

**Федеральное агентство по образованию  
ОАО «МОСКОВСКИЙ КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ»**

**Государственное образовательное учреждение  
Высшего профессионального образования  
«МАТИ» - РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени К.Э. ЦИОЛКОВСКОГО**

**4-я Всероссийская  
с международным участием  
научно-техническая конференция**

**БЫСТРОЗАКАЛЕННЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ**

**Сборник трудов**

**22-23 ноября 2005г.  
«МАТИ» - РГТУ им. К.Э.Циолковского**

**Москва 2005**

**Редакционный совет:**

**Председатель:**

- Ректор «МАТИ» - Российского государственного технологического университета им. К.Э. Циолковского, д.т.н., профессор Петров А.П.

**Зам. председателя:**

- Проректор по научной работе «МАТИ» - Российского государственного технологического университета им. К.Э. Циолковского, д.т.н., профессор Васильев В.А.
- Зав. кафедрой ПМКиП «МАТИ» - Российского государственного технологического университета им. К.Э. Циолковского, д.т.н., профессор Лозован А.А.

**Члены редакционного совета:**

Проф., д.т.н. Барабанова О.А., проф., д.ф.-м.н. Беграмбеков Л.Б., к.ф.-м.н. Борисов А.М., проф., д.т.н. Казаков В.А., проф., к.т.н. Кирилянчик А.С., проф., д.т.н. Костиков В.И., проф., д.т.н. Кудинов В.В., проф., д.т.н. Курилов П.Р., проф., д.ф.-м.н. Курнаев В.А., проф., д.ф.-м.н. Лигачев А.Е., проф., д.т.н. Пашков И.Н., проф., д.т.н. Серов М.М., проф., д.т.н. Суминов И.В., проф., д.т.н. Фролов В.А.

Б 95 «Быстрозакаленные материалы и покрытия» // Труды 4-ой Всероссийской с международным участием научно-технической конференции, 22-23 ноября 2005 г., «МАТИ» - РГТУ им. К.Э. Циолковского.: Сб. трудов.: М.: МАТИ. 2005

В сборнике представлены материалы докладов ведущих отечественных специалистов в следующих областях: быстрозакаленные материалы, модифицирование поверхности лазерными, электронно-лучевыми и ионно-плазменными методами и нанесение покрытий, представленных на 4-й всероссийской с международным участием научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия», проходившей 22-23 ноября 2005 г. в «МАТИ» - РГТУ им. К.Э. Циолковского (г. Москва, ул. Полбина, 45).

Конференция проводится при поддержке ЗАО «АЛАРМ» и ООО НТЦ «СИЛАТЕ»

УДК 669  
ББК 34.2

## ЗЕРЕННАЯ СТРУКТУРА БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЫГ СВИНЦА И ЕГО СПЛАВОВ

Белая О.Н., Шепелевич В.Г.

Белорусский государственный университет  
220050, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 4

E-mail: [belav\\_olenka@mail.ru](mailto:belav_olenka@mail.ru)

Сверхбыстрая закалка из расплава (СБЗР) со скоростями, обеспечивающими полное или частичное сохранение структуры, представляет собой один из способов получения материала с неравновесным составом и дисперсной микроструктурой. Высокие скорости охлаждения обеспечивают, с одной стороны, необходимую степень переохлаждения для реализации сильнонеравновесного состояния, а с другой – способствуют быстрому затвердеванию, при котором подавляются процессы распада и обеспечивается диспергирование структуры. Одна из особенностей СБЗР состоит в том, что в процессе быстрого затвердевания создаются микроструктуры с меньшим размером зерна, чем в случае обычных методов затвердевания [1–3], что для многих сплавов приводит к благоприятным изменениям свойств. Значительное внимание уделено формированию зеренной структуры в сплавах на основе алюминия, получаемых СБЗР [4–6], сплавы на основе свинца изучены в недостаточной степени. Свинец находит довольно широкое применение в промышленности, в первую очередь в машиностроении, электронике и электротехнике. Исследуемые легирующие элементы повышают прочность свинца, снижают его температуру плавления, повышают жидкотекучесть и коррозионную стойкость, улучшают прилуживаемость и сообщают сплавам ряд других свойств, широко используемых в промышленности. Вместе с тем следует отметить, что практически отсутствуют исследования преимущественной ориентировки (текстуры) зерен в сплавах, получаемых СБЗР. Преимущественная ориентация зерен приводит к формированию определенных высокоугловых и малоугловых границ, которые могут стать при распаде образовавшегося пересыщенного твердого раствора местами локализации выделений метастабильных и стабильных фаз.

Целью данной работы было исследование зеренной структуры быстрозатвердевших фольг свинца и выявление влияния концентраций легирующих элементов на структуру этих сплавов.

Фольги используемых материалов получены при затвердевании капли расплава ( $\sim 0,2$  г), инжигированной на внутреннюю поверхность вращающегося медного цилиндра. Линейная скорость поверхности цилиндра 15 м/с. Толщина исследуемых фольг составляла 30...80 мкм.

Скорость охлаждения расплава, как показал расчет [7], была не менее  $10^6$  град/с. Исследование зеренной структуры производилось на поверхности фольги, т.е. на плоскости, перпендикулярной направлению тепловода. Травление предварительно полированных образцов сплавов на основе свинца велось в растворе уксусной кислоты в чередовании с легкой полировкой на сукне. Металлографические исследования проводились с помощью металлографического комплекса МГК-1. Для определения среднего размера зерна использовался метод секущих. Наиболее устойчивую оценку среднего размера зерна  $d$  дает средняя длина хорды  $l$ , отсекаемой границами сечений зерен на случайной секущей. Данная величина связана со средним размером зерна следующим соотношением:  $d=1,62l$  [8]. Рентгеноструктурные исследования выполнялись на дифрактометре ДРОН-3М в медном излучении.

На рис. 1 приведена микроструктура быстрозатвердевших фольг чистого свинца. Средний размер зерен данных фольг составляет 16 мкм, в то время как в сплавах свинца, полученных традиционными методами, средний размер зерна достигает 80 мкм. Наблюдаемое измельчение зерна при сверхбыстрой закалке происходит за счет создания глубокого переохлаждения в расплаве и высокой скорости зародышеобразования. Легирование свинца приводит к измельчению зеренной структуры. Так, легирование фольг свинца 2 ат. % Sb уменьшает размер зерна до 9 мкм; 5 ат. % In – до 10 мкм, легирование свинца 2 и 5 ат. % Sn – до 14 и 10 мкм соответственно. Уменьшение размеров зерен при легировании свинца целесообразно связать с увеличением количества центров кристаллизации.

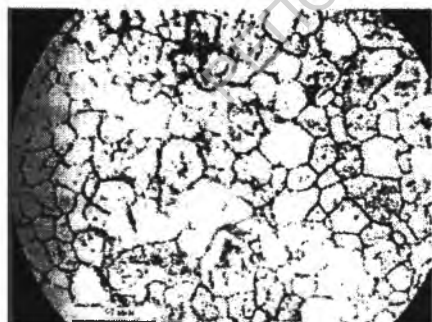


Рис. 1. Микроструктура быстрозатвердевших фольг свинца

Металлографические исследования позволили построить распределение максимальных хорд сечений зерен сплавов на основе свинца по длине (рис. 2). Для каждого исследованного сплава гистограмма

имеет один максимум, причем значение среднего размера зерна попадает в размерную группу, на которую приходится данный максимум.

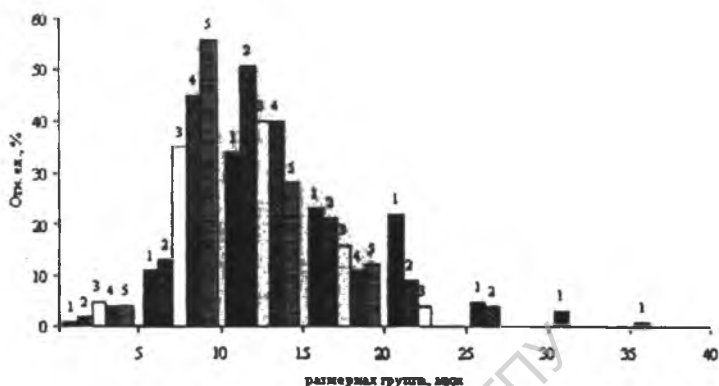


Рис. 2. Распределение максимальных длин хорд поперечных сечений зерен по размерным группам:

1 – Pb, 2 – Pb-2 ат. % Sn; 3 – Pb-5 ат. % Sn; 4 – Pb-5 ат. % In;  
5 – Pb-2 ат. % Sb

Помимо исследования размеров зерен с помощью рентгеноструктурного анализа была изучена зеренная ориентация. Формирование текстуры в сплавах зависит от условий кристаллизации. Известно [9], что в массивных слитках свинца и его сплавах, получаемых традиционными технологиями, формируется текстура (100). Однако в фольгах свинца, полученных сверхбыстрой закалкой, наибольшим значением полюсной плотности характеризуется дифракционная линия 111 (таблица 1), т.е. наблюдается текстура (111). При этом легирование свинца индием, оловом и сурьмой усиливает текстуру (111).

Таблица 1 Полюсные плотности дифракционных линий сплавов на основе свинца

Концентр. легирующего элемента (ат. %)	Дифракционные линии					
	111	200	220	311	331	420
Pb	4.4	0.9	0.1	0.3	0.1	0.2
5 % In	5.8	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0
2 % Sn	5.7	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0
5 % Sn	5.2	0.4	0.1	0.3	0.0	0.0
2 % Sb	5.4	0.3	0.1	0.2	0.0	0.0

Исследуемые быстрозатвердевшие фольги на основе свинца находятся в неустойчивом состоянии, о чем может свидетельствовать наличие в данных фольгах микрокристаллической структуры и текстуры, отличной от текстуры материалов, полученных традиционными способами. В этом случае в процессе термической обработки могут происходить изменения структуры. Так, отжиг фольг свинца при температуре 150 °С вызывает увеличение среднего размера зерна (таблица 2).

Таблица 2 Изменение среднего размера зерна ( $d$ ) и удельной поверхности межфазных границ ( $\Sigma S$ ) в быстрозатвердевших фольгах свинца в процессе термической обработки

	Условия термообработки (°С/мин)			
	исх.	150/30	150/60	150/120
$d$ , мкм	16	32	39	50
$\Sigma S$ , мм <sup>-1</sup>	155	55	48	45

Отжиг фольг чистого свинца в интервале температур от 150 °С до 300 °С через 50 °С в течение 30 мин при каждой температуре вызывает незначительное изменение полюсных плотностей дифракционных линий, что указывает на сохранение текстуры (111) в фольгах при протекании рекристаллизации. Следует отметить, что изохронный отжиг фольг свинца при температуре выше 100 °С приводит к увеличению микротвердости, что объясняется уменьшением площади межзеренных границ, являющихся разупрочненными областями [10]. Изотермический отжиг быстрозатвердевших фольг систем Pb-In, Pb-Sn и Pb-Sb при температуре 240 °С в течение 30, 60, 120 и 300 мин также не вызывает ослабления текстуры (111).

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Быстрозатвердевшие фольги свинца имеют микрокристаллическую структуру, средний размер зерен составляет 16 мкм, с четко выраженной ориентировкой (111).
2. Легирование фольг свинца приводит к измельчению зеренной структуры и усилению текстуры (111).
3. В процессе термической обработки быстрозатвердевших фольг свинца происходит укрупнение среднего размера зерна при сохранении текстуры (111).

## Литература

1. Быстрозакаленные металлы: Сб. науч. тр. / Под ред. Б. Кантора. – М.: Металлургия, 1983. – 472 с.
2. Быстрозакаленные металлические сплавы: Материалы V Международной конференции / Под ред. Штиба С., Варлимонта Г. – М.: Металлургия, 1989. – 376 с.
3. Cohen M., Kear B.H., Mehrabian R. Rapid Solidification Processing an Outlook // Rapid Solidification Processing: Principles and Technologies II. Proc. Of Int. Conf. / Reston, 1980. – P. 1–23.
4. Шепелевич В.Г., Ташлыкова-Бушкевич И.И., Анисович А.Г. Зеренная структура быстрозатвердевших фольг низколегированных Fe, Cu, Sb и Ge сплавов алюминия // Физика и химия обработки материалов. – 1999. – № 4. – С. 86–91.
5. Boud I.D., Nickolson R.V. The coarsening behavior of  $\theta''$  and  $\theta$  precipitates in to Al-Cu alloys // Acta metal. – 1971. – Vol.19. № 12. – P. 1379–1393.
6. Kim W.T., Cantor B. The variation of grain size with cooling rate during melt spinning // Scripta metal. mater. – 1990. – Vol.24. № 4. – P. 633–637.
7. Мирошниченко И.С. Закалка из жидкого состояния. – М.: Металлургия, 1982. – 168 с.
8. Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1961. – 863 с.
9. Вассерман Г., Гревен И. Текстуры металлических материалов. – М.: Металлургия, 1969. – 654 с.
10. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.