

Скоробагатько Ю. П., Горюк М. С., Єфімова В. Г., Горшков А. О.
(ФТІМС НАН України, Київ)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРУВАННЯ МЕТАЛЕВИХ
РОЗПЛАВІВ ВІД НЕМЕТАЛЕВИХ ВКРАПЛЕНЬ З БІЧНИМ
РОЗТАШУВАННЯМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СИСТЕМИ**

E-mail: yulka.ukr@gmail.com



АНОТАЦІЯ. У статті представлено результати дослідження процесу очищення алюмінієвих розплавів від неметалевих включень за допомогою магнітодинамічної установки МДН-6А з додатковим бічним розташуванням електромагнітної системи.

Розглянуто механізм безконтактного маніпулювання розплавом під дією сили Лоренца, що виникає при взаємодії індукованих вихрових струмів із зовнішнім магнітним полем. Запропонована схема поєднує електромагнітне перемішування, багаторазову циркуляцію металу та фільтрацію через пінокерамічні фільтри. Експериментально підтверджено, що застосування бічного електромагніту підвищує ефективність видалення дрібних включень (менше 10 мкм) та покращує змочуваність фільтра. Металографічний аналіз показав зменшення середнього розміру зерна алюмінієвого сплаву АК7 у 3 рази та модифікацію форми кристалів кремнію. Впровадження методу дозволяє підвищити чистоту литва та покращити механічні властивості без ризику вторинного забруднення розплаву.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: алюмінієві сплави, неметалеві включення, магнітодинамічна установка, електромагнітна сила, пінокерамічний фільтр, безконтактна обробка, рафінування.

Протягом десятиліть металургійна промисловість покладалася на низку методів для видалення неметалевих включень, які включають флотацію, седиментацію, керамічну фільтрацію, уловлювання бульбашками та перемішування. Для алюмінію, наприклад, існують також методи дегазації та фільтрації рідкого металу. У випадку видалення заліза з алюмінію, традиційні підходи охоплюють гравітаційне розділення, електрошлаковий перепплав,

фракційну кристалізацію та флюсове рафінування. Хоча тришаровий електроліз вважається однією з найуспішніших технік для видалення заліза з алюмінію, але вона є дорогою.

Однак ці методи часто стикаються з певними обмеженнями. Наприклад, традиційний метод видалення заліза з алюмінію, який передбачає додавання металевих елементів та подальше охолодження для осадження залізовмісного «шламу», є складним для контролю та часто неефективним. Це постійне прагнення до вищої якості металу, як зазначено у вимогах до аерокосмічної та автомобільної промисловості, вказує на те, що наявні методи не завжди можуть задовольнити сучасні стандарти чистоти. Ці обмеження створюють чітку потребу в альтернативних, більш ефективних та контрольованих технологіях. Таким чином, металургійна промисловість шукає інноваційні рішення, які можуть подолати недоліки традиційних підходів, що призводить до розробки більш досконалих методів очищення, таких як електромагнітні дії.

Цей підхід було запропоновано як доповнення до наявних методів, пропонуючи унікальні можливості, яких бракує традиційним системам. Основний принцип полягає у використанні зовнішніх електромагнітних полів для видалення мікроскопічних неметалевих вкраплень із розплавленого металу. Це досягається шляхом маніпулювання вкрапленнями та їх відокремлення від розплаву за допомогою електромагнітних сил, які можуть бути використані для створення специфічних потоків у розплавленому металі. Ці контрольовані потоки, у свою чергу, здатні концентрувати частинки вкраплень у заданій області, звідки їх потім можна механічно видалити. Наприклад, при електромагнітному перемішуванні індуктований струм взаємодіє з магнітним полем, створюючи електромагнітну силу, яка змушує розплавлений метал рухатися. Цей безконтактний механізм перемішування є ключовою перевагою, оскільки він усуває необхідність фізичного контакту з розплавом, що є поширеним у традиційних методах. Безконтактна маніпуляція розплавленим металом принципово змінює спосіб поводження з ним, що призводить до отримання чистішого металу, зменшення зносу обладнання та потенційно

безпечніших операцій. Це, у свою чергу, підвищує загальну ефективність процесу та якість продукції.

Взаємодія електромагнітних полів з розплавленими металами та вкрапленнями є складною, багатфакторною динамікою. Електромагнітна сила та результативний вихровий потік створюють вибірккову дію на багатофазні середовища, які складаються із компонентів з різними властивостями. У випадку одночасного застосування стаціонарного електромагнітного поля та постійного струму, електромагнітна сила ефективно локалізує низькопровідні частинки, що сприяє їх подальшому видаленню.

Моделювання цих процесів вимагає врахування різних сил, які діють на частинку, включаючи електромагнітну силу, гравітацію, силу Архімеда та силу в'язкого опору Стокса. Ефективність видалення вкраплень може бути додатково покращено шляхом поєднання електромагнітних полів з іншими технологіями, наприклад, ультразвукові поля. Ультразвукові хвилі можуть викликати кавітацію, що сприяє агломерації вкраплень, посилює їх транспорт через акустичний потік та покращує взаємодію ультразвукових хвиль із вкрапленнями. Ця динаміка багатьох сил та складні взаємодії підкреслюють, що рух вкраплень є результатом не простого поштовху, а складної комбінації сил. Також електромагнітні поля можуть викликати вторинні ефекти, такі як перемішування, або поєднуватися з іншими технологіями для посилення агломерації та транспорту.

Отже, застосування електромагнітних полів є перспективною, безконтактною технологією для підвищення ефективності видалення вкраплень із розплавлених металів. Такий метод дає змогу уникнути прямого фізичного контакту з розплавом, тим самим зменшуючи ризики забруднення та покращуючи структурну цілісність виливка.

У даній роботі обробку металевих розплавів у магнітогідродинамічній (МГД) установці проводили з використанням бічного впливу допоміжної електромагнітної системи, наприклад допоміжний електромагніт, що є передовим підходом до підвищення чистоти та якості алюмінієвих сплавів

(рис. 1). Така технологія дає змогу безконтактно маніпулювати розплавом, створюючи контрольовані потоки та цілеспрямовано видаляти неметалеві вкраплення.

Допоміжний електромагніт, розташований збоку від ємності з розплавом, генерує магнітне поле, яке проникає крізь стінки та футерівку. Магнітне поле взаємодіє з електропровідним розплавленим металом, індукуючи в ньому вихрові струми. Взаємодія цих індуктованих струмів із застосованим магнітним полем створює об'ємну електромагнітну силу, відому як сила Лоренца.



Рис. 1. Розташування електромагнітної системи з боку магнітодинамічної установки МДН-6А

На відміну від традиційних методів, які покладаються на різницю густин або фізичне захоплення, електромагнітна дія використовує диференційну електропровідність. Розплавлений алюміній є високопровідним, тоді як неметалеві вкраплення (наприклад, оксиди та карбіди) мають дуже низьку електропровідність. Це означає, що сила Лоренца діє переважно на сам розплав, а на непровідні вкраплення майже не діє.

Таке розташування електромагнітної системи з боку тигля дає змогу реалізувати кілька ключових механізмів для очищення розплаву:

- створення контрольованого потоку (електромагнітне перемішування): застосування бічного магнітного поля індукує примусову конвекцію в розплаві, створюючи контрольовані схеми потоку. Таке перемішування забезпечує швидку хімічну та температурну однорідність розплаву, що є важливим для якості кінцевого продукту;

- диференційна дія на вкраплення: завдяки різниці в електропровідності, на неметалеві вкраплення діє «відштовхувальна сила», яка змушує їх рухатися у напрямку, протилежному до дії сили Лоренца на розплав. Ця сила виштовхує вкраплення до стінок ємності або до визначених зон збору, де вони можуть бути видалені;

- посилення агломерації або коалесценції: контрольований потік, який індуктований електромагнітом, може сприяти зіткненню та агломерації (злиття твердих вкраплень) або коалесценції (злиття рідких вкраплень). Більші вкраплення легше спливають на поверхню або осідають, що полегшує їхнє видалення;

- покращення змочування фільтрів: у системах, які поєднують електромагнітний вплив з керамічними пінофільтрами (КПФ), магнітне поле, яке знаходиться збоку, значно покращує змочування фільтрувального матеріалу розплавом. Це дає змогу ефективніше заповнювати пори фільтра та видаляти захоплені газові бульбашки.

Перевагами такого впливу є:

1. Висока ефективність для дрібних вкраплень. Метод ефективний для видалення мікроскопічних вкраплень (менше 10 мкм), з якими традиційні методи часто не справляються.

2. Безконтактність: відсутність фізичного контакту з розплавом усуває ризик забруднення від інструментів та рухомих частин, а також запобігає утворенню шлаку.

3. Точний контроль: напрямок та інтенсивність впливу легко контролюються шляхом зміни електричних та магнітних полів, що дає змогу оптимізувати процес для різних сплавів.

4. Покращення якості продукції: зменшення кількості вкраплень призводить до значного покращення механічних властивостей та однорідності кінцевої продукції.

5. Енергоефективність та продуктивність: електромагнітне перемішування може підвищити продуктивність печі та знизити споживання енергії.

До недоліків можна віднести:

1. Складність моделювання та оптимізації: процеси є складними і потребують детального моделювання для оптимізації параметрів.

2. Потенційна турбулентність: нерівномірно розподілена електромагнітна сила може викликати турбулентний потік, який збурює вкраплення та знижує ефективність розділення.

При розробленні системи з бічним впливом допоміжного електромагніта важливо враховувати:

- геометрію котушок (круглі, квадратні, багат шарові) та розташування котушок (одна або кілька з протилежних сторін);

- параметри живлення: оптимізація частоти, сили струму та напруженості магнітного поля є критично важливою для досягнення максимальної ефективності видалення вкраплень, особливо дрібних;

- немагнітне «вікно»: для проникнення магнітного поля в розплав необхідне «вікно» з немагнітної аустенітної неіржавкої сталі;

- система охолодження: електромагнітні котушки потребують ефективного охолодження (водою або повітрям) для підтримки стабільної роботи.

Перед початком досліджень було поставлено задачу дослідження процесів фільтрування металевих розплавів у магнітодинамічній установці від неметалевих вкраплень із застосуванням електромагнітних полів. В даному експерименті як допоміжну електромагнітну систему було використано ще один

електромагніт, який розміщували збоку до магнітодинамічної установки МДН-6А (див. рис. 1). Для обробки алюмінієвого сплаву в МДН-6А перед отвором бокового каналу встановлювали вставку, в яку було вмонтовано пінокерамічний фільтр, через який протікав рідкий метал.

Оскільки сама установка МДН-6А вже включає систему фільтрації металевих розплавів, використовуючи пінокерамічні фільтри, то в даній конфігурації:

1. Пінокерамічний фільтр розміщується у спеціально підготовленій вставці, яка знаходиться перед отвором бокового каналу.

2. Установка працює в режимі, який індукує безперервний потік розплаву по визначеному контуру, забезпечуючи багаторазове проходження розплаву через фільтр.

3. Відфільтрований розплав знову змішується з основною масою рідкого металу в тиглі, дозволяючи багаторазово проходити через фільтр, що є ключовою перевагою порівняно з однопрохідними технологіями фільтрації.

4. Пінокерамічні фільтри видаляють вкраплення за допомогою як сітчастого механізму (фізичне просіювання), так і адгезійного механізму (прилипання частинок до стінок фільтра).

Установку включали в режим насоса, тобто в режим, за якого розплав засмоктується через бокові устя Ш-подібного каналу і виходить із центрального каналу в ванну. Шляхом регулювання напруги, яка подається на електромагнітні системи, вибирають режим циркуляції розплаву, при якому не відбувається турбулізації поверхні рідкометалевої ванни.

В експериментах з оцінки ефективності фільтрування не проводили продування розплаву аргонном, оскільки бульбашки газу видаляють частину неметалевих вкраплень шляхом флотації. Для цього використовували установку місткістю 250 кг, заливали алюмінієвий розплав у кількості 250 кг, доводили температуру розплаву до 750 °С, включали електромагнітні системи в режим забезпечення циркуляції розплаву за контуром: «ванна – вставка з фільтром – бічне устя каналу – центральний канал» з увімкненим допоміжним

електромагнітом збоку установки (рис. 2) та проводили фільтрування протягом 20 хв з масовою витратою металу близько 40 кг/хв. Таким чином, кратність фільтрування становила при цьому 3,2 місткості установки. Після такої обробки алюмінієвий розплав знаходився в режимі зберігання 20 хв, а потім ще раз провели обробку. Після кожного етапу було відібрано проби для металографічних досліджень.



а



б

Рис. 2. Фото магнітодинамічної установки МДН-6А під час проведення експерименту: а – розташування допоміжного електромагніту збоку установки; б – розташування вставки з фільтром перед отвором бокового устя каналу

Проведене металографічне дослідження показало, що в результаті проведеної обробки відбулися наступні структурні зміни: середній розмір зерна зменшився у 3 рази порівняно з вихідним, зникли аномальні скупчення зерен евтектики, середній розмір евтектичних кристалів Si зменшився у 2 рази, форма більшості кристалів Si модифікувалась від пластинчастої до більш рівновісної, залізовмісні фази відсутні (рис. 3).

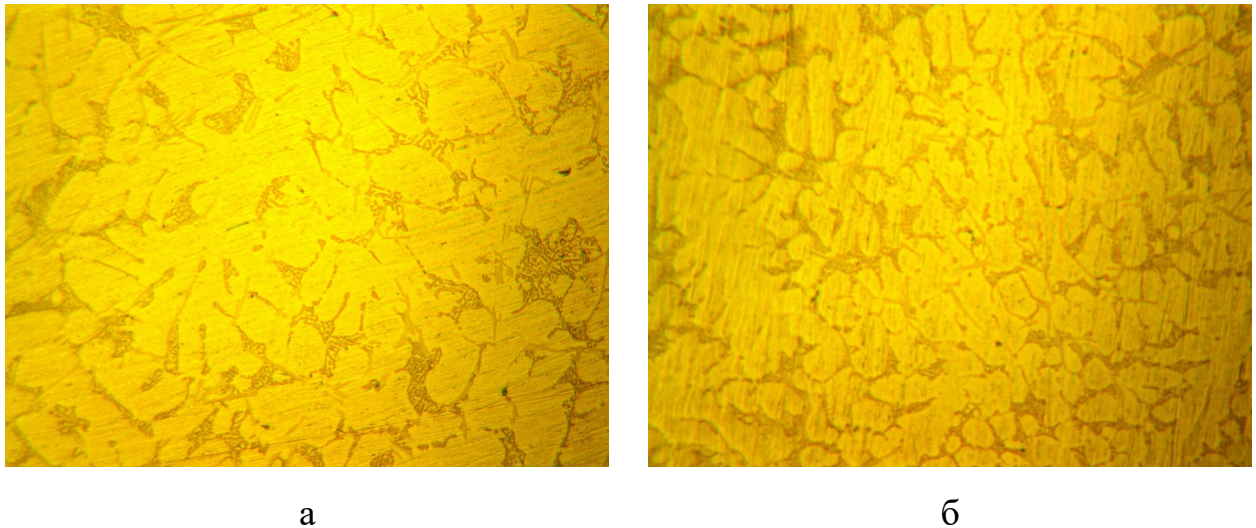


Рис. 3. Мікроструктура алюмінієвого сплаву АК7: а – після заливання сплаву в МДН-6А; б – після фільтрування через пінокерамічний фільтр протягом 20 хв із застосуванням електромагнітних полів

Висновки:

1. Електромагнітна дія значною мірою підвищує ефективність видалення неметалевих включень із алюмінієвого сплаву без погіршення складу або структури металу.
2. Впровадження даного підходу дає змогу зменшити кількість браку, підвищити чистоту литва та знизити витрати на додаткове оброблення.



ABSTRACT. The article presents the results of a study on the process of cleaning aluminum melts from non-metallic inclusions using the MDN-6A magnetodynamic unit with an additional side-mounted electromagnetic system. The mechanism of non-contact melt manipulation under the action of the Lorentz force, which arises from the interaction of induced eddy currents with an external magnetic field, is considered. The proposed scheme combines electromagnetic stirring, multiple metal circulation, and filtration through ceramic foam filters. It has been experimentally confirmed that the use of a side electromagnet increases the efficiency of removing small inclusions (less than $10\text{ }\mu\text{m}$) and improves filter wettability. Metallographic analysis showed a 3-fold reduction in the average grain size of the AK7 aluminum alloy and modification of the silicon crystal shapes. The implementation of this method allows for increasing casting purity and improving mechanical properties without the risk of secondary melt contamination.

KEYWORDS: aluminum alloys, non-metallic inclusions, magnetodynamic unit, electromagnetic force, ceramic foam filter, non-contact treatment, refining.