

## ФІЗИКО – ХІМІЧНІ ТА КІНЕТИЧНІ АСПЕКТИ ФІЛЬТРАЦІЇ РОЗПЛАВІВ АЛЮМІНІЮ З ВИКОРИСТАННЯМ КЕРАМІЧНИХ ФІЛЬТРІВ

Відомо, що алюміній та його сплави мають багато переваг та є одним з основних конструкційних матеріалів. При цьому існують чисельні проблеми в досягненні високої чистоти розплавів алюмінію. У роботі висвітлено, що одним з основних способів рафінування розплавів алюмінію є їх фільтрація крізь керамічні фільтри.

Показано, що чисельні наукові дослідження, присвячені фільтрації розплавів алюмінію від неметалевих включень через керамічні фільтри призводить до суттєвої ефективності фільтрації розплаву алюмінію та осадженню їх на стінках фільтру, але при цьому встановлено, що відсутні дані стосовно фізико-хімічного механізму та кінетичних закономірностей видалення неметалевих включень з розплаву алюмінію при його фільтрації.

Отже метою дослідження стало встановлення фізико-хімічних закономірностей, а також кінетичної моделі видалення неметалевих включень з розплавів алюмінію.

Процес фільтрації крізь поруваті фільтри залежить від двох процесів, що відбуваються одночасно: утримання включень і відрив частинок від поверхні фільтра.

Під час фільтрації швидкість течії розплаву збільшується внаслідок зменшення пористості фільтра. У цьому випадку на частинки включень, що осідають на поверхні фільтра, буде діяти сила відриву. Дія цих сил може бути

описана наступним рівнянням :  $\tau = \eta \frac{du_{\tau}}{dr} \cos \varphi$

$$\tau = \eta \frac{du_{\tau}}{dr} \cos \varphi \quad (1)$$

де  $\eta$  – в'язкість розплаву металу, Па·с<sup>-1</sup>;  $\frac{du_{\tau}}{dr}$  – градієнт радіальної швидкості, м·с<sup>-1</sup>;  $\varphi$  – кут орієнтування включень у фільтрі, градуси.

Як можна помітити, місце утримання включень на поверхні фільтра залежить від кута орієнтування включення у фільтрі. Для великих значень  $\varphi$  ймовірність закріплення включення на поверхні фільтру є найвищою.

Отже, як було сказано раніше, тверді включення утримуються на поверхні фільтра з рахунок агломерації, а затримання рідких включень

алюмінієвих розплавів є результатом роботи поверхневих сил.

Тому можна очікувати, що утримання рідких включень фільтром буде більш чутливим до інерційних сил через вищі швидкості розплаву порівняно з утриманням твердих включень. З іншого боку, для рідких включень характер змочування визначає тенденцію до того, що вони залишаються прикріпленими до поверхні фільтра, незважаючи на силу зсуву, що діє на них. Контактні кути, як правило, менше  $90^\circ$  для рідких включень, що свідчить про умови змочування.

Отже виходячи з вище розглянутих теоретичних принципів можна зробити висновок стосовно механізму утримання частин включень різного агрегатного стану та розмірів на поверхні фільтра. Він буде складатися з наступних положень:

транспортування включень будь-якого агрегатного стану та розмірів відбувається за рахунок гідродинамічного потоку металу;

включення будь-якого агрегатного стану (тверді, рідкі) розміром до 30 мкм утримуються на поверхні фільтра за рахунок дії поверхневих сил, рідкі включення розміром більше 30 мкм підкоряються таким же закономірностям;

тверді включення розміром більше 30 мкм утримуються силами захоплення. В цьому випадку, включення, що злилися між собою надалі виконують роль нових фільтруючих поверхонь.

Кінетична модель для процесу фільтрації в середині фільтру базується на рівнянні [1] :

$$\frac{\partial}{\partial t}(V + C) + U_p \frac{\partial C}{\partial Z} = 0, \quad (2)$$

де  $V$  – об'єм включень, що залишились на поверхні фільтру,  $\text{м}^3$ ;  $U_p$  – швидкість потоку рідкого металу,  $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $Z$  – напрямок потоку;  $C$  – концентрація включень,  $\text{моль} \cdot \text{м}^{-3}$ .

Швидкість зміни захоплених включень в одиницю об'єму  $\frac{\partial V}{\partial t}$  є функцією концентрації їх у розплаві:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = KC, \quad (3)$$

де  $C$  – концентрація включень у розплаві в момент часу  $t$ ,  $\text{мас.}\%$ ;  $K$  – константа рівноваги гетерогенного процесу осадження неметалевих включень, яка визначається як:

$$K = K_0 \left( 1 - \frac{V}{V_0} \right), \quad (4)$$

де  $K_0$  - кінетичний параметр, який залежить від властивостей розплаву, поверхні фільтру та природи неметалевих включень;  $V_0$  – початковий об'єм включень у розплаві,  $\text{м}^3$ .

Оскільки процес фільтрації на керамічному фільтрі є реакцією

першого порядку, то наведений вище вираз, у поєднанні з масою включень на фільтрі дає нам диференційне рівняння першого порядку в частинних похідних, яке представляє концентрацію включень у розплаві як функцію часу та відстані у фільтрі. Якщо в цьому рівнянні встановити відповідні граничні умови можна визначити концентрацію на виході як функцію часу. При цьому будемо мати на увазі, що поверхня фільтру підлягала дії включень кілька разів, і його фільтруюча здатність більше, ніж сили захоплення, тоді  $\frac{V}{V_0} \rightarrow 0$  і рішення диференційного рівняння (17) буде набувати вигляду:

$$\frac{C(Z)}{C_i} = \exp \left\{ -\frac{K_0 Z}{U_P} \right\}, \quad (5)$$

де  $C(Z)$  – концентрація розплаву на виході (у мас. %) за будь-якої довжина  $Z$  у фільтрі, де  $Z$  – відстань від входу у фільтр,  $C_i$  – початкова концентрація включень у розплаві, мас.%. Таким чином концентрацію включень на вході розплаву, що фільтрується можна виразити як:

На основі рівнянь (4) і (5) для граничних умов, враховуючи, що пористість фільтра залишається постійною під час лиття, можна отримати наступне рівняння для концентрації неметалевих включень у рідкому сплаві.

$$C_0 = C_i \exp \left( -\frac{K_0 L}{U_P} \right), \quad (6)$$

де  $C_0$  – початкова концентрація включень у рідкому розплаві, мас.%.

Коли потік розплаву виходить з фільтруючого шару,  $L = Z$ , тоді рівняння (6) набуде вигляду [2]:

$$C_0 = C_L \exp \left( -\frac{K_0 L}{U_P} \right), \quad (7)$$

де  $L$  – довжина фільтруючого шару, м;  $C_L$  – концентрація включень на вході до фільтру, мас.%.

З наведеного рівняння випливає, що найкращі умови фільтрації розплаву створюються за низьких швидкостях. Але в роботах [3] вказано, що довжина фільтра мало впливає на ефективність видалення неметалевих включень, тому у рівнянні (7) довжину фільтра  $L$  можна замінити параметром  $\alpha$ , що визначається експериментально з даних концентрації неметалевих включень на вході та виході з фільтру за фіксованої швидкості розплаву та довжині фільтру.

Отже початкова концентрація неметалевих включень визначається з рівняння:

$$\varepsilon = \frac{C_0 - C_L}{C_0} = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha}{U_P}\right) \quad C_0 = C_L \exp\left(-\frac{\alpha}{U_P}\right). \quad (8)$$

Ефективність видалення неметалевих включень,  $\varepsilon$  у загальному випадку виглядає як:

$$\varepsilon = \frac{C_0 - C_L}{C_0} = 1 - \exp\left(-\frac{\alpha}{U_P}\right). \quad (9)$$

Для підтвердження кінетичної моделі, а саме що реакція видалення неметалевих включень за рахунок фільтрування через поруваті фільтри має перший порядок, а також визначення впливу швидкості розливання металу на якість фільтрації нами було проведено розливання розплаву алюмінію через керамічний фільтр у лабораторних умовах.

У якості фільтра було використано монолітний кордієрит ( $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ), загальна пористість якого становила 70 %. Довжина фільтра складала 10 см,  $r_{\text{прі}} = 30$ . Експериментальний розплав готували з 70 кг алюмінію шляхом нагрівання до  $750^\circ\text{C}$ .

В якості індикаторів фільтрації було обрано включення  $\text{TiB}_2$ . У розплав алюмінію додавали 5%  $\text{Ti}$  та 1%  $\text{B}$  де під дією температури утворювались синтетичні включення.

Титан диборид було використано у якості синтетичних включень з кількох причин:

- 1) розмір частинок і кластерів  $\text{TiB}_2$  лежать в діапазоні 1-30 мкм;
- 2) легкість проведення кількісного аналізу  $\text{Ti}$  і  $\text{B}$  у алюмінію за допомогою металографічної техніки.

На початку циклу фільтрації розплав енергійно перемішували, щоб запобігти осіданню включень  $\text{TiB}_2$ , розплав також систематично відновлювався на протязі експерименту. Періодично відбирали проби з виходу під фільтруючим апаратом. Швидкість потоку вимірювалася за рахунок збирання фільтрату протягом визначеного періоду часу та визначення його ваги. Вважалося, що при температурі фільтрації весь бор був хімічно зв'язаний з титаном.

Відібрані вхідні та вихідні зразки було досліджено металографічним методом Л використанням скануючої електронної мікроскопії.

Результати експериментальних даних наведено у Табл. 1. Значення ефективності фільтрації було розраховано на основі рівняння (9) до і після фільтрації.

Проведені дослідження довели, що дійсно гетерогенний процес фільтрування розплаву алюмінію через керамічні фільтри є реакцією першого порядку, а також дозволили встановити, що ефективність видалення включень зменшується зі спаданням швидкості розливання.

**Таблиця 1. Продуктивність фільтрації включень  $TiB_2$  з розплаву алюмінію**

| Вміст $TiB_2$ , ppm |       | Швидкість розплаву, $cm \cdot s^{-1}$ | Ефективність фільтрації, % |
|---------------------|-------|---------------------------------------|----------------------------|
| До                  | Після |                                       |                            |
| 148                 | 98    | 0,17                                  | 33                         |
| 164                 | 98    | 0,16                                  | 40                         |
| 164                 | 54    | 0,16                                  | 65                         |
| 153                 | 78    | 0,29                                  | 49                         |
| 184                 | 168   | 0,61                                  | 9                          |
| 184                 | 153   | 0,58                                  | 16                         |
| 130                 | 109   | 1,83                                  | 17                         |
| 130                 | 116   | 1,22                                  | 111                        |
| 130                 | 110   | 0,89                                  | 15                         |

В результаті проведених досліджень встановлено фізико-хімічний механізм поглинання неметалевих включень різного агрегатного стану та розміру поверхню керамічного фільтру. Доведено, що транспортування всіх включень до поверхні, що фільтрує, відбувається за рахунок гідродинамічного потоку металу. Встановлено, що утримання неметалевих включень розміром до 30 мкм відбувається за рахунок дії поверхневих сил, а включень розміром більше 30 мкм – за рахунок сил захоплення.

Визначено кінетичну модель видалення неметалевих включень з розплаву алюмінію, яка свідчить, що цей процес відбувається за першим порядком. З використанням лабораторних досліджень встановлено вплив швидкості розливання на ефективність процесу рафінування розплавів.

У якості перспективи досліджень необхідно провести більш детальні дослідження крайових кутів змочування керамічних матеріалів, що використовуються при фільтрації алюмінію, а також провести дослідження процесу фільтрації в залежності від товщини фільтру та ступені проникнення розплаву у його глибину.

### **Список використаних джерел**

1. Gehre P., Takht Firouzehb S., Schmidta G., Dudcziga S., Kieferb B., Aneziris C.G. (2023). Flame-sprayed alumina molten metal filters for dead-mould casting application. Open Ceramics. Vol. (13). pp. 79-94.
2. Ningjie S., Zhe W., Bolin S., Yuan L., Zhancheng G. (2022). Purification of primary aluminum liquid through supergravity-induced filtration. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification. Vol. 182, no.6, pp.234-357.
3. Hassanabadi M., Berto T., Akhtar S., Aune E. (2023). Hydraulic Characterization of Ceramic Foam Filters Used in Aluminum Filtration. Materials. Vol. 16(7). pp. 56-84.