

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 538.9:669.45

**БЕЛАЯ**  
**Ольга Николаевна**

**СТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ ФОЛЫГ СПЛАВОВ  
СВИНЦА, ПОЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ  
ЗАТВЕРДЕВАНИЕМ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Минск. 2008

Работа выполнена в Белорусском государственном университете

Научный руководитель – **Шепелевич Василий Григорьевич**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор,  
Белорусский государственный университет,  
физический факультет,  
профессор кафедры физики твердого тела

Официальные оппоненты: **Королик Альбина Семеновна**,  
доктор физико-математических наук,  
ГНУ «Институт прикладной физики НАН  
Беларуси»,  
главный научный сотрудник

**Тульев Валентин Валентинович**,  
кандидат физико-математических наук,  
УО «Белорусский государственный  
технологический университет»,  
доцент кафедры физики

Оппонирующая организация – УО «Белорусский государственный  
педагогический университет  
им. Максима Танка»

Защита состоится 16 июня 2008 года в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите  
диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном университете по  
адресу: 220030, г. Минск, ул. Ленинградская, 8, корпус юридического  
факультета, ауд. 407.

Телефон ученого секретаря 8-017-209-55-58.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского  
государственного университета.

Автореферат разослан « 14 » мая 2008 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
кандидат физико-математических наук,  
доцент



В.Ф. Стельмах

В современном материаловедении остро стоит проблема получения новых высокоэффективных материалов. Одним из наиболее перспективных направлений современного материаловедения является использование сверхвысоких скоростей охлаждения расплава (выше  $10^5$  К/с) при затвердевании. Прогнозирование свойств материалов и выявление влияния технологических параметров на их структуру и физические характеристики может существенно снизить затраты на разработку технологий получения новых материалов с заданными свойствами. Возрастает интерес к материалам с невысокой температурой плавления, к числу таких металлов относится и свинец. Он обладает рядом ценнейших свойств, обеспечивающих применение его в самых различных областях промышленности, в первую очередь в машиностроении, электронике и электротехнике. В связи с широким применением свинцовых сплавов повышаются требования к их физико-механическим, химическим свойствам и структуре. При введении легирующих добавок в чистый свинец происходят структурные изменения, которые определяют его физико-механические свойства. Поэтому представляет интерес изучить влияние легирования на прочностные свойства и пластичность свинца в условиях высокоскоростного затвердевания. В связи с этим исследования по установлению закономерностей и особенностей формирования структуры в свинце и его сплавах при высокоскоростной кристаллизации, влияние структуры на механические свойства, изменение структуры и свойств, связанные с фазовыми превращениями и рекристаллизационными процессами, являются актуальными. Кроме того, актуальность проведения исследований в этой области с точки зрения практического применения обусловлена необходимостью установления оптимальных режимов получения технически важных материалов.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Связь работы с крупными научными программами, темами.** Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006–2010 года: управление структурой и свойствами кристаллических и неупорядоченных систем, новые высокоэнергетические технологии обработки материалов, новые специализированные материалы.

Тема диссертационной работы утверждена на заседании кафедры физики твердого тела Белорусского государственного университета (протокол № 5 от 03.01.2003 г.) и соответствует специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Тема диссертации включена в утвержденные научные планы Белорусского государственного университета и выполнена в рамках:

- Государственной программы ориентированных фундаментальных исследований «Кристаллофизика» (задание «Изменение структурно-фазового состояния металлов и сплавов в неравновесных условиях»), № гос. рег. 20011971, 2001–2005 г.г.;

- Государственной комплексной программы научных исследований «Физика кристаллических неупорядоченных и атомно-молекулярных структур (Кристаллические и молекулярные структуры)» (задание «Получение, экспериментальное исследование и комплексное моделирование сплавов с особыми свойствами»), 2006–2010 г.г.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является установление закономерностей и особенностей формирования структуры и изменения микротвердости фольг сплавов на основе свинца при высокоскоростном затвердевании и последующей термической обработке.

Для реализации поставленной цели выполнялись следующие задачи:

- изготовление сплавов на основе свинца и дальнейшее получение из них быстрозатвердевших фольг сплавов свинца, содержащих Cd, In, Sn, Sb, Bi;
- исследование фазообразования и распределения основных компонентов в быстрозатвердевших фольгах сплавов на основе свинца;
- исследование влияния легирования на зеренную структуру, текстуру и субструктуру фольг свинца;
- исследование текстуры и микротвердости фольг сплавов на основе свинца, полученных при различных режимах затвердевания;
- изучение закономерностей изменения фазового состава и зеренной структуры в процессе термической обработки;
- изучение закономерностей и особенностей изменения микротвердости фольг исследуемых сплавов в процессе изохронного и изотермического отжигов.

В качестве объекта исследования использовались быстрозатвердевшие фольги свинца и бинарных сплавов на его основе: Pb–X ат. % Cd ( $X=2+50$ ); Pb–X ат. % In ( $X=5+30$ ); Pb–X ат. % Sn ( $X=1+60$ ); Pb–X ат. % Sb ( $X=2+50$ ); Pb–X ат. % Bi ( $X=2+40$ ); а также технические сплавы, используемые в качестве припоев: ПОС 40, 50 вес. % Pb–37,5 вес. % Bi–12,5 вес. % Sn, 81 вес. % Pb–17 вес. % Sn–2 вес. % Sb. Выбор указанных легирующих элементов основан на том, что они находятся в разных группах периодической таблицы Д.И. Менделеева и, следовательно, их влияние на структуру и свойства свинца различно, кроме того, указанные элементы широко используются при изготовлении промышленных сплавов на основе свинца.

Объект исследования (свинец и сплавы на его основе) обладает рядом ценнейших свойств, обеспечивающих его применение в первую очередь в машиностроении, электронике и электротехнике. На основе свинца разработаны сплавы для пластин аккумуляторов, подшипников, припоев и оболочек кабелей.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Впервые обнаруженные закономерности и особенности формирования структуры быстрозатвердевших фольг свинца и его сплавов с кадмием, индием, оловом, сурьмой и висмутом, и промышленных сплавов, состоящие:

- в образовании микрокристаллической структуры со средним размером зерна менее 16 мкм, уменьшающимся с увеличением концентрации легирующего элемента до нескольких микрон;

- в формировании текстуры (111) в фольгах, полученных методом центробежного охлаждения, и двойной текстуры (100)+(111) в фольгах, полученных спиннингованием, в отличие от массивных образцов, в которых формируется текстура (100);

- в образовании в бинарных сплавах свинца с кадмием, сурьмой, оловом и промышленных многокомпонентных сплавах однородно распределенных дисперсных выделений второй фазы, что существенно улучшает их качество.

Модель кристаллизации бинарных сплавов свинца с кадмием, сурьмой и оловом, учитывающая сверхвысокие скорости охлаждения и значительное переохлаждение расплавов, приводящая к захвату легирующих элементов кристаллизующейся фазой с последующим распадом пересыщенного твердого раствора или квазиэвтектическому превращению, объясняющая формирование однородного распределения дисперсных выделений второй фазы в объеме фольги.

2. Впервые обнаруженные закономерности изменения структуры быстрозатвердевших фольг свинца и его сплавов при изохронном и изотермическом отжигах, состоящие в укрупнении зеренной структуры фольг свинца и его сплавов с индием при нагреве выше 80 °С в процессе протекания собирательной и вторичной рекристаллизации при сохранении текстуры (111), и укрупнении частиц второй фазы в результате коалесценции, контролируемой объемной диффузией для фольг сплавов системы свинец-кадмий и переходом атомов через межфазную границу для фольг сплавов системы свинец-сурьма, что имеет практическое значение при определении их режимов термической обработки.

3. Впервые обнаруженные закономерности

- влияния легирующих элементов на микротвердость фольг свинца, заключающиеся в монотонном ее увеличении при легировании индием (до 30 ат. %) и висмутом (до 20 ат. %), обусловленном твердорастворным механизмом упрочнения, и немонотонной ее зависимости при легировании кадмием

сурьмой и оловом, связанной с действием твердорастворного и дисперсионного механизмов упрочнения,

- изменения микротвердости при термическом воздействии, состоящие в ее увеличении при отжиге в результате укрупнения зеренной структуры в ходе протекания рекристаллизационных процессов и ее уменьшении вследствие укрупнения дисперсных частиц второй фазы при их коалесценции, что может быть использовано при определении режимов термической обработки, оптимизации структуры и механических свойств полученных высокоскоростным за твердением фольг.

**Личный вклад соискателя.** Экспериментальная и теоретическая часть работы по получению сплавов и быстрозатвердевших фольг сплавов свинца, исследованию их зеренной и субзеренной структуры, фазообразования и микротвердости, влиянию на них термической обработки, обработке полученных результатов и формулированию выводов была проделана соискателем. Работа выполнялась под руководством доктора физико-математических наук, профессора Шепелевича Василия Григорьевича, которым была сформулирована научная идея исследования, принималось участие в обсуждении результатов, решались организационные вопросы. Техническая поддержка в проведении металлографических исследований была оказана соавтором отдельных работ А.Г. Анисович. Соавтор В.В. Лозенко предоставляла данные по фольгам сплавов на основе цинка, а также участвовала в обсуждении полученных результатов.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, 2003 г.); Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении» (г. Минск, 2003 г.); Международной научно-технической конференции «Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин» (г. Новополоцк, 2003, 2005 г.г.); Республиканской научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов «Физика конденсированного состояния» (г. Гродно, 2003, 2004 г.г.); Международной научно-технической конференции «Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий» (г. Обнинск, 2003, 2005 г.г.); Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование» (г. Могилев, 2003 г.); Международной научно-технической конференции «Ресурсо- и энергосберегающие технологии промышленного производства» (г. Витебск, 2003 г.); Международной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии: порошковая ме-

таллургия, композиционные материалы, защитные покрытия» (г. Минск, 2004 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Быстрозакаленные материалы и покрытия» (г. Москва, 2004, 2005 г.г.); Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, 2004, 2005 г.г.); Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела» (г. Минск, 2005 г.); Международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (г. Минск, 2006, 2007 г.).

Результаты диссертационной работы обсуждались на научных семинарах кафедры физики твердого тела Белгосуниверситета (2004-2006 г.г.).

**Опубликованность результатов диссертации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 22 научных работах, в том числе 6 статей в рецензируемых научных журналах общим объемом около 1,6 авторских листов, 4 статьи в сборниках научных трудов, 8 статей в сборниках материалов научных конференций и 4 тезиса конференций. Общий объем опубликованных работ составляет 3,8 авторских листа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, библиографического списка и приложения.

Полный объем диссертации составляет 135 страниц, в том числе 38 рисунков на 26 страницах, 21 таблица на 9 страницах и приложение на 2 страницах. Библиографический список включает 201 наименование на 14 страницах, список опубликованных работ по теме диссертации содержит 22 наименования на 3 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В первой главе дан обзор литературы по исследованию структуры и свойств свинца и сплавов на его основе.

Рассмотрены общая характеристика сплавов свинца и тенденции их получения и применения, а также влияние легирования и условий кристаллизации на структуру и свойства сплавов на основе свинца. Показано, что структура и свойства сплавов на основе свинца, полученных традиционными технологиями, изучены в достаточной степени. Однако свойства исследуемых сплавов существенным образом зависят от условий получения. Несмотря на большое количество публикаций, посвященных быстрозатвердевающим материалам, влияние условий получения на структуру и свойства свинцовых сплавов изучено не в достаточной степени. Кроме того, одним из способов модификации структуры и свойств металлов является их рациональное легирование. В литературе прак-

тически отсутствуют данные по влиянию легирования свинца такими элементами как олово, сурьма, кадмий, индий и висмут в условиях высокоскоростного затвердевания на их структуру и свойства, что представляет интерес в связи с широким распространением указанных сплавов в различных областях промышленности, в первую очередь в машиностроении, электронике и электротехнике.

Отмечено, что сплавы, полученные методом высокоскоростного затвердевания, находятся в неустойчивом состоянии и термообработка может привести в той или иной степени к изменению их структуры и свойств. Однако данные о процессах, происходящих при термообработке свинца и сплавов на его основе, полученных при скоростях охлаждения порядка  $10^6$  К/с, в литературе отсутствуют.

Показано, что исследуемые сплавы на основе свинца, полученные методом высокоскоростного затвердевания, представляют практический интерес как материалы, используемые в качестве электродов, припоев, при изготовлении аккумуляторных пластин, для нанесения защитных покрытий.

На основании анализа литературных данных, рассмотренных в первой главе, сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе приводится методика получения быстрозатвердевших фольг и описание методов их исследования.

Для изготовления сплавов использовался свинец, имеющий чистоту не хуже 99,99 %. Легирование свинца проводилось кадмием, индием, оловом, сурьмой и висмутом, чистота которых не хуже 99,99 %. Бинарные сплавы изготавливались сплавлением компонентов в кварцевых ампулах. После кристаллизации из получившегося слитка вырезалась средняя часть, которая использовалась для приготовления фольг. В работе использовались свинец и следующие сплавы на его основе: Pb-X ат. % Cd (X=2, 5, 10, 20, 28, 35, 42, 50); Pb-X ат. % In (X=5, 10, 15, 20, 25, 30); Pb-X ат. % Sn (X=1, 2, 5, 10, 20, 30, 35, 40, 50, 60); Pb-X ат. % Sb (X=2, 5, 10, 15, 18, 20, 25, 30, 35, 40, 50); Pb-X ат. % Bi (X=2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 33, 40); а также технические сплавы, используемые в качестве припоев: ПОС 40 ((39–41) масс. % Sn, (1,5–2,0) масс. % Sb, Pb – остальное); 50 мас. % Pb–37,5 мас. % Bi–12,5 мас. % Sn; 81 мас. % Pb–17 мас. % Sn–2 мас. % Sb.

Быстрозатвердевшие фольги получались двумя способами: 1) методом центробежного охлаждения, при котором кристаллизация капли расплава осуществлялась на внутренней поверхности медного полого цилиндра; 2) методом спиннингования, при котором кристаллизация капли расплава осуществлялась на внешней поверхности медного полого цилиндра. Линейная скорость вращения поверхности цилиндра 15 м/с. Для исследования использовались фольги



толщиной 30...80 мкм. Скорость охлаждения расплава составляла порядка  $10^6 \dots 10^7$  К/с.

Наблюдение топографии поверхности и поперечных срезов исследуемых фольг осуществлялось с помощью растрового электронного микроскопа марки LEO 1455VP фирмы «Карл Цейсс», рентгеноспектральный микроанализ проводился с использованием энергодисперсного SiLi-полупроводникового детектора фирмы «Röntec» (Германия). Металлографические исследования проводились с помощью металлографического комплекса МГК-1. Травление предварительно полированных образцов сплавов на основе свинца велось в растворе уксусной кислоты в чередовании с легкой полировкой на сукне. Рентгеноструктурный анализ выполнен на дифрактометре ДРОН-3 в медном излучении. Микротвердость фольг измерялась с помощью ПМТ-3. Исследуемые образцы подвергались изохронному и изотермическому отжигам.

**Третья глава** диссертационной работы посвящена изучению фазового состава, зеренной и субзеренной структуры фольг свинца и его сплавов, а также выявлению влияния легирования на микротвердость фольг свинца.

Исследование вида поверхности фольг свинца и его сплавов показало, что сторона фольги, прилегающая к кристаллизатору, имеет гладкую поверхность и зеркальный вид. Противоположная сторона, контактирующая в процессе кристаллизации с атмосферой, имеет неровности в виде впадин и бугорков. На данной поверхности для сплавов свинца формируется ячеистая структура, размеры ячеек находятся в пределах 0,5...3 мкм. При этом следует отметить, что в фольгах чистого свинца образование ячеистой структуры не обнаружено. При кристаллизации слоя, прилегающего к кристаллизатору, происходит выделение теплоты, которая уменьшает градиент температуры и скорость охлаждения последующих слоев фольги. Кроме того, происходит теплоотдача с поверхности, контактирующей с атмосферой, что обуславливает появление в тонком слое, прилегающем к этой поверхности, градиента температуры, направленного против направления роста кристаллической фазы. Поэтому существует слой расплава у поверхности, контактирующей с атмосферой, в котором среднее значение градиента температуры близко к нулю. В этом тонком слое создаются условия для возникновения флуктуаций энергии и концентрации легирующего элемента, которые и обуславливают формирование ячеистой структуры.

Обнаружено, что основной фазой фольг свинца, легированного Cd, In, Sn, Sb и Bi (до 20 ат. %), является твердый раствор на основе свинца. При концентрации кадмия 5 ат. % и более, олова и сурьмы 10 ат. % и более в фольгах присутствуют однородно распределенные выделения второй фазы. Твердые растворы на основе свинца в быстрозатвердевших фольгах сплавов, содержащих кадмий, сурьму и олово, не являются пересыщенными из-за их низкой темпера-

туры плавления в отличие от твердых растворов алюминия и цинка, полученных тем же методом [1–3]. Исходя из того, что сплавы с различными концентрациями легирующих элементов характеризуются отличными по размерам выделениями вторых фаз, а также различными распределениями по размерным группам, можно предположить, что механизм их образования различен. В связи с этим разработана модель образования частиц второй фазы при высокоскоростном затвердевании.

Системы Pb–Cd, Pb–Sn, Pb–Sb относятся к эвтектическим, их диаграмма состояния схематически изображена на рисунке 1. При концентрациях легирующего элемента ( $C_1$ ) близких к предельной растворимости фазовое превращение происходит по следующей схеме:  $L(C_1) \rightarrow \alpha_n(C_1) \rightarrow \alpha(C'_1) + \beta(C'_\beta)$ . В этом случае выделяемые частицы второй фазы  $\beta$  являются вторичными.

Зарождение частиц второй фазы при концентрациях легирующих элементов, близких к их предельной растворимости в свинце, является гетерогенным. Гетерогенное зарождение связано с образованием зародышей новой фазы преимущественно на определенных местах, таких как границы зерен, дислокации, дефекты упаковки, скопления вакансий и др. Фольги сплавов систем Pb–Cd, Pb–Sn и Pb–Sb имеют микрокристаллическую структуру. Как показали металлографические исследования, около 70 % зерен в данных фольгах приходится на три соседние размерные группы, то есть можно говорить об однородном распределении зерен по размерам. В данных условиях кристаллизации также происходит однородное распределение дислокаций, дефектов упаковки и скоплений вакансий. В связи с вышесказанным распределение частиц второй фазы в условиях высокоскоростного затвердевания является однородным.

При концентрациях легирующих элементов, близких к эвтектическим, происходит образование квазиэвтектической структуры:  $L(C_2) \rightarrow \alpha(C_2) + \beta(C'_\beta)$ . В этом случае выделяемые частицы второй фазы  $\beta$  являются первичными.

Зарождение частиц второй фазы происходит следующим образом. В случае возникновения флуктуации по основному элементу (образования твердого раствора на основе свинца), наблюдается обеднение соседних областей свинцом и соответственно обогащение их легирующим элементом. В обогащенных легирующим элементом областях образуются твердые растворы на основе ле-

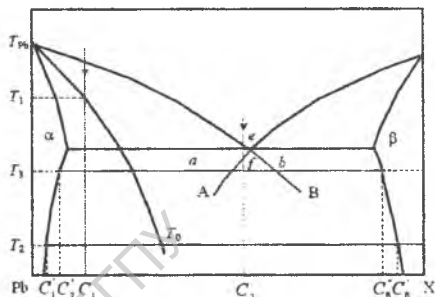
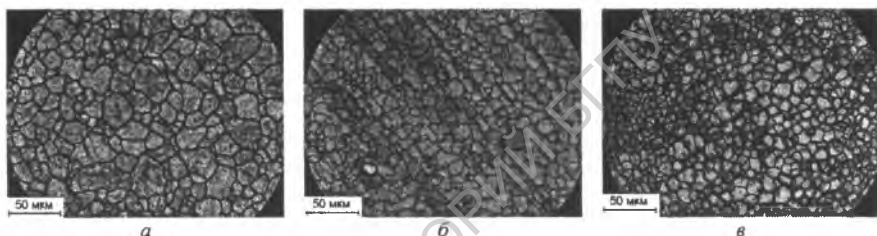


Рисунок 1 - Диаграмма состояния бинарных сплавов с эвтектикой

гирующего элемента, то есть происходит зарождение первичных фаз непосредственно из расплава. В свою очередь выделения первичных фаз легирующего элемента окружаются обогащенными свинцом областями, в которых происходит выделение твердого раствора на основе свинца и так далее. Таким образом происходит однородное распределение фаз в сплавах при концентрациях легирующих элементов, близких к эвтектическим.

Металлографические исследования показали, что фольги свинца имеют микрокристаллическую структуру с размером зерна порядка 16 мкм. Легирование приводит к измельчению зеренной структуры до 5 мкм (рисунок 2). В условиях высокоскоростного затвердевания за счет создания глубокого переохлаждения расплава происходит увеличение скорости зародышеобразования, что приводит к измельчению зеренной структуры сплавов свинца.



*а* – Pb; *б* – Pb–5 ат. % In; *в* – Pb–5 ат. % Sn

### Рисунок 2 - Микроструктура исходных фольг свинца и его сплавов

Распределение полюсных плотностей дифракционных линий указывает, что в фольгах, полученных центробежным охлаждением, формируется текстура (111), в фольгах, полученных спиннингованием, формируется текстура (100)+(111). Энергетический барьер перемещения межфазной границы, совпадающей с плоскостью {111} меньше, чем для межфазной границы, совпадающей с другими плоскостями. Вследствие этого при быстром затвердевании предпочтительнее растут те зерна, у которых плоскости {111} перпендикулярны направлению теплового потока, формируя тем самым текстуру (111). Скорости охлаждения расплавов, инжектируемых на внутреннюю и внешнюю поверхности цилиндра, различаются, более низкие скорости охлаждения расплава при спиннинговании приводят к появлению компонентов текстуры (100). По этой причине в фольгах, полученных спиннингованием, формируется двойная текстура (100)+(111).

Исследование структуры фольг припоев на основе свинца показало, что фольги припоя ПОС 40 имеют двухфазную структуру с однородно распреде-

ленными выделениями второй фазы  $\beta$ -Sn в отличие от промышленных припоев, а также припоев, полученных со скоростью охлаждения 0,1 К/с.

Микротвердость фольг свинца (51,7 МПа) меньше микротвердости его массивного образца (69,2 МПа). Известно, что в металлах при температурах  $T \approx 0,5 T_m$  и выше ( $T_m$  – температура плавления по шкале Кельвина) упрочняющий эффект границ зерен ослабевает и возможно зернограничное проскальзывание. Меньшее значение микротвердости фольг чистого свинца, чем массивных образцов объясняется уменьшением среднего размера зерна, а, следовательно, увеличением площади межзеренных границ и зернограничного проскальзывания.

Сравнение микротвердости фольг сплавов алюминия, полученных методом высокоскоростного затверждения, свидетельствуют о том, что микротвердость фольг алюминия выше, чем микротвердость массивных образцов [1, 2, 4]. Исключение составляют фольги цинка, которые характеризуются меньшими значениями микротвердости по сравнению с массивными [5]. Меньшее значение микротвердости фольг свинца по сравнению с массивными образцами, в отличие от сплавов алюминия, целесообразно связать с тем, что в свинце происходит более интенсивное зернограничное проскальзывание. Более интенсивное зернограничное проскальзывание возможно в силу того, что энергия активации проскальзывания по границам зерен в свинце ниже, чем в алюминии.

Микротвердость быстрозатвердевших фольг сплавов систем Pb–Cd, Pb–In, Pb–Sn, Pb–Sb и Pb–Sb зависит от легирующего элемента и его концентрации (рисунок 3). Микротвердость фольг сплавов всех исследуемых систем значительно превышает микротвердость фольг чистого свинца.

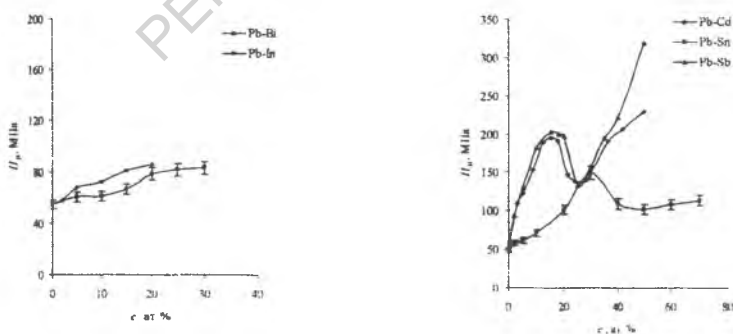


Рисунок 3 - Зависимость микротвердости быстрозатвердевших фольг сплавов на основе свинца от их химического состава

Повышение микротвердости свинца при легировании висмутом и индием обусловлено твердорастворным упрочнением.

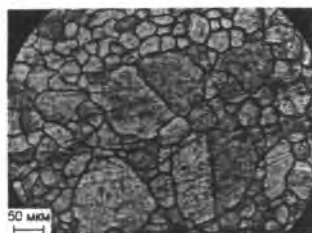
Легирование свинца Cd, Sn и Sb приводит к немонотонной зависимости микротвердости от концентрации легирующего элемента. Первоначальное увеличение микротвердости систем Pb–Cd (до 15 ат. %), Pb–Sn (до 30 ат. %) и Pb–Sb (до 15 ат. %) целесообразно связать с действием твердорастворного и дисперсионного упрочнения. Дальнейшее легирование свинца данными элементами приводит к уменьшению микротвердости, а затем снова к увеличению ее величины. Повторное увеличение  $H_v$  в области больших концентраций легирующего элемента зависит от легирующего элемента и коррелирует с микротвердостью вторых фаз. Выделение частиц второй фазы (кадмия, олова и сурьмы) в рассматриваемых системах происходит как в объеме, так и на границах зерен. Выделившиеся на границах мелкодисперсные частицы приводят к ослаблению зернограницного проскальзывания, что также приводит к увеличению микротвердости

В четвертой главе рассмотрены термическая стабильность структуры и микротвердости быстрозатвердевших фольг сплавов свинца.

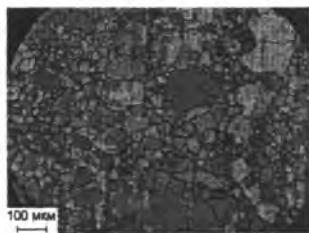
С помощью металлографического анализа обнаружено, что отжиг фольг свинца при температурах 120, 150 и 200 °С вызывает увеличение среднего размера зерна и уменьшение удельной поверхности межфазных границ. Распределение максимальных хорд сечений зерен по длине для фольг свинца, отожженных при температуре 120 °С в течение различного времени свидетельствует о протекании собирательной рекристаллизации. Установлено, что средний размер зерна связан со временем изотермического отжига по закону  $d_t \sim t^{0.5}$ .

Отжиг фольг свинца при температуре 150 °С показал, что в течение 30 мин отжига наблюдается увеличение среднего размера зерна в ходе протекания собирательной рекристаллизации. Увеличение времени отжига до 1,0 часа приводит к формированию структуры, состоящей из сравнительно мелких зерен примерно одинакового размера и гораздо меньшего числа очень крупных зерен (рисунок 4). На гистограмме распределения максимальных хорд сечений зерен по длине появляется второй максимум. Такая структура возникает в результате аномального роста зерна, называемого вторичной рекристаллизацией.

При исследовании микроструктуры фольг свинца, отожженных при температуре 200 °С в течение различного времени, выявлена большая степень разнотерности (рисунок 4), при этом на распределении максимальных хорд сечений зерен по длине присутствуют два максимума. Обнаруженные факты указывают на протекание вторичной рекристаллизации.



*a*



*б*

*a* – 150 °С, 1,0 ч; *б* – 200 °С, 0,5 ч

#### **Рисунок 4 - Микроструктура отожженных быстрозатвердевших фольг свинца**

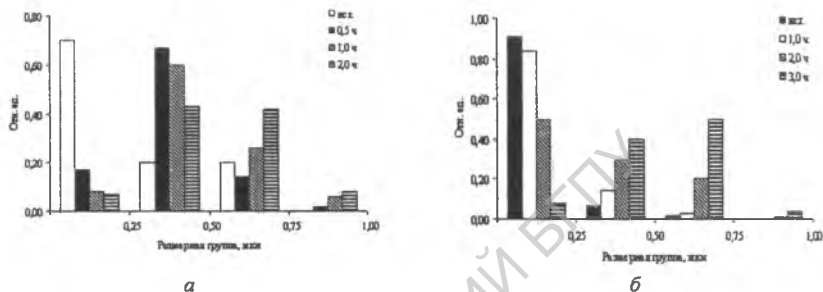
Исследования зеренной структуры фольг сплавов алюминия и цинка показали, что отжиг вызывает укрупнение зеренной структуры в данных фольгах [6; 7]. Детальный анализ показал, что рост зерен происходит в результате протекания собирательной рекристаллизации, увеличение температуры отжига не приводит к аномальному росту отдельных зерен, то есть в отличие от фольг свинца явление вторичной рекристаллизации в указанных фольгах не обнаружено. Причиной того, что в фольгах алюминия и цинка вторичной рекристаллизации не наблюдается может служить тот факт, что границы зерен в них менее подвижны в силу того, что они обладают большей энергией активации проскальзывания по границам зерен.

В ходе металлографических исследований установлено, что в процессе термической обработки фольг сплавов Pb–In происходит укрупнение среднего размера зерна в ходе протекания собирательной (при температуре 120 °С) и вторичной (при температуре 200 °С) рекристаллизации. Металлографические исследования фольг Pb–Cd также выявили рост среднего размера зерна и уменьшение удельной поверхности межзеренных границ в ходе термической обработки. Вторичная рекристаллизация в фольгах исследуемых сплавов системы Pb–Cd не наблюдалась.

Результаты расчета полюсных плотностей исследуемых дифракционных линий твердого раствора на основе свинца фольг, полученных методом центрального охлаждения, показывают, что полюсная плотность дифракционной линии 111 уменьшается до 30 % для различных сплавов. То есть происходит некоторое ослабление текстуры (111) при ее сохранении. Наблюдаемое перераспределение полюсных плотностей дифракционных линий обусловлено протеканием рекристаллизационных процессов.

В фольгах систем Pb–Cd, Pb–Sn и Pb–Sb присутствуют выделения второй фазы. Изменение их размеров и количества в процессе термической обработки может существенным образом влиять на прочностные характеристики фольг.

В ходе проведения отжига фольг сплавов Pb–Cd (при температуре 130 °С) и Pb–Sb (при температуре 150 °С) в течение различного времени обнаружено укрупнение выделений кадмия и сурьмы (рисунок 5) и резкое уменьшение их количества в единице объема. Обнаруженные факты свидетельствует о протекании коалесценции.



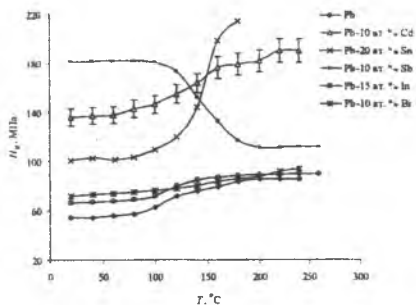
*a* – Pb–10 ат. % Cd, 130 °С; *б* – Pb–10 ат. % Sb, 150 °С

**Рисунок 5 - Распределение выделений второй фазы по размерным группам отожженных фольг Pb–10 ат. % Cd и Pb–10 ат. % Sb**

На основании графиков зависимости среднего размера частиц второй фазы от времени отжига  $\bar{d}''-t$  установлено, что фактором, контролирующим процесс коалесценции в фольгах Pb–10 ат. % Cd системы, является объемная диффузия, а в фольгах Pb–10 ат. % Sb – переход атомов через межфазную поверхность раздела.

Изменение структуры фольг свинца и его сплавов при термической обработке оказывают влияние на их свойства (рисунок 6). Увеличение микротвердости в ходе термической обработки быстрозатвердевших фольг свинца, а также его сплавов с индием и висмутом (в области существования твердых растворов) обусловлено уменьшением удельной поверхности межзеренных границ в процессе протекания рекристаллизации.

Причиной изменения микротвердости фольг систем Pb–Cd, Pb–Sn и Pb–Sb, содержащих дисперсные вторичные выделения, являются два конкурирующих процесса – собирательная рекристаллизация и коалесценция.



**Рисунок 6 - Изменение микротвердости фольг сплавов свинца при изотермическом отжиге**

Так, увеличение  $H_{\mu}$  фольг Pb-5 ат. % Cd, Pb-10 ат. % Cd и Pb-10 ат. % Sn, Pb-20 ат. % Sn обусловлено преобладающим влиянием уменьшения удельной поверхности межзеренных границ в процессе собирательной рекристаллизации. Уменьшение микротвердости фольг Pb-5 ат. % Sb и Pb-10 ат. % Sb связано с доминирующим вкладом укрупнения частиц второй фазы и резким уменьшением их количества в процессе коалесценции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

На основании комплексного исследования структуры, свойств и термической стабильности фольг свинца и его сплавов с индием, висмутом, кадмием, сурьмой и оловом, полученных высокоскоростным охлаждением из расплава при скорости охлаждения  $10^6$  K/c, сформулированы следующие выводы:

1. Обнаружено, что при высокоскоростном затвердевании: на поверхности фольг сплавов свинца образуется ячеистая структура с размером ячеек 0,5...3 мкм; в объеме фольг сплавов свинца с индием (до 40 ат. %) и висмутом (до 20 ат. %) отсутствует микросегрегация легирующих элементов; в фольгах сплавов свинца с кадмием (до 15 ат. %), сурьмой (до 20 ат. %) и оловом (до 30 ат. %) формируется однородное распределение дисперсных равноосных выделений вторичных фаз и первичных фаз в сплавах с составами легирующих элементов, близкими к эвтектическим; твердые растворы на основе свинца в быстрозатвердевших фольгах сплавов, содержащих кадмий, сурьму и олово, не являются пересыщенными из-за их низкой температуры плавления в отличие от твердых растворов алюминия и цинка, полученных тем же методом. Разработана модель кристаллизации сплавов свинца, учитывающая сверхвысокие скорости охлаждения и значительное переохлаждение расплава, приводящие к захвату легирующих элементов кристаллизующейся фазой и последующему распаду пересыщенного твердого раствора или квазиэвтектическому превращению,



объясняющая формирование однородного распределения дисперсных выделений второй фазы в объеме фольги [1-А, 4-А, 5-А, 6-А, 9-А].

2. Обнаружено, что полученные в результате высокоскоростного затвердевания фольги сплавов на основе свинца имеют микрокристаллическую структуру, средний размер зерна фольг уменьшается до 5 мкм с увеличением концентрации легирующего элемента. В фольгах, полученных центробежным охлаждением, формируется текстура (111), в фольгах, полученных спиннингованием, формируется текстура (100)+(111). Установлено, что измельчение зеренной структуры фольг сплавов свинца обусловлено сверхвысокими скоростями охлаждения жидкой фазы ( $-10^6$  К/с), приводящими к значительному переохлаждению ( $-200$  К), вызывающими увеличение скорости зарождения центров кристаллизации; формирование текстуры (111) вызвано преобладающим ростом зерен, у которых граница раздела кристалл-жидкость совпадает с плоскостями {111} [2-А, 3-А, 11-А, 15-А, 20-А, 22-А].

3. Обнаружено, что: а) отжиг фольг свинца приводит к увеличению среднего размера зерна и уменьшению удельной поверхности межзеренных границ до 5 раз, а также появлению второго максимума в распределении максимальных длин хорд поперечных сечений зерен после отжига при температуре  $150$  °С в течение 1,0 ч и  $250$  °С в течение 0,5 ч; б) легирование свинца индием и кадмием ослабляет действие отжига на изменение зеренной структуры; в) текстура фольг свинца и его сплавов с In, Bi, Cd, Sb и Sn сохраняется после отжига при  $240...250$  °С. Установлено, что изменение зеренной структуры при отжиге фольг свинца и его сплавов с индием вызвано сначала протеканием собирательной рекристаллизации, а затем вторичной в отличие от быстрозатвердевших фольг алюминия и цинка, в которых протекает только собирательная рекристаллизация из-за большей энергии активации миграции межзеренных границ, а фольг сплавов свинца с кадмием – только собирательной рекристаллизацией [3-А, 10-А, 17-А].

4. Обнаружено, что при термической обработке быстрозатвердевших фольг сплавов Pb–10 ат. % Cd и Pb–10 ат. % Sb увеличение среднего размера частиц вторичной фазы определяется зависимостями  $d^3-t$  и  $d^2-t$ , соответственно, происходит уменьшение их количества в единице объема и изменение их распределения по размерным группам. Установлено, что укрупнение частиц вторичной фазы происходит в результате коалесценции, которая в фольгах сплава Pb–10 ат. % Cd контролируется объемной диффузией, а в фольгах сплава Pb–10 ат. % Sb – переходом атомов через межфазную границу [1-А, 2-А, 8-А].

5. Обнаружено, что микротвердость фольг свинца меньше микротвердости фольг массивных образцов, микротвердость фольг бинарных сплавов свинца увеличивается с увеличением концентрации индия (до 40 ат. %) и висмута (до 20 ат. %), легирование свинца кадмием, сурьмой и оловом приводит к немонотонному изменению микротвердости фольг. Установлено, что в быстро-

затвердевших фольгах свинца межзеренные границы вызывают разупрочнение из-за зернограничного проскальзывания в отличие от фольг алюминия, в которых оно несущественно. Увеличение микротвердости фольг сплавов свинца с увеличением концентрации индия и висмута обусловлено твердорастворным механизмом упрочнения, а фольг сплавов свинца с увеличением концентрации кадмия, сурьмы и олова – твердорастворным и дисперсионным механизмами упрочнения, при этом вклад последнего, обусловленный частицами вторичных фаз, значительно выше, чем выделениями первичных фаз [2-А, 4-А–8-А, 16-А, 18-А, 21-А].

6. Обнаружено, что в процессе изохронного отжига микротвердость фольг свинца и его твердых растворов с индием и висмутом увеличивается при нагреве выше 80 °С, фольг сплавов свинца, содержащих вторичные фазы кадмия и олова, увеличивается, а фольг сплавов свинца, содержащих вторичную фазу сурьмы, уменьшается при нагреве выше 100 °С. Установлено, что укрупнение зеренной структуры в результате рекристаллизационных процессов вызывает увеличение микротвердости, а укрупнение размеров частиц вторичных фаз в процессе коалесценции в фольгах бинарных сплавов с кадмием, сурьмой и оловом обуславливает ее уменьшение. В фольгах свинца и его твердых растворов с индием и висмутом изменение микротвердости при отжиге определяется укрупнением зеренной структуры. В фольгах, содержащих дисперсные вторичные фазы, изменение микротвердости при отжиге определяется конкуренцией процессов рекристаллизации и коалесценции: для сплавов систем Pb–Cd и Pb–Sn определяющим является укрупнение зеренной структуры, для сплавов системы Pb–Sb – укрупнение дисперсных частиц [1-А, 7-А, 8-А, 12-А–14-А, 19-А].

### **Рекомендации по практическому применению**

Полученные методом высокоскоростного затвердевания фольги сплавов на основе свинца имеют однородное распределение дисперсных фаз, что свидетельствует об улучшении их структуры. Фольги, полученные методом высокоскоростного затвердевания, могут быть использованы при изготовлении прокладок, для нанесения защитных покрытий, в качестве припоев и пластин аккумуляторов.

Научные результаты, полученные при выполнении данного исследования, позволяют разработать физическую основу создания материалов высокоскоростным затвердеванием с заданными структурой и физико-механическими свойствами. Использование ресурсо- и энергосберегающей технологии высокоскоростного затвердевания позволяет определить режимы термической обработки фольг сплавов на основе свинца для оптимизации их структуры и свойств. Результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе Белорусского государственного университета.

## Список цитируемой литературы

1. Неумержицкая, Е.Ю. Структура, свойства и термическая стабильность быстрозатвердевших фольг сплавов алюминия с хромом, никелем и марганцем / Е.Ю. Неумержицкая, В.Г. Шепелевич // Перспективные материалы. – 2005. – № 4. – С. 69–73.
2. Сивцова, П.А. Сравнительная характеристика двойных и тройных быстрозатвердевших сплавов системы Al–Ni–Cr / П.А. Сивцова, Е.Ю. Неумержицкая, В.Г. Шепелевич // Металлы. – 2007. – № 4. – С. 83–88.
3. Лозенко, В.В. Влияние сверхбыстрой закалки на структуру и механические свойства быстрозатвердевших фольги сплавов системы Zn–Cd / В.В. Лозенко, В.Г. Шепелевич // Вестник БГУ. Серия 1. – 2006. – № 1. – С. 37–41.
4. Гутько, Е.С. Исследование быстрозатвердевших фольг бинарных и тройных сплавов на основе алюминия, содержащих цинк и магний / Е.С. Гутько, В.Г. Шепелевич // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 4. – С. 81–85.
5. Лозенко, В.В. Структура и механические свойства быстрозатвердевших фольг сплавов системы Zn–In / В.В. Лозенко, В.Г. Шепелевич // Актуальные проблемы прочности: материалы XLIV Международной конференции, Вологда, 3–7 окт. 2005 г. // Волог. гос. тех. ун-т, редкол.: В.А. Шорин [и др.] – Вологда. 2005. – С. 10–15.
6. Лозенко, В.В. Отжиг быстрозатвердевших фольг цинка / В.В. Лозенко, В.Г. Шепелевич // Быстрозакаленные материалы и покрытия: труды 3-ой Всероссийской с международным участием науч.-техн. конф., Москва, 22–23 ноября 2004 г. / МАТИ, РГТУ им. К.Э. Циолковского; редкол.: А.П. Петров [и др.]. – Москва, 2004. – С. 14–17.
7. Шепелевич, В.Г. Рекристаллизация быстрозатвердевшей фольги алюминия / В.Г. Шепелевич, Е.Ю. Василевич, Е.С. Гутько // Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1. – 2002. – № 1. – С. 38–70.

# СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

## *Статьи в научных журналах*

1-А. Анисович, А.Г. Структура и микротвердость быстрозатвердевшей фольги сплавов системы Рb–Cd / А.Г. Анисович, О.Н. Шахрай (Белая), В.Г. Шепелевич // Вестник Белорусского государственного университета. Серия 1. – 2003. – № 2. – С. 35–38.

2-А. Шепелевич, В.Г. Структура и свойства быстрозатвердевших фольг сплавов системы свинец–сурьма / В.Г. Шепелевич, О.Н. Шахрай (Белая) // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. – 2003. – Т 2, № 4. – С. 43–46.

3-А. Шахрай (Белая), О.Н. Текстура быстрозатвердевших фольг свинца и его сплавов / О.Н. Шахрай (Белая), В.Г. Шепелевич // Весці Нацыянальнай Акадэміі навук Беларусі. Серия физико-технических наук. – 2004. -- № 3. – С. 32–34.

4-А. Белая, О.Н. Быстрозатвердевшие фольги свинца и его сплавов с кадмием, оловом и сурьмой / О.Н. Белая, В.Г. Шепелевич // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 6. – С. 67–72.

5-А. Белая, О.Н. Припой на основе свинца, полученные сверхбыстрой закалкой из расплава / О.Н. Белая, В.Г. Шепелевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Прикладные науки. – 2005. – № 12. – С. 43–46.

6-А. Белая, О.Н. Структура и свойства припоев на основе свинца, полученных сверхбыстрой закалкой из расплава / О.Н. Белая, В.Г. Шепелевич // Весці Нацыянальнай Акадэміі навук Беларусі. Серия физико-технических наук. – 2006.– № 1. – С. 40–43.

## *Статьи в сборниках научных трудов*

7-А. Шахрай (Белая), О.Н. Структура и свойства быстрозатвердевших фольг сплавов системы свинец–олово / О.Н. Шахрай (Белая), В.Г. Шепелевич // Машиностроение: сб. науч. трудов / Белор. нац. техн. ун-т; редкол.: И.П. Филонov [и др.]. – Минск: УП «Технопринт». – 2003. – Вып.19. – С. 729–733.

8-А. Шахрай (Белая), О.Н. Структура и свойства быстрозатвердевших фольг сплавов системы свинец–сурьма / О.Н. Шахрай (Белая), В.Г. Шепелевич // Материалы, технологии и оборудование для упрочнения и восстановления деталей машин: сб. науч. трудов / Полоц. гос. ун-т; редкол.: Ф.И. Пантелеенко [и др.]. – Минск: УП «Технопринт». – 2003. – С. 51–53.

9-А. Белая, О.Н. Быстрозатвердевшие фольги припоев на основе свинца / О.Н. Белая, В.Г. Шепелевич // Быстрозакаленные материалы и покрытия: труды 3-ой Всероссийской с международным участием науч.-техн. конф., Москва, 22–23 ноября 2004 г. / МАТИ, РГТУ им. К.Э. Циолковского; редкол.: А.П. Петров [и др.]. – Москва, 2004. – С. 18–22.

10-А. Белая, О.Н. Зеренная структура быстрозатвердевших фольг свинца и его сплавов / О.Н. Белая, В.Г. Шепелевич // Быстрозакаленные материалы и покрытия: труды 4-ой Всероссийской с международным участием науч.-техн. конф., Москва, 22–23 ноября 2005 г. / МАТИ, РГТУ им. К.Э. Циолковского; редкол.: А.П. Петров [и др.]. – Москва, 2005. – С. 34–38.

### *Статьи в сборниках научных конференций*

11-А. Шахрай (Белая), О.Н. Текстура фольг свинца и его сплавов, полученных сверхбыстрой закалкой из жидкой фазы / О.Н. Шахрай (Белая), В.Г. Шепелевич // Прогрессивные технологии, технологические процессы и оборудование: материалы межд. науч.-техн. конф., Могилев, 15–16 мая 2003 г. / Бел.-росс. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2003. – С. 230–232.

12-А. Шепелевич, В.Г. Структура и свойства быстрозатвердевших фольг свинца и его сплавов с кадмием / В.Г. Шепелевич, А.Г. Анисович, О.Н. Шахрай (Белая) // Наука – образованию, производству, экономике: материалы межд. науч.-техн. конф., Минск, май 2003 г.: в 2 ч. / Белор. нац. техн. ун-т; редкол.: Б.М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2003. – Ч. 1. – С. 67–71.

13-А. Шепелевич, В.Г. Текстура и микротвердость быстрозатвердевших фольг свинца и его сплавов с индием и висмутом / В.Г. Шепелевич, О.Н. Шахрай (Белая) // Ресурсо- и энергосберегающие технологии промышленного производства: материалы межд. науч.-техн. конф., Витебск, ноябрь 2003 г.: в 2 ч. / Витебский гос. техн. ун-т; редкол.: С.М. Литовский [и др.]. – Витебск, 2003. – Ч. 1. – С. 86–90.

14-А. Шахрай (Белая), О.Н. Структура и микротвердость быстрозатвердевших фольг сплава ПОС 40 / О.Н. Шахрай (Белая), В.Г. Шепелевич // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы межд. науч.-техн. конф., Минск, 6–7 апреля 2004 / Инс-т порошковой металлургии; редкол.: А.Ф. Ильюшенко [и др.]. – Минск, 2004. – С. 126–127.

15-А. Белая, О.Н. Рентгеноструктурные исследования быстрозатвердевших фольг сплавов свинца / О.Н. Белая, В.Г. Шепелевич // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы межд. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апреля 2004 г. / Бел.-росс. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2004. – Ч. 1. – С. 144–145.

16-А. Белая, О.Н. ε-фаза в быстрозатвердевших фольгах сплавов системы Pb–Bi / О.Н. Белая, В.Г. Шепелевич // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев 21–22 апреля, 2005 г. / Бел.-росс. ун-т; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2005. – Ч. 1. – С. 139–140.

17-А. Белая, О.Н. Модифицирование зеренной структуры быстрозатвердевших сплавов свинца / О.Н. Белая, В.Г. Шепелевич // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвященной 75-летию ФТИ НАН Беларуси, Минск, 27–29 марта 2006 г. / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: С.А. Астапчик [и др.]. – Минск, 2006. – С. 207–211.

18-А. Белая, О.Н. Влияние термической обработки на структуру и микротвердость быстрозатвердевших фольг припоев на основе свинца и цинка / О.Н. Белая, В.В. Лозенко, В.Г. Шепелевич // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы II междунар. науч.-техн. конф., Минск, 3–5 октября 2007 г. / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: С.А. Астапчик [и др.]. – Минск, 2007. – С. 81–86.

#### *Тезисы конференций*

19-А. Шахрай (Белая), О.Н. Текстура и микротвердость быстрозатвердевших фольг сплавов свинец–сурьма / О.Н. Шахрай (Белая) // Физика конденсированного состояния: тезисы докладов XI Респ. научн. конф студентов, магистрантов и аспирантов, Гродно, 23–25 апреля 2003 г. / Грод. гос. ун-т. – Гродно, 2003. – С. 247–249.

20-А. Шахрай (Белая), О.Н. Формирование текстуры в фольгах сплавов на основе свинца / О.Н. Шахрай (Белая), В.Г. Шепелевич // Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий (МНТ–VII): тезисы докладов, Обнинск, 16–19 июня 2003 г. / ИАТЭ. – Обнинск, 2003. – С. 146–147.

21-А. Шахрай (Белая), О.Н. Структура быстрозатвердевших фольг сплава ПОС 40 / О.Н. Шахрай (Белая) // Физика конденсированного состояния: тезисы докладов XII Респ. научн. конф студентов, магистрантов и аспирантов, Гродно, 21–23 апреля 2004 г. / Грод. гос. ун-т. – Гродно, 2004. – С. 131–134.

22-А. Белая, О.Н. Влияние факторов сверхбыстрой закалки на текстуру быстрозатвердевших фольг свинца / О.Н. Белая, В.Г. Шепелевич // Структурные основы модификации материалов методами нетрадиционных технологий (МНТ–VIII): тезисы докладов, Обнинск, 14–18 июня 2005 г. / ИАТЭ. – Обнинск, 2005. – С. 49.

### СТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ ФОЛЬГ СПЛАВОВ СВИНЦА, ПОЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ЗАТВЕРДЕВАНИЕМ

**Ключевые слова:** высокоскоростное затвердевание, быстрозатвердевшие фольги, ячеистая структура, зеренная структура, текстура, субзеренная структура, микротвердость, отжиг, собирательная рекристаллизация, вторичная рекристаллизация, коалесценция.

**Цель работы:** установление закономерностей и особенностей формирования структуры и изменения микротвердости фольг сплавов на основе свинца при высокоскоростном затвердевании и последующей термической обработке.

**Методы исследования:** рентгеноспектральный микроанализ, металлографические исследования, рентгеноструктурный анализ, измерение микротвердости, изохронный и изотермический отжики.

Обнаружено формирование в сплавах Pb–Cd (до 15 ат. %), Pb–Sb (до 20 ат. %) и Pb–Sn (до 30 ат. %) однородного распределения частиц вторичных фаз легирующих элементов и первичных фаз в сплавах при концентрации элементов, близких к эвтектическим.

Выявлено образование микрокристаллической структуры, легирование свинца приводит к уменьшению среднего размера зерна. В зависимости от условий получения фольги могут иметь текстуру (111) или двойную текстуру (100)+(111).

Микротвердость фольг свинца меньше микротвердости массивных образцов, легирование свинца приводит к увеличению микротвердости.

Установлено укрупнение зеренной структуры при температуре отжига 80 °C и выше, что обусловлено для фольг свинца и его сплавов с индием собирательной и вторичной рекристаллизацией, для фольг свинца с кадмием – только собирательной рекристаллизацией. Рекристаллизация вызывает ослабление текстуры (111).

Обнаружено увеличение среднего размера частиц вторичной фазы и уменьшение их количества в единице объема в результате протекания коалесценции для фольг Pb–10 ат. % Cd и Pb–10 ат. % Sb.

Результаты работы могут быть использованы при разработке режимов термической обработки сплавов на основе свинца, оптимизации их структуры и свойств.

## SUMMARY

Belaya Volha Nikolaevna

### THE STRUCTURE AND MICROHARDNESS FOILS ALLOYS OF LEADS RECEIVED BY HIGH-SPEED HARDENING

**Key words:** high-speed hardening, rapidly quenched foils, cellular structure, grain structure, texture, subgrain structure, microhardness, annealing, normal growth of grains, anomalous growth of grains, coarsening.

The **purpose** of work is determining laws and features of the formation of structure and change of microhardness foils alloys on the basis of lead at high-speed hardening and the subsequent thermal processing.

**Methods of research:** X-ray the microanalysis, metallography research, X-ray diffraction analysis, measurements of microhardness, isochronous and isothermal annealing.

Formation in alloys Pb-Cd (up to 15 at. %), Pb-Sb (up to 20 at. %) and Pb-Sn (up to 30 at. %) homogeneous distribution particles secondary phases of alloying elements and primary phases in alloys at concentration of the elements close to eutectical.

Formation of microcrystalline structure is revealed, alloying lead results in reduction of the average sized grain. Depending on the conditions of receiving foils can have texture (111) or double texture (100)+(111).

Microhardness foils of lead is less than microhardness of massive samples, alloying lead results in increase in microhardness.

The integration of grain structure is established at melt temperature 80 °C and is higher, that is caused for foils of lead and its alloys with indium by normal growth of grains and anomalous growth of grains, for foils of lead with cadmium – only normal growth of grains. Recrystallization causes weakening of texture (111).

It is found increasing of particles of a secondary phase and reduction of their quantity in unit of volume as a result of course coarsening for foils Pb-10 at. % Cd and Pb-10 at. % Sb.

Results of this research can be used by development of modes of thermal processing alloys on the basis of lead, optimization of their structure and properties.



## РЭЗЮМЕ

Белая Вольга Мікалаеўна

### СТРУКТУРА І МІКРАЦВЕРДАСЦЬ ФОЛЬГ СПЛАВАЎ СВІНЦА, АДТРЫМАННЫХ ЗВЫШХУТКІМ ЗАЦВЕРДЗЯВАННЕМ

**Ключавыя словы:** звышхуткае зацвердзяванне, хутказацвярдзелья фольгі, ячэйстая структура, зерневая структура, тэкстура, субзерневая структура, мікрацвердасць, адпал, збіральная рэкрышталізацыя, другасная рэкрышталізацыя.

**Мэта работы:** выяўленне заканамернасцяў і асаблівасцяў фарміравання структуры і змяненне мікрацвердасці фольг сплаваў на аснове свінца пры звышхуткім зацвердзяванні і наступнай тэрмічнай апрацоўцы.

**Метады даследвання:** рэнтгенаспектральны мікрааналіз, металаграфічныя даследванні, рэнтгенаструктурны аналіз, вымярэнне мікрацвердасці, ізахронны і ізатэрмічны адпалы.

Вызначана, што сплавы Pb–Cd (да 15 ат. %), Pb–Sb (да 20 ат. %) і Pb–Sn (да 30 ат. %) характарызуюцца аднародным размеркаваннем часцінак другасных фаз легіруючых элементаў і першасных фаз у сплавах пры канцэтрацыях элементаў, блізкіх да эўтэктыхных.

Вызначана ўтварэнне мікракрышталічнай структуры, легіраванне свінца прыводзіць да памяншэння сярэдняга памеру зерня. У залежнасці ад ўмоў атрымання фольгі могуць мець тэкстуру (111) або падвойную тэкстуру (100)+(111).

Мікрацвердасць фольг свінца менш мікрацвердасці масіўных матэрыялаў, легіраванне свінца прыводзіць да павялічэння мікрацвердасці.

Выяўлена павелічэнне зерневай структуры пры тэмпературы адпалу 80 °C і вышэй, што абумоўлена для фольг свінца і яго сплаваў з індыем збіральнай і другаснай рэкрышталізацыяй, для фольг свінца з кадміем – толькі збіральнай рэкрышталізацыяй. Рэкрышталізацыя выклікае аслабленне тэкстуры (111).

Выяўлена павелічэнне сярэдняга памеру часцінак другаснай фазы і памяншэнне іх колькасці ў адзінцы аб'ёму, што абумоўлена каалесценцыяй для фольг Pb–10 ат. % Cd і Pb–10 ат. % Sb.

Вынікі работы могуць быць выкарыстаны для распрацоўкі ражымаў тэрмічнай апрацоўкі сплаваў на аснове свінца, аптымізацыі іх структуры і ўласцівасцей.

РЕПОЗИТОРИЙ БГПУ

Подписано в печать 12.05.2008 Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ .

Бумага офсетная. Гарнитура Times Roman. Печать RISO.

Усл. печ. л. 1,39. Тираж 100 экз. Заказ 203

Отпечатано на участке оперативной полиграфии  
ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Лицензия № 02330/0133131 от 30.04.2004 г.

220141, г. Минск, ул. Купревича, 10