

УДК 621.745.56:538.4/5:669-14

О.В. Середенко

ФОРМУВАННЯ ЕМУЛЬГОВАНОГО МЕТАЛЕВОГО РОЗПЛАВУ ПІД ДІЄЮ ЗМІННОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Вступ

У металевих сплавах з областю незмішування фаз у рідкому стані можливе формування литої емульгової структури, що забезпечує матеріалу спеціальні властивості, які залежать від розміру і кількості включень металоемulsії. Основною багатьох нових матеріалів з високими тепло- і електропровідностями в комплексі із значним рівнем механічних властивостей при підвищених температурах є мідь. Застосування таких матеріалів стримується через проблеми, пов'язані з їх отриманням, а також із складністю керування фазами сплаву в рідкому стані. Для впливу на фази розплаву застосовуються різноманітні зовнішні впливи, серед яких перспективними є електромагнітні. Однак їх застосування обмежується внаслідок недостатнього вивчення закономірностей електромагнітного впливу на рідкі фази в процесі отримання сплаву.

Існує два основних способи отримання металоемulsії: 1) диспергування рідких об'ємів [1–4]; 2) швидке охолодження розплаву із області однорідної рідини з фіксацією крапель дисперсної фази в твердіючій матриці [5, 6]. Перший спосіб не потребує значного перегрівання розплаву до температур, які перевищують температуру області незмішування. Однак включення характеризуються значною полідисперсністю (мінімальні розміри порядку 5 мкм, а максимальні – кілька сот мікрометрів). Характерні розміри основної маси включень, як правило, входять у діапазон 50–100 мкм, а поверхнева густина їх розподілу (q_v) не перевищує $1 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$. Найбільш тонкодисперсну (включення менше 5 мкм) литу структуру з вузьким діапазоном розподілу розмірів включень отримують при застосуванні другого способу. Однак він пов'язаний із значним перегріванням розплаву і складностями, що потребують врахування особливостей зародження та росту крапель у температурній області незмішування.

Постановка задачі

З метою визначення найбільш раціонального шляху отримання емульгованого металевого розплаву з розмірами крапель від 1 до 5 мкм,

що не потребує значного перегрівання, досліджено процес впливу змінного електромагнітного поля на формування металоемulsії при плавленні сплаву в індукційній тигельній печі. При цьому малося на меті мінімальне насичення рідкої основи сплаву компонентами дисперсної фази.

Методика проведення досліджень

Об'єктом дослідження був сплав з масовим вмістом міді 93,5% і хромистого чавуну – 6,5%. Для приготування сплаву застосовувались різноманітні відходи міді марки М00, шматки хромистого чавуну (з масовим вмістом хрому 16%, вуглецю – 1,4%, марганцю – 0,8%, кремнію – 1,8%, решта – залізо і домішки). Дослідні плавки проводились в індукційній тигельній печі (ІТП) типу ІСТ 0,06/01–ІЗ (частота 2400 Гц). Сплав міді, зміцнений дисперсними включеннями хромистого чавуну, перспективний як матеріал для кристалізаторів, фурм, кокілів, контакторів, зварювальних електродів, а також виробів із високим ресурсом безперервної експлуатації, що використовуються в космічній техніці.

Компоненти сплаву з областю незмішування суттєво відрізняються питомим електроопором. Завдяки цьому електромагнітне поле диференційовано діє на фази сплаву. Поряд з індукційним тепловим впливом на метал при плавленні сплаву в тиглі печі було організовано режим руху розплаву, який дає можливість прискорити його переведення в емульгований стан (за рахунок прискорення масообміну і дестабілізації міжфазної поверхні) і запобігти процесу седиментації та злиття включень металоемulsії (завдяки ефекту паріння крапель). Внаслідок локальної неоднорідності електроопору в системі крапля–оточуючий розплав інтенсифікувався рух розплаву, що омивав краплю, виникало його місцеве перегрівання, що сприяло збереженню розмірів включень емульсії, які формувались. В ІТП при частотах 50–2400 Гц майже вся потужність (>95%) виділяється у вигляді тепла, яке нагріває метал, оскільки дно і стінки тигля є “масивними” для електромагнітного поля ($b_T, d_p > 2\Delta_E$, де b_T – товщина стінки тигля, м; d_p – діаметр розплаву в тиглі, м; Δ_E – ступінь затухання електромагнітного поля в тілі-провіднику, м) [7, 8]. У даній статті організація адресного комплексного впливу змінного електромагнітного поля на розплав здійснювалась за рахунок конструктивних особливостей тигля печі. Циліндричний графітовий тигель із зовнішнім діаметром $d_T = 0,13$ м, висотою $h_T = 0,1$ м, товщиною стінок і дна $b_T =$

= 0,015 м поміщався в середину індуктора (висота індуктора $h_i = 0,4$ м, число витків індуктора – 18). Тигель розміщався в центрі індуктора і при відношенні $h_t/h_i \ll 1$ забезпечувався рівномірний розподіл силових ліній електромагнітного поля по всій висоті тигля. Таким чином, усувався крайовий ефект, який проявляється при $h_t/h_i \approx 1$, і забезпечувались умови одноконтурної циркуляції розплаву в тиглі з максимальною швидкістю v_{\max} [8]. Застосування в експериментах електропровідного (графітового) тигля з оптимальною товщиною стінки практично не знижувало густини електричного струму в розплаві, оскільки виконувалась умова $b_t < \Delta_E$, $d_p > 2\Delta_E$. Визначено, що ступінь затухання електромагнітного поля в графіті дорівнює 0,03 м, в розплаві – 0,005 м. При цьому стінка тигля була “прозорою” для електромагнітного поля, а розплав виявився “масивним” провідником.

Температура плавлення сплаву міді з масовим вмістом хромистого чавуну 6,5% 1460°C вибрана як близька до температури бінодалі при заданому складі сплаву із врахуванням температури плавлення більш тугоплавкого компонента сплаву – хромистого чавуну (1350°C) [9]. Розплав готувався під дією змінного електромагнітного поля з частотою 2400 Гц, індукцією $(3,0–3,5) \cdot 10^{-2}$ Тл при струмі в індукторі 54–62 А, густиною електричного струму, збуджуваного в розплаві електромагнітним полем, $(6,9–7,9) \cdot 10^6$ А/м². Після плавлення компонентів шихти розплав складався з об'єму міді і розміщеного над ним об'єму чавуну. Метал у тиглі при повному розплаві шихти рухався під дією об'ємних електромагнітних сил у режимі одноконтурної циркуляції з максимальною розрахунковою швидкістю v_{\max} , яка визначалась за допомогою формули [10]

$$v_0 = \frac{v_{\max}}{A} \sqrt{\frac{2\rho_p}{\mu_p}} = \frac{v_{\max} h_i}{I_1 W} \sqrt{\frac{2\rho_p}{\mu_p}}, \quad (1)$$

де v_0 – безрозмірна швидкість (для однофазних ІТП при близьких розмірах розплаву по вертикалі і горизонталі $v_0 = 0,65$ [10]); v_{\max} – максимальна швидкість у розплаві, м/с; A – амплітуда лінійної густини струму в індукторі (напруженість магнітного поля на внутрішній поверхні індуктора), А/м; I_1 – сила струму в індукторі, А; W – кількість витків індуктора ($W = 18$); μ_p – магнітна проникність розплаву, Гн/м; ρ_p – густина розплаву ($\rho_p = 7700$ [11]), кг/м³.

Швидкість руху розплаву, що розрахована за виразом (1), становила $(1,4–1,5) \cdot 10^{-2}$ м/с. Цей діапазон швидкостей входив в інтервал $(1 \cdot 10^{-2}–$

$1 \cdot 10^{-1})$ м/с, в якому внаслідок ефекту витання крапель малих розмірів (>50 мкм) уповільнюється як седиментація дисперсних включень, так і їх укрупнення за рахунок зіткнень [12]. При цьому в розплаві забезпечувались ламінарний режим течії, що характеризувався числом Рейнольдса [13] $Re = 1167–1250$, і активний конвективний теплоперенос, що характеризувався числом Пекле [14] $Pe = 8,8–9,2$.

Процес взаємодії речовин у бінарному середовищі, що має циркуляційний характер течії, при якій масоперенос здійснюється дифузійним і циркуляційним переносом маси як вздовж, так і впоперек потоку, оцінювався з допомогою дифузійного числа Фур'є – Fo_{dc} [14, 15]:

$$Fo_{dc} = \frac{v_{\max} \tau}{r_0}, \quad (2)$$

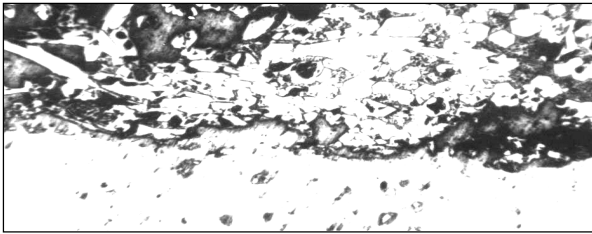
де r_0 – радіус циркулюючого бінарного потоку; m ; τ – час, с.

Взаємодія об'ємів міді та хромистого чавуну оцінювалась за параметром магнітодинамічної взаємодії N [16]. Значення цього критерію 3,5. Критерій відносної частоти ω , що враховує вплив зміни поля в часі на його просторовий розподіл, розраховувався як $\omega = 2d_p^2/\Delta_E^2$ [10] і становив 400.

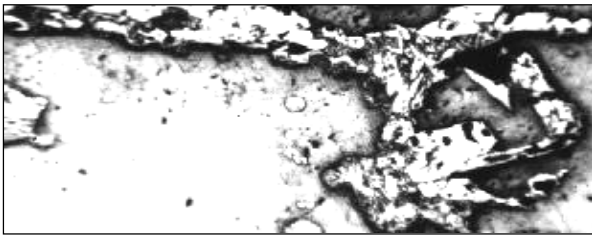
Фіксація будови і складу розплаву виконувалась структурно-загартувальним методом, шляхом всмоктування розплаву в кварцеву трубку з внутрішнім діаметром 4 мм з подальшим охолодженням у холодній (10°C) воді і наморозуванням розплаву на сталевий циліндр, короткочасно занурюваний у верхній об'єм розплаву. Структура оцінювалась за шліфами проб методом оптичної мікроскопії.

Результати досліджень

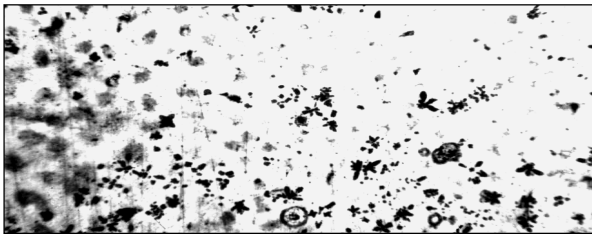
Аналіз послідовно взятих проб із розплаву в тиглі печі показав, що більш тугоплавкий об'єм хромистого чавуну руйнувався послідовно. У першій пробі, взятій з верхнього об'єму розплаву через 360 с після плавлення шихти з $Fo_{dc} = 201$, міжфазна поверхня об'ємів мала незначні викривлення, структура чавуну мало відрізнялась від вихідної, але в ній вже спостерігались локальні зони насичення міддю. Мідна матриця біля міжфазної поверхні містила досить дрібні, переважно округлі, включення хромистого чавуну (~ 25 мкм при вихідній структурі чавуну; <15 мкм при структурі чавуну, що містив мідь) (рисунк, а). Проба, яка була взята через 720 с ($Fo_{dc} = 403$), показала (див. рисунок, б), що процес руйнування хромистого чавуну посилювався. На



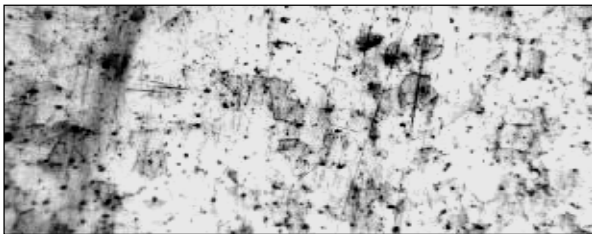
а



б

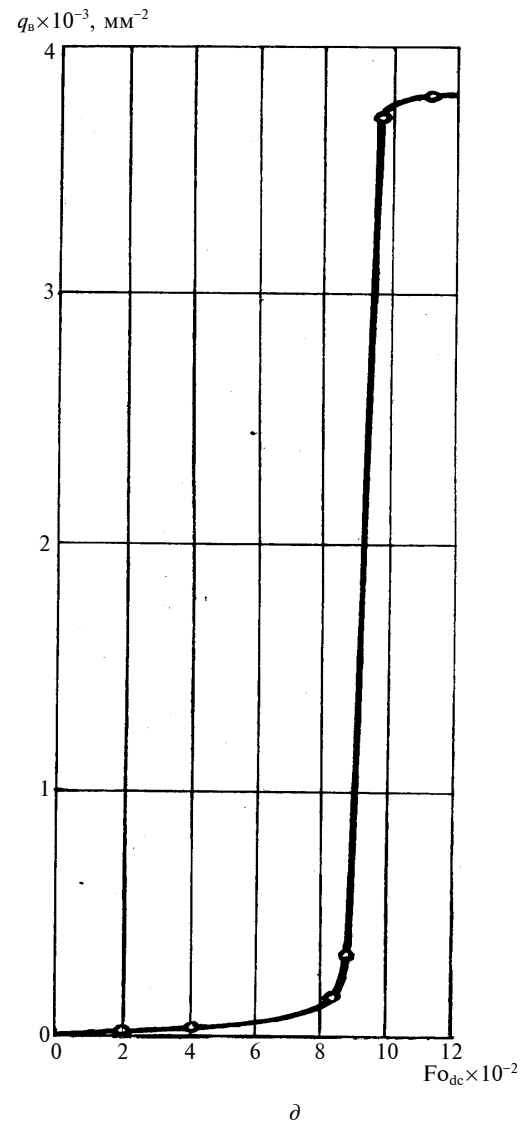


в



г

Формування емульгованого розплаву: а – $Fo_{dc} = 202$; б – $Fo_{dc} = 403$; в – $Fo_{dc} = 828$; г – $Fo_{dc} = 1116$ – структури послідовно взятих проб розплаву, $\times 100$ (травлено); д – зміна поверхневої густини розподілу емульгованих включень



міжфазній поверхні зафіксовано досить крупні (до 320 мкм) утворення, що відривалися від поверхні чавуну. В мідній матриці, безпосередньо біля міжфазної поверхні, розмішувались округлі включення: а) хромистого чавуну з незначним вмістом міді (світлі включення) з розмірами 9–150 мкм; б) хромистого чавуну зі значно більшим вмістом міді (темні включення) з розмірами 3–9 мкм. В об'ємі чавуну в безпосередній близькості від міжфазної поверхні виникли обширні області, зайняті фазою на основі міді (див. рисунок, б). Проба, взята через 1380 с ($Fo_{dc} = 828$), показала, що рідкий сплав вже не містив включень хромистого чавуну з вихідною структурою. Він складався з мідного розплаву з краплями металеомульсії і об'ємів з нерівномірним вмістом у міді компонен-

тів хромистого чавуну (див. рисунок, в). У структурі розплаву містилась велика кількість дисперсних включень з розмірами $< 3\text{--}36$ мкм. Включення були як розгалуженої, так і округлої форми. За допомогою травлення було встановлено, що основна маса включень на основі хромистого чавуну містила значну кількість міді (темні включення), а решта включень мали незначну кількість міді (світлі включення). Порівняно з попередніми пробами кількість дрібних ($< 3\text{--}9$ мкм) округлих темних включень збільшилась.

У подальших пробах ($Fo_{dc} = 864$ та $Fo_{dc} = 969$) проявилась тенденція зменшення кількості розгалужених включень і збільшення частки малих ($< 3\text{--}9$ мкм) округлих темних включень. При цьому в пробі, взятій при $Fo_{dc} = 969$, в структу-

рі виявлені лише поодинокі розгалужені включення на основі хромистого чавуну, а решта включень була переважно дрібною ($< 3\text{--}6\text{ мкм}$) і містила окремі великі (до 15 мкм) темні округлі утворення. Збільшення часу обробки розплаву в індукційній тигельній печі до 1860 с ($Fo_{dc} = 1116$) призвело до повного зникнення в матриці сплаву розгалужених включень (див. рисунок, *з*). В структурі сплаву спостерігались лише дрібні ($< 3\text{--}6\text{ мкм}$) темні округлі включення. Однак, як видно з рисунка, *з*, в розплаві почав проявлятися процес коалесценції включень. При цьому можна стверджувати, що весь розплав при $Fo_{dc} = 1116$ досяг емульгованого стану (див. рисунок, *д*).

В результаті досліджень встановлено, що отримання емульгованого розплаву міді з хромистим чавуном в індукційній тигельній печі при постійній температурі, що незначно ($\sim 110^\circ\text{C}$) перевищує температуру плавлення хромистого чавуну, можливо за рахунок впливу змінного електромагнітного поля на концентраційні неоднорідності, створення одноконтурної вертикальної циркуляції розплаву в тиглі печі, забезпечення ламінарного режиму його течії. Процес формування емульгованого розплаву характеризується числом Fo_{dc} . Визначено, що в об'ємі розплаву однорідний емульгований стан з тонкодисперсними краплями ($< 3\text{ мкм}$) характеризується числом Фур'є Fo_{dc} , більшим 1100 .

Практичне використання результатів

З використанням даного способу отримання емульгованого розплаву в індукційній тигельній печі було розроблено технологічний процес виробництва литих заготовок електродів для апаратів контактного зварювання з мідного сплаву, зміцненого дисперсними включеннями хромистого чавуну, в який входить заливка і твердіння розплаву в постійному магнітному полі при вста-

новленому режимі зі швидкістю охолодження $\sim 30^\circ\text{C}/\text{с}$, що сприяло запобіганню седиментації і коалесценції включень. Це дало змогу отримати однорідну структуру зливка з густиною розподілу включень $(4,12 \pm 0,05) \cdot 10^9\text{ м}^{-2}$, розмірами дисперсної фази $\leq 3\text{ мкм}$ і окремими включеннями до 15 мкм , що забезпечило при зварюванні сіткових конструкцій збільшення стійкості електродів до повного зношення порівняно із стандартними електродами з хромової бронзи від 6000 зварних точок до 16000 .

Висновки

Встановлено, що процес сплавлення хромистого чавуну з рідкою міддю при температурі, вищій на 110°C за температуру плавлення чавуну, під впливом змінного електромагнітного поля мав послідовний характер з проникненням міді в приповерхневу зону хромистого чавуну та переміщенням його дискретних об'ємів у прилеглий об'єм мідного розплаву. Визначено, що гетерогенний стан розплаву характеризувався числом Fo_{dc} , яке виражає дію електромагнітного поля в часі. Розплав поступово досягав у всьому об'ємі емульгованого стану за умов $Re \approx 1200$, $Pe \approx 9$, $N = 3,5$, $\omega = 400$, $Fo_{dc} \geq 1100$.

Застосування розробленої технології має перспективу при отриманні інших сплавів монотектичних систем. Визначені в статті параметри електромагнітного впливу на сплав при його плавці, які забезпечили однорідний розподіл дисперсних емульгованих включень, мають перспективу використання на етапі твердіння зливоків у формах і кристалізаторах в умовах повільного ($< 30^\circ\text{C}/\text{с}$) охолодження розплаву для запобігання седиментації та коалесценції включень.

Е.В. Середенко

ФОРМИРОВАНИЕ ЭМУЛЬГИРОВАННОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО РАСПЛАВА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Показано, что при специально организованном действии электромагнитного поля в индукционной тигельной печи расплав постепенно переходит из состояния, характеризующегося двумя объемами, в состояние тонкодисперсной эмульсии, без использования перегрева расплава выше температуры области двухфазного состояния.

O.V. Seredenko

EMULSIFIED MELT FORMATION UNDER ALTERNATING ELECTROMAGNETIC FIELD ACTION

This study highlights that a melt gradually passes from the two-volumes state into the fine dispersed emulsion without using melt overheating above a two-phase zone, given that the special organisation action of electromagnetic field in an induction crucible furnace is performed.

1. Сучков Е.В., Попель С.И., Жуков А.А. Получение металлических эмульсий механическим перемешиванием расплавов // *Расплавы*. – 1988. – 2, № 6. – С. 89–92.
2. Сучков Е.В., Попель С.М., Жуков А.А., Коннова М.А. Эмульгирование расплавов железо–медь–кремний и закалка эмульсий // *Расплавы*. – 1995. – № 5. – С. 24–28.
3. Горбунов В.Г., Паршин В.Д., Пупынин В.П. и др. Структура и свойства сплавов алюминия со свинцом, полученных с помощью ультразвука и модифицированных натрием // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1974. – № 12. – С. 38–41.
4. Абрамов О.В., Буше Н.А., Гельфгат Ю.Н. и др. Алюминиевосвинцовые антифрикционные сплавы, полученные в условиях компенсации гравитационной ликвации электромагнитными силами // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1982. – № 4. – С. 11–13.
5. Кононенко В.И., Яценко С.П. Некоторые физические свойства расслаивающихся расплавов // *Изв. АН СССР. Металлы*. – 1970. – № 3. – С. 205–208.
6. Кононенко В.Н., Сухман А.Л., Кузнецов А.Н. Влияние расслоения на термодинамические и кинетические свойства сплавов // *Журн. физ. химии*. – 1975. – XLIX, вып. 10. – С. 2570–2574.
7. Цыганов В.А. Плавка цветных металлов в индукционных печах. – М.: Металлургия, 1974. – 248 с.
8. Фомин Н.И., Затуловский Л.М. Электрические печи и установки индукционного нагрева. – М.: Металлургия, 1979. – 248 с.
9. Христенко В.В. Литые сплавы на основе меди, упрочненные включениями, формирующимися при эмульгировании расплавов в области несмешиваемости: Дис. ... канд. техн. наук: 05.16.04. – К., 2000. – 208 с.
10. Тир Л.Л., Губченко А.П. Индукционные плавильные печи для процессов повышенной точности и чистоты. – М.: Металлургиздат, 1988. – 120 с.
11. Смитлз К.Дж. Металлы / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1980. – 446 с.
12. *Производство* отливок из сплавов цветных металлов: Учеб. для вузов / А.В. Курдюмов, М.В. Пикунов, В.М. Чурсин, Е.Л. Бибиков. – М.: Металлургия, 1986. – 416 с.
13. Кафаров В.В. Основы массопередачи: Учеб. для студентов вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1979. – 440 с.
14. Тир Л.Л., Столов М.Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией в электропечах. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1991. – 280с.
15. Столов М.Я., Левина М.Я. Процесс гомогенизации расплава при легировании в индукционных тигельных печах // *Исследования в области промышленного электронагрева: Сб. науч. тр. (ВНИИЭТО)*. – М.: Энергия, 1979. – № 9. – С. 91–98.
16. Гельфгат Ю.М., Лиелаусис О.А., Шербинин Э.В. Жидкий металл под действием электромагнитных сил. – Рига: Зинатне, 1975. – 248 с.