

УДК 621.745.56:538.4/5:669-14

О.В. Середенко

ВПЛИВ ПОСТІЙНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ФОРМУ КРАПЕЛЬ МЕТАЛОЕМУЛЬСІЇ

Вступ

Литі металеві сплави з емульговою структурою на базі систем з областю незмішування рідких фаз є перспективними матеріалами із спеціальними властивостями, оскільки включення, що виконують у сплаві функції твердого мастила або зміцнюючої фази, утворюються безпосередньо в рідкому стані і практично не змінюються при експлуатації матеріалу. Одним із напрямків підвищення властивостей подібних сплавів є збільшення кількості емульгованих включень у структурі сплаву, зокрема для зміцнених сплавів, за рахунок зменшення розмірів включень, запобігання коалесценції, седиментації крапель та забезпечення однорідного або градієнтного розподілу включень в основі сплаву. З цією метою використовуються різноманітні зовнішні впливи, у тому числі електромагнітні поля. Найсприятливішою формою включень у таких сплавах є сферична. При отриманні сплавів звичайними засобами лиття краплі металоемумльсії мають змогу рухатись відносно розплаву внаслідок дії сил інерції і гравітації при заповненні форм та при охолодженні розплаву у формі. Рух краплі викликає збурення в прилеглому до неї розплаві основи сплаву та при досить великому розмірі краплі течії металу в середині краплі [1, 2]. Течії металу можуть привести до формування несферичних емульгованих включень у сплаві, про що свідчать фотографії литих структур сплавів, наведених, зокрема, в працях [3–5]. У ряді випадків (див., наприклад, [6, 7]) формуються сферичні включення. При дії постійного магнітного поля на емульгований розплав внаслідок неоднорідності електричного опору в системі краплі–прилеглий розплав виникають локально діючі електромагнітні сили [8], які викликають магнітогідродинамічні течії розплаву і впливають на рухому краплю будь-якого розміру на відміну від лиття без застосування електромагнітного впливу. На даний час вивчається переважно дія електромагнітних впливів, зокрема постійного однорідного магнітного поля, на кількість, розмір, коалесценцію, роз-

поділ емульгованих включень, а вплив на форму крапель залишається вивченим недостатньо.

Постановка задачі

Задача проведених досліджень полягала у визначенні умов, при яких відбувається формування в емульгованому сплаві сферичних включень під час його заливання та тверднення в ливарній формі при накладанні на нього постійного однорідного горизонтального магнітного поля.

Методика проведення досліджень

З метою встановлення впливу на форму краплі постійного однорідного магнітного поля дослідження проводились на низькотемпературному сплаві цинк–вісмут, який має область незмішування рідких фаз [9]. Оскільки компоненти металевих сплавів істотно відрізняються питомим електроопором, то дослідження проводились на емульгованих сплавах на основі як цинку, так і вісмуту. Для одночасного вивчення сплавів на основі як з меншим, так і з більшим відносно крапель електроопором було отримано розплав, що складався з двох шарів на основі цинку й вісмуту. Було проведено дві серії експериментів. Перша серія – це заливання розплаву (660 °С) у форму. При цьому краплі металоемумльсії рухались переважно внаслідок дії сили інерції. З метою фіксації особливостей впливу магнітного поля на емульговані краплі заливання розплаву здійснювалось на поверхню рідкометалевого охолоджувача – вісмуту (300 °С), що знаходився у формі. Для забезпечення турбулентного режиму течії розплаву при контакті його струменя з поверхнею охолоджувача та запобігання надмірного збурення рідкого металу в місці контакту струменя з охолоджувачем швидкість струменя (діаметр 3 мм) в умовах експериментів була обмежена 0,46 м/с на початку заливання. Швидкість визначалась за відомою формулою $v = \sqrt{2gH}$ (де g – прискорення сили тяжіння, м/с²; H – висота падіння струменя відносно рівня охолоджувача, м). Наприкінці заливання швидкість струменя становила 0,31 м/с.

Друга серія експериментів проводилась в умовах статичного стану сплаву. Краплі металоемумльсії рухались у розплаві під впливом сили тяжіння. Контрольні зразки емульгованих сплавів в обох серіях експериментів були отримані без дії постійного магнітного поля. На даний

час вивчається переважно дія потужних електромагнітних полів на металеві сплави. Індукція B таких полів значно більша 1 Тл. Для створення таких полів необхідне енергоємне спеціальне обладнання. Індукція магнітного поля, що реалізується енергоекономними електромагнітами з феромагнітними осердями, досягає 1,5 Тл. У даній статті було застосовано електромагніт, що забезпечує значення індукції магнітного поля $0 < B \leq 1$ Тл.

Як характеристики умов утворення в сплаві крапель металоемulsії певної форми (сферичної або несферичної) були визначені такі числа подібності: Re – число Рейнольдса [2], N – параметр магнітогідродинамічної взаємодії [10], Na – число Гартмана [10]. Число Re (співвідношення сил інерції і в'язкості, що діють у розплаві) визначалось як

$$Re = \frac{\nu D}{\nu},$$

де ν – швидкість струменя емульгованого розплаву, м/с; D – діаметр струменя розплаву, м; ν – кінематична в'язкість розплаву, м²/с.

Співвідношення електромагнітної та інерційної сил, які діють у сплаві при його заливанні, оцінювалось за допомогою параметра N :

$$N = \frac{B^2 D}{\rho \rho^e \nu},$$

де ρ^e – питомий електроопір розплаву, що заливається, Ом·м; ρ – густина розплаву, кг/м³.

Число Na характеризує співвідношення електромагнітної сили та сили в'язкості в розплаві

$$Na = \frac{Bl}{\sqrt{\rho \rho^e \nu}},$$

де l – характерний розмір, м. При заливанні розплаву у форму під електромагнітним впливом число Na визначалось для струменя розплаву, що викликав рух емульгованих крапель, і за l було взято величину діаметра струменя. Для аналізу дії постійного магнітного поля на краплі, що седиментувались у нерухомому розплаві, число Na визначалось для крапель і l дорівнювало розміру краплі (діаметру сферичної або довжині несферичної краплі).

Значення фізичних характеристик компонентів рідкого сплаву наведені в табл. 1.

Отримані зливки для проведення досліджень розрізались по осі у вертикальному напрямку, шліфувались та полірувались.

Таблиця 1. Фізичні характеристики рідких компонентів сплаву цинк–вісмут

Характеристика	Компонент сплаву	
	Zn	Bi
ρ^e , Ом·м	$36 \cdot 10^{-8}$ [11]	$148 \cdot 10^{-8}$ [11]
ρ , кг/м ³	6810 [12]	9660 [12]
ν , м ² /с	$3,3 \cdot 10^{-7}$ [12]	$1,0 \cdot 10^{-7}$ [12]

Результати досліджень

У першій серії експериментів у зоні контакту струменя з охолоджувачем розплав рухався в турбулентному режимі ($Re = 6900$ – 4600), а при подальшому розтіканні по поверхні охолоджувача – у ламінарному ($Re = 950$ – 75). Залитий сплав охолоджувався зі швидкістю: 30 °C/с – шар на основі цинку (температура кристалізації 416 °C [9]) і 1 °C/с – шар на основі вісмуту (температура кристалізації $254,5$ °C [9]). Швидкість охолодження сплаву було визначено експериментально.

Аналіз зразків сплаву, отриманого без дії магнітного поля, показав, що затверділі краплі металоемulsії в обох шарах сплаву мали діапазон розмірів 5 – 600 мкм та переважно сферичну і еліптичну форму (рис. 1,а). У шарі на основі цинку в емульгованих включеннях вісмуту з розміром > 84 мкм були наявні включення фази цинку, що утворились у результаті евтектичної реакції. Вони були орієнтовані в напрямку тепловідводу (див. рис. 1,а). В об'ємі вісмуту виникли краплі на основі цинку, які зафіксувались на етапі розчинення у вісмуті внаслідок змішування з охолоджувачем (див. рис. 1,а).

Заливання емульгованого розплаву і його тверднення в постійному однорідному горизонтальному магнітному полі ($B = 1$ Тл, $N = 6,1$ – $4,8$, $Na = 500$) привело до утворення включень вісмуту в більш тугоплавкій та електропровідній основі сплаву – цинку розмірами 5 – 300 мкм та деформації форми всіх включень (див. рис. 1,б). Такі значення магнітогідродинамічних чисел, форма крапель і оболонка навколо них вказують на дуже істотний вплив електромагнітних сил у розплаві. Краплі вісмуту зосереджувались переважно біля міжфазної поверхні шарів на основі цинку і вісмуту (рис. 1,б). Як видно з рисунка, найбільші краплі проникали в міжфазну поверхню, але не зливались з об'ємом охолоджувача, оскільки цьому перешкождала цинкова оболонка (товщина

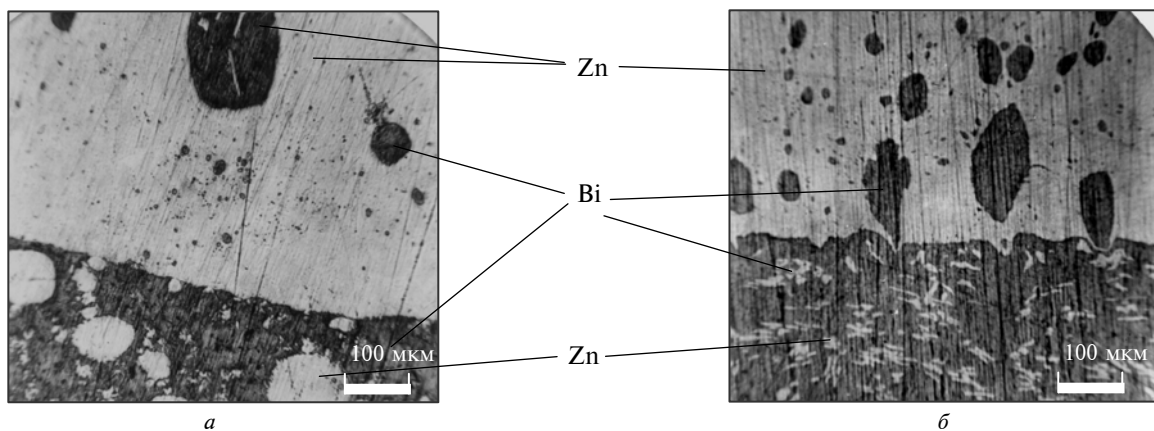


Рис. 1. Вплив постійного магнітного поля на форму емульгованих крапель вісмуту в сплаві Zn–Bi при заливці розплаву замонотектичного складу на рідкий охолоджувач Bi ($\times 100$, нетравлено): *a* – без дії постійного магнітного поля; *б* – під дією постійного магнітного поля 1Тл

~ 5 мкм) навколо краплі. Під дією постійного магнітного поля евтектичні включення цинку були зафіксовані в краплях вісмуту з розміром > 216 мкм. Евтектичні включення цинку були орієнтовані в напрямку силових ліній магнітного поля. Найбільше змінилась форма крапель, які за розміром перевищували 50 мкм. Утворились краплі витягнутих та складних форм. Ймовірно, що магнітогідродинамічні течії, які виникли при заливанні сплаву в магнітному полі, прискорювали краплі та витягували їх вздовж напрямку руху. Вірогідно також, що зміна характеру розташування крапель відносно міжфазної поверхні шарів на основі цинку і вісмуту, наявність оболонки навколо краплі пов'язані з розвитком значних магнітогідродинамічних течій навколо емульгованих крапель, що рухались у розплаві. Деформації форми крапель та збільшення розміру тих, що мали в середині евтектичні включення, вказують також на можливість розвитку локальних магнітогідродинамічних течій у середині крапель. Вірогідно, що внаслідок перерозподілу енергії струменя сплаву при заливанні в об'ємі охолоджувача магнітогідродинамічні течії викликали розчинення всіх крапель більш тугоплавкого компонента (цинку) у вісмутівій основі (див. рис. 1,б). При дії постійного магнітного поля на розплав, що заливається ($N = 6,1-4,8$, $Na = 500$), відбувається істотна деформація форми крапель, які мають більший електроопір відносно основи сплаву. Розплав під дією струменя інтенсивно переміщується, що приводить до повного розчинення крапель речовини з меншим електроопором і більшою температурою плавлення, ніж основа сплаву. Під впливом постійного магнітного поля в наведених

умовах струмів розплаву істотно гальмується, що заважає його глибинному проникненню в об'єм металу, особливо наприкінці заливання. Тому для виготовлення сплаву з емульгованими включеннями сферичної форми при електромагнітному впливі під час заливання у форму необхідно виконання умови: $N \ll 4,8$, $Na < 500$.

Аналіз литих структур зразків сплавів другої серії експериментів ($Re = 0$, $N = 0$), охолоджених із швидкістю $2,5$ °C/c, показав, що під впливом постійного магнітного поля $B = 1$ Тл змінюється форма емульгованих включень як вісмуту, так і цинку (рис. 2,а, б). Ймовірно, це пов'язано з дією локальних магнітогідродинамічних течій. У сплаві на основі цинку утворились емульговані включення вісмуту з розмірами 5–30 мкм. Для цих включень значення чисел Na становили 0,43–2,60. Із зростанням розміру включень збільшувалась деформація їх форми. У сплаві на основі вісмуту емульговані включення цинку мали розміри 15–60 мкм ($Na = 0,53-2,12$). Збільшення розміру включень супроводжувалось деформацією їх форми. Крім того, мала місце агломерація включень (див. рис. 2,б).

З метою зменшення впливу постійного магнітного поля на деформацію крапель металеульсії, були отримані зразки сплаву в умовах $B = 0,1$ Тл. Під впливом постійного магнітного поля в сплаві на основі цинку утворились включення вісмуту з розмірами 5–30 мкм ($Na = 0,013-0,080$) та в сплаві на основі вісмуту включення мали розміри 10–90 мкм ($Na = 0,03-0,30$). Порівняно із сплавами, отриманими при $B = 0$ і $B = 1$ Тл, емульговані включення як вісмуту, так і цинку мали сферичну

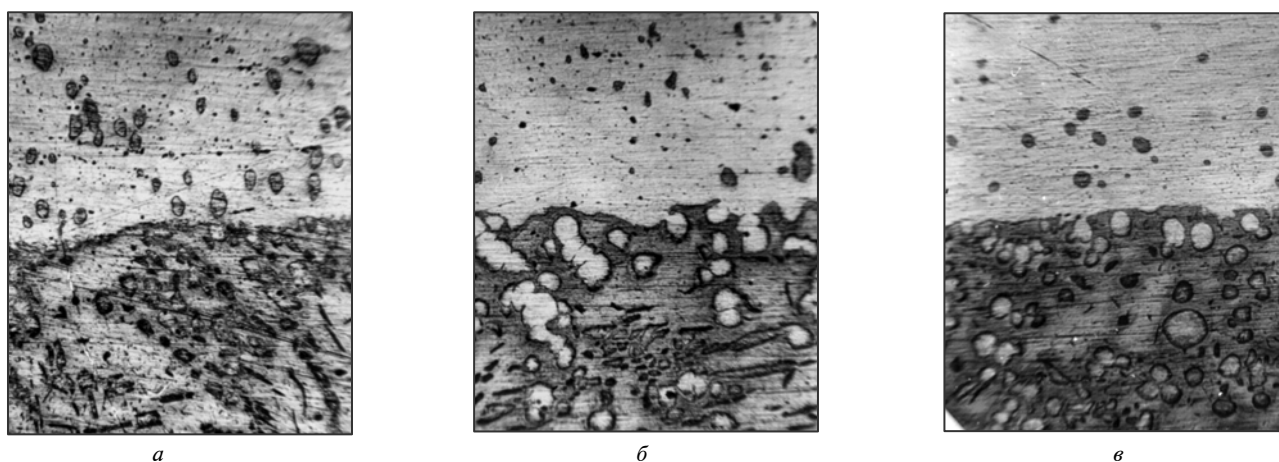


Рис. 2. Вплив магнітного поля на форму емульгованих включень: *a* – $B = 0$ Тл; *b* – $B = 1,0$ Тл; *c* – $B = 0,1$ Тл

форму, зросла відстань між включеннями вісмуту і зменшилась агломерація включень цинку. Таким чином, для застосування дії постійного магнітного поля під час охолодження і тверднення емульгованого сплаву, основа якого має менший питомий електроопір, ніж включення, необхідне виконання умови $Ha < 0,43$, і сплаву, основа якого має більший питомий електроопір, ніж включення, – умови $Ha < 0,53$.

Практичне використання результатів

Результати проведених досліджень було використано при виготовленні сплаву на основі міді, зміцненого дисперсними емульгованими включеннями хромистого чавуну (6,5 % за масою). Такий матеріал є перспективним для литих виробів, що працюють у жорстких умовах експлуатації, зокрема електродів контактного зварювання [7]. Фізичні характеристики компонентів сплаву наведені в табл. 2. Технологія отримання литих заготовок з емульгованого мідного сплаву (температура плавлення чавуну 1350 °С [7], розмір емульгованих включень хромистого чавуну 3 – 30 мкм) включає заливання розплаву вільним струменем у ливарну форму в турбулентному режимі ($Re = 26700$ – 22000) і охолодження із швидкістю до 35 °С/с. Для підвищення стійкості зварювальних електродів із врахуванням результатів досліджень, проведених на низькотемпературному сплаві, було встановлено оптимальне значення індукції постійного магнітного поля, накладеного на розплав під час його заливання та охолодження в ливарній формі. Було використано постійне однорідне горизонтальне магнітне поле з індук-

цією $0,3$ Тл, накладене на сплав під час заливання, охолодження і тверднення у формі. При заливанні сплаву значення чисел подібності N і Ha відповідно дорівнювали $0,4$ – $0,3$ і 223 . Під впливом постійного магнітного поля в сплаві утворились включення чавуну з розмірами 3 – 15 мкм ($Ha \leq 0,048$).

Таблиця 2. Фізичні характеристики рідкого сплаву мідь–хромистий чавун

Характеристика	Компонент сплаву	
	Cu (основа)	Fe–Cr–C (крапля)
ρ^e , Ом·м	$30 \cdot 10^{-8}$ [11]	$127 \cdot 10^{-8}$ [11]
ρ , кг/м ³	7700 [12]	6900 [12]
ν , м ² /с	$3,1 \cdot 10^{-7}$ [12]	$10 \cdot 10^{-7}$ [12]

Аналіз литої структури отриманих зливків (рис. 3) показав, що під впливом постійного магнітного поля з визначеною індукцією проявився його позитивний вплив на кількість і розмір емульгованих включень: кількість включень хромистого чавуну зросла приблизно на 8 %, розмір максимальних включень знизився на 50 %. При цьому всі включення хромистого чавуну мали сферичну форму. При заливанні сплаву відбувався перерозподіл енергії струменя, про що свідчить збільшення однорідності розподілу компонентів хромистого чавуну, які були розчинені в мідній основі приблизно на 30 %, однорідність розподілу емульгованих включень зросла приблизно на 23 %. Внаслідок зміни литої структури сплаву під впливом постійного магнітного поля експлуатаційна стійкість електродів контактного зварювання збільшилась приблизно на 30 %.

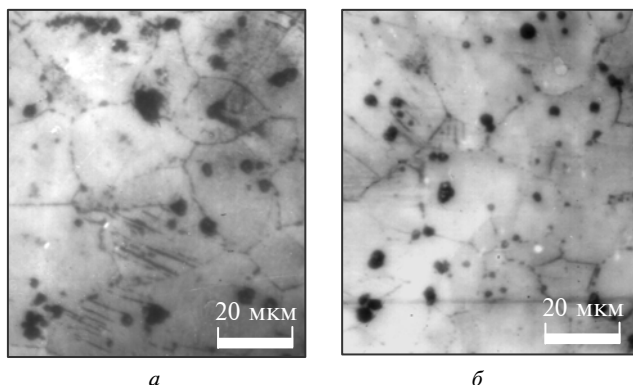


Рис. 3. Литі структури мідного сплаву зміцненого емульгованими включеннями хромистого чавуну: *a* – $B = 0,0$ Тл; *b* – $B = 0,3$ Тл

Е.В. Середенко

ВЛИЯНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ФОРМУ КАПЕЛЬ МЕТАЛЛОЭМУЛЬСИИ

Показано, что постоянное магнитное поле влияет на форму движущихся капель металлоэмульсии. Установлены условия, при которых в сплавах с эмульгированной структурой образуются сферические включения.

Висновки

Отримані результати досліджень дають можливість робити прогнозування впливу електромагнітного поля на форму крапель металевої емульсії в металевих сплавах з областю незмішування рідких фаз і встановлювати оптимальну індукцію постійного магнітного поля для забезпечення позитивного впливу магнітного поля на кількість, розмір, характер розподілу емульгованих включень і збереження сферичної форми крапель.

Перспектива подальших досліджень полягає у вивченні впливу постійного магнітного поля на фази сплавів евтектичних систем, наприклад залізо–вуглець, алюміній–кремній, алюміній–мідь.

O.V. Seredenko

THE CONSTANT MAGNETIC FIELD IMPACT ON THE DROPS SHAPE OF METALLIC EMULSION

The paper under scrutiny argues for the influence of the constant magnetic field on the drops shape of metallic emulsion. Investigated here are the conditions of the spherical inclusions formation in alloys with emulsified structure.

1. *Дмитрієва В.Ф.* Фізика. – К.: Вища шк., 1992. – 448 с.
2. *Кафаров В.В.* Основы массопередачи: Учебник для студентов вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1979. – 440 с.
3. *Сучков Е.В., Попель С.И., Жуков А.А.* Получение металлических эмульсий механическим перемешиванием расплавов // *Расплавы.* – 1988. – 2, № 6. – С. 89–92.
4. *Абрамов О.В., Гельфгат Ю.М., Сёмин С.И. и др.* О возможности получения материалов из несмешивающихся между собой компонентов в условиях квазиравновесия // *Физика и химия обработки материалов.* – 1980. – № 5. – С. 66–72.
5. *Добаткин В.И., Елагин В.И.* Гранулируемые алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1981. – 176 с.
6. *Morris M.A., Morris D.G.* Microstructures and mechanical properties of rapidly solidified Cu–Cr alloys // *Acta metallurgica.* – 1987. – 35, N 10. – P. 2511–2522.
7. *Христенко В.В.* Литі сплави на основі міді, зміцнені включеннями, які утворюються при емульгуванні розплавів в області незмішування: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – К., 2000. – 20 с.
8. *Середенко О.В.* Вплив постійного магнітного поля на рух емульгованих включень у металевому розплаві // *Наукові вісті НТУУ "КПІ".* – 2007. – № 3. – С. 89–93.
9. *Хансен М., Андерко К.* Структуры двойных сплавов: В 2 т. / Пер. с англ.; Под ред. И.И. Новикова, И.Л. Рогельберга. – М.: Металлургиздат, 1962. – Т. 2. – 1488 с.
10. *Гельфгат Ю.М., Лиелаусис О.А., Щербинин Э.В.* Жидкий металл под действием электромагнитных сил. – Рига: Зинатне, 1975. – 248 с.
11. *Фомин Н.И., Затуловский Л.М.* Электрические печи и установки индукционного нагрева. – М.: Металлургия, 1979. – 247 с.
12. *Смитлз К.Дж.* Металлы / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1980. – 446 с.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
17 жовтня 2007 року