

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/377101557>

# Theoretical study of physico-chemical and kinetic aspects of the process of filtration of aluminum melts using ceramic filters

Article in *Metal and Casting of Ukraine* · December 2023

DOI: 10.15407/steelcast2023.03.056

CITATIONS

0

READS

19

6 authors, including:



**Aleksey Smirnov**

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of S...

100 PUBLICATIONS 157 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Anastasiia Semenko**

National Academy of Sciences of Ukraine

34 PUBLICATIONS 19 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

**В.Г. Єфімова<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, доц. кафедри, e-mail: yefimovav@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2372-8398>,  
Web of Science ResearcherID: K-3299-2017

**Ю.П. Скоробагатько<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: yulka.ukr@gmail.com,  
<https://orcid.org/0000-0002-1724-9895>

**О.М. Смірнов<sup>2</sup>**, д-р техн. наук, проф., зав. відділу, e-mail: stalevoz@i.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5247-3908>,  
Web of Science ResearcherID: N-1890-2017

**А.Ю. Семенко<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: semenko.au@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0448-1636>,  
Web of Science ResearcherID: GYD-3600-2022

**М.С. Горюк<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, заст. зав. відділу, e-mail: gormak72@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7561-6948>

**Є.В. Карпунін<sup>2</sup>**, аспірант, e-mail: eugenkarpuhin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-00002-2876-8742>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
(Київ, Україна)

<sup>2</sup>Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

## Теоретичне дослідження фізико-хімічних та кінетичних аспектів процесу 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 численні проблеми в досягненні високої чистоти розплавів алюмінію. У даній роботі висвітлено, що одним з основних способів рафінування розплавів алюмінію є їх фільтрація крізь керамічні фільтри.*

*Результати попередніх наукових досліджень показали високу ефективність фільтрації розплаву алюмінію від неметалевих включень через керамічні фільтри, що обґрунтовано їх суттєвим осадженням на стінках даного виробу. Однак фізико-хімічний механізм та кінетичні закономірності видалення неметалевих включень з розплаву алюмінію при його фільтрації вивчено недостатньо.*

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

*На першому етапі досліджень було проведено термодинамічний аналіз видалення неметалевих включень з розплаву алюмінію за рахунок дії поверхневих та динамічних сил. Детально розглянуто механізм утримання поверхнею фільтра включень різного агрегатного стану та розмірів.*

*В результаті досліджень встановлено, що 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.*

*Проведений кінетичний аналіз гетерогенного процесу видалення неметалевих включень поверхнею фільтра показав, що процес лімітується кінетичною областю та перебігає за першим порядком.*

*Для підтвердження достовірності кінетичної моделі, а також для визначення впливу швидкості розливання металу на якість фільтрації, було проведено розливання розплаву алюмінію через керамічний фільтр у лабораторних умовах з використанням індикаторів фільтрації.*

*Проведені дослідження підтвердили лімітуючу область перебігу гетерогенного процесу фільтрування розплаву алюмінію через керамічні фільтри, а також дозволили встановити, що ефективність видалення включень зменшується зі зменшенням швидкості розливання.*

**Ключові слова:** керамічний фільтр, розплав алюмінію, фільтрація, неметалеві включення, крайовий кут змочування, кінетика гетерогенних процесів, поверхнева енергія.

**Вступ.** Алюміній та його сплави мають численні переваги та є одними з найбільш використовуваних металевих матеріалів. Отже, надзвичайно важливо знайти відповідні процеси та методи, що призводять до підвищення якості розплавів алюмінію. Однак мають місце численні проблеми в досягненні високої чистоти розплаву алюмінію через його схильність реагувати з повітрям, киснем і водяною парою, утворення при цьому різноманітних оксидних, неоксидних та частково твердих включень, які призводять до виникнення у литому металі пор, тріщин, точкових отворів і окалини, що зрештою негативно впливає на загальну якість продукту. Одним з основних способів рафінування розплавів алюмінію є їх фільтрація крізь пінокерамічні фільтри. Для фільтрації розплавів алюмінію фільтри виготовляються з оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ) або карбїду кремнію ( $SiC$ ) та інших матеріалів.

Чистота сплавів алюмінію була в центрі уваги протягом останніх трьох десятиріч та залишається одним з головних питань якості готової продукції. Переважно рафінування алюмінію зводиться до мінімізації утворення дефектів, спричинених розчиненими газами (особливо воднем), неметалевими включеннями (оксиди, карбїди та нітриди), різними інтерметалїдними сполуками, лужними та лужноземельними елементами (передусім натрієм, літїєм та кальцієм). Ці забруднюючі компоненти потрапляють у розплавлений алюміній через сировину, а також з вогнетривких матеріалів в екстракційних металургійних процесах та атмосфери під час виробництва алюмінію, а також за рахунок процесу афінажу [1].

Численні дослідження призвели до суттєвого покращення якості розплавів алюмінію за рахунок різноманітних методів очищення, що використовуються на постійній основі у ливарних і металургійних цехах. На сьогодні виробникам алюмінієвих сплавів висувають дуже високі вимоги стосовно якості готової продукції. Різні методи, такі як седиментація, пузиркова флоатція, фільтрація та електромагнітний вплив, застосовуються для видалення включень з розплаву алюмінію. Один з методів, що відзначається найменшими інвестиціями, є фільтрація через пінокерамічні фільтри. Тому дослідження фізико-хімічного механізму та кінетичних закономірностей видалення включень з розплаву алюмінію є актуальною задачею.

У роботах [2—5] показано, що фільтрація у гранульованому шарі  $AlF_3$  шляхом порошкового флюсування, яка використовується для очищення розплавів алюмінію від розчинених домішок Na та Ca, становить 98 %.

Наукові дослідження [6—14], де проводилась оцінка ефективності керамічних пінних фільтрів на видалення неметалевих домішок з розплаву, показали, що досягається висока ефективність фільтрації алюмінію та утворення включень у верхній частині фільтра, що сприяє високій ефективності. При цьому відбувається також видалення включень розміром менше пори фільтра в режимі глибинної фільтрації,

але відсутні дані стосовно фізико-хімічного механізму та кінетичних закономірностей видалення неметалевих включень з розплаву алюмінію з використанням пінокерамічних фільтрів.

**Постановка задачі.** Механізм фільтрації є результатом комплексу взаємопов'язаних фізико-хімічних явищ. Відомо, що видалення включень з розплавів алюмінію можна описати кількома наступними стадіями: транспортування включень до приграничного ламінарного шару, їх проникнення у цей шар, адгезії на стінках фільтра та асиміляції з ними.

Основними параметрами, що впливають на процес фільтрації рідких розплавів алюмінію, є: швидкість розплаву, що протікає крізь фільтр, температура фільтрації, хімічний склад включень. Ці процеси безпосередньо залежать від значень крайових кутів змочування таких фаз, як: «розплав алюмінію — поверхня фільтра», «розплав алюмінію — включення» та «включення — поверхня фільтра».

Отже, визначення фізико-хімічних закономірностей, а також кінетики видалення неметалевих включень з розплавів алюмінію з використанням керамічних фільтрів є актуальною науковою задачею.

**Мета роботи.** Визначити фізико-хімічні закономірності утримання включень різного агрегатного стану і розміру поверхнею фільтра, а також дослідити кінетику процесу фільтрування алюмінієвого розплаву.

**Об'єкт і методика досліджень.** Об'єктом дослідження є фізико-хімічні процеси, що перебігають на межі поділу фаз «поверхня керамічного фільтра — включення (різного агрегатного стану та розмірів) — розплав алюмінію», а також розробка кінетичної моделі процесу фільтрування рідкого алюмінію крізь керамічні фільтри.

Методикою досліджень є термодинамічний аналіз та фізико-хімічні розрахунки процесу видалення включень з рідкого алюмінію керамічними фільтрами.

Проведення лабораторних досліджень розливання рідкого алюмінію крізь керамічні фільтри з метою підтвердження кінетичної моделі та встановлення залежності швидкості розливання на рафінування розплаву від шкідливих включень.

**Обговорення результатів.** Утримання дрібних включень у розплавах алюмінію у ламінарному потоці характеризується одночасною дією сил рідинного механічного походження та силами, що діють між включеннями та фільтруючим матеріалом. Ця комбінація сил керує траєкторіями частинок, які визначають транспортування та утримання включень на поверхні фільтруючого середовища.

Перед контактом з поверхнею фільтра включення мають подолати межу поділу фаз «поверхня фільтра — розплав алюмінію». Вона може бути дуже тонкою і становити кілька сотих міліметрів для деяких рідин, але всередині неї швидкість потоку металу безперервно зростає від нуля до повного значення, яке спостерігається в масі рідкого розплаву.

Товщина приграничного шару  $\delta$  являє собою відстань «X» від поверхні, на якій розплав металу

набуває швидкості основного потоку. Для ламінарного потоку приграничний шар описується наступними рівняннями [15]:

$$\frac{U_x}{\eta_{x,\infty}} = 0,99, \quad (1)$$

$$\delta(X) = 4,7 \left( \frac{\mu \cdot X}{U_{x,\infty}} \right)^{0,5} \quad (2)$$

де  $U_x$  — кінематична швидкість на відстані  $z$  від точки наближення, м·с<sup>-1</sup>;  $\eta_{x,\infty}$  — в'язкість основного потоку, Па·с;  $\mu$  — кінематична в'язкість, м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>;  $X$  — відстань вздовж напрямку  $X$ , м.

Товщину приграничного шару в турбулентному потоці можна описати за допомогою рівняння [15]:

$$\delta = \frac{30 \cdot \mu}{V} \quad (3)$$

де  $V$  — швидкість потоку, м·с<sup>-1</sup>.

Видалення неметалевих включень з розплаву алюмінію теоретично можна представити наступними послідовними стадіями:

- 1) транспортування включень до приграничного шару;
- 2) проникнення у приграничний шар рідких та твердих включень;
- 3) адгезія включень на поверхні фільтра;
- 4) злипання включень на поверхні фільтра.

При цьому на сьогодні відсутня інформація стосовно механізму видалення крупних та дрібних включень поверхнею фільтра, а також у сучасній літературі не розглянуто процес утримання фільтром включень різного агрегатного стану (твердих та рідких).

Рух включень у середині керамічного фільтра підкоряється підкоряється закону седиментації суспензійних систем [16]. Швидкість седиментації  $v$ , що визначається у м·с<sup>-1</sup>:

$$v = \frac{2g(\rho - \rho_0)r^2}{9\mu} \quad (4)$$

де  $g$  — прискорення сили тяжіння, 9,81 Н·кг<sup>-1</sup>;  $\rho$  та  $\rho_0$  — густина включення та розплаву алюмінію, кг·м<sup>-3</sup>;  $r$  — радіус частинок, м. Швидкість цього процесу зростає зі збільшенням густини включень та їх радіуса.

При потрапленні струменя рідкого розплаву в отвори фільтра він змінює напрямок потоку. У фільтрі, з розміром отворів  $d_0$  радіус траєкторій включень становить  $1/2d_0$ , а сила інерції, що діє на частинку включення, визначається як [17]:

$$F = \frac{\pi d^3}{3} (\rho - \rho_0) \frac{u_m^2}{d_0} \quad (5)$$

де  $U_m$  — середня швидкість потоку у фільтрі, м·с<sup>-1</sup> та знаходиться з рівняння  $U_m = U_0/e$ , де  $U_0$  — швидкість потоку металу, м·с<sup>-1</sup>;  $e$  — пористість фільтру, ррї на

даний момент часу.

Проведені нами розрахунки показали, що при використанні фільтра з діаметром отворів  $d_0 = 500$ — $1000$  мкм в умовах ламінарного потоку, швидкість якого  $1 \cdot 10^{-3}$  м·с<sup>-1</sup>, силою інерції в порівнянні з силами тяжіння можна знехтувати, оскільки вона наближено складає  $10^{-12}$  Н.

Рух включень внаслідок броунівського руху можна проаналізувати за допомогою коефіцієнта дифузії  $D$ , м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>. Квадрат середньої відстані, яку пройдено включеннями  $X$ , м за проміжок часу  $\Delta\tau$ , с можна представити:

$$X^2 = 2 \times D \times \Delta\tau \quad (6)$$

Якщо цей інтервал часу вважати за час, що витрачається частинкою при проходженні через шар фільтра одиничної товщини та дорівнює діаметру включення, то відстань, на яку буде переміщуватись включення, буде визначатися як  $d_0 = u_m \Delta\tau$ .

Співвідношення  $X/d_0$  буде характеризувати процес дифузії та визначатися рівнянням [16]:

$$\frac{X}{d_0} = \frac{\sqrt{(2 \times D \times \Delta\tau)}}{u_m \times \Delta\tau} = \sqrt{\frac{2D}{u_m \times d_0}} \quad (7)$$

де  $\frac{D}{u_m \cdot d_0} = Pe^{-1}$  ( $Pe$  — критерій Пекле).

Значення коефіцієнта дифузії  $D$  може бути визначено з використанням співвідношення (формули) Стокса — Ейнштейна [18]:

$$D = \frac{Tk}{3\pi \cdot \mu \cdot d_0} \quad (8)$$

де  $T$  — температура, К;  $k$  — константа Больцмана. Поєднавши рівняння (7) та (8), отримаємо:

$$\frac{X}{d_0} = \sqrt{\frac{2Tek}{3\pi\mu d_0 u_m}} \quad (9)$$

Переміщення включень у середині фільтра за рахунок броунівського руху стає суттєвим у разі низьких швидкостей потоку розплаву через фільтр і маленьких розмірів частинок. В умовах, коли частинка знаходиться між двома шарами рідини, які рухаються з різними швидкостями, вона переміщується у зону, де швидкість більше.

Зміну вільної енергії  $\Delta G$  при утриманні включення у фільтрі можна представити як:

$$\Delta G = \sigma_{\epsilon-\phi} - \sigma_{\rho-\phi} - \sigma_{\rho-\epsilon} \quad (10)$$

де  $\sigma_{\epsilon-\phi}$  — поверхневий натяг на межі поділу фаз «включення — поверхня фільтра», Н·м<sup>-1</sup>;  $\sigma_{\rho-\phi}$  — поверхневий натяг на межі поділу фаз «розплав — поверхня фільтра», Н·м<sup>-1</sup>;  $\sigma_{\rho-\epsilon}$  — поверхневий натяг на межі поділу фаз розплав — включення, Н·м<sup>-1</sup>.

З іншого боку поверхневий натяг на межі поділу фаз «включення — поверхня фільтра» має вигляд у Н·м<sup>-1</sup>:

$$\sigma_{\sigma-\phi} = \sigma_{\sigma-\pi} + \sigma_{\phi-\pi} \quad (11)$$

де  $\sigma_{\sigma-\pi}$  — поверхневий натяг на межі поділу фаз «включення — повітря», Н·м<sup>-1</sup>;  $\sigma_{\phi-\pi}$  — поверхневий натяг на межі поділу фаз «поверхня фільтра — повітря», Н·м<sup>-1</sup>.

Досліджуючи рівновагу краплі сплаву на твердій поверхні включення, можна зробити висновок, що рівноважний поверхневий натяг на межах поділу фаз «включення — газ» та «поверхня фільтра — повітря»:

$$\sigma_{\sigma-\pi} = \sigma_{\rho-\sigma} + \sigma_{\rho-\pi} \cos \theta_{\rho-\sigma} \quad (12)$$

$$\sigma_{\phi-\pi} = \sigma_{\rho-\phi} + \sigma_{\rho-\pi} \cos \theta_{\rho-\phi} \quad (13)$$

де  $\sigma_{\rho-\pi}$  — поверхневий натяг на межі поділу фаз «розплав — поверхня фільтра», Н·м<sup>-1</sup>;  $\theta_{\rho-\sigma}$  та  $\theta_{\rho-\phi}$  — крайові кути змочування на межі поділу фаз «розплав — включення» та «розплав — поверхня фільтра», відповідно.

Об'єднавши рівняння (11), (12) та (13), отримаємо:

$$\Delta G = \sigma_{\rho-\pi} (\cos \theta_{\rho-\sigma} + \cos \theta_{\rho-\phi}) \quad (14)$$

Необхідною умовою для утримання включення на стінці фільтра є  $\Delta G < 0$ . Оскільки  $\sigma_{\rho-\pi}$  завжди додатна, значення ізобарно-ізотермічного потенціалу залежить від крайових кутів змочування  $\theta_{\rho-\sigma}$  та  $\theta_{\rho-\phi}$ . Чим вище значення крайового кута змочування, тим вище тенденція до утримання включень. Дані, що наведено в табл. 1 [19], показують, що основні матеріали, з яких виготовляють фільтри, мають велике значення крайових кутів змочування і, відповідно, добре утримують на своїй поверхні шкідливі включення.

Таблиця 1

Значення крайових кутів змочування керамічних матеріалів розплавом алюмінію [19]

Матеріал	Крайовий кут, ° за 700 °С	Крайовий кут, ° за 1100 °С
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	90	80
SiO <sub>2</sub>	150	50
SrO <sub>2</sub>	150	87
AlN	160	50, 45
BN	140	0—60
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	160	60
Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	—	54
SiC	160	51
TiB <sub>2</sub>	140—160	0

Сила Ван-дер-Ваальса (міжмолекулярної взаємодії) визначається конфігурацією фільтра. Слід зазначити факт, що силами Ван-дер-Ваальса нехтують у випадку деяких частинок включень з діаметром менше 10 мкм.

Сили тертя, які виникають при зіткненні включень з поверхнею фільтра, призводять до їх деформації та залишають їх на місці контакту. Відомо, що в

процесі фільтрування розплаву сталі високі робочі температури фільтрів для чорних сплавів дозволяють швидко спікати включення на поверхні фільтра, тоді як для сплавів на основі алюмінію спікання включень на поверхні фільтра, на жаль, не є можливим механізмом їх захоплення та утримання.

Фільтрація розплаву крізь поруваті фільтри залежить від двох процесів, що відбуваються одночасно: утримання включень і відриву 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, яка може бути описана наступним рівнянням:

$$f = \eta \frac{dU_{\tau}}{dr} \cos \phi, \quad (15)$$

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

Як можна помітити, місце утримання включень на поверхні фільтра значно впливає на можливість їх утримання. Для великих значень  $\phi$  ймовірність закріплення включень на поверхні фільтра є найвищою.

Отже, як було зазначено раніше, тверді включення утримуються на поверхні фільтра за рахунок агломерації, а затримання рідких включень алюмінієвих розплавів є результатом роботи поверхневих сил.

Відповідно 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° 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:

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

2) 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 тим самим закономірностям;

3) 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 фільтра базується на рівнянні:

$$\frac{\partial}{\partial t}(V + C) + U_P \frac{\partial C}{\partial Z} = 0 \quad (16)$$

де  $V$  — об'єм включень, що залишилися на поверхні фільтра, м<sup>3</sup>;  $U_P$  — швидкість потоку рідкого металу, м·с<sup>-1</sup>;  $Z$  — напрямок потоку;  $C$  — концентрація включень, моль·м<sup>-3</sup>.

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

$$\frac{\partial V}{\partial t} = KC \quad (17)$$

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

$$K = K_0 \left(1 - \frac{V}{V_0}\right) \quad (18)$$

де  $K_0$  — кінетичний параметр, який залежить від властивостей розплаву, поверхні фільтра та природи неметалевих включень;  $V_0$  — початковий об'єм включень у розплаві, м<sup>3</sup>.

Оскільки процес фільтрації на керамічному фільтрі є реакцією першого порядку, то наведений вище вираз, у поєднанні з масою включень на фільтрі, дає нам диференціальне 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 фільтра підлягала дії включень кілька разів, і його фільтруюча здатність більше, ніж сили захоплення, тоді  $\frac{V}{V_0} \rightarrow 0$  і рішення диференціального рівняння (17) набувати вигляду:

$$\frac{C(Z)}{C_i} = \exp\left\{\frac{-K_0 Z}{U_P}\right\}, \quad (19)$$

де  $C(Z)$  — концентрація включень у розплаві на виході з фільтра (у %мас.) за будь-якої відстані від входу у фільтр  $Z$ , м;  $C_i$  — початкова концентрація включень у розплаві, %мас.

На основі рівнянь (16) і (17) для граничних умов, враховуючи, що пористість фільтра залишається незмінною протягом лиття, можна отримати наступне рівняння для концентрації неметалевих включень у рідкому сплаві:

$$C_0 = C_i \exp\left(\frac{-K_0 L}{U_P}\right), \quad (20)$$

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

Коли потік розплаву виходить з фільтруючого шару,  $L = Z$ , тоді рівняння (20) набуде вигляду:

$$C_0 = C_L \exp\left(\frac{-K_0 L}{U_P}\right), \quad (21)$$

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

З наведеного рівняння випливає, що найкращі умови фільтрації розплаву створюються за низьких швидкостей. Але в роботі [10] було зазначено, що довжина фільтра мало впливає на ефективність видалення неметалевих включень, тому у рівнянні (21) довжину фільтра  $L$  можна замінити параметром  $\alpha$ , що визначається експериментально з даних концентрації неметалевих включень на вході та виході з фільтра за фіксованої швидкості розплаву та довжини фільтра.

Отже, початкова концентрація неметалевих включень визначається з рівняння:

$$C_0 = C_L \exp\left(\frac{-\alpha}{U_P}\right). \quad (22)$$

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

$$\varepsilon = \frac{C_0 - C_L}{C_0} = 1 - \exp\left(\frac{-\alpha}{U_P}\right). \quad (23)$$

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, 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,  $\text{ppr}$  — 30. Експериментальний розплав готували з 70 кг алюмінію шляхом нагрівання до 750 °С.

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  $\text{TiB}_2$  перебуває в діапазоні 1—30 мкм;
- 2) відносна простота здійснення кількісного аналізу  $\text{Ti}$  і  $\text{B}$  у алюмінію за допомогою металографічної техніки.

На початку циклу фільтрації розплав інтенсивно перемішували, щоб запобігти осіданню включень  $\text{TiB}_2$ . Також розплав систематично відновлювався протягом 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 з використанням скануючої електронної мікроскопії.

Результати експериментальних даних наведено у табл. 2. Значення ефективності фільтрації було розраховано на основі рівняння (23) до і після фільтрації.

Таблиця 2

Продуктивність фільтрації включень  $TiV_2$  з розплаву алюмінію

Вміст $TiV_2$ , ppm		Швидкість розплаву, см·с <sup>-1</sup>	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

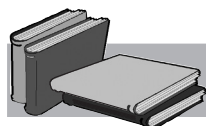
Проведені дослідження довели, що гетерогенний процес фільтрування розплаву алюмінію через керамічні фільтри є дійсно реакцією першого порядку, а також дозволили встановити, що ефективність видалення включень зменшується зі спаданням швидкості розливання.

### Висновки і перспективи досліджень

В результаті проведених досліджень встановлено фізико-хімічний механізм поглинання неметалевих включень різного агрегатного стану різним розміром поверхні керамічного фільтра. 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.

Розроблено 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 детальне вивчення крайових кутів змочування керамічних матеріалів, що використовуються при фільтрації алюмінію, а також провести дослідження процесу фільтрації залежно від товщини фільтра та ступеня проникнення розплаву у його глибину.

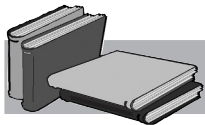


## ЛІТЕРАТУРА

- Apelian D., Mutharasan R., Ali S. Removal of inclusions from steel melts by filtration. *J Mater Sci*. 1985. 20. 3501—3514. <https://doi.org/10.1007/BF01113756>
- Sun N., Wang Zh., Sun B., Li Yu., Guo Zh. Purification of primary aluminum liquid through supergravity-induced filtration. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 2022. 182. 109199. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109199>
- Hassanabadi M., Berto T., Akhtar S., Aune R.E. Hydraulic Characterization of Ceramic Foam Filters Used in Aluminum Filtration. *Materials*, 2023. 16(7). 2805. <https://doi.org/10.3390/ma16072805>
- Gehre P., Firouzeh S.T., Schmidt G., Dudczig S., Kiefer B., Aneziris C.G. Flame-sprayed alumina molten metal filters for dead-mould casting application. *Open Ceramics*. 2023. 15. 100373. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100373>
- Voigt C., Hubáková J., Zienert T., Fankhänel B., Stelter M., Charitos A., Aneziris C.G. Aluminum Melt Filtration with Carbon Bonded Alumina Filters. *Materials*. 2020. 13. 3962. <https://doi.org/10.3390/ma13183962>
- Salomon A., Zienert T., Voigt C., Jäckel E., Fabrichnaya O., Rafaja D., Aneziris C.G. Comparison of interfacial reactions between AlSi7Mg and alumina filter after casting and spark plasma sintering. *Advanced Engineering Materials*. 2013. 15(12). 1206—1215. <https://doi.org/10.1002/adem.201300114>
- Gehre P., Schmidt A., Hubáková J., Aneziris C.G., Child N., Delaney I., Rancoule G., DeBastiani D. Interaction of slip- and flame-spray coated carbon-bonded alumina filters with steel melts. *Journal of the American Ceramic Society*. 2018. 101(7). 3222—3233. <https://doi.org/10.1111/jace.15431>
- Voigt C., Ditscherlein L., Werzner E., Zienert T., Nowak R., Peuker U., Sobczak N., Aneziris C.G. Wettability of AlSi7Mg alloy on alumina, spinel, mullite and rutile and its influence on the aluminum melt filtration efficiency. *Materials & Design*. 2018. 150. 75—85. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.026>
- Luchini B., Hubáková J., Wetzig T., Grabenhorst J., Fruhstorfer J., Pandolfelli V.C., Aneziris C.G. Carbon-bonded alumina foam filters produced by centrifugation: A route towards improved homogeneity. *Ceramics International*. 2018. 44(12). 13832—13840. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.228>
- Voigt C., Jäckel E., Taina F., Zienert T., Salomon A., Wolf G., Aneziris C.G., Le Brun P. Filtration Efficiency of Functionalized Ceramic Foam Filters for Aluminum Melt Filtration. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2017. 48. 497—505. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0869-5>
- Voigt C., Dietrich B., Badowski M., Gorshunova M., Wolf G., Aneziris C.G. Impact of the Filter Roughness on the Filtration Efficiency for Aluminum Melt Filtration. In: Chesonis, C. (eds) *Light Metals 2019. The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7\\_130](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_130)

12. Ali S., Apelian D., Mutharasan R. Refining of Aluminum and Steel Melts by the Use of Multi-Cellular Extruded Ceramic Filters. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2013. 4. 311—318. <https://doi.org/10.1179/cmqr.1985.24.4.311>
13. Emmel M., Aneziris C.G. Development of novel carbon bonded filter compositions for steel melt filtration. *Ceramics International*. 2012. 38(6). 5165—5173. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.03.022>
14. Damoah L.N.W., Zhang L. Removal of Inclusions from Aluminum Through Filtration. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2010. 41. 886—907. <https://doi.org/10.1007/s11663-010-9367-3>
15. Ляхтер В.М. Гидравлическое моделирование. Москва: Энергоатомиздат, 1994. 392 с.
16. Гельфман М.И., Ковалевич О.В., Юстратов В.П. Коллоидная химия. С.-Пб.: Лань, 2004. 336 с.
17. Сивухин Д.В. Курс общей физики. Т. 1. Механика. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 560 с.
18. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. Москва: Мир, 1980. 616 с.
19. Fankhänel B., Stelter M., Voigt C., Aneziris C.G. Interaction of AlSi7Mg with Oxide Ceramics. *Advanced Engineering Materials*. 2017. 19(9), 1700084. <https://doi.org/10.1002/adem.201700084>

Надійшла 25.08.2023



## REFERENCES

1. Apelian, D., Mutharasan, R., Ali, S. (1985). Removal of inclusions from steel melts by filtration. *J Mater Sci*, 20, 3501—3514. <https://doi.org/10.1007/BF01113756>
2. Sun, N., Wang, Zh., Sun, B., Li, Yu., Guo, Zh. (2022). Purification of primary aluminum liquid through supergravity-induced filtration. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 182, 109199. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109199>
3. Hassanabadi, M., Berto, T., Akhtar, S., Aune, R.E. (2023). Hydraulic Characterization of Ceramic Foam Filters Used in Aluminum Filtration. *Materials*, 16(7), 2805. <https://doi.org/10.3390/ma16072805>
4. Gehre, P., Firouzeh, S.T., Schmidt, G., Dudczig, S., Kiefer, B., Aneziris, C.G. (2023). Flame-sprayed alumina molten metal filters for dead-mould casting application. *Open Ceramics*, 15, 100373. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2023.100373>
5. Voigt, C., Hubáľková, J., Zienert, T., Fankhänel, B., Stelter, M., Charitos, A., Aneziris, C.G. (2020). Aluminum Melt Filtration with Carbon Bonded Alumina Filters. *Materials*, 13, 3962. <https://doi.org/10.3390/ma13183962>
6. Salomon, A., Zienert, T., Voigt, C., Jäckel, E., Fabrichnaya, O., Rafaja, D., Aneziris, C.G. (2013). Comparison of interfacial reactions between AlSi7Mg and alumina filter after casting and spark plasma sintering. *Advanced Engineering Materials*, 15(12), 1206—1215. <https://doi.org/10.1002/adem.201300114>
7. Gehre, P., Schmidt, A., Hubáľková, J., Aneziris, C.G., Child, N., Delaney, I., Rancoule, G., DeBastiani, D. (2018). Interaction of slip- and flame-spray coated carbon-bonded alumina filters with steel melts. *Journal of the American Ceramic Society*, 101(7), 3222—3233. <https://doi.org/10.1111/jace.15431>
8. Voigt, C., Ditscherlein, L., Wertzner, E., Zienert, T., Nowak, R., Peuker, U., Sobczak, N., Aneziris, C.G. (2018). Wettability of AlSi7Mg alloy on alumina, spinel, mullite and rutile and its influence on the aluminum melt filtration efficiency. *Materials & Design*, 150, 75—85. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.026>
9. Luchini, B., Hubáľková, J., Wetzig, T., Grabenhorst, J., Fruhstorfer, J., Pandolfelli, V.C., Aneziris, C.G. (2018). Carbon-bonded alumina foam filters produced by centrifugation: A route towards improved homogeneity. *Ceramics International*, 44(12), 13832—13840. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.228>
10. Voigt, C., Jäckel, E., Taina, F., Zienert, T., Salomon, A., Wolf, G., Aneziris, C.G., Le Brun, P. (2017). Filtration Efficiency of Functionalized Ceramic Foam Filters for Aluminum Melt Filtration. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 48, 497—505. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0869-5>
11. Voigt, C., Dietrich, B., Badowski, M., Gorshunova, M., Wolf, G., Aneziris, C.G. (2019). Impact of the Filter Roughness on the Filtration Efficiency for Aluminum Melt Filtration. In C. Chesonis (Ed.), *Light Metals 2019. The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7\\_130](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05864-7_130)
12. Ali, S., Apelian, D., Mutharasan, R. (2013). Refining of Aluminum and Steel Melts by the Use of Multi-Cellular Extruded Ceramic Filters. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 4, 311—318. <https://doi.org/10.1179/cmqr.1985.24.4.311>
13. Emmel, M., Aneziris, C.G. (2012). Development of novel carbon bonded filter compositions for steel melt filtration. *Ceramics International*, 38(6), 5165—5173. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.03.022>
14. Damoah, L.N.W., Zhang, L. (2010). Removal of Inclusions from Aluminum Through Filtration. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 41, 886—907. <https://doi.org/10.1007/s11663-010-9367-3>
15. Lyakhter, V.M. (1994). *Hydraulic modeling*. Moscow: Energoatomizdat, 392 p. [in Russian].
16. Gelfman, M.I., Kovalevich, O.V., Yustratov, V.P. (2004). *Colloidal chemistry*. St. Petersburg: Lan Publishing House, 336 p. [in Russian].
17. Sivukhin, D.V. (2005). *General physics course. Vol. 1. Mechanics*. Moscow: FIZMATLIT, 560 p. [in Russian].
18. Roach, P. (1980). *Computational fluid dynamics*. Moscow: Mir, 616 p. [in Russian].

## Summary

**V.G. Yefimova**<sup>1</sup>, PhD (Engin.), Associate Professor of the Department, e-mail: yefimovavg@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2372-8398>, Web of Science ResearcherID: K-3299-2017

**Yu.P. Skorobagatko**<sup>2</sup>, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: yulka.ukr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1724-9895>

**O.M. Smirnov**<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department, e-mail: stalevoz@i.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5247-3908>, Web of Science Researcher ID: N-1890-2017

**A.Yu. Semenko**<sup>2</sup>, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: semenko.au@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0448-1636>, Web of Science ResearcherID: GYD-3600-2022

**M.S. Goruk**<sup>2</sup>, PhD (Engin.), Deputy Head of the Department, e-mail: gormak72@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7561-6948>

**Ye.V. Karpuhin**<sup>2</sup>, PhD student, e-mail: eugenkarpuhin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-00002-2876-8742>

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

<sup>2</sup>Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

## Theoretical study of physico-chemical and kinetic aspects of the process of filtration of aluminum melts using ceramic filters

*It is known that aluminum and its alloys have many advantages and are one of the main structural materials. At the same time, there are numerous problems in achieving high purity of aluminum melts. In this paper it is shown that one of the main ways of refining aluminum melts is their filtration through ceramic filters.*

*The results of previous scientific studies have shown the high efficiency of filtering aluminum melt from non-metallic inclusions through ceramic filters, which is justified by their substantial deposition on the walls of this product. However, the physico-chemical mechanism and kinetic patterns of removal of non-metallic inclusions from aluminum melt during its filtration have not been studied enough.*

*Therefore, the goal of the research was to establish the physico-chemical regularities, as well as creating the kinetic model of the removal of non-metallic inclusions from aluminum melts.*

*At the first stage of our research, a thermodynamic analysis of the removal of non-metallic inclusions from molten aluminum due to the action of surface and dynamic forces was conducted. The mechanism of retention of inclusions of different aggregate state and sizes by the filter surface has been considered in detail.*

*As a result of the research, it was found that inclusions of any aggregate state (solid, liquid) up to 30 μm in size are held on the filter surface due to surface forces, liquid inclusions larger than 30 μm obey the same laws; solid inclusions larger than 30 μm are held by the gripping forces. In this case, the inclusions that have merged with each other will further act as new filter surfaces.*

*The conducted kinetic analysis of the heterogeneous process of removal of non-metallic inclusions by the filter surface showed that the process is limited by the kinetic region and proceeds according to the first order.*

*To confirm the reliability of the kinetic model, as well as to determine the influence of the metal pouring speed on the quality of filtration, aluminum melt was poured through a ceramic filter in laboratory conditions using filtration indicators.*

*The conducted studies confirmed the limiting area of the heterogeneous process of filtering molten aluminum through ceramic filters, and also allowed us to establish that the efficiency of removing inclusions decreases with a decrease in the pouring speed.*

## Keywords

*Ceramic filter, aluminum melt, filtration, non-metallic inclusions, wetting edge angle, kinetics of heterogeneous processes, surface energy.*