

ждения аммонийно-галлоидных кристаллов, быстро растущие с ростом концентрации таллия, принадлежат парным центрам люминесценции; 2) расстояние между компонентами парного центра не превышает одну постоянную решетки, т.е. они находятся в ближайших катионных узлах.

### Список литературы

- [1] Сильд О.И. Опт. и спектр. 15, 4, 478 (1963).
- [2] Yuster P.H., Delbecq B.J. J. Chem. Phys. 21, 5, 892 (1953).
- [3] Sharan V.B., Srivastwa D.N.S., Sen S.C. Phys. Stat. Sol. (a) 50, 323 (1978).

УДК 669.532.613.14

© Физика твердого тела, том 37, № 6, 1995  
Solid State Physics, vol. 37, N 6, 1995

## О КОАЛЕСЦЕНЦИИ СПЛАВОВ В ТВЕРДО-ЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

*Е.С.Кучеренко*

Днепропетровская государственная металлургическая академия  
(Поступило в Редакцию 21 апреля 1994 г.  
В окончательной редакции 10 января 1994 г.)

Теория коалесценции [1] развита для случая малой объемной доли выделений второй фазы. Большая часть данных, подтверждающих ее, получена на твердофазных системах [2-4]. Теоретически учет влияния объемной доли выделений новой фазы выполнен в [5,6]. Экспериментальные наблюдения кинетики коалесценции фазы с высокой ее относительной долей были проведены в [7]. В качестве этой фазы выступали первичные кристаллы, окруженные расплавом, в системе эвтектического типа.

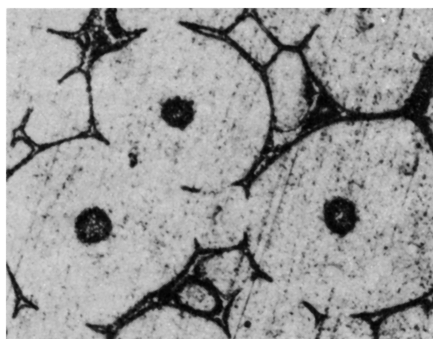
Металлические сплавы в двухфазном твердо-жидком состоянии являются удобным объектом для исследования коалесценции и сопоставления полученных результатов с теорией. Быстрая поверхностная и объемная кинетика диффузионных процессов в таких системах позволяет изучать коалесценцию в широком интервале изменения размеров коалесцирующих частиц и наблюдать морфологические эффекты, соответствующие поздним стадиям коалесценции, которые не удается достичь в других типах двухфазных систем. Однако эвтектичность исследованной в [7] системы позволяла наблюдать только коалесценцию частиц твердой фазы и исключала возможность получения для сравнения данных о кинетике коалесценции в том же самом сплаве капелек жидкости, диспергированных в твердой матрице. Подобные исследования, представляя интерес с точки зрения теории коалесценции в системах с высокой объемной долей укрупняющейся фазы, имеют и самостоятельное значение.

В настоящей работе путем проведения предварительной термической обработки в сплаве одного и того же исходного состава формировались две различные системы коалесцирующих объектов: либо система кристаллических глобул, погруженных в расплав, либо система капелек жидкой фазы, диспергированных в твердой матрице. Изучены коалесцентные эффекты в таких системах.

Сплав  $\text{Cu} + 86.5\% \text{ мас. Zn}$  в жидком виде выливали тонким слоем на медный лист. Достижимая при этом высокая скорость охлаждения расплава обуславливала формирование при затвердевании особо мелкодендритной структуры. Затем отливку разделяли на образцы объемом порядка  $2 \dots 3 \text{ мм}^3$ , которые вводили в печь с температурой  $520^\circ\text{C}$ . При этой температуре состояние сплава двухфазное [8], твердо-жидкое. В процессе нагрева и частичного оплавления дендриты распадаются на отдельные округлые глобулы, дальнейший рост которых происходит за счет коалесценции. После различных изотермических выдержек — от 1 мин до 3 h — образцы постадийно закаливали в воду, фиксируя возникшую структуру, приготавливали микрошлиф и микроскопически методом Фуллмана [9] определяли средний размер твердых глобулей, достигавшийся к моменту закалки.

Вторую партию образцов предварительно длительно отжигали при температуре  $424^\circ\text{C}$ , которая соответствует однофазному твердому состоянию сплава. В результате протекания гомогенизации и рекристаллизации формировались очень крупные полиэдрические зерна. Затем образцы вводили в печь с той же температурой, что и в первом случае, с теми же последующими операциями. Однако в этом случае жидкая фаза возникала внутри зерен в виде множества отдельных мельчайших капелек, которые в процессе выдержки коалесцировали.

Количественная обработка результатов измерений средних размеров  $\bar{R}$  коалесцирующих объектов и определения зависимости их от времени показала, что постоянная  $n$  в законе роста  $\bar{R}^n = \bar{R}_0^n + kt$  равна 2.9 — для глобулей твердой фазы и 3.4 — для капелек. Поскольку  $n$  есть целое число, отсюда следует, что в обеих системах кинетика коалесценции может быть описана известным законом корня кубического из времени [1]. Однако завышенное значение  $n$  для коалесценции капелек внутри кристаллической матрицы, насыщенной дислокациями, позволяет предположить, что в этом случае диффузия компонентов по дислокациям оказывает влияние на кинетику процесса, не являясь, однако, определяющей [10]. Для коэффициентов скорости коалесценции  $k$  получили соответственно  $k_s = 0.23 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3/\text{с}$  и  $k_l = 0.45 \cdot 10^{-20} \text{ м}^3/\text{с}$ . Их различие пропорционально соотношению коэффициентов диффузии в матричных фазах — жидкой и твердой.



Структура сплава  $\text{Al} + 9\% \text{ Mg}$ .

Изучение временной зависимости концентрации коалесцирующих объектов показало, что в обоих случаях последняя изменяется пропорционально обратному времени  $1/t$ .

Приведенные данные о росте жидких капель внутри зерен получены для случая, когда расстояние между центрами капель  $a \ll l$ , где  $l$  — размер зерен, что практически отвечает бесконечной матрице, поскольку наличие жидких прослоек между зернами почти не сказывалось на поведении капелек внутри зерен. При небольших размерах зерен возможно наблюдение морфологического эффекта, соответствующего поздним стадиям коалесценции. На микрофотографии (рисунок) представлена структура сплава Al + 9% Mg после выдержки при 600 °C в течение 20 min. Интересующий нас эффект состоит в самоцентрировании на определенной стадии коалесценции жидкой капли внутри зерна: все остальные капли внутри зерна исчезают и выживает только одна, расположенная в центре. В дальнейшем и эта центральная капля растворяется.

Нетрудно видеть, что наблюдаемый эффект обусловлен конечностью размеров твердой матрицы — зерна алюминия, в которой коалесцируют жидкие включения. По отношению к жидкой фазе наружная поверхность зерен имеет отрицательную кривизну, в связи с чем внутри твердой фазы устанавливается радиальный градиент концентрации примеси, наличие которого приводит к появлению потока примеси от жидких включений к внешнему расплаву. В этих условиях вначале исчезают капли, расположенные ближе к краям зерен, и лишь на последних стадиях растворяется центральная капля. В итоге происходит полное освобождение зерен от включений жидкой фазы.

В изученной системе Cu-Zn доля коалесцирующей фазы велика — 0.64 и 0.36 соответственно для твердой и жидкой фаз, что обуславливало значительное перекрытие диффузионных полей коалесцирующих объектов. Как следует из приведенных результатов, наблюдаемые закономерности, однако, в целом соответствуют теории [1] и ее дальнейшему развитию [5,6].

#### Список литературы

- [1] Лифшиц И.М., Слезов В.В. ФТТ 1, 9, 1401 (1959).
- [2] Нечипоренко Е.П., Слезов В.В., Сагалович Н.Е., Сагалович В.В. ФТТ 14, 5, 1469 (1972).
- [3] Березина А.Л., Трофимова Л.Н., Чуистов К.В. ФММ 55, 3, 543 (1983).
- [4] Слезов В.В., Сагалович В.В. УФН 151, 1, 67 (1987).
- [5] Ardell A.J. Acta Met. 20, 1, 61 (1972).
- [6] Остапчук П.Н., Слезов В.В., Тур А.В., Яновский В.В. ФММ 67, 3, 462 (1989).
- [7] Hargy S.C., Voorhees P.W. Met. Trans. A 19, 11, 2713 (1988).
- [8] Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов М. (1962), 1488 с.
- [9] Ростокер В., Дворак Д. Микроскопический метод в металловедении. М. (1967), 206 с.
- [10] Ardell A.J. Acta Met. 20, 2, 601 (1972).