–35]. Тому марка й кількість модифікатора, момент його введення, температура і час до заливання мають бути однаковими в усіх плавках. Вплив модифікування не включено до факторного простору цієї роботи, щоб не змішувати його з ефектами рафінування.

Відмінність АК12 від А356 та Al–Si–Mg-сплавів стосується фактичного вмісту Si, інтервалу кристалізації й домішок. Спільними залишаються закони масоперенесення водню та міжфазного розділення частинок, однак коефіцієнти, допустима температура, ефективність флюсу і гідродинаміка конкретної ванни мають визначатися для фактичної системи. Літературні значення в цій роботі задають лише межі первинного скринінгу.

У плані розділено: 1) керовані фактори F і G та їх параметри; 2) вимірювані відгуки C_H , DI, BI, V_p , N_A і, за наявності спеціалізованого методу, C_{inc} ; 3) блокові й контрольовані умови — партія шихти, частка звороту, піч, ротор, форма, ливникова система, температура й час до заливання. Зміна третьої групи без блокування робить причинне порівняння некоректним.

Флюсова та газова стадії виконують різні функції в єдиному маршруті. Рафінувальний флюс може змінювати змочування, сприяти агломерації та переходу оксидних частинок у флюсово-дросову фазу; після його введення потрібні регламентована витримка й зняття утвореного дросу. Під час роторного продування потік Ar дробиться зсувними потоками біля газових каналів ротора. Через низький початковий $p(H_2)$ у бульбашці виникає рушійна сила $C_H - C_H^*$: водень переноситься до межі газ—метал, переходить у газову фазу як H_2 і видаляється з бульбашкою. Включення випускаються не дифузійно, а внаслідок зіткнення й прикріплення до бульбашок, флотації, агломерації та подальшого розділення фаз [27–29, 38, 39].

Наукова новизна роботи. Елемент наукової новизни полягає не у приписуванні новизни відомим операціям, а у формалізації їх перевірки як двофакторного плану 2^2 зі спільними обов'язковими стадіями відстоювання. Коефіцієнт взаємодії β_{FG} кількісно відокремлює спільну дію флюсу й аргону від суми їх головних ефектів, а багатовідгуковий критерій обмежує допустиму область одночасно за показниками якості, температурними втратами, тривалістю циклу та ознаками надмірної турбулізації. Методика передбачає блокування шихти й виробничого дня та підтвердження вибраної області у незалежних плавках.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи — розробити відтворювану методику виробничої верифікації параметрів флюсово-газового рафінування розплаву ливарного алюмінієвого сплаву АК12 перед його заливанням у ливарні форми для одержання фасонних виливків. Для досягнення мети необхідно: 1) формалізувати повний технологічний маршрут з обов'язковими витримками та зняттям дросу; 2) задати двофакторну матрицю $F \times G$ за сталих базових операцій; 3) описати фізичні параметри диспергування аргону і масоперенесення водню; 4) стандартизувати відбір проб та межі застосовності кожного показника; 5) оцінити головні ефекти F і G та їх взаємодію β_{FG} із блокуванням шихти, обладнання і виробничого дня.

Матеріали, обладнання і методика промислового експерименту. Методику розраховано на порційні плавки сплаву АК12. У межах однієї серії використовують той самий плавильний агрегат, тигель або футерівку, ківш і газорозподільний пристрій. Масу плавки фіксують у межах обраного для підприємства масштабу 100–150 кг і не змінюють усередині блоку; цей інтервал не є оптимальним режимом. Для кожної плавки реєструють фактичний хімічний склад, частку звороту, марку й партію флюсу та чистоту аргону. Азот до факторного простору цієї роботи не включено.

Шихту формують з однієї паспортної партії чушкового металу та звороту відомого походження. Вологі, промаслені або покриті елементи не допускають. Якщо однакову частку звороту забезпечити неможливо, серію блокують за шихтою, а блок включають до статистичної моделі. Фактичний склад кожної плавки підтверджують спектральним аналізом або паспортом партії; позначення АК12 саме по собі не замінює контролю складу.

У дослідженні застосовують один визначений спосіб подачі аргону. Для роторного дегазатора фіксують геометрію і діаметр ротора, розміщення газових каналів, частоту обертання, глибину занурення, відстань до дна, витрату Ar та стан графіту. Газ диспергується завдяки зсуву біля вихідних каналів ротора; менший середній діаметр бульбашок d_{32} збільшує питому міжфазну площу. Нерухому фурму й ротор не вважають взаємозамінними: застосування іншого пристрою потребує окремої серії. Надмірна інтенсивність, що спричиняє відкриту воронку або розбризкування, є критерієм відхилення.

Тип форми, ливникову систему, температуру форми, місця вирізання зразків і час від закінчення оброблення до заливання задають до початку серії та не змінюють між варіантами. Проби від контрольної деталі відбирають з однакових зон. Такий контроль потрібний, щоб не приписувати рафінуванню дефекти, зумовлені живленням, газоутворенням форми або іншою тепловою історією. Початкові рівні факторів і правила їх виробничого уточнення наведено в табл. 1, а послідовність оброблення та контрольні точки — на рис. 1.

Варіанти A—D утворюють двофакторний план 2^2 : F позначає наявність флюсової стадії, G — наявність

Початкові рівні факторів і правила їх виробничого уточнення

Параметр	Початковий рівень / діапазон для верифікації	Метод контролю	Правило уточнення й інтерпретації
Склад АК12	Si 10—13 %; інші елементи — за паспортом плавки	Спектральний аналіз / паспорт партії	Стала партія в межах блоку; позначення марки не замінює аналіз
Маса плавки	100—150 кг; одне фіксоване значення у серії	Вагова відомість	Масштаб серії, а не фактор оптимізації
Температура початку	Кодовані рівні $T-1$, T_0 , $T+1$ у межах 720—740 °C	Занурювальна термопара у розплаві	Межі уточнюють за ліквідусом, втратами тепла й температурою заливання
Доза флюсу F	0,10; 0,15; 0,20 % маси металу	Зважування; паспорт флюсу	Початкові рівні фактора; не вважати оптимумом до аналізу даних
Витримка після флюсу	3 ± 1 хв; потім зняття дросу	Таймер; фіксація стану поверхні	Обов'язкова до продування Ar у варіантах F = 1
Аргон G	8; 10; 12 л/хв	Калібрований ротаметр	Допустимі лише рівні без відкритої воронки та розбризкування
Роторне диспергування	Одна геометрія ротора; задані n і глибина; контроль d_{32} за можливості	Тахометр; паспорт ротора; стан графіту	Ротор дробить газ зсувом; фурма потребує окремої серії
Тривалість Ar	6; 8; 10 хв	Таймер	Рівні уточнюють за кривою відгуку і температурними втратами
Кінцеве відстоювання	8—12 хв; однакове для всіх варіантів	Технологічний журнал	Обов'язкова спільна стадія; після неї зняти дрос
Температура заливання	690 ± 10 °C як виробниче обмеження	Занурювальна термопара у розплаві ковша безпосередньо перед заливанням	Вимірюється температура металу, а не повітря біля ковша

Джерело: складено автором самостійно за результатами власного дослідження

Послідовність пакетного рафінування та контрольні точки



Рис. 1.

Послідовність пакетного флюсово-газового рафінування та контрольні точки

Джерело: розроблено та побудовано автором самостійно у середовищі Python 3 (бібліотека Matplotlib) за матеріалами власного дослідження

роторного продування Ar. Первинне зняття дросу, кінцеве відстоювання, повторне зняття дросу та умови заливання є однаковими для всіх варіантів. У варіантах з F після введення флюсу додатково виконують технологічну витримку 3 ± 1 хв для міжфазного розділення і формування дросу, після чого дрос ви-

дають до початку газової стадії. Окремі варіанти є факторними контролями, а не рекомендованими взаємозамінними технологіями. В основному плані фактори кодують як $F, G \in \{0, 1\}$; трирівневі значення в табл. 1 є кандидатними рівнями попереднього скринінгу, тоді як базова матриця в табл. 2

використовує фіксовані центральні режими. Температурно-часову траєкторію й кодовані рівні показано на рис. 2. Порядок виконання варіантів А–D рандомізують у межах блоків шихти або виробничого

дня; плавки з наперед визначеними технологічними відхиленнями не замінюють розрахунковими значеннями, а аналізують окремо.

Проби відбирають з фіксованої глибини метале-

Таблиця 2

Двофакторна матриця F×G за однакових базових операцій

Варіант	Послідовність операцій	Доза флюсу, %	Витрата Ag, л/хв	Тривалість продування Ag, хв	Кінцеве відстоювання, хв	Повтори
A (F0G0)	Базові операції → кінцеве відстоювання → зняття дросу	0	0	0	10	≥3
B (F1G0)	Флюс → 3 ± 1 хв → зняття дросу → кінцеве відстоювання → повторне зняття дросу	0,15	0	0	10	≥3
C (F0G1)	Роторне Ag → кінцеве відстоювання → зняття дросу	0	10	8	10	≥3
D (F1G1)	Флюс → 3 ± 1 хв → зняття дросу → роторне Ag → кінцеве відстоювання → зняття дросу	0,15	10	8	10	≥3

Джерело: складено автором самостійно за результатами власного дослідження

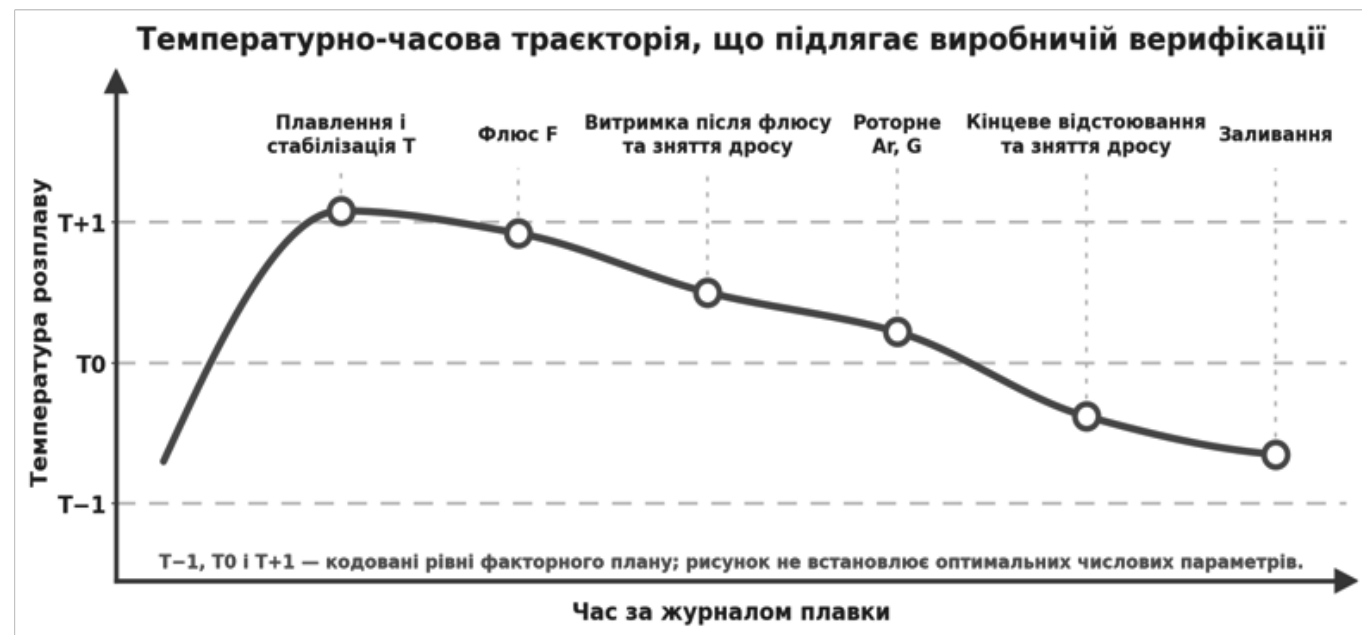


Рис. 2.

Температурно-часова траєкторія та кодовані рівні факторного плану, що підлягають верифікації

Джерело: розроблено та побудовано автором самостійно у середовищі Python 3 (бібліотека Matplotlib) за матеріалами власного дослідження

вим або графітовим пробовідбірником без додаткового турбулентного перемішування. M0 відбирають перед активними стадіями; M1 — після первинного зняття дросу; M2 — після флюсу, післяфлюсової витримки та зняття дросу; M3 — після продування Ag; M4 — після кінцевого відстоювання і зняття дросу безпосередньо перед заливанням; M5 — з контрольної виливка. Температуру, час, вакуум RPT, площу аналізу, $d_{\min}$ та метод ідентифікації включень фіксують у протоколі. Повну схему відбору й межі інтерпретації подано в табл. 3.

Розрахункові показники і оброблення даних. Прямим показником вмісту розчиненого вод-

ню є C_H , визначений спеціалізованим аналізатором. DI і BI характеризують стандартизовану RPT-пробу та застосовуються як порівняльні відгуки, але не замінюють C_H . Цифровий аналіз нетравлених шліфів використовують для площинної частки пор V_p і видимої чисельної щільності розпізнаних об'єктів N_A вище заданої межі $d_{\min}$; цей 2D-показник не є загальною концентрацією неметалевих включень у розплаві. Для C_{inc} потрібен окремий спеціалізований метод, наприклад PoDFA, Prefil або LiMCA, а природу об'єктів підтверджують SEM-BSE/EDS [5—7, 40]. Масоперенесення водню та питому міжфазну площу описують рівнянням (1):

Таблиця 3

Точки відбору, методи контролю та межі інтерпретації

Точка	Момент відбору	Метод	Показник	Межі висновку
M0	Перед активними стадіями	C _H ; RPT; обраний метод включень	C _{H0} , DI0, BI0, C _{inc0} /N _{A0}	Початковий стан конкретної плавки
M1	Після первинного зняття дросу	T; за планом RPT	T1, DI1, BI1	Діагностика базових операцій
M2	Після флюсу, витримки та зняття дросу	T; шліф; PoDFA/Prefil/LiMCA за наявності	T2, N _{A2} , C _{inc2}	N _A — лише видимі 2D-об'єкти
M3	Після роторного Аг	T; C _H ; RPT	T3, C _{H3} , DI3, BI3	DI не ототожнювати з C _H
M4	Після кінцевого відстоювання і зняття дросу	T; C _H ; RPT; шліф; метод включень	C _{H4} , DI4, BI4, V _{p4} , N _{A4} /C _{inc4}	Кінцевий стан металу перед заливанням
M5	Контрольний виливок	Макроаналіз; шліф; за потреби SEM-EDS	V _p , N _A , тип дефекту	Характеристика заданих зон виливка

Джерело: складено автором самостійно за результатами власного дослідження

$$\frac{dC_H}{dt} = -k_L \cdot a \cdot (C_H - C_H^*), \quad a \approx \frac{6\Sigma_g}{d_{32}}, \quad (1)$$

де k_L — об'ємний коефіцієнт масоперенесення; a — питома поверхня газ—метал; Σ_g — газовміст; d_{32} — середній діаметр бульбашок за Заутером. Рушійна сила визначається різницею $C_H - C_H^*$, пов'язаною з $p(H_2)$ у бульбашці. Для статистичного аналізу застосовують рівняння (2):

$$Y_{ijk} = \beta_0 + \beta_F F_i + \beta_G G_j + \beta_{FG} (F_i G_j) + b_k + \Sigma_{igk}. \quad (2)$$

У рівнянні (2) β_F і β_G оцінюють головні ефекти за кодування 0/1, β_{FG} — відхилення спільної дії флюсу

й аргону від суми їх окремих ефектів, а b_k враховує блок шихти або виробничого дня. Ефекти подають з 95 % довірчими інтервалами; припущення моделі перевіряють за залишками, а вибране параметричне вікно — у незалежних плавках. Зведені формули та межі тлумачення наведено в табл. 4, фізичний механізм масоперенесення — на рис. 3.

Параметричне вікно визнають прийнятним лише тоді, коли головні ефекти та взаємодія оцінені за первинними даними, довірчі інтервали сумісні з наперед заданими технічними межами, а температурні втрати, тривалість циклу і стан поверхні ванни залишаються допустимими. Збільшення витрати Аг або частоти обертання не трактують як автоматичне поліпшення: коалесценція бульбашок, відкрита воронка й втягування оксидної плівки можуть погіршити результат.

Таблиця 4

Показники, формули та межі коректного тлумачення

Показник	Формула / метод	Одиниці	Фізичний зміст і межі
Розчинений водень, C _H	Спеціалізований аналізатор водню	мл/100 г або мг/кг	Прямий відгук; метод і калібрування зазначають
k_{La}	$-\frac{1}{t} \ln \left[\frac{C_{H,t} - C_H^*}{C_{H,0} - C_H^*} \right]$	хв ⁻¹	Об'ємний коефіцієнт масоперенесення за прийнятою моделлю
Індекс густини, DI	$\frac{\rho_{atm} - \rho_{RPT}}{\rho_{atm}} \cdot 100$	%	Непрямий порівняльний показник стандартизованої RPT-проби
Біфільм-індекс, BI	ΣI_i	мм	Операційна довжина розкритих порожнин на стандартному перерізі
Площинна пористість, V _p	$\frac{A_p}{A} \cdot 100$	%	2D-частка пор у заданих полях; не автоматично об'ємна пористість
Видима щільність, N _A	$\frac{n_{\geq d_{min}}}{A}$	мм ⁻²	Лише розпізнані об'єкти вище d_{min} ; природу підтверджують окремо
Чистота розплаву, C _{inc}	PoDFA / Prefil / LiMCA або валідований аналог	за методом	Спеціалізована оцінка концентрації/розподілу включень
Взаємодія, β_{FG}	Коефіцієнт при F×G у факторній моделі	одиниці Y	Відхилення спільної дії від суми головних ефектів

Джерело: складено автором самостійно за результатами власного дослідження

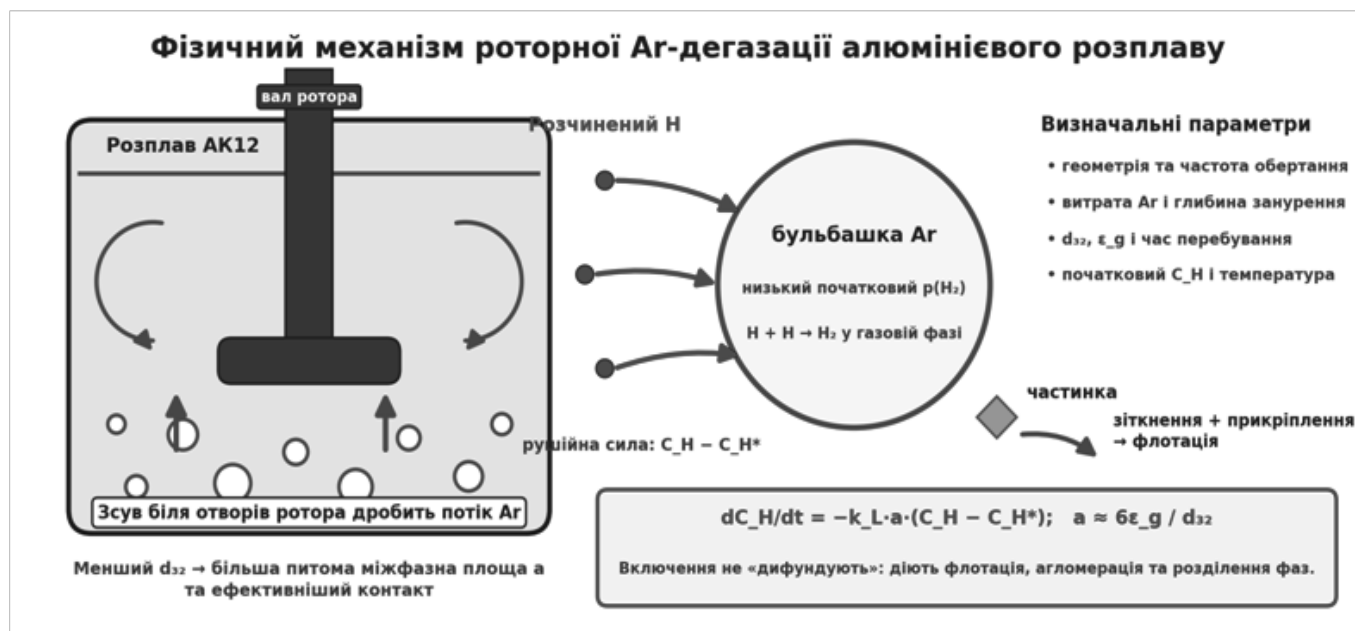


Рис. 3.

Механізм масоперенесення водню і флотації частинок під час роторного продування аргонем

Джерело: розроблено та побудовано автором самостійно у середовищі Python 3 (бібліотека Matplotlib) за матеріалами власного дослідження

Методичні результати та межі виробничої верифікації. Методичним результатом є простежування схема одержання й аналізу парних даних M0—M4 у плані F×G. Табл. 5 визначає обов'язкову форму подання ефектів, а не підмінює фактичні результати. Числові висновки про зниження C_H , DI, BI, V_p або C_{inc} допускаються лише після внесення пер-

винних протоколів, оцінювання розкиду між плавками та підтвердження у незалежній серії. У цій редакції непідтверджені виробничі числа не моделюються.

Паспорт плавки і простежуваність виробничих даних. Паспорт плавки пов'язує факторні рівні з вихідними матеріалами, обладнанням, температурною історією та результатами аналізу. Мініміально

Таблиця 5

Форма подання головних ефектів і взаємодії F×G

Відгук	Початкові дані M0	Кінцеві дані M4/M5	Ефект F (95 % ДІ)	Ефект G (95 % ДІ)	F×G (95 % ДІ)	Допустимий висновок
C_H	З кожної плавки	З кожної плавки	Оцінити	Оцінити	Оцінити	Пряме вилучення H — лише за аналізатором
DI	За сталого RPT	За сталого RPT	Оцінити	Оцінити	Оцінити	Схильність RPT-проби; не концентрація H
BI	Стандартний переріз	Стандартний переріз	Оцінити	Оцінити	Оцінити	Операційний індекс, не повний підрахунок біфільмів
V_p , N_A	Єдина карта полів	Єдина карта полів	Оцінити	Оцінити	Оцінити	Лише досліджені 2D-перерізи
C_{inc}	Спеціалізований метод	Той самий метод	Оцінити	Оцінити	Оцінити	Загальна чистота — в межах валідованого методу

Джерело: складено автором самостійно за результатами власного дослідження

фіксують номер і дату плавки, партію шихти, частку звороту, масу, піч і тигель, марку й партію флюсу, ротор і його частоту обертання, витрату Ar, усі температури та часи, коди проб і відхилення. Плавку з незареєстрованою зміною шихти, форми, газорозподільника або протоколу RPT не об'єднують з основною серією. Мінімальну структуру паспорта наведено в табл. 6, а ланцюг простежуваності — на рис. 4.

Операційний регламент описує не загальну рекомендацію, а критерії придатності кожного виконання. Після введення флюсу обов'язково витримують розплав 3 ± 1 хв для міжфазного розділення та формування дросу, після чого дрос видаляють до роторного продування. Після Ar виконують однакове для всіх варіантів кінцеве відстоювання та повторне зняття дросу. Розбризування, відкрита воронка, зміна ротора або перевищення часу до зали-

Мінімальний паспорт плавки для факторної верифікації

Блок паспорта	Що реєструвати	Допустимий формат	Навіщо потрібно
Шихта	партія чушок, частка звороту, маса, чистота поверхні	кг, %, номер партії	виключення змішування режимів
Піч і ківш	тип печі, номер тигля/ковша, стан футерівки	код обладнання	вплив окиснення і втрат тепла
Температура	T до флюсу, після флюсу, після Ag , перед заливанням	°C, час вимірювання	контроль технологічного вікна
Флюс	марка, партія, маса, спосіб введення	г, % маси металу	перевірка дозування
Газ	тип газу, витрата, тиск, час продування	л/хв, хв	відтворюваність дегазації
Контроль	номери RPT-проб, шліфів, фото, оператор	код проби	зв'язок між плавкою і результатом

Джерело: складено автором самостійно за результатами власного дослідження



Рис. 4. Простежуваність даних від паспорта плавки до підтвердженого параметричного вікна

Джерело: розроблено та побудовано автором самостійно у середовищі Python 3 (бібліотека Matplotlib) за матеріалами власного дослідження

вання кодуються як відхилення. Операції та критерії відхилення систематизовано в табл. 7, карту відбору проб — на рис. 5.

Верифікація макро- і мікродефектності. Макродефекти контрольних виливків класифікують окремо: газова пористість, усадкові порожнини, оксидні плівки, дросові включення, непроливи та дефекти форми. Рафінуванню не приписують дефекти, спричинені живленням або формою. Для кожного варіанта досліджують однакові зони щонайменше трьох незалежних виливків; кількість полів і загальну площу аналізу задають наперед.

На нетравленому шліфі цифровий аналіз може кількісно визначати площинну частку пор V_p та N_A — кількість оптично розпізнаних об'єктів на одиницю площі вище d_{min} . Він не встановлює загальну концентрацію включень у ванні та не гарантує їх хімічної ідентифікації; пори, інтерметаліди, викришування й артефакти полірування можуть змішуватися.

Тому видимі об'єкти верифікують SEM-BSE/EDS, а C_{inc} визначають спеціалізованим методом. Результат обов'язково супроводжують d_{min} , збільшенням, кількістю полів, площею та алгоритмом сегментації [40]. Контроль похибок і правила придатності даних узагальнено в табл. 8.

Критерій вибору раціонального режиму. Рішення приймають за сукупністю оцінених ефектів, а не за формальним мінімумом одного відгуку. Бажана область повинна одночасно задовольняти технічні межі C_H або $DI, BI, V_p, N_A/C_{inc}$, не погіршувати заповнюваність форми, не спричиняти відкритої воронки або розбризкування та не перевищувати допустиму втрату температури й тривалість циклу. Якщо 95 % довірчий інтервал охоплює межу неприйнятності, висновок не вважають підтвердженим. Багато-відгукові критерії підтвердження подано в табл. 9.

У технологічній карті після підтверджувальної серії подають не одну точку, а допустимі інтервали темпе-

Операційний регламент і критерії відхилення

Крок	Операція	Контрольна дія	Ознака відхилення	Рішення
1	Плавлення і стабілізація	T за кодованим рівнем; первинне зняття дросу	Зміна шихти/печі; неврахований перегрів	Заблокувати або виключити плавку
2	Введення флюсу F	Задана доза; рівномірне введення за паспортом	Флюс грудкується або не плавиться	Позначити відхилення; не трактувати як рівень F
3	Післяфлюсова витримка	3 ± 1 хв; формування і повне зняття дросу	Дрос не знято до Ag	Зупинити маршрут або оформити окреме відхилення
4	Роторне Ag , G	Задані Q , n , t ; прогрітий ротор	Відкрита воронка, розбризкування, коалесценція	Знизити інтенсивність; плавку не включати як коректну
5	Кінцеве відстоювання	Однакова тривалість; повторне зняття дросу	Скорочена витримка або залишений дрос	Не об'єднувати з основною серією
6	Заливання	T у розплаві ковша; плавний струмінь; стала форма	Зміна форми, падіння струменя, затримка	Окремий код дефекту/блок

Джерело: складено автором самостійно за результатами власного дослідження



Рис. 5. Карта відбору проб і стандартних зон металографічного контролю

Джерело: розроблено та побудовано автором самостійно у середовищі Python 3 (бібліотека Matplotlib) за матеріалами власного дослідження

ратури, дози флюсу, витрати Ag , частоти обертання і часу продування, а також ознаки припинення або відбракування операції. До завершення такої серії наведені рівні залишаються планом верифікації й не називаються оптимальними. Основні технологічні джерела дефектів узагальнено на рис. 6.

Обговорення. Двофакторний план $F \times G$ відповідає не на очевидне питання, чи містить комплексний

маршрут більше операцій, а на питання про величину головних ефектів і взаємодії за однакових базових стадій. Додатний або від'ємний β_{FG} показує, чи відрізняється спільна дія флюсу й Ag від суми їх окремих ефектів. Водночас технологічне рішення не можна робити лише за β_{FG} : воно має враховувати прямий або непрямий контроль водню, біфільми, включення, дефектність виливка й процесні обмеження.

Таблиця 8

Контроль похибок і правила придатності даних

Джерело помилки	Як проявляється	Профілактика	Статус даних
Несталий вакуум RPT	Зміна DI/BI без зміни процесу	Калібрування; фіксація тиску й часу	Повторити пробу
Інша частка звороту	Інший початковий оксидний фон	Одна партія або блокування	Не змішувати без блоку
Нестала температура	Зміна кінетики та тверднення	T і час у M0–M4	Коригувати моделлю або виключити
Інша зона шліфа	Незіставні V_p і N_A	Єдина карта різання та площа аналізу	Перешліфувати/повторити
Неправильна класифікація об'єктів	Змішування пор, фаз, включень і артефактів	d_{min} , алгоритм, SEM-BSE/EDS	Обмежити висновок N_A
Зміна форми/ливника	Нова усадкова або газова складова	Однакова форма й маршрут	Окрема серія
Затримка заливання	Окиснення та втрата T	Граничний час після Ag	Позначити відхилення

Джерело: складено автором самостійно за результатами власного дослідження

Таблиця 9

Багатовідгукові критерії підтвердження параметричного вікна

Група критерію	Показник	Що оцінювати	Напрямок	Рішення
Водень	C_H ; за відсутності — DI	Ефекти F, G, F×G і 95 % DI	Зменшення	Не ототожнювати DI з C_H
Біфільми	BI	Та сама методика перерізу RPT	Зменшення	Підтвердити відтворюваність
Видимі дефекти	V_p , N_A	Стандартні 2D-зони і d_{min}	Зменшення	Висновок лише для досліджених перерізів
Чистота розплаву	C_{inc}	Один спеціалізований метод	Зменшення	Потрібна валідована методика
Дефектність вилівка	Кількість і тип макродефектів	Однакові контрольні партії	Зменшення	Відокремити дефекти форми й живлення
Технологічність	Втрата T , час циклу, воронка, розбризкування	Обмеження процесу	У межах допуску	Параметричне вікно приймають лише разом з якістю

Джерело: складено автором самостійно за результатами власного дослідження

Причинно-наслідкова схема утворення дефектів у виливках АК12

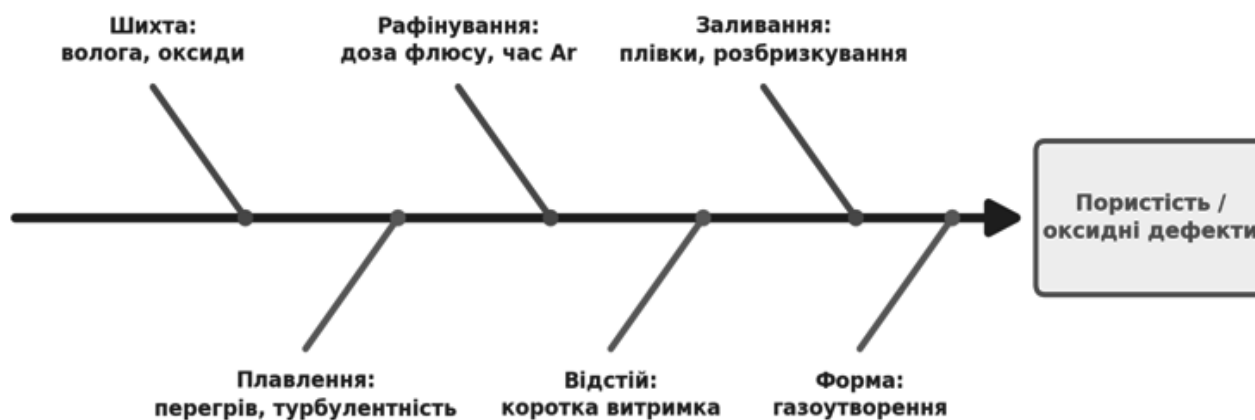


Рис. 6.

Основні технологічні джерела пористості й оксидних дефектів у виливках АК12

Джерело: розроблено та побудовано автором самостійно у середовищі Python 3 (бібліотека Matplotlib) за матеріалами власного дослідження

Для АК12 температурний фактор особливо важливий: зниження температури змінює в'язкість і кінетику розділення фаз, а надмірний перегрів посилює окиснення. Модифікування евтектики тримають сталим і не використовують як пояснення ефекту рафінування. Якщо DI зменшується без зниження C_H або за погіршення BI/N_A , висновок про дегазацію потребує перевірки; якщо N_A зменшується, але спеціалізоване C_{inc} не вимірювалось, висновок обмежують дослідженими шліфами.

Валідаційну спроможність запропонованої методики посилює її узгодженість із визнаними закордонними методами контролю якості алюмінієвого роз-

плавку. Вибір C_H як прямого відгуку, DI та BI як стандартизованих порівняльних показників RPT, а C_{inc} як спеціалізованої міри чистоти відповідає практикам, застосовуваним у Великій Британії, Канаді, США, країнах ЄС та Японії. У табл. 10 наведено методичне зіставлення: контрольні точки M0—M5 сумісні з цими підходами, однак кількісне порівняння результатів допускається лише після узгодження одиниць, калібрування та перевірки відтворюваності кожного методу.

На основі цієї публікації готується пропозиція промислового експерименту: підтверджувальна серія плавок за планом $2^2 (F \times G)$ з блокуванням шихти та

Таблиця 10

Валідаційне порівняння запропонованої методики із закордонними методами контролю якості розплаву

Закордонний метод (розробник, країна)	Контрольований показник	Спільне із запропонованою методикою	Відмінності та межі застосування
RPT з денситометричним індексом DI (Dispinar, Campbell; Велика Британія)	Газо-оксидний стан розплаву за зниженого тиску	DI прийнято як стандартизований порівняльний відгук проб M2—M4	DI чутливий одночасно до водню і біфільмів, тому доповнюється прямим вимірюванням C_H
Біфільм-індекс BI (Dispinar–Campbell; Велика Британія)	Сумарна довжина пор на перерізі RPT-проби, мм	Застосовано як операційну міру впливу оксидних плівок	Не є прямим підрахунком біфільмів у виливку; інтерпретація обмежена перерізом проби
PoDFA / Prefil (ABB; Канада)	Концентрація включень C_{inc} , мм ² /кг	Передбачено як спеціалізований метод верифікації чистоти розплаву	Потребує окремого обладнання; у базовій серії застосовується вибірково
LiMCA II (Канада)	Онлайн-підрахунок включень понад 20 мкм	Слугує закордонним еталоном безперервного контролю чистоти	Орієнтований на безперервні процеси; обмежено застосовний у тигельних плавках
Зонди водню ALSPEK-H / Telegas (ЄС, США)	Прямий онлайн-вміст водню C_H	Узгоджується з вибором C_H як прямого відгуку методики	Вимірювання in-situ; у методиці C_H визначають аналізатором проб M0—M4
Роторні дегазатори FDU (Fosco; Велика Британія) та SNIF	Промислове роторне Ag-продування	Збігається з фізичною моделлю $k_1 \cdot a \cdot d_{32}$ та чинником G	Комерційні режими не переносяться без факторної верифікації $F \times G$
K-mold (Японія)	Експрес-оцінка включень за зломом клиноподібної проби	Аналог операційного контролю злам-проби RPT	Напівкількісний характер; потребує підтвердження шліфами або C_{inc}

Джерело: складено автором самостійно на основі відкритих описів закордонних методів RPT/DI, BI, PoDFA/Prefil, LiMCA II,

ALSPEK-H, FDU та K-mold

виробничого дня, реєстрацією C_H , DI, BI, V_p , N_A і, вибірково, C_{inc} , а також з валідаційним зіставленням отриманих значень із діапазонами, типовими для закордонних методів RPT/DI, PoDFA та LiMCA. Такий експеримент переводить викладену методику зі стадії методичного обґрунтування у стадію експериментальної перевірки та створює основу для міжлабораторного порівняння результатів.

Технологічні рекомендації для цехової апробації. Для цехової апробації до початку серії фіксують агрегат, ротор, шихту, флюс, форму, маршрут заливання та критерії відхилення. Інструмент і пробовідбірники висушують і підігривають; флюс вводять за паспортом; післяфлюсову витримку завершують зняттям дросу; роторне продування виконують без відкритої воронки; після кінцевого відстоювання дрос знімають повторно. Температуру вимірюють за-

нуровальною термопарою безпосередньо в розплаві ковша перед заливанням.

Висновки

1. Флюсову обробку, післяфлюсову витримку зі зняттям дросу, роторне продування аргонном, кінцеве відстоювання та повторне зняття дросу формалізовано як послідовні стадії одного процесу. Відстоювання не розглядається як взаємозамінна альтернатива комплексному обробленню.

2. Запропоновано двофакторний план 2^2 для оцінювання головних ефектів флюсу F, аргону G та їх взаємодії β_{FG} за однакових базових операцій, з блокуванням шихти й виробничого дня та підтвердженням у незалежних плавках.

3. Фізично обґрунтоване керування дегазацією потребує контролю утворення дрібних бульбашок ротором, питомої міжфазної площі та рушійної сили $C_H - C_{H^*}$. Збільшення витрати Ag або частоти обертання не є автоматично корисним через ризик коалесценції, воронки й втягування оксидної плівки.

4. C_H визначено як прямий відгук, DI і BI — як стандартизовані порівняльні показники RPT , а V_p і N_A — як характеристики лише досліджених $2D$ -перерізів. Загальна чистота розплаву за включеннями потребує спеціалізованого методу C_{inc} та окремої ідентифікації об'єктів.

5. Наведені температури, дози й тривалості є початковими рівнями плану; без первинних даних і підтверджувальних плавок вони не є оптимальними параметрами та не доводять зниження дефектності.

6. На основі цієї публікації готується пропозиція промислового експерименту за планом 2^2 з реєстрацією C_H , DI , BI , V_p , N_A та C_{inc} і валідаційним порівнянням із закордонними методами контролю якості розплаву (RPT/DI , $PoDFA/Prefil$, $LiMCA II$, $ALSPEK-H$), що забезпечує перехід від методичного обґрунтування до експериментально підтверджених технологічних рекомендацій.

Обмеження дослідження

Рукопис не містить первинних числових протоколів промислових плавок, тому не робить висновку про вже

досягнуте зниження пористості, включень або браку. Для переходу від методики до експериментально підтвердженої технологічної рекомендації необхідні фактичні $C_H/DI/BI/V_p/N_A$ або C_{inc} , характеристики об'єктів, хімічний склад, статистичні інтервали та незалежна підтверджувальна серія. Непідтверджені результати свідомо не імітуються.

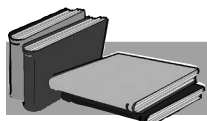
Декларації

Декларація щодо використання ШІ. Інструменти генеративного ШІ використовувалися для структурування рукопису, мовного редагування, а також підготовки схем і табличних форм. Автор самостійно перевіряв науковий зміст, бібліографічні дані, опис методики, інтерпретацію та висновки й несе повну відповідальність за остаточну версію. Генеративний ШІ не використовувався для створення або статистичного опрацювання первинних експериментальних даних.

Фінансування. Дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів.

Внесок автора. Мороз Д.С. — концепція і методика дослідження, аналіз джерел, підготовка рисунків і таблиць, написання та редагування рукопису.



REFERENCES

- Shivkumar, S., Wang, L., & Apelian, D. (1991). Molten metal processing of advanced cast aluminum alloys. *JOM*, 43, 26-32. <https://doi.org/10.1007/BF03220114>
- Samuel, A. M., & Samuel, F. H. (1992). Various aspects involved in the production of low-hydrogen aluminium castings. *Journal of Materials Science*, 27, 6533-6563. <https://doi.org/10.1007/BF01165936>
- Czerwinski, F. (2017). Modern Aspects of Liquid Metal Engineering. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 48, 367-393. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0807-6>
- Gyarmati, G., Fegyverneki, G., Tokár, M., & Mende, T. (2021). The Effects of Rotary Degassing Treatments on the Melt Quality of an Al-Si Casting Alloy. *International Journal of Metalcasting*, 15, 141-151. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00428-z>
- Dispınar, D., & Campbell, J. (2004). Critical assessment of reduced pressure test. Part 1: Porosity phenomena. *International Journal of Cast Metals Research*, 17(5), 280-286. <https://doi.org/10.1179/136404604225020696>
- Dispınar, D., & Campbell, J. (2004). Critical assessment of reduced pressure test. Part 2: Quantification. *International Journal of Cast Metals Research*, 17(5), 287-294. <https://doi.org/10.1179/136404604225020704>
- Dispınar, D., & Campbell, J. (2006). Use of bifilm index as an assessment of liquid metal quality. *International Journal of Cast Metals Research*, 19(1), 5-17. <https://doi.org/10.1179/136404606225023300>
- Dispınar, D., Akhtar, S., Nordmark, A., Di Sabatino, M., & Arnberg, L. (2010). Degassing, hydrogen and porosity phenomena in A356. *Materials Science and Engineering: A*, 527(16-17), 3719-3725. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.01.088>
- Dispınar, D., & Campbell, J. (2011). Porosity, hydrogen and bifilm content in Al alloy castings. *Materials Science and Engineering: A*, 528(10-11), 3860-3865. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.084>
- El-Sayed, M. A., Hassanin, H., & Essa, K. (2016). Bifilm defects and porosity in Al cast alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86, 1173-1179. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8240-6>
- El-Sayed, M. A., & Griffiths, W. D. (2014). Hydrogen, bifilms and mechanical properties of Al castings. *International Journal of Cast Metals Research*, 27(5), 282-287. <https://doi.org/10.1179/1743133614Y.0000000113>

12. El-Sayed, M. A. (2016). The Behaviour of Bifilm Defects in Cast Al-7Si-Mg Alloy. *PLoS ONE*, 11(8), e0160633. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160633>
13. El-Sayed, M. A., Hassanin, H., & Essa, K. (2016). Effect of casting practice on the reliability of Al cast alloys. *International Journal of Cast Metals Research*, 29(6), 350-354. <https://doi.org/10.1080/13640461.2016.1145966>
14. Chen, Q., & Griffiths, W. D. (2021). Modification of Double Oxide Film Defects with the Addition of Mo to an Al-Si-Mg Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 52, 502-516. <https://doi.org/10.1007/s11663-020-02038-w>
15. Griffiths, W. D., Caden, A. J., & Chen, Q. (2017). Effects of transition metal additions on double-oxide film defects in an Al-Si-Mg alloy. *Materials Science and Technology*, 33(18), 2168-2175. <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1346911>
16. Raiszadeh, R., & Griffiths, W. D. (2010). The behaviour of double oxide film defects in liquid Al alloys under atmospheric and reduced pressures. *Journal of Alloys and Compounds*, 491(1-2), 575-580. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.10.271>
17. Raiszadeh, R., & Griffiths, W. D. (2006). A method to study the history of a double oxide film defect in liquid aluminum alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 37, 865-871. <https://doi.org/10.1007/BF02735007>
18. El-Sayed, M. A., Salem, H. A., Kandeil, A. Y., & Griffiths, W. D. (2013). A Study of the Behaviour of Double Oxide Films in Al Alloy Melts. *Materials Science Forum*, 765, 260-265. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.765.260>
19. El-Sayed, M., Salem, H., Kandeil, A., & Griffiths, W. D. (2011). Effect of Holding Time Before Solidification on Double-Oxide Film Defects and Mechanical Properties of Aluminum Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 42, 1104-1109. <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9571-9>
20. Tiryakioğlu, M. (2020). The Effect of Hydrogen on Pore Formation in Aluminum Alloy Castings: Myth Versus Reality. *Metals*, 10(3), 368. <https://doi.org/10.3390/met10030368>
21. Tiryakioğlu, M. (2019). Solubility of hydrogen in liquid aluminium: reanalysis of available data. *International Journal of Cast Metals Research*, 32(5-6), 315-318. <https://doi.org/10.1080/13640461.2020.1718337>
22. Yousefian, P., & Tiryakioğlu, M. (2018). Pore Formation During Solidification of Aluminum: Reconciliation of Experimental Observations, Modeling Assumptions, and Classical Nucleation Theory. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49, 563-575. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4438-6>
23. Campbell, J. (2006). Entrainment Defects. *Materials Science and Technology*, 22(2), 127-145. <https://doi.org/10.1179/174328406X74248>
24. Reilly, C., Green, N. R., Jolly, M. R., & Gebelin, J.-C. (2013). The modelling of oxide film entrainment in casting systems using computational modelling. *Applied Mathematical Modelling*, 37(18-19), 8451-8466. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.03.061>
25. Cox, M., Wickins, M., Kuang, J. P., Harding, R. A., & Campbell, J. (2000). Effect of top and bottom filling on reliability of investment castings in Al, Fe, and Ni based alloys. *Materials Science and Technology*, 16(11-12), 1445-1452. <https://doi.org/10.1179/026708300101507442>
26. Samuel, A. M., Samuel, E., Songmene, V., & Samuel, F. H. (2023). A Review on Porosity Formation in Aluminum-Based Alloys. *Materials*, 16(5), 2047. <https://doi.org/10.3390/ma16052047>
27. Bogdanoff, T., Tiryakioğlu, M., Liljenfors, T., Jarfors, A. E. W., Seifeddine, S., & Ghassemali, E. (2023). On the Effectiveness of Rotary Degassing of Recycled Al-Si Alloy Melts: The Effect on Melt Quality and Energy Consumption for Melt Preparation. *Sustainability*, 15(6), 5189. <https://doi.org/10.3390/su15065189>
28. Podaril, M., Prášil, T., Majerník, J., Kampf, R., Socha, L., Gryc, K., & Gráf, M. (2022). Aluminum Melt Degassing Process Evaluation Depending on the Design and the Degree of the FDU Unit Graphite Rotor Wear. *Materials*, 15(14), 4924. <https://doi.org/10.3390/ma15144924>
29. Lazaro-Nebreda, J., Patel, J. B., Lordan, E., Zhang, Y., Karakulak, E., Al-Helal, K., Scamans, G. M., & Fan, Z. (2022). Degassing of Aluminum Alloy Melts by High Shear Melt Conditioning Technology: An Overview. *Metals*, 12(10), 1772. <https://doi.org/10.3390/met12101772>
30. Dahle, A. K., Nogita, K., McDonald, S. D., Dinnis, C., & Lu, L. (2005). Eutectic modification and microstructure development in Al-Si alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 413-414, 243-248. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.09.055>
31. Gursoy, O., & Timelli, G. (2020). Lanthanides: a focused review of eutectic modification in hypoeutectic Al-Si alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 8652-8666. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.105>
32. McDonald, S. D., Nogita, K., & Dahle, A. K. (2004). Eutectic nucleation in Al-Si alloys. *Acta Materialia*, 52(14), 4273-4280. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.05.043>
33. Lu, L., Nogita, K., & Dahle, A. K. (2005). Combining Sr and Na additions in hypoeutectic Al-Si foundry alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 399(1-2), 244-253. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.03.091>
34. Emadi, D., Gruzleski, J. E., & Toguri, J. M. (1993). The effect of Na and Sr modification on surface tension and volumetric shrinkage of A356 alloy and their influence on porosity formation. *Metallurgical Transactions B*, 24, 1055-1063. <https://doi.org/10.1007/BF02660997>
35. Fracchia, E., Gobber, F. S., & Rosso, M. (2021). Effect of Alloying Elements on the Sr Modification of Al-Si Cast Alloys. *Metals*, 11(2), 342. <https://doi.org/10.3390/met11020342>
36. Song, H., Zhang, L., Cao, F., Gu, X., & Sun, J. (2021). Oxide bifilm defects in aluminum alloy castings. *Materials Letters*, 285, 129089. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.129089>

37. Bogdanoff, T., Tiryakioğlu, M., Jarfors, A. E. W., Seifeddine, S., & Ghassemali, E. (2023). On the combined effects of surface quality and pore size on the fatigue life of Al–7Si–3Cu–Mg alloy castings. *Materials Science and Engineering: A*, 885, 145618. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145618>
38. Warke, V. S., Shankar, S., & Makhlouf, M. M. (2005). Mathematical modeling and computer simulation of molten aluminum cleansing by the rotating impeller degasser: Part II. Removal of hydrogen gas and solid particles. *Journal of Materials Processing Technology*, 168(1), 119-126. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.10.016>
39. Abreu-López, D., Amaro-Villeda, A., Acosta-González, F. A., González-Rivera, C., & Ramírez-Argáez, M. A. (2017). Effect of the Impeller Design on Degasification Kinetics Using the Impeller Injector Technique Assisted by Mathematical Modeling. *Metals*, 7(4), 132. <https://doi.org/10.3390/met7040132>
40. ASTM International. (2023). *Standard Practice for Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis* (ASTM E1245-03(2023)). <https://doi.org/10.1520/E1245-03R23>

Надійшла/Received 08.07.2026

Прийнята/Accepted 27.08.2026

Опублікована/Published 28.09.2026

Summary

D.S. Moroz, Postgraduate Student of the Department of Casting Production,
e-mail: stork1909@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-0326-2057>

Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro, Ukraine)

Methodology for Industrial Verification of Flux-Gas Refining Parameters for AK12 Alloy Melt

The aim of this study is to develop a reproducible methodology for industrial verification of flux-gas refining parameters for AK12 cast aluminium alloy melt before pouring into moulds for shaped castings. A 2^2 factorial design is proposed in which flux treatment F and rotary argon purging G are varied independently, while initial dross removal, final holding, repeated dross removal, and pouring conditions remain identical. The initial screening levels are defined as values to be verified rather than optima: 720-740 °C, 0.10-0.20% flux, 8-12 L/min Ar, 6-10 min purging, and 8-12 min final holding. The physical basis of degassing is represented by the transfer of dissolved hydrogen to dispersed bubbles, specific interfacial area, Sauter diameter d_{32} , and the k_{La} coefficient. Sampling at points M0-M5 is specified, and direct hydrogen determination C_H is distinguished from the indirect RPT/DI and BI indices, areal porosity V_p , apparent areal density of inclusions N_A , and specialized melt-cleanliness assessment C_{inc} . For each heat, chemical composition, return fraction, flux batch, argon purity, rotor geometry, gas flow, and metal temperature before pouring are recorded; process deviations are coded and analysed separately. The statistical model estimates the main effects of F and G , their interaction coefficient β_{FG} , and the blocking effect of charge batch or production day; estimates are reported with 95 % confidence intervals. The method does not equate DI with hydrogen concentration or N_A with overall melt cleanliness and requires a uniform RPT protocol, a fixed metallographic field map, and recorded temperature-time trajectories. The methodological result is a reproducible protocol for selecting an admissible process window from quality indicators, temperature loss, cycle duration, and signs of excessive turbulence. A final technological decision must be confirmed in independent heats with unchanged charge, equipment, mould, and gating system.

Keywords

AK12; Al-Si; flux-gas refining; rotary degassing; argon; hydrogen mass transfer; 2^2 factorial design; RPT; bifilm index; areal porosity; visible inclusions; industrial verification.