

УДК: 621.365.5

ПЛАВКА У ЗВАЖЕНОМУ СТАНІ¹ (ОГЛЯД)

О. О. Малишок

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»*

Досконально розглянуто фізичні основи, металургійні та технологічні можливості, області застосування та особливості методу плавки у зваженому стані.

Досконально рассмотрены физические основы, металлургические и технологические возможности, области применения и особенности метода плавки во взвешенном состоянии.

Physical bases, metallurgical and technological possibilities, application and feature of method of melting domains in the self-weighted state, are thoroughly considered.

Вступ

Індукційний метод електронагріву дозволяє без контакту передавати енергію металу, що нагрівається. Використовуючи сили взаємодії індукваного в металі струму з викликаним його електромагнітним полем, можливо підняти метал над індуктором і таким чином здійснювати нагрів і плавку металу у зваженому стані. При цьому відсутній тигель, матеріал якого завжди ставить границі зростання температури.

Постановка задачі дослідження

Розглянути металургійні та технологічні можливості, фізичні основи, області застосування та особливості методу плавки у зваженому стані.

Індукційний метод нагріву чи плавки металу оснований на безконтактній передачі енергії електромагнітного поля від індуктора до шихти чи розплаву по закону електромагнітної індукції і перетворенні її в теплову в відповідності до закону Джоуля-Ленца, а також таких фізичних явищ в провідниках зі струмом, як поверхневий ефект, ефект близькості,

¹ - роботу виконано під керівництвом к.т.н. доцента Ремізова Г.О., НТУУ «Київський політехнічний інститут»

стискаючий ефект, глибина проникнення струму.

Така сукупність фізичних явищ, на яких оснований індукційний нагрів, визначили унікальність його фізичних параметрів і технологічних можливостей, до яких відноситься можливість реалізації методів безтигельної плавки [1, 2]. До цих методів відноситься: безтигельна зонна плавка, плавка з електромагнітним утриманням розплаву на опорі, гарнісажна плавка в холодних тиглях і секційних кристалізаторах, плавка у зваженому стані.

Індукційна плавка у зваженому стані в наш час дуже добре розроблена і знаходить широке використання в лабораторній практиці для різних металургійних та фізико-хімічних досліджень, а саме:

- вивчення реакцій взаємодії газів і шлаків з рідкими металами з ціллю вивчення їх властивостей;
- дослідження фізичних властивостей розплавів(густини, поверхневого натягу);
- вивчення процесів випаровування компонентів сплаву і домішок.

Плавка у зваженому стані має унікальні можливості: ефективно перемішування розплаву силами взаємодії індукованого в металі струму з електромагнітним полем; відсутністю забруднюючого контакту з будь-якою речовиною; можливість використання додаткового нагріву електронним променем у вакуумі чи факелом плазми в нейтральній атмосфері для отримання температур до 4000°C і плавлення таких тугоплавких з'єднань як карбіди металів, а також випаровування різноманітних металів та сплавів; регулювання температури металу без втрати зваженого стану; контрольованим випуском металу в виливницю-кристалізатор чи кристалізація каплі металу у зваженому стані; отримання переохолодженого чи перегрітого металу; можливість вивчення розчинності газів у рідких металах при температурах, коли пружність пари металу висока; невеликий градієнт температур по перерізу каплі.

Окрім цього, цей метод дозволяє широко варіювати температуру металу, користуючись високочастотними генераторами малої потужності. При плавці у зваженому стані в порівнянні з іншими методами для гетерогенних систем метал-газ доступна вся поверхня наважки металу для газу. Від цього в прямій залежності знаходиться швидкість досягнення рівноваги.

Суть цього методу полягає в наступному. За допомогою одного індуктора чи системи індукторів створюють електромагнітне поле з так званою потенційною ямою, тобто поле, всередині якого знаходиться зона з низькою напруженістю (рис.1). Поміщений в цю зону метал стійко висить, якщо сили гравітації урівноважуються рівнодіючою силою, створеною полем нижнього індуктора. В наважці металу відбувається індукування

струмів, викликаючи нагрівання і наступне розплавлення. Конфігурація поля задається конструкцією індуктора, який може бути багато- або маловитковим.

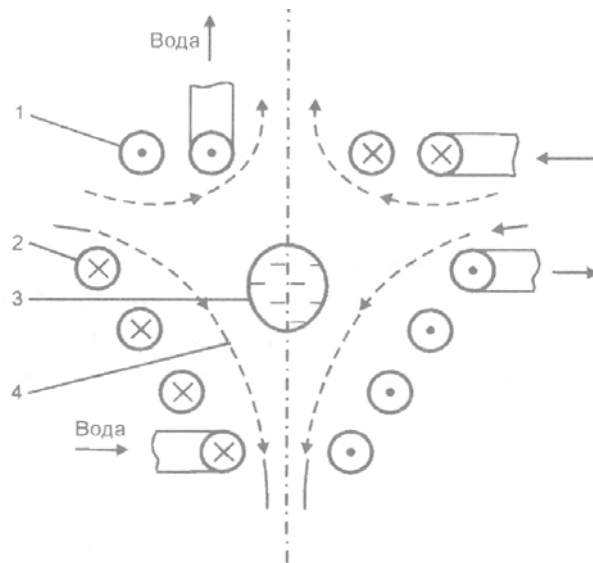


Рис.1 Схема індукційної плавки у зваженому стані

1 - верхня секція індуктора; 2 - нижня секція індуктора; 3 - крапля металу; 4 - силові лінії електромагнітного поля; х, • - напрямки струму у витках індуктора.

Плавка металу у зваженому стані в вакуумі або атмосфері інертного газу в більшості випадків ведеться в герметичній металічній камері. Інколи використовують кварцову трубку чи колбу, розміщену в середині індуктора. В цьому випадку індуктор можна робити багатовитковим, адже він не знаходиться у вакуумі і тому піддається електричним пробоям.

Недоліком плавки в багатовиткових індукторах є відсутність достатньої жорсткості конструкції індуктору і відносно велика електрична напруженість на струмовідводах, які збільшують імовірність виникнення електричного розряду при плавці у вакуумі.

Тому бажано використовувати більш жорсткі маловиткові конструкції індукторів.

Розроблено декілька типів індукторів з мінімальною кількістю витків, які живляться великим струмом при низькій напрузі, що забезпечує значно більш високу надійність в умовах вакууму. На практиці використовуються здебільшого наступні три конструкції (рис.2):

- індуктор типу «човник»;
- індуктор із зворотним витком;
- індуктор з коротко замкнутим витком.

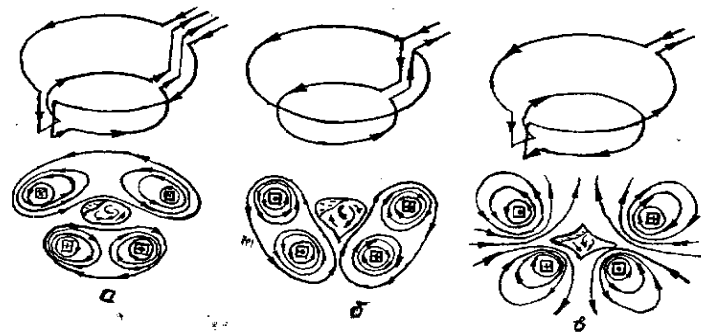


Рис.2 Схема проходження струму, конфігурації магнітного поля і форми рідкого металу при плавлі в індукторах: а - типу «човник»; б - з паралельним оберненим витком; в - з послідовним оберненим витком.

Звичайно метал після розплавлення приймає форму обумовлену характером полю індуктору. Незалежно від конструкції індуктору нижче рівня металу є зони з малою напруженістю поля, які виникають в місцях розгалуження поля, що обтікає метал. Метал через ці зони не витікає тільки під впливом сил поверхневої напруженості.

Відомо також, що утримання металу у звищеному стані можливо тільки при неоднорідному полі. Ці особливості нагріву металу у звищеному стані враховуються введенням коефіцієнту конфігурації поля:

$$F = 0,5A * P_s * S \sqrt{\frac{\mu}{\pi} * \rho * f} \dots\dots\dots(1)$$

де F - рівнодійна сила, діюча з боку поля на метал, рівна його вазі, Н; P_s - потужність, яка передається в метал, віднесена до одиниці його поверхні, Вт/м²; A - коефіцієнт, який характеризує конфігурацію магнітного поля біля поверхні металу (рівний: 0,95...0,7 - для індуктору типу «човника», 0,8...0,3 - з паралельним оберненим витком, 0,6...0,3 - з послідовним оберненим витком).

Плавка у зваженому стані використовується тільки для експериментальних досліджень, так як вага зразка складає десятки грам при об'ємі 1-5 см³. При більшій масі зразка отримати зважений стан практично не вдається, так як потужність, яка виділяється в металі, зменшується, а потужність, яка виділяється в індукторі, різко зростає (при недостатньому охолодженні можливо навіть розплавлення індуктора).

Таким чином, практично для даного об'єму металу існує визначений діапазон частот, в межах якого він може бути утриманий в зваженому стані. Для плавлення у зваженому стані використовують частоти від 66 до 440 кГц.

Порівнюючи частоти електромагнітного поля, які забезпечують задані

значення потужності і утримують рідкий метал, можна рекомендувати наступне:

1. Для тугоплавких металів потрібну частоту слід визначати з умови отримання заданої температури;
2. Для легкоплавких металів частоту слід вибирати за умовою утримання розплавленого металу у зваженому стані. В цьому випадку частота поля перевищує частоту необхідну для розплавлення. Для усунення небажаного перегріву вживають спеціальні заходи (наприклад, обдув металу інертним газом, зменшення розмірів зразка металу).

Використання джерел живлення більш високої частоти збільшує число металів, які можуть бути розплавлені у зваженому стані. Наприклад при частоті 0.07×10^6 Гц залізо може бути перегріто на 100°C , при частоті 0.44×10^6 Гц можливий сильний перегрів вище температури плавлення. Обмеження частоти 440 кГц викликано в вакуумі електричних розрядів, які коротять витки індуктора внаслідок високої напруги відповідних джерел живлення.

Деколи використовують при плавленні двохчастотне нагрівання: поле однієї частоти (f_1) утримує метал у зваженому стані та нагріває його до деякої температури; поле другої частоти (f_2) – нагріває метал до більш високих температур. Запропонована монограма для визначення металургійних можливостей плавки у зваженому стані (рис.3) (за даними А.А.Фогеля при об'ємі металу $1,4\text{см}^3$ [1]).

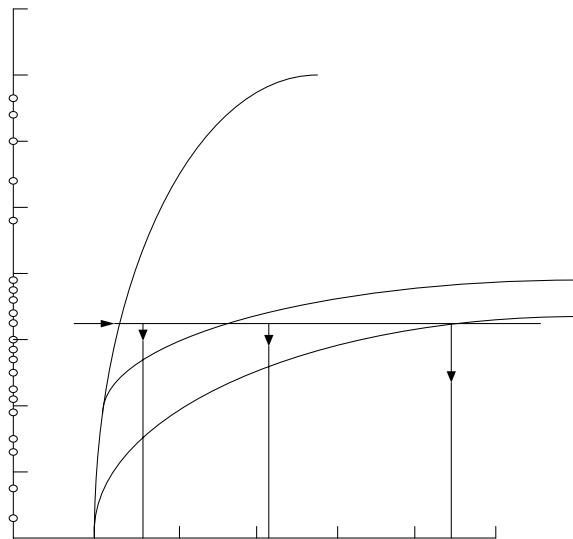


Рис.3 Монограма для визначення металургійних можливостей плавки у зваженому стані: I - перегрів металу вище температури плавлення до 100°C ; II - вище 100°C ; III- сильний перегрів ($\Delta t \gg 100^\circ\text{C}$).

На ряду з перевагами при використанні даного методу знаходяться і деякі недоліки. В першу чергу – це змога працювати тільки з невеликими навантажками металу, тобто з малою вагою та об'ємом.

Висновок

Метод плавки металу у зваженому стані знаходить широке застосування при проведенні фізико-хімічних досліджень. Ведення плавки у широкому діапазоні тисків середовища, можливо використовувати додатковий нагрів електронним променем у вакуумі або плазмою в нейтральній атмосфері.

Література

1. Фогель А.А. Индукционный метод удержания жидких металлов во взвешенном состоянии. – Л.: Машиностроение, 1979. – 104с.
2. Григоренко Г.М., Шейко И.В. Индукционная плавка металлов в холодных тиглях и охлаждаемых секционных кристаллизаторах. – К.: Сталь. 2006. – 318с.