

<https://doi.org/10.15407/plit2025.04.003>

УДК 669.714.1:621.745.56:538.4/5

В.О. Середенко, докт. техн. наук, пров. наук. співроб.;
e-mail: mhdptima@gmail.com; <http://orcid.org/0009-0001-5335-7391>

О.В. Середенко, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.;
e-mail: ptimamhd@gmail.com; <http://orcid.org/0009-0009-4792-7421>

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РАФІНУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ РОЗПЛАВІВ ВІД НЕМЕТАЛЕВИХ ВКРАПЛЕНЬ У ПІНОКЕРАМІЧНИХ ФІЛЬТРАХ

На основі аналізу способів організації електромагнітних впливів на процес затримки неметалевих вкраплень в порах пінокерамічних фільтрів при фільтрації рідких сплавів визначено перспективність застосування схеми схрещення під прямим кутом постійних магнітного та електричних полів, дія яких підсилює гравітаційну седиментацію часток у напрямку неелектропровідних стінок пор та закріпленню на них вкраплень. Показано, що непрямолінійність русла пор і нерівномірність їх поперекових перетинів по всій довжині русла суттєво впливає на зміну як напрямку електроструму, так і його локальних щільностей. На відміну від цього, силові лінії однорідного магнітного поля, для яких фільтр і гетерогенний розплав є майже однорідним середовищем за магнітною проникністю, не зазнають викривлень. Визначено, що такі особливості впливають на силову електромагнітну дію, яка генерує в потоці розплаву в порах фільтра локальні циркуляційні і гвинтові рухи, що сприяють затримці неметалевих вкраплень у порах фільтра, особливо в зонах заглиблень у стінках пор. Складність протікання фізичних процесів електромагнітного рафінування рідких сплавів від неметалевих вкраплень може певною мірою бути досліджена на фізичних моделях. На основі теорії подібності розрахована фізична модель фільтрації у стандартному пінокерамічному фільтрі Ceralu® Al_2O_3 з високою хімічною стійкістю фірми Drach (Німеччина) алюмінієвого розплаву, отриманого із забрудненої неметалевими вкрапленнями шихти при накладанні постійних магнітного та електричного полів. Визначено основні критерії, що характеризують кінематику частинок у потоці розплаву під дією сили тяжіння (Рейнольдса і Фруда), та забезпечено умову їх ідентичності для фізичної моделі і натурної системи. Також реалізовано подібність синергетичної дії сил тяжіння та електромагнітного впливу на неелектропровідну частинку в електропровідному розплаві у модельній та натурній системі. На цій основі були розраховані масштабні коефіцієнти фізичної моделі протікання порами фільтра алюмінієвого розплаву та електромагнітного впливу на процес фільтрації.

Ключові слова: електромагнітне рафінування, металеві розплави, неметалеві вкраплення, пінокерамічні фільтри.

Вступ

Рафінування металевих розплавів від неметалевих вкраплень (НВ) є одною з обов'язкових операцій при отриманні високоякісної металевої продукції [1–3]. Розплавлені метали та їх сплави, як правило, містять багато дисперсних вкраплень і є дисперсними системами. При плавці, розливці, охолодженні і

твердненні рідкометалеві середовища безперервно перемішуються внаслідок впливу різних факторів. У цей час дисперсні вкраплення підхоплюють потоки розплаву. Переміщення вкраплень та їх взаємодія багато в чому визначаються специфікою властивостей несучого середовища і самих вкраплень. При вивченні процесів очищення рідких металів і сплавів від неметалевих вкраплень важливо класифікувати розплави за низкою важливих відмінностей, що сприяє визначенню наукових основ розроблюваних технологій рафінування. Так, найбільш поширені та затребувані металеві матеріали, як-от сталь та алюмінієві сплави, мають щонайменше дві важливі відмінності в плані дисперсних середовищ. Перше зумовлене протилежними співвідношеннями щільностей дисперсних частинок та рідкого несучого середовища. Для сталі це співвідношення щільностей включень (Al_2O_3 , FeO , SiO_2 , MnO , FeS тощо) і матричної фази значно менше одиниці ($\rho_{\text{в}} / \rho_{\text{ст}} < 1$), а в разі алюмінію та його сплавів істотно вище — $\rho_{\text{в}} / \rho_{\text{Al}} > 1$ (Al_2O_3 в Al). Наслідок цього — протилежне по вертикалі переміщення дисперсної фази в рідині під дією гравітації в процесі сепарації та очищення розплавів, зокрема із застосуванням фільтрів.

По-друге, взаємодія твердих і рідких частинок при зіткненні є різною. Тверде вкраплення (Al_2O_3 в Al) при зіткненнях взаємодіють пружно і коагулюють тільки при високій вільній енергії їх поверхонь. Рідкі частинки — краплі інших рідин (FeO , FeS , SiO_2 і т. п.) в сталі, з якими дисперсійне середовище (розплавлений метал) не змішується, при зіткненні можуть як коагулювати, так і дробитися (наприклад, при ударі струменя об поверхню фільтра), прилипати до твердої поверхні, що змочується (фільтра або інших твердих вкраплень), а також до рідких плівок, які розташовані на поверхні твердих вкраплень [4, 5].

Розплавлені метали та сплави, що містять НВ, належать до полідисперсного класу, і тому їх фізико-механічні моделі складніші в описі, ніж найпростіша монодисперсна, що складається зі сферичних частинок у несучій рідині. У полідисперсному класі аналізовані системи (сталеві та алюмінієві розплави) є потоками з малою масовою концентрацією дисперсної фази, але дуже значною за кількістю дисперсних частинок в одиниці об'єму. Для такого типу рідкометалевої системи характерний спільний рух несучого середовища та дисперсних частинок у традиційному без застосування зовнішніх впливів режимі фільтрації без вираженої взаємодії НВ між собою та слабого впливу на гідродинаміку розплавленого середовища.

Матеріали та методи

В аналізованому контексті основних впливів на НВ і рідкометалеве середовище при русі полідисперсної системи порами пінокерамічного фільтра на частинки діють поле тисків в несучій рідині, включаючи гідродинамічний опір ξ її відносному руху, сили Архімеда і Магнуса, сили інерції та адгезії, а також електромагнітну силу.

Відомо, що для окремої сферичної частки при впливі в потоці лише гідродинамічних сил існує два характерних випадки актуальних для її поведінки в потоці рідини в порах фільтра — область в'язкого обтікання (коли власне число Рейнольдса частки $\text{Re}' \leq 1$ ($\xi \text{Re}' = \text{const}$)) та область автомодельності ($\xi = 0,4$). У першому випадку відносна швидкість частинки в напрямку потоку рідини не відрізняється від його швидкості, у другому може бути меншою. При цьому важливим моментом є виникнення обертального руху НВ при зіткненнях зі стінкою (виступом на поверхні пори фільтра), один з одним або потрапляння в зони звуження, розширення, різких поворотів унаслідок кривизни русла пори. Це відбувається також при злитті й розділенні потоків полідисперсної суспензії (або суспензії та емульсії) внаслідок поєднання сусідніх або розгалуженні пор фільтра, тобто потрапляння потоку в умови локально виражених градієнтів швидкості на протилежних зонах поверхні частинки. У таких ситуаціях проявляється сила Магнуса, спрямована перпендикулярно до поступального руху потоку несучого середовища. Цей ефект сприяє відходу НВ від стінки пори фільтра, на якій внаслідок змочування швидкість рідини дорівнює нулю (прилипання) або зменшується внаслідок тертя і шорсткості стінки та переходу

вкраплення в центральну зону потоку в порі, де його швидкість вище середньої. При цьому сила Магнуса найбільш виражено діє на найкрупніші НВ, оскільки вона прямо пропорційна щільності розплаву, відносної поступальної швидкості вкраплення в потоці, кутової

швидкості НВ, а характерному розміру вкраплення в третьому ступені. Гідротракт пінокерамічного фільтра має виражену локальність за площею перерізу S , та, за законом нерозривності потоку (витрата рідини $Q = U \cdot S = \text{const}$), швидкість потоку U в кожному об'ємі по геометрії ділянки загального русла відрізняється від певного середнього значення, що задається загальною витратою по фільтру. Завдяки такій неоднорідній швидкісній структурі мікропотоків металевої рідини, що несе велику кількість полідисперсних включень по численних порах, які відрізняються складною геометричною формою елементів гідротрактів, що пронизують фільтр від входу до виходу, а також дії на НВ сил інерції, Архімеда, Магнуса і відцентрових на криволінійних ділянках гідротракту можливе виникнення різних несталоностей і неоднорідностей в суспензії, що рухається. Це може призвести, наприклад, до накопичення НВ в локальних областях із низькими швидкостями течії середовища, утворення зон із підвищеною концентрацією НВ (згустків і конгломератів) на ділянках із криволінійними локальними потоками, закріпленню НВ у поглибленнях стінок пор тощо. Конгломерати, що утворилися, можуть змиватися потоком, частково або повністю перекривати переріз пор на подальших ділянках гідротракту. Такі процеси можуть викликати перебудову швидкісних структур у порах фільтра та пульсації.

Також пульсації у всьому об'ємі полідисперсного потоку, що йде через фільтр, неминуче впливають на процес фільтрації, ускладнюючи його фізико-математичний опис та вироблення шляхів підвищення ефективності очищення металу від НВ.

З урахуванням складності та неоднозначності синергетичної дії різних чинників на процес рафінування рідкометалевих систем від НВ доцільно обмежитися одним доступнішим для дослідження з урахуванням сучасних умов сплавом. Ґрунтуючись на низці сформованих факторів, об'єктом було вибрано виплавлений із брухту алюмінієвий сплав, що містить полідисперсні тверді неелектропровідні вкраплення Al_2O_3 з використанням електромагнітної сили як зовнішнього впливу.

Електромагнітні дії на полідисперсний рідкометалевий потік з неелектропровідними НВ можна реалізувати різними способами [1–6]. Уся їх різноманітність ділитися на 2 типи щодо впливу в часі — змінні та постійні. При розробці технологій очищення рідких металів від НВ в основному дослідження ведуться при накладенні: а) високочастотного соленоїдального електромагнітного поля на розплав в циліндричній ємності або електромагнітного поля, що біжить; б) схрещених під прямим кутом постійних магнітного та електричного полів, накладених на розплав у призматичній або циліндричній (канальній) формі. Як правило, поля схрещуються в горизонтальній площині з пропусканням електроструму по розплаву перпендикулярно до силових ліній постійного магнітного поля [1–3]. Обидва ці типи організації силового електромагнітного впливу на полідисперсну систему розплаву з НВ конкурують, маючи як свої переваги, так і складності при досягненні позитивних результатів очищення металевих розплавів від НВ. У разі застосування другого типу створення електромагнітного впливу на метал та НВ із застосуванням пінокерамічних фільтрів немає обмеження по глибині проникнення в електропровідний розплав електромагнітного силового поля через відсутність явища поверхневого ефекту (скін-ефекту), характерного для змінних полів, особливо високочастотних.

При пропусканні електроструму по розплаву в порах фільтра у зв'язку з їх звивистим руслом і стінками, що не проводять електрострум, його лінії будуть відхилятися від перпендикулярного положення відносно силових ліній магнітного поля. У зв'язку з тим, що магнітна проникність речовин фільтра, НВ та рідкого алюмінію відрізняються на надзвичайно незначні величини, силові лінії магнітного поля не зазнають змін у напрямку їхнього вектора. Така особливість у характері протікання електроструму по звивистих траєкторіях, на які локально впливатимуть

неелектропровідні полідисперсні включення і особливо їх конгломерати, що можуть як закріплюватися, так і переміщатися в потоках по порах, приведуть до локальних змін в односпрямованості електромагнітних силових впливів на полідисперсні потоки в розплаві. Це підвищить гідроопір в порах, але, головне, призведе до виникнення локальних циркуляційних і гвинтових потоків. Це може викликати затримання НВ у порах фільтра, особливо в зонах русла, куди не входять лінії електроструму, і гальмування руху розплаву з НВ магнітним полем через збільшення ξ [3]. Такі явища, імовірно, сприятимуть затриманню НВ у порах, посиленню ймовірності як утворення конгломератів, так і їх заходу в заглиблення пор фільтра й закріпленню НВ у них (рис. 1).

За даними провідного європейського виробника пінокерамічних фільтрів для

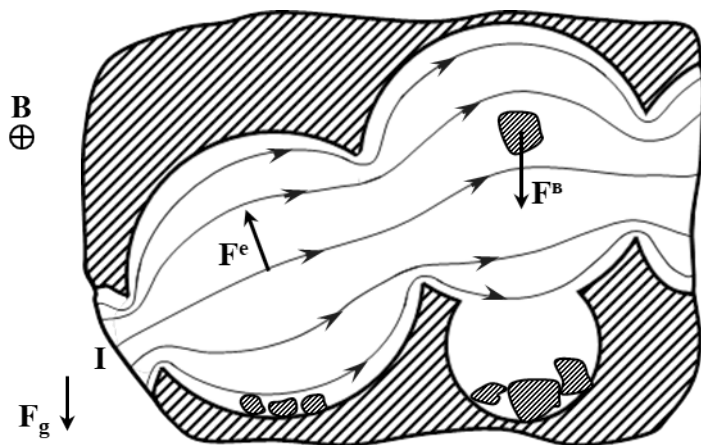


Рис. 1. Схема фрагмента пори неелектропровідного пінокерамічного фільтра з електропровідним розплавом (сплав алюмінію) з неелектропровідними твердими НВ у процесі фільтрації під електромагнітним впливом, що реалізується схрещеними постійними полями — електричним, що генерує електрострум I , та магнітним з індукцією B , при синергетичній дії електромагнітної сили F^e і сили тяжіння F_g , які призводять до виникнення результуючої сили F^B , яка діє на неметалеві вкраплення

фільтрування розплавів чорних і кольорових металів Drach (Німеччина), для очищення рідкого алюмінію від НВ використання лінійки квадратних фільтрів типу Ceralu на основі оксиду алюмінію з розмірами від 178 до 585 мм і товщиною 50 мм середніх діаметрів пор від 0,6 до 5,4 мм забезпечує продуктивність рафінування розплаву від 25 до 510 кг/хв (<https://www.drache-gmbh.de/en/products/aluminium-dc-casting/ceralu-al2o3/>).

Результати і обговорення

Виконаний розрахунок за характеристиками одного з фільтрів зазначеної лінійки (178 x 178 x 50 мм) з кількістю пор на квадратний дюйм 30, розміром пори 1,5 мм з продуктивністю від 25 до 35 кг/хв показав, що загальна площа прохідного перерізу фільтра складає 8,2 % від його загальної площі, середня швидкість розплаву при проходженні по порах відповідно з витратою від 25 до 35 кг/хв або від $1,7 \cdot 10^{-4}$ до $2,3 \cdot 10^{-4}$ м³/с, дорівнювала 65,3 мм/с і 88,6 мм/с. При цьому числа Рейнольдса мали відповідно значення 816 і 1107. Ці значення є орієнтовними внаслідок складної геометрії пор. Такі величини чисел Re вказували на ламінарний режим течії полідисперсного розплаву у фільтрі в діапазоні рекомендованих витрат, з одного боку, а з іншого — на суттєве превалювання інерційних сил над в'язкісними. При цьому, як впливає з експериментальних даних по картинах обтікання потоками

рідини нерухомих локальних перешкод (а це виступи на стінках пор), поведінка рідкого середовища за перешкодами не є стаціонарною в кормовій частині, де рідина підгальмовується, створюючи в потоці складні нестаціонарні явища типу автоколивань [7]. Такі коливання в потоці відбуваються за рахунок внутрішніх явищ у пограничному шарі на поверхні перешкоди. Інтенсивність цих явищ підвищується зі зростанням числа Рейнольдса і, відповідно, ролі сил інерції відносно сил в'язкого тертя. За наявності таких явищ використовуються як числові методи, так і фізичні моделі для встановлення їх характеристик.

Загалом проблема розкриття особливостей фільтрації металевих розплавів з НВ у пінокерамічних фільтрах складна та неоднозначна. Застосування в таких процесах додаткових силових впливів, особливо електромагнітних, що відрізняються своєю специфікою, ще більше ускладнює пошук оптимальних технологічних рішень.

Зазвичай у випадку просторового фільтраційного потоку, що проникає крізь пористе середовище під дією сили тяжіння, оцінюють за допомогою закону Дарсі з визначенням вектора «швидкості фільтрації». Закон виведений на підставі обробки дослідних даних за просторово усередненою течією в язкої рідині за випадково орієнтованими та різноманітними за геометричною формою порах фільтруючого середовища. Закон Дарсі має високу адекватність при малих швидкостях (міліметри в секунду) та малих (близьких до 1) значень числа Рейнольдса, що дозволяє знехтувати прискореннями, спричиненими кривизною пор та змінністю площ їх перерізів. Зазначені обставини незначно впливають на середній гідростатичний опір у порах та, відповідно, на витратну складову фільтраційної швидкості. При русі в язких рідинах крізь пористі середовища з порівняно великими середніми розмірами пор і швидкостями, що притаманно пінокерамічним фільтрам, закон Дарсі втрачає адекватність через свою лінійність. Для точнішої фізичної картини необхідно застосування нелінійної характеристики швидкості фільтрації, пов'язаної перш за все зі зростанням впливу локальних прискорень, що розвиваються в потоці і подальших проявів втрати стійкості ламінарного руху в порах [7].

З урахуванням складності фізичних процесів, що протікають при очищенні металевих розплавів від НВ за допомогою пінокерамічних фільтрів і електромагнітних впливів було проведено розрахунок масштабних коефіцієнтів «холодної» фізичної моделі, виконаний на основі теорії подібності. Модель розраховувалася для варіанта очищення рідкого алюмінієвого сплаву, отриманого із забрудненої шихти від неелектропровідних полідисперсних включень Al_2O_3 . Аналіз чисел подібності виконувався з урахуванням основних силових впливів різної природи на потік розплавленого алюмінію, що несе вкраплення глинозему різних розмірів. Визначальними критеріями прийнято числа Re і Fr (Фруда). Вони характеризують насамперед процес підведення неметалевого вкраплення до стінки фільтра. Після чого починають відбуватися процеси прилипання твердих частинок до стінок фільтра та закріплення на них включень за рахунок адгезії. Число Re — критерій динамічної подібності, що характеризує співвідношення сил інерції потоку та в'язкого тертя. Він однозначно визначає режим течії рідини з постійними властивостями простору заданої конфігурації. В аналізованому варіанті процесу фільтрації за допомогою пінокерамічного фільтра локальними відмінностями в просторі та часі пов'язаними з процесами конгломерації частинок, змінами геометрії гідротракту через прилипання включень до стінки пор фільтра можна знехтувати. За характерну швидкість потоку в порі фільтра прийнята середньовитратна швидкість розплаву через весь фільтр. Характерний розмір прийнятий рівним діаметру пори, а кінематична в'язкість унаслідок впливу на неї підвищеної концентрації НВ такою, що дещо перевищує цю характеристику первинного алюмінію.

Форма числа гравітаційно-гідродинамічної взаємодії Fr прийнята для випадку двокомпонентного потоку «тверді частинки – несуче середовище», у якому величини відносної швидкості твердого включення U_0 і кутова швидкість вкраплення ω виробляються самою течією:

$$Fr = (2 v_0^2) / [g d (\rho_0 - 1)],$$

де g — прискорення сили тяжіння, м/с^2 ; d — діаметр пори, м ; $\rho_{\text{в}}$ — щільність неметалевої частинки, кг/м^3 ; $\rho_0 = \rho_{\text{в}} / \rho$ — відносна щільність частинки, зваженої в рідині зі щільністю ρ .

Сила Архімеда, що діє на вкраплення в рідині, характеризується числом Архімеда (Ar):

$$Ar = Re^2 / Fr = g d_{\text{в}}^3 (\rho_0 - 1) / (8 v^2),$$

де $d_{\text{в}}$ — діаметр вкраплення, м ; v — кінематична в'язкість алюмінієвого розплаву, $\text{м}^2/\text{с}$.

Як випливає з цього виразу, сила Архімеда помітно впливатиме на включення з діаметром $d_{\text{в}} > 40 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ (40 мкм).

Сила Магнуса залежить в основному від величини діаметра НВ:

$$F_{\text{М}} = (\pi / 3) \rho d_{\text{в}}^3 v_0 \omega.$$

Оскільки $d_{\text{в}} \ll 1 \text{ м}$, то порядок величини $d_{\text{в}}^3 \sim (1 \cdot 10^{-12} \text{ — } 1 \cdot 10^{-18}) \text{ м}^3$ нівелює дію цієї сили в потоках з $v < 1 \text{ м/с}$ і в процесі, що розглядається, нею можна знехтувати.

Оцінка в нульовому наближенні співвідношення дій сил тяжіння та електромагнітної на неелектропровідне компактне вкраплення з формою, близькою до сферичної, в електропровідній рідині, щільність якої менше щільності включення, виконано шляхом порівняння швидкостей сферичних твердих тіл у рідкому середовищі ($v_{\text{с}}$) з використанням формули Стокса й відомого виразу, отриманого на основі балансу електромагнітної сили $F^{\text{е}}$ та сили в'язкого опору [2].

$$v_{\text{с}} / v^{\text{е}} = [2 d_{\text{в}}^2 g (\rho_{\text{в}} - \rho) / 9(\rho v)] : (d_{\text{в}}^2 F^{\text{е}}) / (24 \rho v) = 52,3 \Delta \rho / F^{\text{е}},$$

де $v^{\text{е}}$ — швидкість потоку внаслідок дії об'ємної електромагнітної сили, м/с ; $\Delta \rho = (\rho_{\text{в}} - \rho)$, кг/м^3 .

Оскільки $\rho_{\text{в}} = 4 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\rho = 2,37 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, $\Delta \rho = 1,63 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, то $v_{\text{с}} / v^{\text{е}} = 85,3 \cdot 10^3 / F^{\text{е}}$. Цей приблизний розрахунок показав, що швидкості переміщення полідисперсних включень Al_2O_3 під дією сили тяжіння та об'ємної електромагнітної сили в рідкому алюмінії дорівнюватимуть $v_{\text{с}} / v^{\text{е}} = 1$ при значенні $F^{\text{е}} = 8,5 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^3$. Оскільки $F^{\text{е}} = B j$, де B — індукція магнітного поля, Тл; j — щільність електроструму в рідкому алюмінії, А/м^2 , наприклад, при $B = 0,01 \text{ Тл}$ необхідна щільність електроструму повинна мати порядок $\sim 8,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$. Такий порядок щільності електроструму характерний для металу в бокових ділянках каналів установки МДН-6А. Індукція, створювана у порах фільтра, обмежена умовою однорідності індукції в зазорі електромагніту постійного струму чи постійного магніту. Ця проблема значно посилюється зі збільшенням необхідного проміжку між полюсами магніту при розміщенні в ньому пінокерамічного фільтра. Щільність електроструму, що пропускається по порах фільтра, обмежується рівнем виділення тепла Джоуля та пінч-ефектом.

Аналіз співвідношень $v_{\text{с}} / v^{\text{е}}$ показав, що для досягнення паритету за величиною й однорідності гравітаційного та електромагнітного впливів у порожнині форм фільтра на НВ в алюмінієвому розплаві необхідно врахувати не тільки складності та обмеження апаратного забезпечення досить високого рівня магнітної індукції та електроструму у всьому об'ємі розплаву в порах стандартного пінокерамічного фільтру, але й капітальні та енергетичні витрати. Водночас дія сили тяжіння постійна та однорідна в просторі і часі, вертикальна та абсолютно доступна для безвитратного використання в даному процесі рафінування. Це дає можливість підвищити ефективність процесу при синергетичному поєднанні з електромагнітною силою. Така перевага досягається, наприклад, при поєднанні односпрямованої дії цих сил на переміщення неелектропровідних НВ в електропровідному рідкому середовищі

якщо $\rho_b / \rho > 1$ і реалізується у разі протилежної спрямованості електромагнітної сили силі тяжіння [2, 8] в режимі штучного зниження питомої ваги електропровідної рідини [9]. Також необхідне горизонтальне або близьке до нього розташування проточних каналів пінокерамічного фільтра. При цьому НВ витіснятимуться з алюмінієвого розплаву до нижньої стінки пори фільтра узгоджено з дією сили Стокса. У цьому випадку НВ повинні подолати відстань до твердої стінки $\ell \leq d - d_b$ за час менший, ніж $\tau = \ell_\phi / v$, де ℓ_ϕ — товщина фільтра. Звідси $v_c + v^e \geq d \cdot v / \ell_\phi = \text{Re} \cdot v / \ell_\phi$. За таких умов синергетична дія електромагнітної і гравітаційної сил набуде максимального ефекту.

З урахуванням геометрії стандартного фільтра з мінімальними рекомендованими витратами рідкого алюмінієвого сплаву, що рафінується, прийнято найбільш адекватну умову для визначального критерію — $\text{Re} = \text{idem}$. Під цю умову підібрана рідина, що моделює розплав — 1 % водний розчин NaCl щільністю $\sim 1000 \text{ кг/м}^3$, кінематичною в'язкістю $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ близькою за величиною до аналогічної характеристики забрудненого натурального розплаву $\sim 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, питомим електроопором $\sim 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ і відносною магнітною проникністю $\mu \sim 1$. Таким чином, геометричний масштаб моделі $a_\ell = 1$, швидкісний $av = 1$, в'язкісний (кінематична в'язкість) $a_v \approx 1$. Звідси масштаб часу $a_t = a_\ell / av = 1$. Співвідношення властивостей за агрегатним станом (тверді НВ в рідкому алюмінієвому розплаві) склали по: щільності $\rho_b / \rho = 4 \cdot 10^3 / 2,5 \cdot 10^3 = 1,6$; питомому електроопору $\rho_b^e / \rho^e = 0,25 \cdot 10^{-8} = 0$, відношній магнітній проникності $\mu_b / \mu \approx 1/1 = 1$. При використанні як матеріалу, що моделює тверді вкраплення неелектропровідного подрібненого текстоліту співвідношення в моделі щільностей вкраплення і середовища, що моделює рідкий алюмінієвий сплав, склало — $\rho_b / \rho = 1,6 \cdot 10^3 / 1 \cdot 10^3 = 1,6$, а питомого електроопору — $\rho_b^e / \rho^e = 0/1 = 0$ і виконано умову $\text{Fr} = \text{idem}$. Таким чином, кінематика частинок у потоці під дією Архімедової сили та гідродинамічного напору буде близька (особливо за компактної форми включень) до натурних умов.

З урахуванням експериментальних даних щодо видалення НВ з розплавленого алюмінію електромагнітними силами за ступенем видалення з розплаву полідисперсних НВ [4, 5] їх можна поділити на 2 категорії: з розміром $> 40 \text{ мкм}$ та $< 10 \text{ мкм}$. Це можна зробити в три етапи: перші 2 з монодисперсними включеннями 40 або 10 мкм, а третій суміщений. Електромагнітну силу в процесі проведення моделювання раціонально варіювати в діапазоні $(0,2-0,8) v_c / v^e$, виходячи з розглянутого раніше співвідношення сил Стокса та електромагнітної при $v_c / v^e = 1$.

Для розрахунку масштабних коефіцієнтів моделі аналізованих випадків немає повної однозначності в характеристиках натури, оскільки остаточно не з'ясована оптимальна конструкція силової схеми впливу на полідисперсні вкраплення, які відрізняються не тільки розмірами і формою, але й різними співвідношеннями фізичних характеристик несучого середовища і вкраплень (щільності, агрегатного стану, в'язкості у випадку рідких або твердо-рідких вкраплень, а також твердих, де у порах і тріщинах знаходиться газ, електропровідності, магнітної проникності, поверхневих властивостей та ін.). Тому необхідні подальші поглиблені дослідження з урахуванням багатофакторних специфічних умов протікання процесів електромагнітного рафінування від полідисперсних структурно-неоднорідних неметалевих вкраплень у різних за температурою і складом рідкометалевих середовищ.

Висновки

Показано, що проблема розкриття особливостей фільтрації металевих розплавів із НВ у пінокерамічних фільтрах складна та неоднозначна. Застосування в таких процесах додаткових силових впливів і особливо електромагнітних, що відрізняються своєю специфікою, ще більше ускладнює пошук оптимальних технологічних рішень.

Висвітлено, що непрямолінійність русла пор і нерівномірність їх поперекових перетинів по всій довжині русла суттєво впливає на зміну як напрямку електроструму, так і його локальних щільностей. На відміну від цього силові лінії однорідного магнітного поля, для яких фільтр і гетерогенний розплав є майже однорідним середовищем за магнітною проникністю, не зазнають викривлень. Неоднорідність

розподілу електромагнітної сили по об'єму пори призводить до виникнення локальних циркуляційних і гвинтових потоків металу. Це сприяє затриманню НВ у порах фільтру, особливо в зонах русла, куди не входять лінії електроструму і гальмується рух розплаву з НВ магнітним полем.

Визначено, що складність фізичних процесів та їх математичного опису при рафінуванні сплавів від НВ за допомогою пінокерамічних фільтрів і електромагнітних впливів може бути певною мірою розв'язане фізичним моделюванням. На основі теорії подібності розроблено масштабні коефіцієнти «холодної» фізичної моделі очищення від НВ рідкого алюмінієвого сплаву, отриманого з забрудненої шихти. Забезпечено умови подібності моделі й натури за рахунок ідентичності критеріїв, що характеризують гідродинаміку полідисперсного потоку, та реалізовано подібність синергетичної дії сил тяжіння й електромагнітного впливу на неелектропровідну частинку в електропровідному розплаві.

Список літератури

- 1 Liu, G., Ren, Y., Ma, W., Morita, Y., Lei, Y., Zhan, S., Lv, G., Li, S., Wang, Z., Li, R. (2024) Recent advances and future trend of aluminum alloy melt purification: A review, *Journal of Materials Research and Technology*. 28. P. 4647–4662. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.024>
- 2 Парк, Дж. П., Танака, Й., Сасса, К., Асаи, С. (1996) Сепарация примесных включений из расплава металла с использованием электромагнитных сил. Магнитная гидродинамика. № 32 (2). С. 244–250.
- 3 Повх И.Л., Чекин Б.В. Магнитогидродинамическая сепарация. Киев: Наукова думка, 1978. 148 с.
- 4 Фоченков В.А. О движении твёрдых неметаллических включений в каналах индукционной плавильной печи. Цветные металлы. 1985. №7. С. 65–67.
- 5 Zhai, X., Fan, L., Sun, Z., Yao, G. Study of electromagnetic separation of non-metallic inclusions of various sizes in molten aluminum. *Journal of Molecular Science*. 2001. 17 (1). P. 23–26.
- 6 Колесниченко А.В., Гориславец Ю.М. Об удалении неметаллических включений в жидком алюминии. Цветные металлы. 1988. № 2. С. 66–69.
- 7 Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Москва: Металлургия, 1979. 416 с.
- 8 Бабкин В.Г., Шпаков В.И., Пихутин И.А., Никитин В.М., Серюков В.С. Преодоление зарастания футеровки каналов индукционных печей при плавке алюминиевых сплавов. Цветные металлы. 1989. № 3. С. 93–97.
- 9 Верте Л.А. МГД-технология в производстве чёрных металлов. Москва: Металлургия, 1990. 120 с.

Надійшла 02.04.2025

Received

- 1 Liu, G., Ren, Y., Ma, W., Morita, Y., Lei, Y., Zhan, S., Lv, G., Li, S., Wang, Z., Li, R. (2024) Recent advances and future trend of aluminum alloy melt purification: A review, *Journal of Materials Research and Technology*, 28, 4647-4662. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.024> [in English].
- 2 Park, J.P., Tanaka, Y., Sassa, K., Asai, S. (1996) Separation of impurity inclusions from a metal melt using electromagnetic forces, *Magnetohydrodynamics*, 32 (2), 244–250 [in Russian].
- 3 Povkh, I.L., Chekin, B.V. (1978) *Magnetohydrodynamic separation*. Naukova Dumka, 148 [in Russian].
- 4 Fochonkov, V.A. (1985) *On the movement of solid non-metallic inclusions in the channels of an induction melting furnace*. Non-ferrous Metals, (7), 65–67 [in Russian].

- 5 Zhai, X., Fan, L., Sun, Z., Yao, G. (2001) Study of electromagnetic separation of non-metallic inclusions of various sizes in molten aluminum. *Journal of Molecular Science*, 17(1), 23–26 [in English].
- 6 Kolesnichenko, A.V., Gorislavets, Yu.M. (1988) On the removal of non-metallic inclusions in liquid aluminum. *Non-ferrous Metals*, (2), 66–69 [in Russian].
- 7 Kutateladze, S.S. (1979) *Fundamentals of the Theory of Heat Transfer*. Metallurgy, 416 [in Russian].
- 8 Babkin, V.G., Shpakov, V.I., Pikhutin, I.A., Nikitin, V.M., Seryukov, V.S. (1989) Overcoming fouling of the lining of induction furnace channels during the melting of aluminum alloys. *Non-ferrous Metals*, (3), 93–97 [in Russian].
- 9 Verte, L.A. (1990) *MHD technology in the production of ferrous metals*. Metallurgy, 120 [in Russian].

Received 02.04.2025

V. O. Seredenko, Dr. Sci. (Engin.), leading researcher; e-mail: mhdptima@gmail.com;
<http://orcid.org/0009-0001-5335-7391>

O. V. Seredenko, Ph. D. (Engin.), Senior Researcher;
e-mail: ptimamhd@gmail.com; <http://orcid.org/0009-0009-4792-7421>

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Science of Ukraine
(Kyiv, Ukraine)

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC REFINING OF METAL MELTS FROM NON-METALLIC INCLUDES IN FOAM CERAMIC FILTERS

Based on the analysis of methods for organizing electromagnetic influences on the process of retaining non-metallic inclusions in the pores of foam ceramic filters during the filtration of liquid alloys, the prospects of using a scheme of crossing constant magnetic and electric fields at right angles were determined, the action of which enhances the gravitational sedimentation of particles in the direction of non-conductive pore walls and the fixation of inclusions on them. It is shown that the nonlinearity of the pore channel and the unevenness of their cross-sections along the entire length of the channel significantly affect the change in both the direction of the electric current and its local densities. In contrast, the lines of force of a homogeneous magnetic field for which the filter and the heterogeneous melt are almost homogeneous media in terms of magnetic permeability do not undergo distortions. It has been determined that such features affect the force electromagnetic action, which generates local circulation and screw movements in the melt flow in the filter pores and contribute to the retention of non-metallic inclusions in the filter pores, especially in the zones of depressions in the pore walls. The complexity of the physical processes of electromagnetic refining of liquid alloys from non-metallic inclusions can to some extent be investigated on physical models. Based on the theory of similarity, a physical model of filtration in a standard Ceralu® Al₂O₃ ceramic foam filter with high chemical resistance from the Drach company (Germany) of an aluminum melt obtained from a charge contaminated with non-metallic inclusions under the application of constant magnetic and electric fields has been calculated. The main criteria characterizing the kinematics of particles in the melt flow under the action of gravity (Reynolds and Froude) have been determined and the condition of their identity for the physical model and the full-scale system has been ensured. The similarity of the synergistic action of gravity and electromagnetic influence on a non-conductive particle in an electrically conductive melt in a model and full-scale system was also realized. On this basis, the scale coefficients of the physical model of the flow through the pores of the aluminum melt filter and the electromagnetic influence on the filtration process were calculated.

Keywords: electromagnetic refining, metal melts, non-metallic inclusions, ceramic foam filters.