

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

# **МАШИНОСТРОЕНИЕ**

**РЕСПУБЛИКАНСКИЙ МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ  
СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ**

Основан в 1976 году

Выпуск 19

Минск  
УП «Технопринт»  
2003

Компьютерный анализ этой модели показал, что в данном случае уравнение для нахождения  $t_1$  будет также иметь один положительный корень.

Приведенные ниже графики показывают зависимость абсолютной величины давления  $P$  от времени  $t$  источника звука, находящегося на расстоянии 100 м от наблюдателя при  $t=2, \dots, 8$  при различных начальных скоростях  $v$  (ускорение  $a = 1 \text{ м/с}^2$ ) движения источника звука.

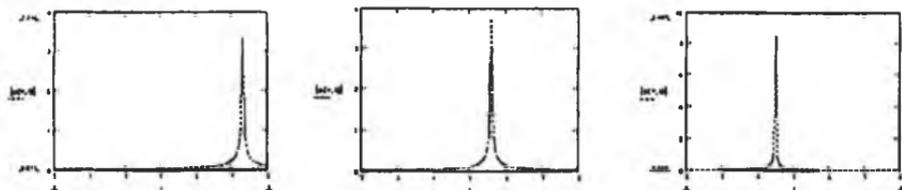


Рис. 2

Пик давления достигается при  $t=7,3$  ( $v=10 \text{ м/с}$ ),  $t=5,6$  ( $v=15 \text{ м/с}$ ),  $t=4,5$  с ( $v=20 \text{ м/с}$ ).

Из рис. 2 видно, что при увеличении скорости движения источника звуковых колебаний пиковая величина давления возрастает, что, в общем, согласуется бытовыми представлениями.

Графики получены с использованием программы MathCAD 2001 для персонального компьютера (2).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Остаев В.Е. Распространение звука в движущихся средах. — М.:Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1992. — 205с.
2. Кирьянов Д.В. Самоучитель MathCAD 2001. — СПб.:БХВ-Петербург, 2001. — 544 с.

УДК 669.04:548.735

О.Н.Шахрай, В.Г.Шепелевич

## СТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛГ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ СВИНЕЦ-ОЛОВО

*Белорусский государственный университет*  
Минск, Беларусь

При изготовлении приборов электронной техники широко применяется пайка легкоплавкими припоями. Высокая пластичность свинца в широком интервале тем-

ператур (-200 °C + +250 °C), относительно высокая температура плавления (327,4 °C), низкая стоимость и некоторые другие характеристики делают его перспективным материалом для создания на его основе припоев. В припоях, полученных методом сверхбыстрой закалки из расплава, удастся получить не только мелкодисперсную структуру, но и сделать ее более однородной по сравнению с массивными образцами. На большую часть из всех применяемых мягких припоев составляют припой системы свинец-олово. В связи с этим проведены исследования структуры и свойств быстро затвердевших фольг свинца и его сплавов с оловом.

Быстрозатвердевшие фольги системы свинец-олово получены при затверждении капли расплава, инжектированной на внутреннюю полированную поверхность быстро вращающегося медного цилиндра. Толщина используемых фольг составляет 30...80 мкм. Сторона фольги, контактирующая с кристаллизатором, имела зеркальный вид, а противоположная сторона, имеющая контакт с атмосферой, была бугристой. Средняя скорость охлаждения, согласно расчетам [1], составляет 10<sup>6</sup> К/с. Для выявления специфики фольг получены литые массивные образцы того же состава. Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре ДРОН-2 в медном излучении. Текстура фольг исследована методом обратных полюсных фигур, полюсная плотность  $\rho_{\text{пл}}$  дифракционных линий 111, 200, 220, 311, 331 и 420 рассчитана по методу Харриса [2]. Микротвердость измерена на приборе ПМТ-3. Относительная ошибка измерения микротвердости составляет 4 %.

Быстрозатвердевшие фольги свинца имеют микрокристаллическую структуру. В массивном образце чистого свинца размер зерна достигает 80 мкм, а в фольге превышает десяти микрон. При этом легирование свинца оловом приводит к изменению зеренной структуры.

Таблица 2

Полюсные плотности дифракционных линий быстрозатвердевших фольг системы свинец-олово

Материал	Дифракционная линия					
	111	200	220	311	331	420
Pb	4,4	0,9	0,1	0,3	0,1	0,2
Pb-2 ат.% Sn	5,7	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0
Pb-5 ат.% Sn	5,2	0,4	0,1	0,3	0,0	0,0
Pb-10 ат.% Sn	5,0	0,6	0,1	0,3	0,0	0,0
Pb-20 ат.% Sn	5,6	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0

В табл. 1 приведены значения полюсных плотностей дифракционных линий быстрозатвердевших фольг системы свинец-олово. Наибольшим значением полюсной плотности характеризуется дифракционная линия 111. На долю данной ориентировки приходится 75-90 % объема фольги. Легирование свинца оловом способствует усилению текстуры (111).

Известно [2], что в массивных слитках свинца и его сплавах, получаемых традиционными методами, формируется текстура (100). Однако в фольге чистого свинца, полученной в сильно неравновесных условиях, наблюдается текстура (111). Из плоскостей {111} и {100} наиболее плотноупакованными являются плоскости {111}, а наименьшей поверхностной энергией характеризуются плоскости {100}. Поэтому при условиях кристаллизации, близких к равновесным, энергетически выгодным является формирование текстуры (100). При затвердевании в сильно неравновесных условиях текстура определяется теми зернами, у которых при плоском фронте кристаллизации межфазная граница "кристалл-жидкость" совпадает с плоскостью, перемещающейся с наибольшей скоростью. Согласно выполненным расчетам [3], энергетический барьер перемещения межфазной границы, совпадающей с плоскостями {111} меньше, чем для межфазной границы, совпадающей с плоскостями {100}. Вследствие этого при быстром затвердевании предпочтительней растут те зерна, у которых плоскости {111} перпендикулярны направлению теплоотвода, формируя тем самым текстуру (111) в быстрозатвердевших фольгах свинца и его сплавах с оловом.

В табл. 2 приведены значения полюсных плотностей дифракционных линий быстрозатвердевшей фольги Pb-1 ат. % Sn, а также их изменение при отжиге. Отжиг фольг в течение 1 и 5 часов при температуре 250 °C вызывает перераспределение полюсных плотностей дифракционных линий. Так, полюсная плотность дифракционной линии 111 уменьшается, полюсные плотности остальных дифракционных ли-

Таблица 2

Полюсные плотности дифракционных линий быстрозатвердевших фольг Pb-1% Sn, отожженных при температуре 250 °C

Состояние фольги	Дифракционная линия					
	111	200	220	311	331	420
исходные	5,4	0,3	0,1	0,2	0,0	0,0
отжиг 1 ч.	5,0	0,7	0,1	0,2	0,0	0,0
отжиг 5 ч.	4,8	0,7	0,1	0,3	0,1	0,0

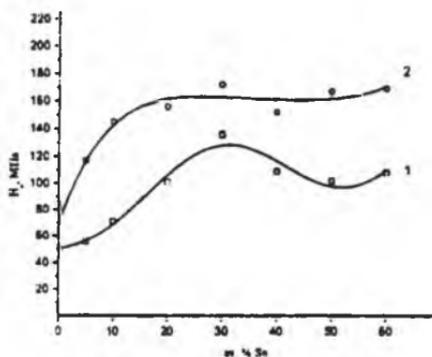
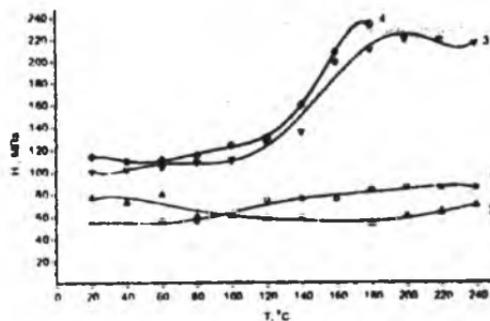


Рис. 1. Зависимость микротвердости быстрозатвердевших фольг (1) и массивных образцов (2) системы свинец-олово от концентрации олова

твердости массивных образцов и фольг. При этом микротвердость фольг меньше микротвердости массивных сплавов того же состава.

Меньшее значение микротвердости фольг, чем массивных образцов, объясняется уменьшением среднего размера зерна. Известно [4], что в металлах границы зерен при температурах  $T \approx 0,5 T_m$  и выше ( $T_m$  — температура плавления по шкале Кельвина) являются разупрочненными зонами, возможно зернограничное проскальзывание. Благодаря этому фольги более пластичны, чем массивные образцы.

Быстрозатвердевшие фольги свинца и его сплавов с оловом находятся в неустойчивом состоянии. Так, отжиг фольг свинца при температуре 240 °C в течение 1 часа приводит к увеличению среднего размера зерна до 12 мкм. Таким образом, при отжиге происходят процессы рекристаллизации.



ний незначительно увеличиваются. Полюсная плотность дифракционной линии 200 увеличивается более чем в 2 раза, но остается меньше 1. Наблюдаемое ослабление текстуры (111) в быстрозатвердевшей фольге Pb-1 ат.% Sn связано с протеканием рекристаллизационных процессов, происходящих при отжиге.

Измерения микротвердости проводились как для массивных образцов, так и для фольг системы свинец-олово. Микротвердость исследуемых сплавов зависит от концентрации олова (рис. 1). Легирование свинца оловом приводит к увеличению микротвердости массивных образцов и фольг.

Изменение структуры фольг при отжиге вызывает изменение микротвердости. Результаты проведенного изохронного отжига представлены на рис. 2.

Рис. 2. Изохронный отжиг быстрозатвердевших фольг Pb (1), Pb-10 ат. % Sn (2), Pb-20 ат. % Sn (3), Pb-30 ат. % Sn (4)

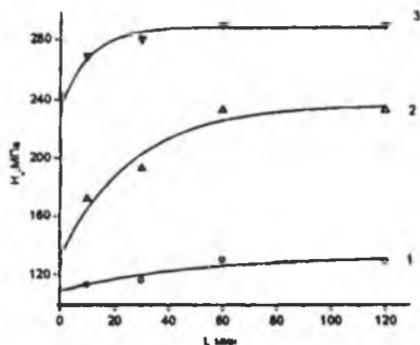


Рис.3. Изотермический отжиг фольг Pb-20 % ат. Sn при температуре 100 °C (1), 140 °C (2), 200 °C (3)

В фольгах чистого свинца наблюдается увеличение микротвердости, что объясняется протеканием рекристаллизационных процессов, вызывающих рост зерен. В фольгах Pb-10 % Sn до температуры 100 °C происходит уменьшение микротвердости, а, начиная с температуры 180 °C, микротвердость возрастает. В фольгах Pb-20 % ат. Sn и Pb-30 % ат. Sn наблюдается увеличение микротвердости, что можно связать с миграцией высокоугловых границ, вызывающей укрупнение зеренной структуры.

На рис.3 представлены результаты проведения изотермического отжига фольг Pb-20 % ат. Sn при температурах 100 °C, 140 °C и 200 °C. При переходе к более высокой температуре отжига увеличивается значение микротвердости.

Таким образом, быстрозатвердевшие фольги свинца и его сплавов с оловом имеют микрокристаллическую структуру и текстуру (111). Микротвердость фольг меньше микротвердости массивных сплавов того же состава. Отжиг приводит к изменению структуры и микротвердости фольг, ослаблению текстуры (111).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мирошниченко И.С. Закалка из жидкого состояния. – М.: Металлургия, 1982. – 168 с.
2. Вассерман Г., Гривен Г. Текстуры металлических материалов. – М.: Металлургия, 1969. – 654с.
3. Li D.Y., Szpunar J.A. A possible role for surface packing density information of (111) texture in solidified metals. *J. Mater. Sci. Let.* – 1994. V.13, №21. – P.1521-1523.
4. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. – М.: Мир, 1972. – 408с.