

## Мікрівкраплення в структурі сплавів з областю незмішування рідких фаз в різних умовах охолодження

В. О. Середенко, доктор технічних наук  
О. В. Середенко, кандидат технічних наук  
О. А. Паренюк

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*Визначено умови формування однорідних структур сплавів з вкрапленнями другої фази розмірами у діапазоні 1 – 7 мкм, що визначаються значеннями числа Біо  $\leq 1$  і числа Фур'є  $< 1$ . Одержано структуру з середнім розміром вкрапель  $\sim 1$  мкм і їх кількістю  $\sim 1 \cdot 10^5$  мм<sup>-2</sup>.*

Завдяки існуванню в сплавах монотектичної системи області незмішування фаз в рідкому стані в них можливо формування емульсії, яка “заморожується” в твердому сплаві при певних умовах охолодження і тверднення. Сплави з такою структурою застосовуються в сучасній техніці в якості матеріалів з високою міцністю, тепло- і електропровідністю, зносостійкістю [1, 2]. Структура, що забезпечує необхідний рівень властивостей, характеризується розмірами включень 5 – 15 мкм і їхньою кількістю  $\sim 1 \cdot 10^3$  мм<sup>-2</sup>. Такі параметри структури реалізуються при швидкості охолодження до  $10^2$  °C/с [2, 3]. Найголовнішим резервом підвищення властивостей таких сплавів є збільшення дисперсності і кількості включень, тобто утворення в рідкому сплаві стану мікроемульсії з розмірами вкрапель  $\sim 1$  мкм і менше. Для цього потрібні високі швидкості охолодження розплаву  $\sim (10^3 - 10^5)$  °C/с [4, 5]. Однорідність структури також є важливим фактором підвищення властивостей сплаву [1]. Внаслідок ряду особливостей поведінки емульсії при охолодженні формування однорідної структури ускладнено [1 – 4]. Особливо це проявляється у сплавах на основі більш легкоплавкого компонента по відношенню до речовини вкрапель. Оскільки у сплаві на базі більш тугоплавкого компонента при охолодженні першою твердне основа сплаву і рідкі вкраплення фіксуються в ній. В сплаві на основі менш тугоплавкого компонента першими тверднуть тугоплавкі вкраплення і потрібно більше часу для їх фіксації в матриці.

Емульсовані сплави є дуже чутливими не тільки до швидкості охолодження, але й умов відводу тепла. Існують дані, які вказують, що навіть при охолодженні стрічки товщиною 50 мкм зі сплаву Cu – Cr зі швидкістю  $10^5$  °C/с по її висоті утворюються зони з різним розміром і кількістю вкрапель [5].

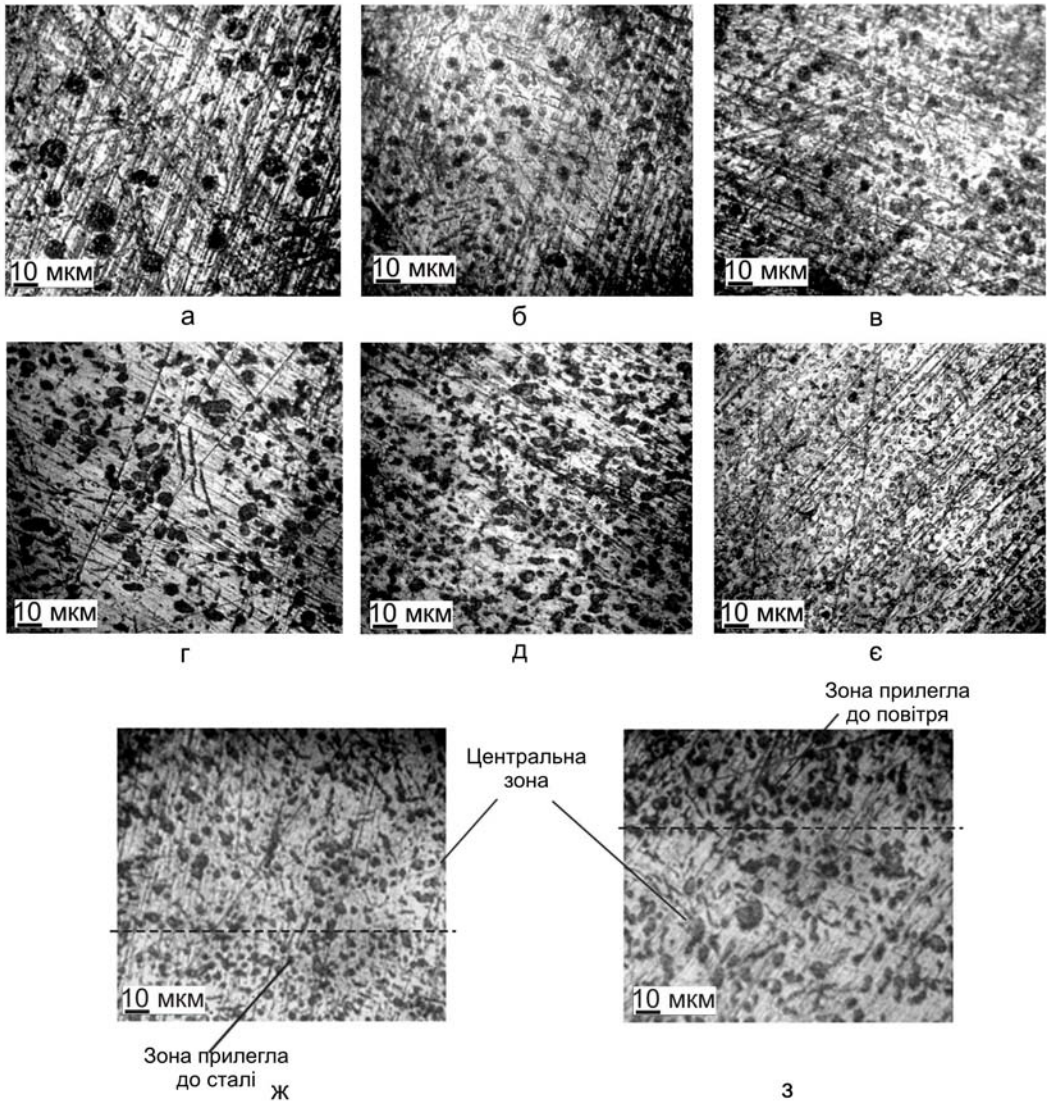
Відомо, що великий вплив на формування структури сплаву чинить контакт між розплавом та поверхнею охолоджувача. Виникнення газового проміжку особливо сильно змінює умови охолодження металу у шарі товщиною до 0,25 мм [6]. Наявність повітря між нерівностями на поверхні охолоджувача також впливає на умови відводу тепла [7].

В дослідженнях по формуванню структури емульсованих сплавів головна увага приділяється розміру вкраплень та їхньому розподілу за розмірами. Недостатньо вивчено вплив швидкості охолодження на кількість крапель емульсії, а також рідко враховується особливості теплообміну між розплавом і охолоджувачем. Вивчення особливостей поведінки емульсованих сплавів у багатьох випадках проводять на сплавах з невисокою температурою плавлення, у тому числі системи цинк-вісмут на базі більш тугоплавкого компонента (цинку).

Метою даної роботи було визначення впливу умов охолодження при кристалізації на розмір, кількість крапель мікроемульсії і однорідність структури сплаву на основі менш тугоплавкого компонента (вісмуту) з добавкою цинку.

Експерименти проводились на замонотектичному сплаві вісмуту з 30 % мас. цинку. Температура обробки розплаву і розливки становила 560 °С, що на 50 °С вище температури області незмішування сплаву [8]. Товщина зразків, що заливались на підложку була 600, 300 і 120 мкм. Швидкість охолодження ( $\nu$ ) розраховували за допомогою рівняння Ньютон-Ріхмана. Коефіцієнт тепловіддачі ( $\alpha$ ) від зразка до підкладки визначали на основі підходу, що враховує контактний спротив повітря, замкнутого між нерівностями на поверхні підкладки [6, 7]. В дослідженнях застосовувались підкладки з близькими коефіцієнтами теплопровідності [9], але з різними висотами мікронерівностей на поверхнях. Підкладка з графіту мала мікронерівності  $\sim 200$  мкм ( $\alpha = 1,63 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)), сталева полірована  $\sim 2$  мкм ( $\alpha = 1,42 \cdot 10^5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К)). Умови теплообміну описувались безрозмірними числами Біо ( $Bi$ ), що відображає перепад температури в тілі (зразку), і Фур'є ( $Fo$ ), яке характеризує темп зміни температури тіла [9]. Визначали середній розмір вкраплень ( $b$ ), середню відстань між ними ( $\ell$ ) та їх кількість на одиниці площі шліфа ( $q$ ), що визначали за допомогою оптичного мікроскопа.

Структури зразків сплаву, що тверднули на графіті, були однорідними (рисунок а – зразок товщиною 600 мкм, б – 300 мкм, в – 120 мкм). В структурі зразків, отриманих на сталевій підкладці, товщиною 600 і 300 мкм сформувалися 3 зони: нижня, зі сторони прилеглої до підкладки, середня зона (її структура представлена на рисунку: г – зразка товщиною 600 мкм, д – 300 мкм) і верхня – зі сторони повітря. Розміри вкраплень цинку в нижній зоні були на 30 %, а у верхній на 7 % менше, ніж у середній, висота зон була  $\sim 60$  мкм – рисунок ж, з. Структура зразка товщиною 120 мкм була однорідною (рисунок є). Умови охолодження і параметри структури (для зразків з неоднорідною структурою – для середньої зони приведено в таблиці).



Структура зразків сплаву, отриманих у різних умовах охолодження: на графітовій (а, б, в) і сталевій поверхнях (г, д, е) та зони в структурі зразків (ж, з).

З даних таблиці видно, що зі збільшенням кількості вкраплень зростає значення коливань показнику відстані між ними. Так, найбільша рівномірність розподілу вкраплень притаманна зразкам, отриманим при темпі охолодження визначеним найменшим значенням  $F_0$  ( $\ll 1$ ). При цьому коливання параметру  $b$  по відношенню до його середнього значення є найменшим серед усіх зразків – 15,9 %. У випадку, коли число  $F_0$  найбільше ( $\gg 10$ ), коливання  $b$  також найбільші – 44,8 %. Стану мікромемльсії найбільшим чином відповідає зразок сплаву з середнім розміром вкраплень  $\sim 1$  мкм і їх кількістю  $\sim 1 \cdot 10^5$  мм<sup>2</sup> (рисунок, таблиця).

Таким чином, для отримання однорідної структури сплаву з дрібнодисперсними вкрапленнями (як у випадку підкладки з графіту) число  $V_i$

## Плавлення і кристалізація

Вплив умов охолодження на параметри вкраплень у структурі сплаву

| Параметри                    | Підкладка           |                   |                   |                   |                   |                   |
|------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                              | Графіт              |                   |                   | Сталь             |                   |                   |
|                              | Товщина зразка, мкм |                   |                   |                   |                   |                   |
|                              | 600                 | 300               | 120               | 600               | 300               | 120               |
| $v, ^\circ\text{C}/\text{c}$ | $8,21 \cdot 10^2$   | $1,64 \cdot 10^3$ | $4,10 \cdot 10^3$ | $7,12 \cdot 10^4$ | $1,42 \cdot 10^5$ | $3,56 \cdot 10^5$ |
| $Vi$                         | 0,065               | 0,033             | 0,013             | 5,67              | 2,83              | 1,13              |
| $Fo$                         | 12,1                | 24,2              | 60,5              | 0,1               | 0,3               | 0,7               |
| $b, \text{мкм}$              | $6,4 \pm 1,02$      | $3,6 \pm 0,46$    | $3,1 \pm 0,58$    | $3,6 \pm 0,45$    | $1,7 \pm 0,17$    | $1,4 \pm 0,13$    |
| $l, \text{мкм}$              | $8,2 \pm 1,89$      | $3,1 \pm 0,88$    | $2,9 \pm 1,31$    | $5,4 \pm 0,86$    | $2,5 \pm 0,66$    | $1,2 \pm 0,25$    |
| $q, \text{мм}^{-2}$          | $7,90 \cdot 10^3$   | $1,11 \cdot 10^4$ | $1,25 \cdot 10^4$ | $1,10 \cdot 10^4$ | $6,02 \cdot 10^4$ | $1,78 \cdot 10^5$ |

повинно бути  $< 0,1$ , що відповідає умові термічно “тонкого” тіла з дуже незначним перепадом температури у зразку, що охолоджується. Для однорідного зразка, отриманого на сталевій підкладці (товщиною 120 мкм), однорідність структури, вірогідно, пов’язана зі змиканням нижньої і верхньої зон. Найбільш дисперсні мікроемульсовані структури утворюються в умовах  $Fo < 1$ , однорідні по висоті зразка – при  $Vi \leq 1$ , з найбільш однорідним розподілом вкраплень – при  $Fo \ll 1$ .

Перспектива подальших досліджень полягає в визначенні впливу умов отримання зразків з концентрацією цинку в сплаві у діапазоні менше 30, але більше 15 % (по масі), що відповідає області незмішування рідких фаз.

### Література

- Zhong Y., Wang J., Zheng T. // Journal of Iron and Steel Research International. – 2012. – 19, 1 – 1. – P. 282 – 285.
- Wang W., Wang E., Zhang L. // Journal of Iron and Steel Research International. – 2012. – 19, 1 – 2. – P. 821 – 825.
- Сучков Е.В., Попель С.М., Жуков А.А. // Расплавы. – 1995. – 5. – С. 24 – 28.
- Добаткин В.И., Елагин В.И. Гранулируемые алюминиевые сплавы. – М.: Металлургия, 1981. – 176 с.
- Morris M.A., Morris D.G. // Acta metallurgica. – 1987. – 35, 10. – P. 2511 – 2522.
- Марширов В. В. // Литейн. пр-во. – 2013. – 9. – С. 33 – 36.
- Абраменко А. Н., Калиниченко А. С., Антонец М. А. // ИФЖ. – 1988. – 55, 1. – С. 117 – 122.
- Malakhov D. V. // Calphad. – 2000. – 24, 1. – P. 1 – 14.
- Пехович А.И., Жидких В.М. Расчёты теплового режима твердых тел. – М.: Энергия, 1976. – 352 с.

Одержано 22.04.14

В. А. Середенко, Е. В. Середенко, А. А. Паренюк

**Микровключення в структурі сплавів с областю несмешивания жидких фаз в разных условиях охлаждения**

**Резюме**

Определены условия формирования однородных структур при кристаллизации сплавов с включениями второй фазы размерами в диапазоне 1 – 7 мкм, определяемые значениями числа Био  $\leq 1$  и числа Фурье  $< 1$ . Получена структура со средним размером включений  $\sim 1$  мкм и их количеством  $\sim 1 \cdot 10^5$  мм<sup>-2</sup>.

V. O. Seredenko, O. V. Seredenko, A. A. Parenjuk

**Microindusions in the structure of alloys with miscibility gap under different cooling conditions**

**Summary**

Conditions allowing to form homogeneous structures of the alloys with second phase inclusions of 1 – 7  $\mu\text{m}$  were established. They described by Numbers  $Bi \leq 1$  and  $Fo < 1$ . Structure with average size of the inclusions  $\sim 1$   $\mu\text{m}$  and their quantity  $\sim 1 \cdot 10^5$   $\text{mm}^{-2}$  were obtained.

***Шановні колеги!***

**Триває передплата на науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів» на 2015 р.**

Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України. Вартість одного номера журналу – 30 грн., передплата на рік – 120 грн.

Ціна архівних номерів 1995 – 2013 рр. – 10 грн.

**Розрахунковий рахунок для передплатників, спонсорів і рекламодавців:**

банк ГУДКСУ в м. Києві, р/р 31257201112215, код банку 820019.

Отримувач – ФТІМС НАН України, ЗКПО 05417153,

з посиланням на журнал "ММ".

Копію документа передплати та відомості про передплатника просимо надсилати до редакції, вказавши номер і дату платіжного документа.