

6. Сіренко К.А. Напрями розвитку методології регулювання хімічного складу і властивостей чавуну в ливарному виробництві на базі ймовірнісного підходу // *Металознавство та обробка металів*. 2023. Т. 29 (108). № 4. С. 23–33.

7. Сіренко К.А., Мазур В.Л., Дереча Д.О. Залежність твердості та інших властивостей сірого чавуну від його вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності // *Метал та лиття України*. Т. 31. № 2 (333). С. 42–50.

8. Сіренко К.А. Шляхи удосконалення методики термічного аналізу якості рідкого чавуну // *Процеси лиття*. 2022. № 2. С. 30–39.

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

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

E-mail: yulka.ukr@gmail.com

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 переплав, 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 в вимогах до аерокосмічної та автомобільної промисловості, вказує на те, що існуючі 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 був запропонований як доповнення до існуючих методів, пропонуючи унікальні можливості, яких бракує традиційним системам. Основний принцип полягає у використанні зовнішніх електромагнітних полів для видалення мікроскопічних неметалевих включень з розплавленого металу. Це досягається шляхом маніпулювання включеннями та їх відділення 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 включень у заданій області, звідки їх потім можна механічно видалити. Наприклад, при електромагнітному перемішуванні індуктований струм взаємодіє з магнітним полем, створюючи електромагнітну силу, що 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 включеннями є складною, багатофакторною динамікою. Електромагнітна сила та результуючий вихровий потік створюють вибірккову дію на багатофазні середовища, які складаються з 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, що діють на частинку, включаючи електромагнітну силу, гравітацію, силу Архімеда та силу в'язкого опору Стокса. Ефективність видалення включень може бути додатково покращена шляхом поєднання електромагнітних полів з іншими технологіями, наприклад, ультразвукові поля. Ультразвукові хвилі можуть викликати кавітацію, що сприяє агломерації включень, посилює їх транспорт через акустичний потік та покращує взаємодію ультразвукових хвиль з включеннями. Ця динаміка багатьох сил та складні взаємодії підкреслюють, що рух включень 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 включень у розплавлених металах. Такий метод дозволить уникнути прямого фізичного контакту з розплавом, тим самим зменшуючи ризики забруднення та покращуючи структурну цілісність виливку.

В 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 дозволить безконтактно маніпулювати розплавом, створюючи контрольовані потоки та цілеспрямовано видаляючи неметалеві включення.

Допоміжний електромагніт, що 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, що покладаються на різницю густин або фізичне захоплення, електромагнітна дія використовує диференційну електропровідність. Розплавлений алюміній є високопровідним, тоді як неметалеві включення (наприклад, оксиди, карбіди) мають дуже низьку електропровідність. Це означає, що сила Лоренца діє переважно на сам розплав, а на непровідні включення майже не діє.

Таке розташування електромагнітної системи з боку тигля дозволяє 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 включення: завдяки різниці в електропровідності, на неметалеві включення діє «відштовхувальна сила», яка змушує їх рухатися у напрямку, протилежному до дії сили Лоренца на розплав. Ця сила виштовхує

включення 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 включень) або коалесценції (злиття рідких включень). Більші включення легше спливають на поверхню або осідають, що полегшує їхнє видалення;

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

Перевагами такого впливу є: 1) висока ефективність для дрібних включень. Метод ефективний для видалення мікроскопічних включень (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 дозволяє оптимізувати процес для різних сплавів; 4) покращення якості продукції: зменшення кількості включень 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 включення та знижує ефективність розділення.

При розробці системи з бічним впливом допоміжного електромагніту важливо враховувати:

- геометрію котушок: форма (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 включень, особливо дрібних;
- немагнітне «вікно»: для проникнення магнітного поля в розплав необхідне «вікно» з немагнітної аустенітної нержавіючої сталі;
- система охолодження: електромагнітні котушки потребують ефективного охолодження (водою або повітрям) для підтримки стабільної роботи.

Перед початком досліджень була поставлена задача дослідження процесів фільтрування металевих розплавів в магнітодинамічній установці від неметалевих включень із застосуванням електромагнітних полів. В даному експерименті в якості застосування допоміжної електромагнітної системи 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, що 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 включення за допомогою як сітчастого механізму (фізичне просіювання), так і адгезійного механізму (прилипання частинок до стінок фільтра).

Установку включали в режим насоса, тобто в режим, при якому розплав засмоктується через бокові устя Ш-подібного каналу і виходить з центрального

каналу в ванну. Шляхом регулювання напруги, що 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 аргонем, оскільки бульбашки газу видаляють частину неметалевих включень 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-центральный канал» з включеним 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 ємності установки. Після такої обробки алюмінієвий розплав знаходився в режимі зберігання 20 хв., а потім ще раз провели обробку. Після кожного етапу були відібрані проби для металографічних досліджень.



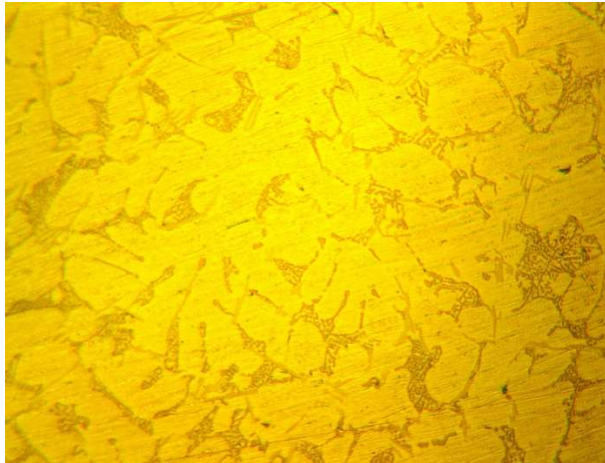
а



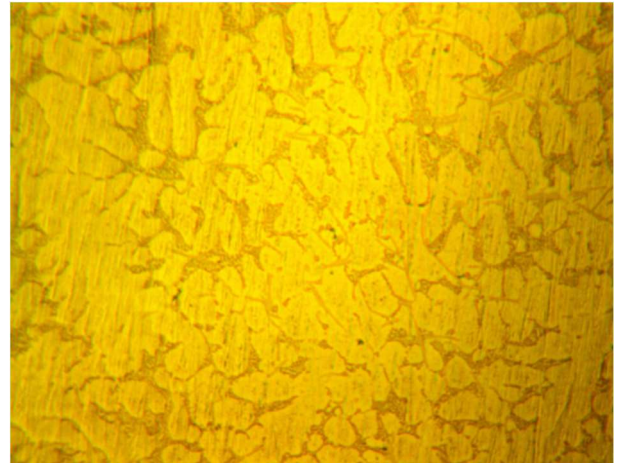
б

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 показано, що в результаті проведеної обробки відбулися наступні структурні зміни: середній розмір зерна зменшився у 3 рази, у порівнянні з вихідним, зникли аномальні скопичення зерен евтектики, середній розмір евтектичних кристалів Si зменшився у 2 рази, форма більшості кристалів Si модифікувалась від пластинчатої до більш рівновісної, залізовміщуючі фази відсутні (рис. 3).



а



б

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

Висновки:

1. Електромагнітна дія значно підвищує ефективність видалення НВ без погіршення складу або структури металу.
2. Впровадження даного підходу дозволяє зменшити кількість браку, підвищити чистоту литва та знизити витрати на додаткову обробку.