

## МИКРОСТРУКТУРА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ ИНДИЙ-ЦИНК

Ван Цзин Цзе, В.Г. Шепелевич

*Белорусский государственный университет, Минск*

**Введение.** Ограничения на использование легкоплавких сплавов, содержащих вредные для здоровья компоненты (свинец, кадмий, таллий и ртуть), вызывают необходимость проведения исследований по созданию новых материалов, в которых вышеуказанные компоненты заменены менее опасными. К числу таких заменителей относятся олово и индий. В связи с более высокой стоимостью индия и олова целесообразно легкоплавкие материалы на их основе получать ресурсосберегающими технологиями, к которым относится, например, высокоскоростное затвердевание. При скоростях охлаждения  $10^5$  К/с и выше в сплавах формируется микрокристаллическая структура и образуются дисперсные выделения частиц легирующих элементов, что оказывает существенное влияние на их механические и физические свойства [1, 2]. В связи с этим получение и исследование структуры и свойств легкоплавких сплавов на основе индия, полученных высокоскоростным затвердеванием, имеют практическое и научное значение. В данной работе представлены результаты исследования микроструктуры быстрозатвердевших фольг сплавов системы индий-цинк.

**Методика эксперимента.** Сплавы системы индий-цинк, содержащие до 4 ат. % Zn, получены сплавлением компонентов, чистота которых не хуже 99,999 %, в кварцевой ампуле. Быстрозатвердевшие фольги сплавов получены кристаллизацией капли расплава на внутренней полированной поверхности вращающегося медного цилиндра. Микроструктура фольг исследована с помощью растрового микроскопа LEO 1455VP фирмы «Карл Цейс». Рентгеноспектральный микроанализ проводился с использованием энергодисперсного SiLi-полупроводникового детектора фирмы «Rontec» (Германия). Рентгеноструктурные исследования выполнены на дифрактометре ДРОН-3 в медном излучении. Для исследования текстуры использовались дифракционные линии 002, 110, 112, 200, 103, 211, 202 и 213. Их полюсные плотности  $p$  рассчитывались по методу Харриса [3].

**Результаты и их обсуждение.** При высокоскоростном затвердевании сплавов системы индий-цинк получают фольги длиной до 10 см и шириной до 1 см. При исследовании структуры и микротвердости использовались фольги толщиной 30 – 70 мкм. Поверхность фольги (А), при-

легающая к кристаллизатору, имеет зеркальный вид и содержит вытянутые вдоль направления течения металла расплава раковины глубиной несколько микрон. Противоположная поверхность (В) фольги имеет бугристую структуру. В слоях фольг, прилегающих к поверхностям А и В, различие концентраций цинка не превышает 5 %.

Быстрозатвердевшие фольги являются двухфазными, состоят из индия и дисперсных частиц цинка. Гистограмма распределения частиц цинка по размерным группам в средней части поперечного сечения фольг сплавов, содержащих 2 и 4 ат. % цинка, приведена на рис. 1. Распределение характеризуется одним максимумом. Средний размер частиц цинка в фольгах сплавов, содержащих 2 и 4 ат. % Zn, равен 0,36 и 0,43 мкм соответственно. На поверхности А фольг средний размер частиц почти в два раза меньше, чем в средней ее части. Исследование микроструктуры массивных образцов сплавов, полученных при скоростях охлаждения  $10^2$ , показали, что в них выделения цинка значительно крупнее; их средний размер почти в 15 раз больше среднего размера частиц в быстрозатвердевших фольгах. Высокоскоростное затвердевание вызывается значительным переохлаждением жидкости [1, 2], что приводит к значительному увеличению скорости зарождения кристаллических фаз. По мере перемещения фронта кристаллизации от поверхности фольги А к поверхности В величина переохлаждения уменьшается. По этой причине средний размер частиц цинка в средней части больше, чем на поверхности.

Быстрозатвердевшие фольги исследуемых сплавов находятся в неустойчивом состоянии. Их низкая температура плавления обуславливает активное протекание диффузионных процессов при комнатной температуре. Выдержка фольг при комнатной температуре вызывает укрупнение частиц цинка, что подтверждается исследованиями поверхности А фольги. Так, на поверхности А фольги сплава In-1 ат. % Zn, выдержанного при комнатной температуре в течение двух суток, средний размер частиц цинка увеличился почти в два раза, а их число в расчете на единицу площади уменьшилось. В средней части фольги средний размер частиц цинка практически не изменялся, но отжиг при более высоких температурах активизирует этот процесс роста. Происходит смещение максимума распределения частиц цинка по размерным группам (рис. 1) в фольге сплава In-4 ат. % Zn. Обнаруженная линейная зависимость квадрата среднего размера частиц  $d^2$  от времени изотермического отжига  $t$  при температуре 130 °C свидетельствует о том, что процесс коалесценции контролируется переходом атомов через межфазную границу в фольгах сплавов In-Zn [4].

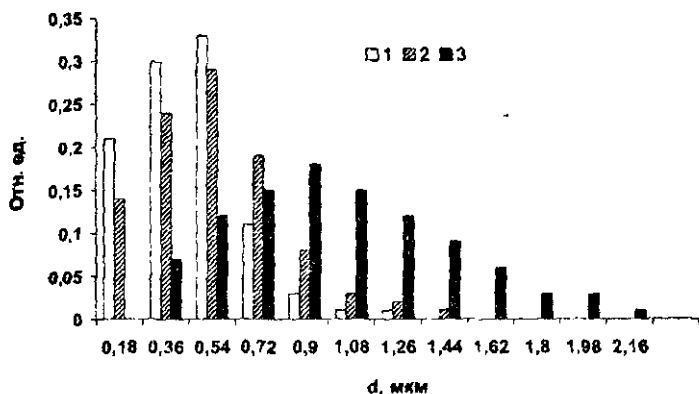


Рис. 1. Гистограмма распределения частиц цинка по размерным группам для исходных фольг сплавов In-2 ат. % Zn (1) и In-4 ат. % Zn (2) и отожженной в течение 3 ч при 130 °C фольги сплава In-4 ат. % Zn

Значительные переохлаждения жидкой фазы, возникающие при высокоскоростной кристаллизации, вызывают формирование и микрокристаллической структуры. Кроме того, легирование индия цинком вызывает дополнительное измельчение зеренной структуры. Так, в фольгах сплава In-4 ат. % Zn размер сечений большинства зерен находится в пределах 1 – 4 мкм. Обнаружено, что зерна быстрозатвердевших фольг имеют преимущественную ориентировку. В таблице приведены значения полюсных плотностей дифракционных линий для фольг сплавов индия с цинком. Рентгеновское излучение падало на поверхность А фольги. Наибольшим значением полюсной плотности характеризуется дифракционная линия 202, что указывает на формирование текстуры (101). Легирование индия цинком усиливает текстуру. На долю данной ориентировки приходится от 60 до 90 % объема слоя фольги, прилегающего к поверхности А.

Формирование четкой текстуры при высокоскоростной кристаллизации экспериментально наблюдалось ранее в сплавах металлов с границентрированной кубической и гексагональной плотноупакованными решетками. Теоретические исследования показали [5], что в металлах с границентрированной решеткой в условиях сверхбыстрой закалки из жидкого состояния при кристаллизации преимущественно растут те зерна, у которых межфазная граница совпадает с наиболее плотноупакованными плоскостями и перпендикулярна к направлению теплоотвода. В индии наиболее плотноупакованной является плоскость (101), что и обуславливает формирование текстуры (101).

**Полюсные плотности дифракционных линий  
быстрозатвердевших сплавов индия с цинком**

Концентрация цинка, ат. %	Темпер./время отжига, °С/ч	Дифракционные линии								
		002	110	112	200	103	211	202	213	
1	–	1,0	0,2	0,6	0,8	0,1	0,3	4,4	0,5	
2	–	0,4	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	6,7	0,1	
4	–	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	7,7	0,0	

**Выводы.** Быстрозатвердевшие фольги сплавов системы индий-цинк, содержащие до 4 ат. % цинка, имеют микрокристаллическую структуру, текстуру (202) и содержат дисперсные частицы цинка. Коалесценция частиц цинка в фольгах контролируется переходом атомов через межфазную границу.

#### Литература

1. Мирошниченко, И. С. Закалка из жидкого состояния / И. С. Мирошниченко. – М.: Металлургия, 1982. – 168 с.
2. Васильев, В. А. Высокоскоростное затвердевание расплавов (теория, технология и материалы) / В. А. Васильев [и др.]; под ред. Б. С. Мятина. – М.: СП ИНТЕР-НЕТ ИНЖИНИРИНГ, 1998. – 400 с.
3. Васерман, Г. Текстуры металлических материалов / Г. Васерман, И. Грелен. – М.: Металлургия, 1969. – 654 с.
4. Мартин, Дж. Стабильность микроструктуры металлических систем / Дж. Мартин, Р. Дозрти. – М.: Атомиздат, 1978. – 280 с.
5. Li, D. Y. A hssible role for surface packing density in the formation of (111) texture in solidified FCC metals / D. Y. Li, J. A. Szpunar // J. of Matter. Sci. Lett, 1994. – Vol. 13. – P. 1521 – 1523.

УДК (539.25+548.73+539.533):669.5

### СТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Zn-Pb

**В.В. Лозенко, А.И. Грачев, В.Г. Шепелевич**

*Белорусский государственный университет, Минск;*

*Белорусский государственный аграрный технический университет,  
Минск*

**Введение.** Материалы, полученные методами высокоскоростного затвердевания расплава, обладают рядами свойств, которые обуславливают возможность их широкого применения в науке и технике [1]. Высокоско