

# ВЕСТНИ



НАЦЫЯНАЛЬНАЯ  
АКАДЭМІЯ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК

---

ИЗВЕСТИЯ  
НАЦИОНАЛЬНОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ  
СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

PROCEEDINGS  
OF THE NATIONAL ACADEMY  
OF SCIENCES OF BELARUS  
PHYSICO-TECHNICAL SERIES

1

# ВЕСЦІ

## НАЦЫЯНАЛЬНАЯ АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК 2006 № 1

# ИЗВЕСТИЯ

## НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК 2006 № 1

ЗАСНАВАЛЬНИК — НАЦЫЯНАЛЬНАЯ АКАДЭМІЯ НАВУК БЕЛАРУСІ

Часопіс выдаецца са студзеня 1956 г.

Выходзіць чатыры разы ў год

### СОДЕРЖАНИЕ

#### К 75-ЛЕТИЮ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА НАН БЕЛАРУСИ

Гордиенко А. И. ФТИ НАН Беларуси – 75 лет (исторический очерк развития).....	5
Ивашко В. В. Технологические процессы термической обработки титана и его сплавов в промышленности с применением скоростного нагрева.....	9
Ивашко В. В., Вегера И. И. Исследование и разработка функционально-градиентных материалов на основе легированных сталей.....	16
Кашулин С. М., Новиков А. А. Автоматизированное оборудование для обработки металлических и неметаллических конструкционных материалов концентрированными потоками энергии.....	27
Лебедев В. Я. Особенности теплового воздействия на ротационный резец при прерывистом резании.....	34
Белая О. Н., Шепелевич В. Г. Структура и свойства припоев на основе свинца, полученных сверхбыстрой закалкой из расплава.....	40
Бушик А. И. Исследование динамики катодных пятен в импульсном вакуумном дуговом разряде.....	45

#### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Ковчур С. Г., Ковчур А. С., Нетсев Ю. А. Получение никелевого порошка из промышленных отходов.....	49
Ловшенко Ф. Г., Ловшенко Г. Ф., Ловшенко З. М. Формирование фазового состава, структуры и свойств механически легированных алюминиевых сплавов.....	53
Толочко Н. К., Шиенок Ю. А. Кинетика перехода материала из твердого состояния в твердожидкое при тиксокомпактировании.....	59

#### МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

Высоцкий М. С., Амельченко П. А., Гуськов В. В., Мелешко М. Г. Оптимизация положения центра масс и центра давления колесного трактора.....	63
--	----

УДК 621.791.3:669.04

О. Н. БЕЛАЯ, В. Г. ШЕПЕЛЕВИЧ

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПРИПОЕВ НА ОСНОВЕ СВИНЦА, ПОЛУЧЕННЫХ СВЕРХБЫСТРОЙ ЗАКАЛКОЙ ИЗ РАСПЛАВА

*Физико-технический институт НАН Беларуси,  
Белорусский государственный университет*

*(Поступила в редакцию 22.04.2005)*

**Введение.** При изготовлении приборов электронной техники широко применяется пайка легкоплавкими припоями. Качество и долговечность паяных соединений в значительной мере зависят от физико-механических характеристик припоя и характера его физико-химического взаимодействия с конструкционным материалом. В связи с этим широкое применение получила пайка свинцовыми припоями. Высокая пластичность свинца в широком интервале температур (от  $-200$  до  $250$  °С), малая химическая активность к полупроводникам и металлам, относительно высокая температура плавления ( $327,4$  °С), низкая стоимость и некоторые другие характеристики делают его перспективным материалом для создания на его основе припоев. В отечественной и зарубежной литературе появлялись отдельные работы, свидетельствующие о возможности использования припоев на основе свинца [1–5], в которых предлагаются различные технологические приемы, а также легирующие свинец добавки.

Традиционные технологии не в состоянии обеспечить потребность промышленности в припоях малого размера, что вызвало необходимость применения новых способов обработки материалов. Одним из путей решения данной проблемы является использование метода сверхбыстрой закалки из расплава (СБЗР). Быстрозакаленные материалы, получаемые в виде фольги и используемые в качестве припоев, обладают более высокой химической и микроструктурной однородностью по сравнению со стандартными припоями [6, 7]. Эта однородность, в свою очередь, проявляется более равномерным плавлением, растекаемостью по площади соединения и затвердеванием в процессе пайки. Более того, быстрое затвердевание обеспечивает формуемость фольги для припоев, хрупких и недеформируемых в кристаллическом состоянии. При пайке такими припоями образуется однородная микроструктура соединения без пор и раковин, что в свою очередь способствует улучшению качества паяного соединения.

В связи с этим представляется актуальным проведение исследований быстрозатвердевших фольг припоев на основе свинца. В данной работе представлены результаты исследований структуры и свойств фольг припоев трех составов (ат. %): № 1 – ПОС 40 (60% Pb, 40 % Sn); № 2 – Pb 50%, Bi 37,5%, Sn 12,5%; № 3 – Pb 81%, Sn 17%, Sb 2%.

**Методика эксперимента.** Фольги используемых материалов получены при затвердевании капли расплава ( $\sim 0,2$  г), инжесктированной на внутреннюю поверхность вращающегося медного цилиндра. Линейная скорость поверхности цилиндра 15 м/с. Толщина используемых фольг составляла 30–80 мкм. Скорость охлаждения расплава, как показал расчет [8], была не менее  $10^6$  град/с. Наблюдение топографии фольг проводилось на растровом электронном микроскопе LEO 1445 VP, исследования проводились как при нормальном падении луча на поверхность фольги, так и при наклоне фольги на  $45^\circ$ . Для анализа распределения анализируемых элементов осуществлялось сканирование по заданной линии. Рентгеноструктурные исследования выполнялись на дифрактометре ДРОН-3М в медном излучении. При этом рентгеновское излучение падало либо на поверхность фольги, которая имела контакт с кристаллизатором (тип А), либо на противоположную сторону, контактирующую с атмосферой (тип Б). Измерения параметра элементарной ячейки кристаллической решетки  $a$  проведены по положению дифракционной линии 333. Параметр элементарной

ячейки определен из формулы Вульфа – Брэгга  $a = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}$ , где  $n$  – порядок отражения,  $\theta$  – угол

отражения,  $\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$ . Относительная погрешность определения  $a$  около 0,01%. Микротвердость измерялась с помощью прибора ПМТ-3. Исследования проводились при нагрузке 10 г для всех образцов, время выдержки нагрузки 15 с. Изохронный отжиг быстрозатвердевших фольг припоев на основе свинца проводился от комнатной температуры до 180 °С, изотермический отжиг осуществлялся в течение нескольких часов.

**Результаты и их обсуждение.** Сторона фольги, прилегающая к кристаллизатору (тип А), имеет блестящий вид, а на стороне, контактирующей с атмосферой (тип Б), наблюдаются впадины и бугорки с четко выраженной ячеистой структурой.

Фольги припоя № 1 имеют двухфазную структуру. Так, в фольгах как со стороны А, так и со стороны Б обнаружены темные включения на светлом фоне (рис. 1, а, б). Рентгеноспектральный микроанализ (рис. 2, а) показал, что темные включения соответствуют олову, а светлый фон – свинцу. Рентгеноструктурный анализ подтвердил, что основной фазой в фольгах припоя ПОС 40 является твердый раствор на основе свинца. На дифрактограммах данных фольг присутствуют дополнительные дифракционные отражения, принадлежащие, как показал расчет [9],  $\beta$ -Sn. Средний размер частиц  $\beta$ -Sn составляет 1,8 мкм.

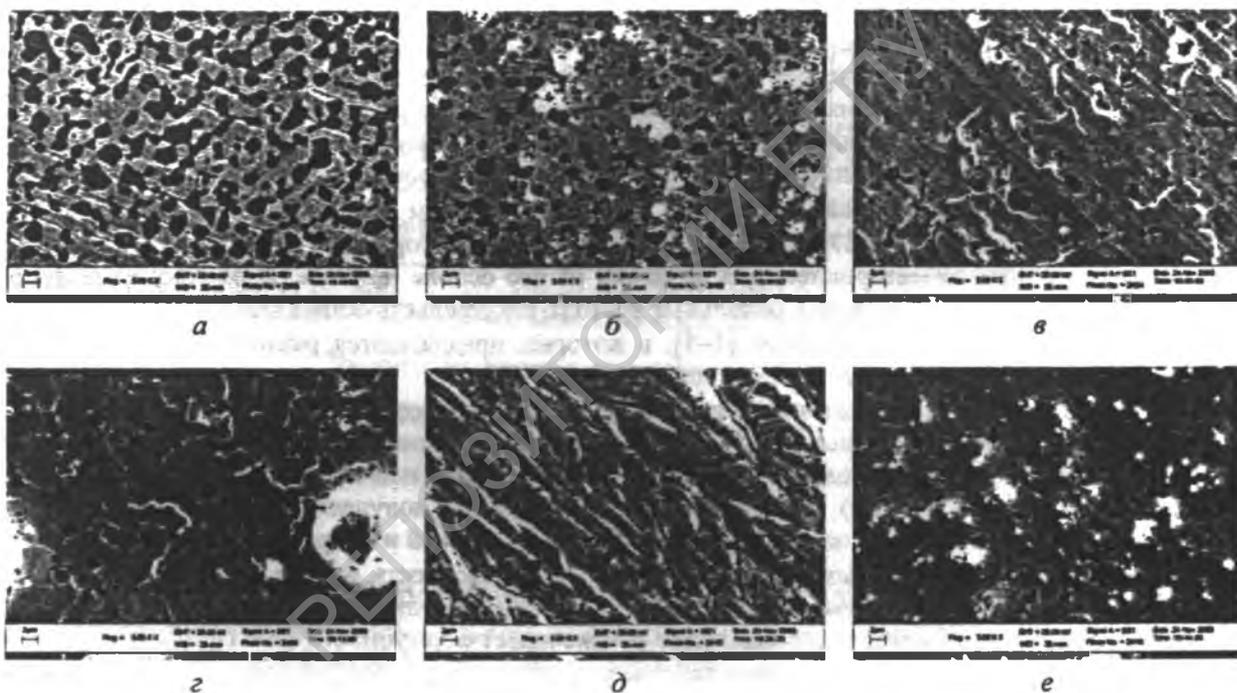


Рис. 1. Микроструктура быстрозатвердевших фольг припоев № 1 (а, б), № 2 (в, з) и № 3 (д, е)

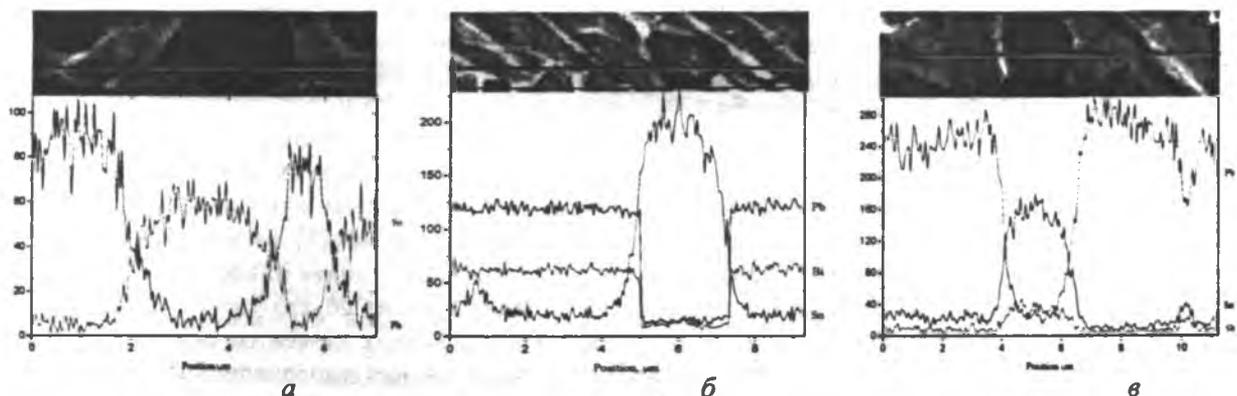


Рис. 2. Распределение компонентов в быстрозатвердевших фольгах припоев на основе свинца: а – № 1, б – № 2, в – № 3

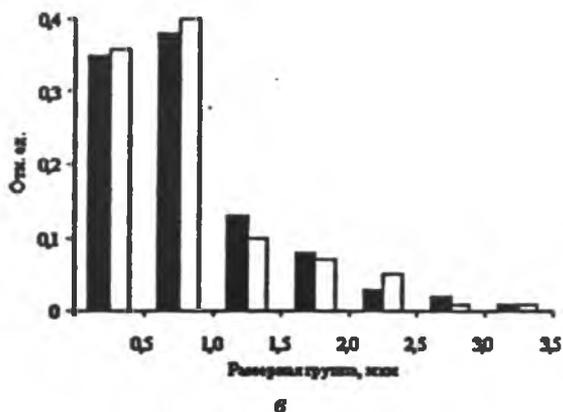
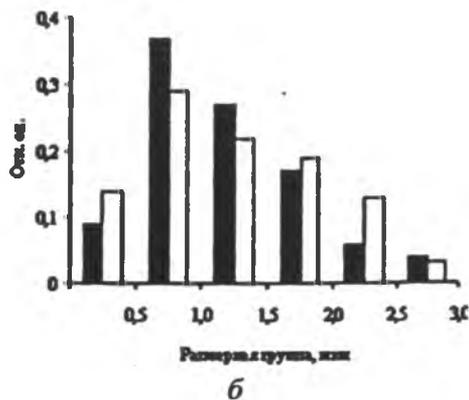
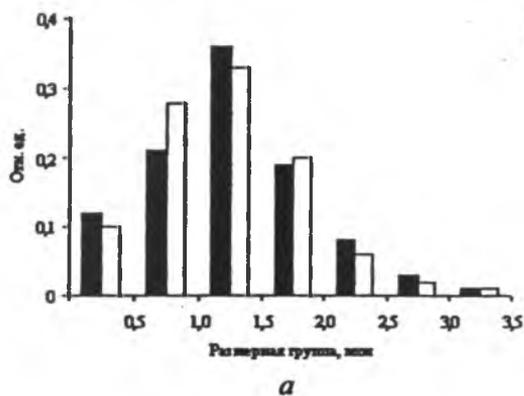


Рис. 3. Распределение частиц твердого раствора на основе  $\beta$ -Sn фольг припоев № 1 (а), № 2 (б) и № 3 (в) по размерным группам

В фольгах припоя № 2 также наблюдаются темные включения (рис. 1, в, з), принадлежащие, как следует из проведенного рентгеноспектрального микроанализа,  $\beta$ -Sn (рис. 2, б). Существование  $\beta$ -Sn подтверждено рентгеноструктурным анализом, средний размер частиц  $\beta$ -Sn составляет 0,8 мкм. Основной фазой в данном сплаве является  $\epsilon$ -фаза, стехиометрический состав которой соответствует формуле  $Pb_2Bi$  [10].

Фольги припоя № 3 также характеризуются наличием темных включений (рис. 1, д, е), соответствующих по результатам рентгеноспектрального микроанализа  $\beta$ -Sn (рис. 2, в). При этом рентгеноструктурный анализ подтвердил наличие данной фазы. Сурьма распределена в основном в частицах  $\beta$ -Sn, что целесообразно объяснить практически равными по значению атомными радиусами сурьмы и олова. Средний размер частиц  $\beta$ -Sn составляет 0,7 мкм.

Также следует отметить, что включения  $\beta$ -Sn во всех трех исследуемых припоях имеют равноосную форму. Все исследуемые фольги характеризуются наличием одного максимума на распределении частиц твердого раствора  $\beta$ -Sn по размерным группам (рис. 3). Так, для фольг припоя № 1 наибольшей долей характеризуется размерная группа 1,0÷1,5 мкм (рис. 3, а). Максимальной долей в фольгах припоев № 2 и № 3 обладают частицы размером 0,5–1,0 мкм (рис. 3, б, в).

Среди факторов, определяющих свойства материалов, большое значение имеет текстура, которая влияет на многие структурно-чувствительные свойства материалов: прочность и твердость, анизотропию упругих, электрических, магнитных и других свойств [11]. Исследуемые фольги характеризуются четко выраженной текстурой. Так, распределение полюсных плотностей дифракционных отражений, принадлежащих твердому раствору на основе свинца, указывает на формирование текстуры (111) для исследуемых припоев. Установлено, что текстура (111) выражена более четко со стороны фольги типа А, на долю данной ориентировки приходится до 70% объема фольги (табл. 1). Следует отметить, что аналогичная текстура характерна и для других сплавов на основе свинца, полученных СБЗР [12]. Также изучена текстура  $\beta$ -Sn в припое № 1: в фольгах типа А наблюдается двойная текстура (200)+(101), фольги типа Б характеризуются текстурой (211)+(301).

Тот факт, что в быстрозатвердевших свинцовых сплавах наблюдается текстура (111), является неожиданным, так как обычно текстура для литых сплавов с кубической решеткой должна быть

(100) [13]. Из плоскостей {100} и {111} наиболее плотноупакованными являются плоскости {111}, а наименьшей поверхностной энергией характеризуются плоскости {100} [14]. При затвердевании в сильно неравновесных условиях текстура определяется зернами, у которых при плоском фронте кристаллизации межфазная граница кристалл–жидкость совпадает с плоскостями, перемещающимися с наибольшей скоростью. Такими плоскостями являются плоскости {111} [15]. Вследствие этого при быстром затвердевании предпочтителен рост тех зерен, у которых плоскости {111} перпендикулярны направлению теплоотвода, формируя тем самым текстуру (111) в фольгах сплавов на основе свинца.

Таблица 1. Полюсные плотности дифракционных линий фольг припоев на основе свинца

Состав припоя	Тип фольги	Дифракционные линии					
		111	200	220	311	331	420
№ 1	А	4,5	0,9	0,1	0,1	0,2	0,2
	Б	2,1	0,6	0,7	0,9	0,8	0,9
№ 3	А	4,7	0,8	0,1	0,2	0,1	0,1
	Б	2,5	0,7	0,7	0,8	0,7	0,6

Результаты расчета параметра элементарной ячейки и микротвердости быстрозатвердевших фольг припоев на основе свинца представлены в табл. 2. Величина параметра элементарной ячейки исследуемых фольг припоев на основе свинца меньше, чем для фольг чистого свинца. Данное уменьшение связано с тем, что атомы легирующих элементов, имеющие меньший атомный радиус, чем атомы свинца, при легировании образуют твердые растворы замещения, вследствие чего происходит уменьшение величины  $a$ .

Таблица 2. Свойства быстрозатвердевших фольг припоев на основе свинца

Состав сплава	$a$ , Å	$H_p$ , МПа	
		фольга	массивный образец
Pb	4,947	52	69
ПОС 40	4,944	114	130
Pb 50 %, Bi 37,5 %, Sn 12,5 %	—	160	166
Pb 80 %, Sn 17 %, Sb 2 %	4,944	191	211

Микротвердость фольг меньше микротвердости массивных сплавов того же состава, что связано с измельчением зеренной структуры при сверхбыстрой закалке. Известно [16], что в металлах границы зерен при температуре  $T \approx 0,5 T_m$  и выше ( $T_m$  – температура плавления по шкале Кельвина) являются разупрочненными зонами и возможно зернограницное проскальзывание. Благодаря этому фольги более пластичны, чем массивные образцы.

Микротвердость исследуемых припоев значительно превышает микротвердость фольг чистого свинца (52 МПа), что целесообразно связать с действующими механизмами упрочнения. Один из механизмов упрочнения заключается в выделении частиц второй фазы, имеющих более высокие значения твердости, чем свинец. Данные частицы препятствуют скольжению дислокаций [16]. Образование твердых растворов олова, висмута и сурьмы в свинце приводят к твердорастворному механизму упрочнения.

Таким образом, технология получения припоев методом сверхбыстрой закалки позволяет улучшить их пластичность и добиться более однородной и мелкодисперсной структуры по сравнению с традиционными методами изготовления.

### Литература

1. Яковлев Г. А. Пайка материалов припоями на основе свинца // Обзоры по электронной технике. Сер. «Технология, организация производства и оборудование». М., 1978. Вып. 9.
2. Лашко С. В., Лашко Н. Ф. Пайка металлов. М., 1988.
3. Яковлев Г. А. Исследование взаимодействия сплавов на основе свинца с пористым никелем в процессе композиционной пайки // Обзоры по электронной технике. Сер. «Материалы». М., 1977. Вып. 11. С. 10–18.

4. Miyazawa Yasuyuki, Ariga Tadashi. // Mater. Trans. 2001. Vol. 42, N 5. P. 776–782.
5. Лимина Л. П., Тремба Т. С. // Адгезия расплавов и пайка материалов. 1982. № 9. С. 11–13.
6. Васильев В. А. и др. Высокоскоростное затвердевание расплава (теория, технология и материалы). / Под ред. Б. С. Митина. М., 1998.
7. Чернов В. С., Евтеев А. С., Татаринов В. А., Пащенко В. Е., Хозиков В. С. // Металловедение и термическая обработка металлов. 1992. № 9. С. 28–30.
8. Мирошниченко И. С. Закалка из жидкого состояния. М., 1982.
9. Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу. М., 1961.
10. Савицкий Е. М., Ефимов Ю. В., Йенн Г., Штапф И. // Металлы. 1982. № 3. С. 93–98.
11. Penelle R. Texture of Materials / Ed. by G. Gottstein, K. Lucke. Aachen, Germany, 1978, Vol. 2 P. 44–51.
12. Шахрай О. Н., Шепелевич В. Г. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2004. № 3. С. 32–34.
13. Баррет Ч. С., Массальский Т. Б. Структура металлов / Пер. с англ. В II частях. М., 1984. Ч. II.
14. Broughton J. Q., Abraham F. F. // Chem. Phys. Lett. 1980. Vol. 71. P. 456–461.
15. Li D. Y., Szpunar J. A. // J. of Mater. Sci. Lett. 1994. Vol. 13. P. 1521–1523.
16. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. М., 1972.

*O. N. BELAYA, V. G. SHEPELEVICH*

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF LEAD BASE SOLDERS,  
PREPARED BY RAPID SOLIDIFICATION FROM MELT**

**Summary**

Results of research of structure and properties of lead based solders, prepared by rapid solidification from melt, where presented. Rapidly solidified foils of lead were characterized by formation of microcrystalline structure and texture (111). Foils of lead solders have microhardness value less than microhardness of the samples received by traditional methods.