

УДК (539.26+621.785): 669.715

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МИКРОТВЕРДОСТИ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ-ЦИНК

**Е.С. ГУТЬКО, В.Г. ШЕПЕЛЕВИЧ**  
(Белорусский государственный университет, Минск)

*Фольги сплавов системы Al-Zn получены сверхбыстрой закалкой из расплава при скоростях охлаждения жидкой фазы приблизительно  $10^6$  К/с. Установлено, что они имеют микрокристаллическую структуру, формируется текстура (111). Рассмотрено изменение микротвердости фольг и массивных образцов от концентрации цинка. Исследовано влияние отжига на размер зерна, текстуру и микротвердость.*

Материалы, полученные сверхбыстрой закалкой из расплава, имеют структуру и свойства, которые невозможно получить используя традиционные методы термообработки. Системы Al-Zn являются базой для получения технических сплавов как бинарных, так и многокомпонентных [1]. В данной работе представлены результаты исследования зеренной структуры, фазообразования и микротвердости быстрозатвердевших фольг сплавов системы алюминий-цинк, а также их изменения при отжиге.

Фольги системы сплавов Al-Zn, содержащие от 0,5 ат. % до 4 ат. % Zn, были получены кристаллизацией капли расплава (приблизительно 0,2 г), выплеснутой на полированную внутреннюю поверхность быстровращающегося медного цилиндра. Толщина фольг находилась в пределах от 20 мкм до 80 мкм. Скорость охлаждения расплава была порядка  $10^6$  К/с [2]. Для выявления границ зерен использовался реактив, состоящий из азотной, соляной и плавиковой кислот [3]. Рентгеноструктурный анализ применялся для исследования текстуры, определения фаз и параметра элементарной ячейки. Съёмка образцов проводилась на дифрактометре ДРОН-3 в медном излучении. Текстура фольг изучалась с помощью «обратных» полюсных фигур. Полюсные плотности дифракционных линий 111, 200, 220, 311, 331 и 420 рассчитывались по методу Харриса [4]. Текстуру фольг изучали с гладкой стороны, прилегающей к кристаллизатору, и бугристой стороны, контактирующей с окружающей средой. Параметр элементарной ячейки  $a$  твердого раствора на основе алюминия определялся по положению дифракционной линии 420. Микротвердость  $H_n$  фольг измерялась на приборе ПМТ-3 с использованием нагрузки 20 г. Изохронный отжиг проводился от комнатной температуры до 600 °С через 30 °С с выдержкой по 20 мин при каждой температуре. Изотермический отжиг осуществлялся в течение нескольких часов при температурах 130, 160 и 500 °С.

Быстрозатвердевшие фольги сплавов системы Al-Zn имеют микрокристаллическую структуру. Так, средний размер зерна для фольг Al-2 ат. % Zn составляет примерно 5 мкм, что в 1,8 раза меньше, чем для фольг чистого алюминия.

Для фольг с гладкой стороны максимальным значением полюсной плотности характеризуется дифракционная линия 111 (табл. 1), что указывает на формирование текстуры (111). При увеличении концентрации цинка до 1 ат. % текстура фольг (111) усиливается.

Таблица 1

Полюсные плотности дифракционных линий фольг сплавов Al-Zn

| Сплав           |           | Дифракционные линии |     |     |     |     |     |
|-----------------|-----------|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 |           | in                  | 200 | 220 | 311 | 331 | 410 |
| A1-0,5 ат. % Zn | гладкая   | 5,3                 | 0,2 | 0,1 | 0,0 | 0,2 | 0,2 |
| A1-1 ат. % Zn   | гладкая   | 6,0                 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| A1-2 ат. % Zn   | гладкая   | 2,4                 | 0,6 | 1,0 | 1,0 | 0,6 | 0,4 |
| A1-4 ат. % Zn   | гладкая   | 3,7                 | 0,4 | 0,5 | 0,4 | 0,5 | 0,4 |
|                 | бугристая | 1,6                 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 0,8 |

Затем для фольг сплавов системы Al-2 ат. % Zn и Al-4 ат. % Zn данная текстура ослабевает, но остается наиболее четкой. В фольгах Al-4 ат. % Zn с бугристой стороны текстура (111) выражена менее четко, по сравнению с гладкой стороной. В тонких пленках, полученных термическим путем, происходит образование текстуры (111). Хотя в слитках алюминия и его сплавах при условиях кристаллизации, близких к равновесным, энергетически выгодным является формирование текстуры (100). При затвердевании в сильно неравновесных условиях текстура фольг определяется зернами, у которых плоскости {111} совпадают с межфазной границей и перпендикулярны направлению теплоотвода [5]. Скорость охлаждения жидкой фазы со стороны фольги, прилегающей к кристаллизатору, больше, чем со стороны, контактирующей с воздухом. Соответственно и степень переохлаждения жидкости в первом случае больше, чем во втором. Поэтому текстура фольг с гладкой стороны выражена наиболее четко.

Результаты рентгеноструктурного анализа показывают, что на рентгенограммах исходных фольг сплавов Al-Zn, содержащих 1,2,4 ат. %Zn, наблюдаются только дифракционные линии твердого раствора на основе алюминия. Параметр элементарной ячейки  $a$  уменьшается при увеличении концентрации цинка в фольгах системы сплавов Al-Zn (рис. 1, кривая 1).

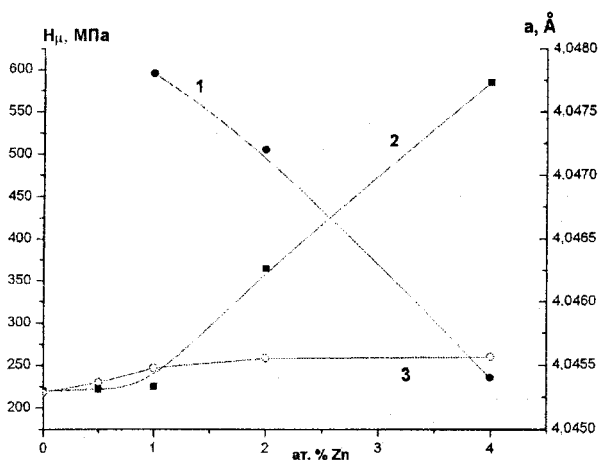


Рис. 1. Зависимость параметра элементарной ячейки  $a$  (кривая 1); микротвердости  $H_{\mu}$  фольг (кривая 2); массивных образцов (кривая 3) от концентрации цинка

Микротвердость быстрозатвердевших фольг (рис. 1, кривая 2) и массивных образцов (рис. 1, кривая 3) увеличивается с повышением концентрации Zn. Для фольг Al-0,5 и 1 ат. % Zn исследуемое свойство несколько ниже, чем у массивных образцов того же состава. Для фольг Al-2 ат. % Zn микротвердость примерно в 1,5 раза выше, чем у массивных образцов, а для фольг Al-4 ат. % Zn - в 2,5 раза.

Фольги сплавов системы Al-Zn подверглись отжигу. При изохронном отжиге в интервале температур от 120 до 230 °C происходит уменьшение микротвердости (рис. 2). Дальнейшее увеличение температуры не приводит к изменению данного свойства. Уменьшение микротвердости наблюдается и при изотермическом отжиге при температурах 130 °C и 160 °C в течение 5 часов для фольг Al-4 ат. % Zn (рис. 3). Последующий отжиг данного образца при температуре 500 °C не приводит к изменению микротвердости.

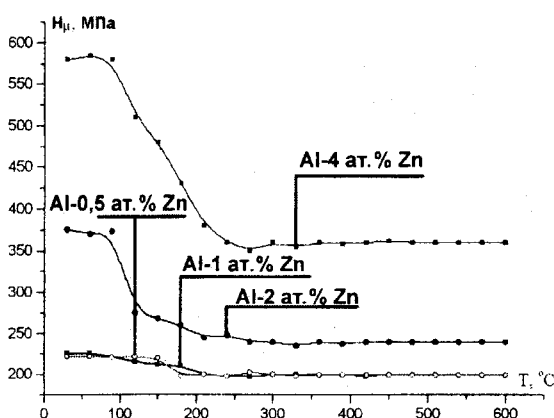


Рис. 2. Изменение микротвердости  $H_{\mu}$  фольг сплавов системы Al-Zn при изохронном отжиге

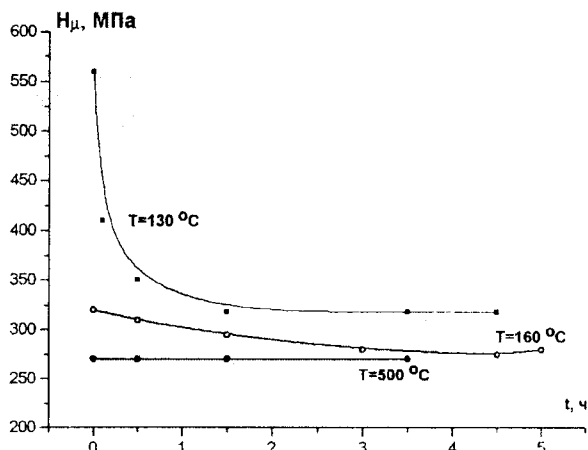


Рис. 3. Изменение микротвердости  $H_{\mu}$  фольг Al-4 ат. % Zn при изотермическом отжиге

Металлографические исследования фольг Al-2 ат. % Zn, отожженных при 240 °C в течение 8 часов, подтвердили протекание рекристаллизационных процессов. Средний размер зерна отожженных фольг составил примерно 10 мкм, что в 2 раза выше, чем у исходных фольг.

Известно, что средний размер зерна  $d$  пропорционален времени изотермического отжига:  $d \sim \tau^n$ , где  $\tau$  – время отжига;  $n$  – постоянная величина.

Величина показателя  $n$  для фольг Al-2 ат. % Zn равна 0,3 (рис. 4), что отличается от теоретического значения - 0,5 [6]. Различия в величинах показателя может быть обусловлено толщиной эффектом и наличием текстуры.

Исследовано влияние термической обработки на текстуру фольг. Отжиг при температуре 300 °C в течение одного часа вызывает перераспределение полюсных плотностей дифракционных линий, что видно из табл. 2.

Так, для фольг сплавов Al-2 ат. %, 4 ат. % Zn полюсные плотности линии 111 примерно в 2 раза меньше, чем у исходных, но текстура (111) сохраняется. Для фольг Al-2 ат. % Zn, отожженных при 500 °C, текстура (111) исчезает. На смену ей приходит слабовыраженная текстура (100). Следовательно, термическая обработка приводит к перераспределению полюсных плотностей дифракционных линий фольг системы Al-Zn, что свидетельствует о протекании рекристаллизации.

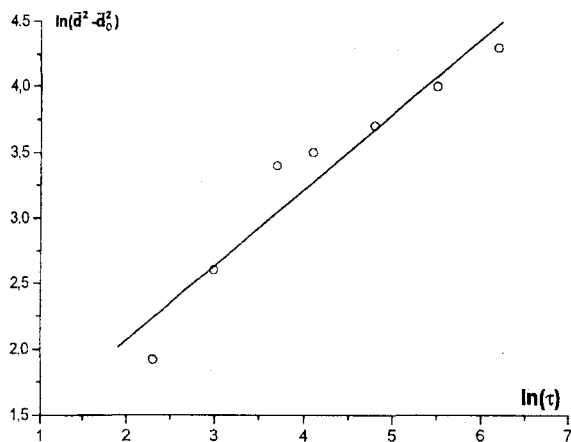


Рис. 4. Зависимость  $\ln(d^2 - d_0^2)$  от  $\ln t$  для фольг Al-2 ат. % Zn при изотермическом отжиге

Физическое уширение  $\beta$  дифракционной линии 420 твердого раствора на основе алюминия для фольг Al-4 ат. % Zn уменьшается при отжиге выше 100 °С. Изотермический отжиг при 160 °С также приводит к уменьшению  $\beta$ . Изменение физического уширения связано с уменьшением микродеформации.

На рентгенограммах фольг Al-2 ат. % Zn и Al-4 ат. % Zn, отожженных при температурах 300 и 500 °С, наблюдаются дополнительные дифракционные линии, принадлежащие цинку, что обусловлено его выделением при распаде пересыщенного твердого раствора.

Таблица 2

Полусные плотности дифракционных линий фольг сплавов алюминий-цинк

| Сплав         | Температура отжига | Дифракционные линии |     |     |     |     |     |
|---------------|--------------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|               |                    | 111                 | 200 | 220 | 311 | 331 | 420 |
| Al-1 ат. % Zn | 300 °С             | 4,8                 | 0,2 | 0,4 | 0,3 | 0,3 | 0,4 |
|               | 500 °С             | 2,8                 | 0,1 | 0,4 | 1,3 | 0,4 | 1,0 |
| Al-2 ат. % Zn | 300 °С             | 1,2                 | 0,8 | 1,1 | 1,4 | 0,7 | 0,8 |
|               | 500 °С             | 0,7                 | 1,7 | 0,6 | U   | 0,3 | 1,6 |
| Al-4 ат. % Zn | 300 °С             | 1,9                 | 0,5 | 1,1 | 1,0 | 0,5 | 1,0 |
|               | 500 °С             | 2,2                 | U   | 0,6 | 0,7 | 0,4 | 1,0 |

Таким образом, в фольгах сплавов системы алюминий-цинк, полученных сверхбыстрой закалкой из расплава, образуется микрокристаллическая структура, формируется текстура (111). Микротвердость фольг Al-2 ат. % Zn и Al-4 ат. % Zn выше, чем для массивных образцов того же состава. При отжиге быстрозатвердевших фольг сплавов алюминий-цинк происходит распад пересыщенного твердого раствора на основе алюминия и рекристаллизация. Микротвердость фольг уменьшается при отжиге в интервале температур от 120 °С до 230 °С. При рекристаллизации текстура (111) фольг системы Al-Zn ослабевает. Для фольг Al-2 ат. % Zn на смену ей приходит слабовыраженная текстура (100).

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (грант Ф03-015)

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сверхбыстрая закалка жидких сплавов: Сб. науч. тр. / Под ред. Г. Германа; Пер.с англ. Е.А. Жураковского, В.В. Федорова; Под ред. В.Т. Борисова. - М.: Металлургия, 1986. - 375с.
2. Мирошнеченко И.С. Закалка из жидкого состояния. - М.: Металлургия, 1982. - 168 с.
3. Коваленко В.С. Металлографические реактивы. - М.: Металлургия, 1970. - 134 с.
4. Вассерман Г., Гревен И. Текстуры металлических материалов - М.: Металлургия, 1969. - 654 с.
5. Li D.Y., Szpunar S.A. A possible role for surface packing density in the formation of {111} texture in solidified FCC metals // S. Mater. Sci. Lett. - 1994. - V. 13, № 21. - P. 1521 - 1523.
6. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. - М.: Металлургия, 1978. - 392 с.