

в нанодисперсном диапазоне (менее 0,15 мкм): значительно уменьшается максимальный размер частиц (менее 150 мкм), и агрегаты представлены в основном тремя фракциями. Растирание в агатовой ступке приводит к изменению дифференциальной кривой распределения и увеличению количества частиц с размером от 10 до 50 мкм. Более эффективна диспергация агрегатов в планетарной мельнице: максимальный размер частиц не превышает 10 мкм, значительно увеличивается содержание частиц менее 5 мкм и нанодисперсного диапазона.

Установлены закономерности изменения свойств синтезированных образцов в зависимости от вида и количества модификаторов. Синтезированы и исследованы керамические материалы на основе феррита висмута с использованием модифицирующей добавки  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  в количестве 0,1 мол. доли методами традиционного спекания и химическим синтезом. Получены функциональные керамические покрытия на микропористых подложках с использованием различных вариантов подготовки исходной керамической субстанции необходимого микро- и нанодисперсного диапазона.

При разных методах их нанесения разработанные материалы могут использоваться для изготовления различных компонентов электронной техники [3], в т. ч. для функциональных покрытий микропористых структур, используемых для изготовления средств автоматизации и автоматики.

#### Литература

1. Макоед, И.И. Получение и физические свойства мультиферроиков: монография / И.И. Макоед; Брест. гос. ун-т имени А.С. Пушкина. – Брест : БрГУ, 2009. – 181 с.
2. Бабич, В.М. Технология производства ферритов и радиокерамики: учеб. пособие для вузов / В.М. Бабич. – М. : Высшая школа, 1984. – 223 с.
3. Магнитная керамика на основе модифицированного феррита висмута / Р.В. Головач, О.А. Сергиевич, Ю.С. Шинелько, Е.М. Дятлова // 71-я Всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием: сб. материалов конф., Ярославль, 18 апр. 2018 г. в 3 ч. [Электр. ресурс]. – Ярославль : Издат. дом ЯГТУ, 2018. – Ч. 1. – С. 100–103.

УДК 539.2:669.(1-8)

### МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ ОЛОВО–СВИНЕЦ, ПОЛУЧЕННОГО ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ЗАТВЕРДЕВАНИЕМ

Гольцев М.В.<sup>1</sup>, Белая О.Н.<sup>1</sup>, Иванов А.А.<sup>1</sup>, Шепелевич В.Г.<sup>2</sup>, Гусакова С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Сплавы на основе системы олово-свинец характеризуются высокими технологическими параметрами и используются в различных отраслях промышленности. На их основе изготавливаются легкоплавкие припои, подшипниковые сплавы, сплавы для кабельных оболочек, элементы электрических цепей и др. В последние десятилетия успешно развиваются нетрадиционные технологии получения материалов, к которым относятся и высокоскоростное затвердевание расплава, позволяющее достичь скоростей охлаждения выше  $10^5$  [1]. Структура сплавов, получаемых при сверхвысоких скоростях охлаждения, отличается от структуры, образующей в сплавах при малых и средних скоростях охлаждения. В связи с этим является актуальным исследование структуры и физических свойств сплавов системы олово-свинец, используемых в промышленности, например, эвтектического сплава.

Эвтектический сплав (Sn – 27 ат. % Pb) изготовлен сплавлением компонентов в кварцевой ампуле. Расплав сначала заливался в графитовую изложницу и затвердевал в форме стержня длиной 10 см и поперечным сечением  $3 \times 5$  мм<sup>2</sup>. Кусочек

сплава массой ~ 0,15 г расплавляли и инжигировали на внутреннюю полированную поверхность быстровращающегося медного цилиндра. Расплав растекался тонким слоем на поверхности кристаллизатора и затвердевал в виде фольги длиной до 10 см и шириной до 10 мм [1]. При исследовании использовались фольги толщиной 30 ... 100 мкм. Исследование микроструктуры фольг быстрозатвердевшего сплава выполнено на растровом электронном микроскопе LEO-1455 VP (Германия) с рентгеноспектральным микроанализатором Aztec Energy Advanced X-Max80 (Великобритания), позволяющим определить элементный состав и распределение компонентов, а также с дифракционной приставкой фазового анализа HKL EBSD Premium System Channel 5 (Великобритания), благодаря которой исследована зеренная структура фольг. Для определения фазового состава и текстуры применялся рентгеноструктурные исследования, проводимые на дифрактометре ДРОН-4. Полусная плотность дифракционных линий рассчитывалась по методу Харриса [2]. Исследование микроструктуры проводилось со стороны А фольги, контактирующей с кристал-

лизатором, и с ее противоположной стороны *B*. Определение параметров микроструктуры проведено методом случайных секущих [3]. Испытание растяжением выполнялось на универсальной разрывной машине Testometric M350-10Ct при комнатной температуре. Измерения микротвердости  $H_{\mu}$  фольг выполнено на приборе ПМТ-3. Погрешность измерения  $H_{\mu}$  составила 4 %.

Изображение микроструктуры поперечного сечения быстрозатвердевшей фольги сплава Sn – 27 ат. % Pb, полученное растровым электронным микроскопом, представлено на рис. 1. Наблюдаются светлые и темные участки.

На рентгенограмме быстрозатвердевшей фольги сплава наблюдаются дифракционные линии олова (200, 101, 220, 211 и др.) и свинца (111, 200, 220, 222 и др.). С помощью рентгеноспектрального микроанализа установлено, что в белых участках находится свинец, а в черных олово.

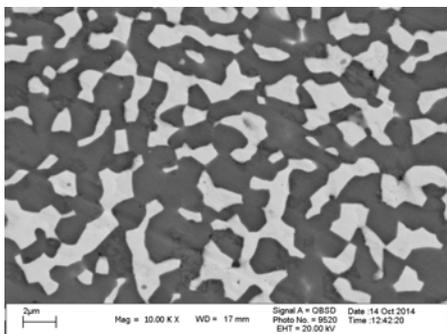


Рисунок 1 – Микроструктура поперечного сечения фольги сплава Sn – 27 ат. % Pb

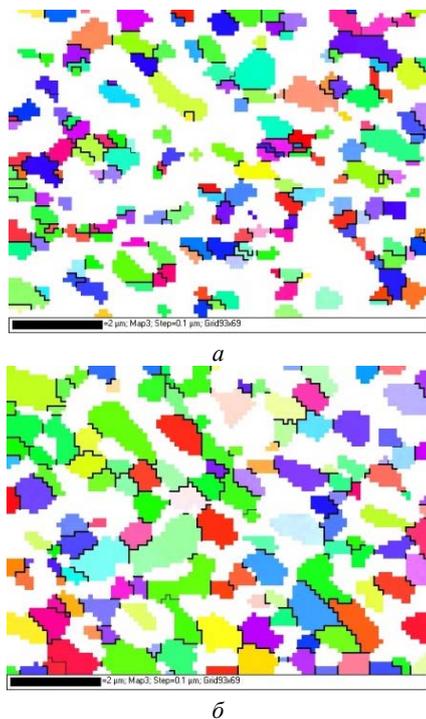


Рисунок 2 – Зеренная структура свинца (а) и олова (б)

Средняя длина хорд свинца  $d_{Pb} = 0,8$  мкм, олова  $d_{Sn} = 1,8$  мкм. Удельная поверхность межфазной границы  $S = 1,2$  мкм<sup>-1</sup>.

Изображение зеренной структуры выделений свинца и олова быстрозатвердевшей фольги сплава Sn – 27 ат. % Pb приведено на рис. 2. Черным жирным линиям на сечениях фаз соответствуют высокоугловые границы (ВУГ), а тонким – малоугловые границы (МУГ).

Установлено, что фольги имеют микрокристаллическую структуру (рис.2). Средняя длина на сечениях зерен свинца и олова менее 0.8 мкм и 1,8 мкм соответственно. Удельная поверхность границ зерен не превышает 0,3 мкм<sup>-1</sup>. В быстрозатвердевших фольгах формируется текстура (111) свинца и (100) олова. Ее образование обусловлено тем, что соответствующие кристаллографические плоскости являются наиболее плотнотупакованными.

Изменения межплоскостных расстояний  $d_{111}$  свинца и  $d_{100}$  олова при выдержке при комнатной температуре (20°C) в течение 26 ч находятся в пределах погрешности измерения. При этом наблюдалось уменьшение ширины дифракционных линий 111 свинца и 100 олова на 30 и 40 % соответственно, что обусловлено уменьшением микродеформаций из-за улучшения структуры межфазных границ и границ зерен.

Выполнены измерения микротвердости  $H_{\mu}$  быстрозатвердевших фольг и массивных образцов эвтектики. Микротвердость фольг (25 МПа) меньше  $H_{\mu}$  массивных образцов (205 МПа), полученных при скорости охлаждения 10<sup>2</sup> К/с. Наблюдается монотонное увеличение  $H_{\mu}$  фольг от 25 МПа до 34 МПа за 26 ч. Аналогичные изменения микротвердости наблюдались ранее для фольг эвтектических сплавов бинарных систем Sn – Bi, Bi – In и In – Sn, полученных также высокоскоростным затвердеванием [1].

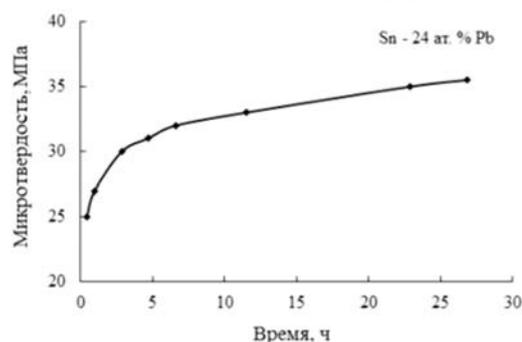


Рисунок 4 – Зависимость микротвердости фольги сплава Sn – 27 ат. % Pb от времени выдержки при комнатной температуре

Комнатная температура для исследуемого сплава является высокой. В этом случае границы зерен являются разупрочненными зонами [10]. Пластическая деформация сплава будет обусловлена скольжением внутри зерен и зернограницным проскальзыванием. Поэтому микротвер-

дость фольги меньше микротвердости массивных образцов. Однако благодаря диффузионным процессам происходит улучшение структуры границ зерен. Доля зернограничного проскальзывания в общей величине деформации уменьшается, что и является причиной увеличения микротвердости фольг в процессе выдержки при комнатной температуре.

Испытания фольг растяжением проведены через 1 сутки после изготовления фольги. На кривой растяжения сначала наблюдается увеличение напряжения с ростом деформации (до  $\varepsilon_1 = 4\%$ ), а затем его уменьшение. Максимальное напряжение  $\sigma_{\max} = 8,6$  МПа. Достижимое макси-

мальное удлинение  $\varepsilon_{\max} = 100\%$ . Кривая растяжения зависит от времени выдержки фольги при комнатной температуре с момента ее изготовления. С увеличением времени выдержки фольги до 60 суток происходит увеличение  $\sigma_{\max}$  до 16 МПа и уменьшение  $\varepsilon_{\max}$  до 43%.

#### Литература

1. Шепелевич В.Г. Быстрозатвердевшие легкоплавкие сплавы. – Минск : БГУ, 2015. – 192 с.
2. Русаков А.А. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 480 с.
3. Салтыков С.А. Стереология в металловедении. – М. : Металлургия, 1976. – 272 с.

УДК 669.(6-8):539.2

### ВРЕМЕННАЯ И ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТИ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ СПЛАВА Sn-Zn-Bi-In

Гусакова О.В.<sup>1</sup>, Шепелевич В.Г.<sup>2</sup>, Гусакова С.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова БГУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Эвтектические сплавы широко применяются в различных отраслях промышленности, в частности в электронной промышленности для пайки. Миниатюризация изделий электронной промышленности приводит к необходимости изготовления материалов припоев в виде дисперсных порошков, тонких проволок, фольг [1]. Перспективным методом изготовления припоев в виде фольг является сверхбыстрая закалка из расплава (СБЗР). Припой, полученные этим методом имеют ряд преимуществ, по сравнению с массивными. Использование фольг позволяет уменьшить расход материала, осуществлять пайку тонких изделий. Высокая химическая однородность материала обеспечивает сужение температурного интервала плавления и кристаллизации и уменьшение времени нагрева для получения гомогенного расплава, что снижает деструктивное влияние высокой температуры на элементы пайки [2]. Однако для низкоплавких эвтектических сплавов микроструктура и свойства зависят не только от условий, при которых протекает затвердевание, но и от времени выдержки при комнатной температуре после изготовления. Для легкоплавких эвтектических сплавов при нормальных условиях гомологическая температура имеет значение около 0,7. В этом случае интенсивно протекают диффузия и структурно-фазовые превращения. В связи с этим исследования изменения микроструктуры быстрозатвердевших фольг эвтектических сплавов Sn – Zn – Bi – In в процессе старения являются актуальными.

Фольги сплава получались при затвердевании слоя расплава, растекшегося по внутренней поверхности вращающегося медного кристаллизатора. При толщине исследованной фольги 50-60 мкм

скорость охлаждения расплава  $\approx 10^5$  К/с. Исследовалась микроструктура поверхностей фольги через 30 минут, 5 и 25 часов, а также поперечного сечения фольги при старении в течение 50, 100 и 700 часов и после изохронного отжига при 60 и 100 градусах в течение 20 минут. На рисунке 1 приведена микроструктура поверхности фольги, прилегающей к кристаллизатору (А) и свободно затвердевающей поверхности (В) фольг после выдержки при комнатной температуре.

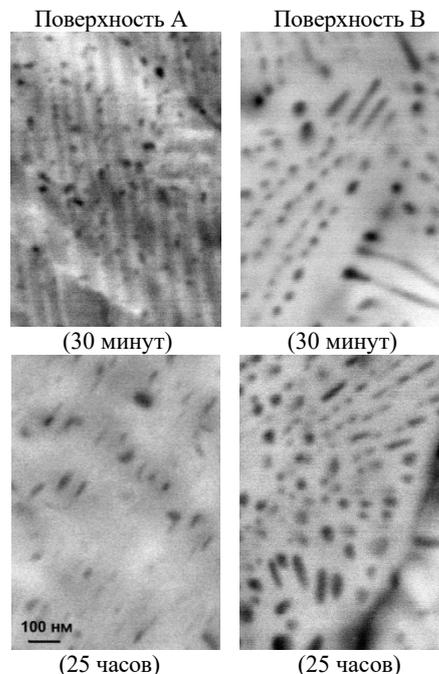


Рисунок 1 – Микроструктура поверхностей быстрозатвердевшей фольги сплава Sn – 8,0 мас. % Zn – 3,0 мас. % Bi – 4,0 мас. % In