

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК (539.26+539.533):669.71

ЗЕРНИЦА
Денис Александрович

**Структурно-фазовые состояния и физические свойства сплавов цинка,
полученных высокоскоростной кристаллизацией**

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

Минск – 2023

Научная работа выполнена
в УО «Мозырский государственный педагогический университет
имени И. П. Шамякина».

Научный руководитель – **Шепелевич Василий Григорьевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физики твёрдого тела
и нанотехнологий
Белорусского государственного университета.

Официальные оппоненты: **Грабчиков Сергей Степанович**
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
лаборатории физики магнитных плёнок
ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»;

Федотов Александр Сергеевич
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры компьютерного моделирования
физического факультета
Белорусского государственного университета.

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

Защита состоится 24 ноября 2023 г. в 14.00 на заседании совета по защите
диссертаций Д 02.01.16 при Белорусском государственном университете
по адресу: г. Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета),
ауд. 407.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

Телефон учёного секретаря: 2095709; e-mail: Fedotov@bsu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке
Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «19» октября 2023 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
доктор физико-математических наук
профессор



А. К. Федотов

ВВЕДЕНИЕ

Современное материаловедение в настоящее время развивается в таких направлениях, как поиск новых материалов, превосходящих по своим характеристикам уже существующие, разработка ресурсо- и энергосберегающих технологий их получения, характеризуемых снижением затрат на производство и эксплуатацию, получение структур в неравновесных условиях. Условия получения материалов, например, температура, скорость охлаждения, приводят к переходу к неравновесному состоянию, а энергия, накопленная в таких системах, превосходит энергию в однородных материалах, что способствует более интенсивному взаимодействию с окружающей средой. Таким образом, изучение стабильности материалов и её изменение во времени возможно при исследовании изменений структурных составляющих и свойств в процессе выдержки и при термической обработке.

Получение материалов в неравновесных условиях с уникальными физическими свойствами возможно при помощи сверхбыстрой кристаллизации, при которой скорости охлаждения могут достигать 10^5 - 10^6 К/с. За последние десятилетия технология сверхбыстрой кристаллизации развивалась весьма стремительно, создавались научные центры. Промышленность ряда стран в настоящее время изготавливает на основе фольг, полученных сверхбыстрым охлаждением, устройства, которые находят применение в электротехнических, машиностроительных, измерительных областях.

Ограничение использования свинца в связи с его токсичностью привело к проведению исследований по поиску экологически безвредных компонентов. К числу альтернатив относят бессвинцовую систему Sn-Zn, что делает актуальным исследование таких сплавов, а сверхбыстрая кристаллизация может послужить заменой традиционным способам кристаллизации. Исследования, проведённые в этой области для сплавов Sn-Zn, весьма единичны и не дают полного представления о свойствах и стабильности. В литературе не встречаются сведения о формировании структур при сверхбыстрой кристаллизации, а также изменении свойств при старении.

В этой связи исследование поведения быстрозатвердевших двойных и многокомпонентных сплавов Sn-Zn, установление механизмов формирования структур этих сплавов, изучение их временной и температурной стабильности является актуальным, имеет научное и прикладное значение и вносит свой вклад в научное направление по созданию материалов методом высокоскоростного затвердевания.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа на тему «Структурно-фазовые состояния и физические свойства сплавов цинка, полученных высокоскоростной кристаллизацией» выполнена в Мозырском государственном педагогическом университете. Тематика кандидатской диссертации соответствует приоритетным направлениям научно-технической деятельности, в соответствии с указом Президента Республики Беларусь от 22 апреля 2015 г. № 166, в котором утверждены приоритетные направления научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016-2020 годы; фундаментальным научным исследованиям в соответствии с перечнем, утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы».

Диссертационная работа выполнена в рамках гранта Министерства образования Республики Беларусь на тему «Структура и стабильность бессвинцовых оловянно-цинковых сплавов, полученных высокоскоростным затвердеванием» (Рег.№ НИОКТР 20211069), по договору от 22.03.2021 №1410 гр/2021 на выполнение научно-исследовательских работ по грантам Министерства образования Республики Беларусь.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью диссертационного исследования является установление закономерностей формирования при высокоскоростной кристаллизации структуры сплавов цинка, её термической стабильности и изменения физических свойств.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) синтез двойных (Sn-Zn) и тройных сплавов цинка, содержащих Al и Sb в малых концентрациях;
- 2) исследование образования фаз и пространственного распределения компонентов в быстрозатвердевших сплавах цинка;
- 3) установление влияния легирования на зёрненную структуру цинковых сплавов;
- 4) анализ морфологии поверхностных слоёв, текстуры и параметров микроструктуры полученных фольг;
- 5) определение характера зависимости микротвёрдости быстрозатвердевших сплавов Sn-Zn от содержания легирующих элементов;

б) выявление закономерностей изменения фазового состава и зёрненной структуры фольг Sn-Zn при отжиге;

7) изучение закономерностей и особенностей изменения механических свойств сплавов Sn-Zn в зависимости от содержания легирующих элементов и при отжиге.

В качестве **объекта исследования** выбраны сплавы системы Sn-Zn, в том числе легированные алюминием и сурьмой, полученные методом высокоскоростного затвердевания из расплава.

Предметом исследования является элементный и фазовый состав, микроструктура быстрозатвердевших оловянно-цинковых сплавов, стабильность структуры и свойств при отжиге.

Научная новизна

1) Впервые проведено комплексное исследование структуры и механических свойств быстрозатвердевших фольг сплавов системы Zn-Sn и тройного сплава Sn – 8,8 мас. % Zn – Sb, полученных высокоскоростной кристаллизацией при скорости охлаждения $10^5 \dots 10^6$ К/с.

2) Впервые установлены механизмы и закономерности формирования фазовой структуры при высокоскоростной кристаллизации. В сплавах Sn – (1,2 – 2,0) мас. % Zn и Zn – 1,5 мас. % Sn при кристаллизации происходит «захват» легирующих элементов, что приводит к образованию пересыщенных твёрдых растворов, и их последующий распад с выделением равноосных частиц цинка и олова размером до 0,5 мкм. Кристаллизация сплавов, составы которых близки к эвтектическому сплаву, связана с переохлаждением пересыщенных жидких растворов на основе олова и цинка и образованием неравновесной эвтектики в результате расслоения жидкой фазы, с формированием пересыщенных твёрдых растворов олова и цинка и последующего их распада с образованием дисперсных выделений цинка размером менее 2 мкм. Кристаллизация сплавов, содержащих 40 – 80 мас. % Zn, происходит по механизму образования и роста зародышей с образованием при перемещении фронта кристаллизации выделений олова и цинка, при этом средняя длина хорд случайных секущих на сечениях олова не превышает 1 мкм. При кристаллизации тройных сплавов Sn – 8,8 мас. % Zn – x мас. % Sb ($x = 1-5$) происходит выделение дисперсных частиц цинка и фазы Zn_4Sb_3 .

3) Впервые установлены закономерности образования микроструктурной структуры в быстрозатвердевших сплавах системы Sn-Zn со средним размером хорды на сечениях зёрен олова от 2,5 до 4,5 и зёрен цинка от 1,5 до 3,7 мкм. Легирование олова цинком и цинка оловом вызывает ослабление текстуры (100) олова и (0001) цинка, а также появление новой

текстуры (10 $\bar{1}0$) цинка в сплавах Sn – (40 – 70) мас. % Zn.

4) Впервые установлено увеличение частот в распределении углов соседних зёрен олова и цинка для коррелированных и некоррелированных границ зёрен в сплавах Sn – 8,8 мас. % Zn, Zn – 5 мас. % Sn и Sn – 8,8 мас. % Zn – 2 мас. % Sb.

5) Впервые установлены закономерности изменения микротвёрдости быстрозатвердевших фольг бинарных сплавов Sn-Zn, выраженные в появлении минимума при содержании цинка ~ 10 мас. %, и достижения предельных значений при его концентрации ~ 80 мас. %; выявлено одновременное увеличение предела прочности и относительного удлинения в сплавах Sn-Zn в областях концентраций Sn – (15 – 80) мас. % Zn и Sn – (15 – 60) мас. % Zn соответственно.

6) Впервые установлены механизмы изменения микротвёрдости быстрозатвердевших фольг сплавов олово-цинк при естественном старении, выраженные в её увеличении до 15 %, с последующим уменьшением при выдержке; выявлено уменьшение микротвёрдости при изохронном отжиге до 30 %, с изменением параметров структуры при температурах, достигающих 160 °С, выраженное в увеличении выделений фаз, уменьшении удельной поверхности межфазных границ при сохранении текстуры олова и цинка.

7) Впервые установлено, что в паяных соединениях меди и латуни с использованием в качестве припоя быстрозатвердевших фольг сплавов Sn – 10 мас. % Zn происходит миграция атомов цинка в медь (или латуни) и на границе паяного материала формируется диффузионный слой толщиной 3-5 мкм с прослойкой дисперсного соединения Cu₅Zn₈.

Положения, выносимые на защиту

1. Установлены особенности формирования фазового состава и структуры при высокоскоростной кристаллизации сплавов Sn-Zn, заключающиеся в следующем:

- протекание кристаллизации в сплавах Sn-Zn с малыми концентрациями Sn и Zn (Sn – (1,2 – 2,0) мас. % Zn и Zn – 1,5 мас. % Sn) путём захвата легирующих элементов, с формированием пересыщенных твёрдых растворов на основе олова и цинка и последующим их распадом с образованием двухфазной дисперсной структуры;

- образование неравновесной эвтектики в результате расслоения жидкой фазы с последующим образованием пересыщенных твёрдых растворов в сплавах Sn-Zn, близких к эвтектическим составам;

- формирование дисперсной структуры в сплавах Sn – (40 – 80) мас. % Zn по механизму образования и роста зародышей новой фазы.

2. Установлено, что:

- при легировании олова цинком и цинка оловом образуется микрокристаллическая структура со средней хордой на сечениях зёрен олова 4,5-2,5 мкм и на сечениях зёрен цинка 3,7-1,5 мкм соответственно;

- легирование приводит к ослаблению текстур (0001) и (100), формирующихся в быстрозатвердевших фольгах чистых компонентов цинка и олова соответственно; в сплавах Sn – (40 – 70) мас. % Zn формируется текстура (10 $\bar{1}$ 0);

- в быстрозатвердевших фольгах сплавов Sn – 8,8 мас. % Zn, Zn – 5 мас. % Sn, Sn – 8,8 мас. % Zn – 2 мас. % Sb протекает двойникование в олове и цинке в плоскостях (301) и (10 $\bar{1}$ 2) для зёрен олова и цинка соответственно.

3. Установлены механизмы и закономерности изменения механических свойств быстрозатвердевших фольг Sn-Zn в исходном состоянии и при отжиге:

- увеличение микротвёрдости в областях малых концентраций легирующих добавок, связанное с действием механизмов твёрдорастворного и дисперсионного упрочнения; уменьшение микротвёрдости в области заэвтектических составов вследствие образования микрокристаллической структуры и возникновения проскальзывания по границам зёрен; увеличение микротвёрдости в быстрозатвердевших эвтектических сплавах Sn-Zn, легированных Sb, связанное с упрочняющим действием Zn и образованием дисперсных выделений Zn₄Sb₃;

- одновременное увеличение предела прочности на разрыв и пластичности в быстрозатвердевших сплавах Sn – (15 – 60 мас. %) Zn, связанное с упрочняющим действием цинка и вкладом олова в зернограничное проскальзывание соответственно;

- увеличение микротвёрдости при выдержке при $t_{комн}$, связанное с распадом пересыщенных твёрдых растворов и образованием скоплений легирующих атомов; последующее снижение микротвёрдости, связанное с образованием выделений фаз и их коалесценцией, и уменьшением скоплений легирующих атомов;

- уменьшение микротвёрдости при изохронном отжиге с укрупнением фаз цинка и олова, увеличением размера зёрен и сохранением текстур, формирующихся при кристаллизации, и с исчезновением дефектов.

Личный вклад соискателя учёной степени

Экспериментальная и теоретическая часть кандидатской диссертации по исследованию структур быстрозатвердевших сплавов, механических свойств

цинка и его сплавов, влиянию выдержки и термического воздействия, обработка полученных экспериментальных данных и формулировка выводов была проделана соискателем. Настоящая работа была выполнена под руководством доктора физико-математических наук, профессора кафедры физики твёрдого тела и нанотехнологий Белорусского государственного университета Шепелевича Василя Григорьевича, который сформулировал основную научную идею исследования, цель и задачи, участвовал в планировании научной деятельности и обсуждении полученных результатов, руководил исследованиями и помогал решать организационные вопросы. Эксперименты проводились на базе центра коллективного пользования уникальным научным оборудованием «Белорусский межвузовский центр обслуживания научных исследований». Вклад соавторов отдельных работ, Гусаковой О. В., Иванова А. А., Гольцева М. В., Петрушенко В. О., Савенко В. С., заключался в участии их при обсуждении полученных результатов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Полученные результаты докладывались на следующих конференциях и научных семинарах: XXVII, XXVIII, XXIX и XXX Международной научно-практической конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Физика конденсированного состояния» (Гродно, 18-21 апреля 2019 г., 17 апреля 2020 г., 22-23 апреля 2021 г., 7-8 апреля 2022 г.); Международном научном форуме обучающихся «Молодёжь в науке и творчестве» (Гжель, 3 апреля 2019 г.); 12, 13 и 14 Международной научно-технической конференции «Приборостроение» (Минск, 13-15 ноября 2019 г., 18-20 ноября 2020 г., 17-19 ноября 2021 г.); XVI, XVII, XVIII, XIX Международной научно-технической конференции «Быстрозакалённые материалы и покрытия» (Москва, 15-16 октября 2019 г., 20-21 октября 2020 г., 19-20 октября 2021 г., 18-19 октября 2022 г.); XII, XIII, XIV, XV Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам» (Мозырь, 5-6 марта 2020 г., 25-26 марта 2021 г., 29 марта 2022 г., 24 марта 2023); Международной научно-технической конференции молодых учёных «Инновационные материалы и технологии» ИМТ 2021 (Минск, 19-21 января 2021 г.); Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилёв, 23-24 апреля 2020 г., 22-23 апреля 2021 г., 21-22 апреля 2022 г.); научных чтениях имени И. А. Одингга «Механические свойства современных конструкционных материалов» (Москва, 17-18 сентября 2020 г.); XIII Международной научно-

технической конференции (научных чтениях, посвященных 125-летию со дня рождения П.О. Сухого) «Современные проблемы машиноведения» (Гомель, 22 октября 2020 г.); Объединённой конференции «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике» (Черноголовка, 13-17 сентября 2021 г.); VIII-й Международной научно-практической конференции «Приоритетные направления развития образования и науки» (г. Стерлитамак, 25 марта 2022 г.); Втором Республиканском форуме молодых учёных учреждений высшего образования Республики Беларусь (Могилёв, 17-19 мая 2023 г.); Конгрессе молодых учёных Беларуси и России (г. Минск, 27-31 марта 2023 г.).

Результаты диссертационного исследования обсуждались на научном семинаре кафедры физики твёрдого тела и нанотехнологий Белорусского государственного университета (14.04.2023 г.).

По результатам диссертации получен 1 акт о внедрении результатов в образовательный процесс в МГПУ имени И. П. Шамякина.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 35 научных работах, из которых: 9 статей в научных изданиях, включенных в Перечень изданий, и в иностранных научных изданиях (общим объемом 5,03 авторского листа), 24 статьи в сборниках материалов научных конференций, 2 тезисов.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 162 страницы, в том числе 89 рисунков занимают 48 страниц, 27 таблиц на 12 страницах, 1 приложение занимает 2 страницы. Список использованных источников содержит 268 наименований, включая собственные публикации соискателя ученой степени (на 24 страницах).

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой** главе приводится обзор научной литературы по теме диссертационного исследования. Проанализированы основные этапы развития научных исследований по структуре и свойствам цинковых сплавов; дан обзор современного состояния металловедения литых и быстрозатвердевших сплавов цинка с оловом, приведены основные подходы к их исследованию в нашей стране и за рубежом. Рассмотрена общая характеристика цинка и олова как

химических элементов с приведением основных свойств. Отмечены исследования В. Д. Александрова, А. М. Магомедова, М. А. Шилова, направленные на изучение цинка в жидком состоянии. Показана важность изучения механизмов кристаллизации из жидкости и фазовых переходов двойных систем в неравновесных необратимых условиях. Отмечены работы по исследованию взаимодействия цинка с легирующими элементами. Проанализированы структура и свойства легкоплавких сплавов, содержащих цинк. Выявлены основные подходы учёных, направленные на применение принципов диффузии и фазовых превращений к сплавам.

Установлено, что за последние десятилетия в работах, направленных на изучение цинковых сплавов, полученных в неравновесных условиях, отмечается значимость метода сверхбыстрой закалки из расплава. К сожалению, исследований, сосредоточенных на изучении пересыщенных твёрдых растворов в быстрозатвердевших фольгах на основе цинка и его сплавов, не встречаются. Единичные публикации нацелены в основном на изучении литых эвтектических сплавов Sn-Zn, легированных Bi, In, Ga, Ag, Al, Cu, полученных традиционными методами литья. До настоящего времени нет сведений о формировании текстур, размеров зёрен и субзёрен, а также поведении механических свойств при старении сплавов Sn-Zn, полученных при сверхвысоких скоростях охлаждения.

На основе анализа литературы определён предмет исследования, сформулированы цели и задачи кандидатской диссертации.

Во **второй главе** приводится методика получения быстрозатвердевших фольг и литых сплавов, а также описаны методы исследований структур и свойств. Двойные сплавы цинка с оловом имели следующие составы: Zn – x мас. % Sn ($x = 0-100$). Бинарные сплавы эвтектического состава Sn – 8,8 мас. % Zn легировались Sb и Al, и имели следующие составы: Sn – 8,8 мас. % Zn – x мас. % Sb ($x = 2,0; 3,0; 4,0$); Sn – 8,8 мас. % Zn – x мас. % Al ($x = 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0$). Изготовление сплавов проводилось сплавлением исходных компонентов в кварцевых ампулах. Затем приготовленная смесь выливалась в графитовую изложницу. Из полученных слитков вырезались кусочки массой ~ 0,2 г, которые расплавлялись в печи. Далее капля расплава инжигировалась на полированную внутреннюю поверхность медного цилиндра, вращающегося с частотой 25 об/с. Толщины быстрозатвердевших фольг, используемых для исследований, находились в диапазоне 40...80 мкм.

Исследования фазового состава и текстуры зёрен цинка и его сплавов методом дифракции проводились при $t_{комн}$ с помощью рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV с медным анодом. Расчёт полюсных плотностей ρ_{hkl} дифракционных линий проводился по методу Харриса. Исследование морфологии и структуры выполнялось на сканирующем растровом электронном

микроскопе LEO 1455 VP. С помощью энергодисперсионного полупроводникового детектора «Röntec» проводился рентгеноспектральный микроанализ. С помощью приставки фазового анализа «HKL EBSD Premium System Channel 5» к растровому электронному микроскопу проводились исследования зёрненной структуры фольг. Определение параметров структуры проводилось методами стереографического анализа. Микротвёрдость образцов измерялась на приборах ПМТ-3 и ТПП-2. Испытания фольг методом одноосного растяжения проводились при комнатной температуре с использованием разрывной машины Testometric M350 – 10СТ. Влияние старения и отжига фольг изучалось при проведении серии экспериментов по измерению микротвёрдости, параметров элементарной ячейки и микроструктуры.

В третьей главе рассмотрены особенности формирования фаз в фольгах сплавов Sn-Zn. Фазовый состав быстрозатвердевших фольг Sn-Zn характеризуется наличием фаз β -Sn и Zn.

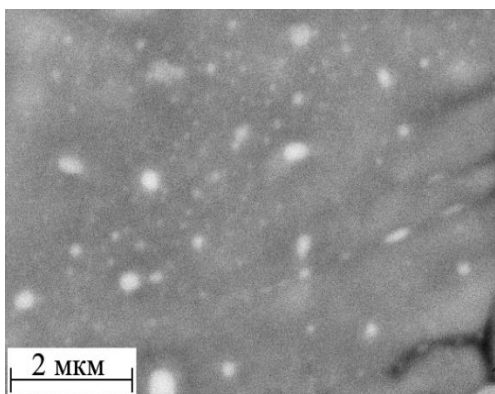


Рисунок 1 – Микроструктура быстрозатвердевшей фольги сплава Zn – 1,5 мас. % Sn

Выявлено, что после изготовления и выдержки при $T_{комн}$ формируется двухфазная дисперсная структура, с образованием тёмных выделений цинка и светлых выделений олова в сплавах Sn – 1,2 мас. % Zn и Zn – 1,5 мас. % Sn (рисунок 1), соответственно. Средний размер выделений второй фазы после выдержки в течение 2 суток после их изготовления не превышает 0,5 мкм. Формирование наблюдаемой микроструктуры в фольгах связано с тем, что при охлаждении с высокой скоростью основной фазы происходит захват

легирующих элементов. В результате образуются пересыщенные твёрдые растворы на основе олова и цинка, в которых активно протекают диффузионные процессы. Благодаря энергетическим и концентрационным флуктуациям происходит распад пересыщенных твёрдых растворов путём образования и роста зародышей. Образование зародышей новой фазы является гетерогенным и происходит преимущественно на местах, обладающих избытком свободной энергии. Распад твёрдых пересыщенных растворов подтверждается изменением их параметров кристаллических решёток.

Для быстрозатвердевших сплавов эвтектических составов и близких к ним установлено формирование дисперсных равноосных частиц Zn на фоне светлой матрицы Sn (рисунок 2). Частицы Zn, выделившиеся вблизи поверхности A, контактирующей с кристаллизатором, более дисперсные, чем в объёме, что связано с уменьшением степени переохлаждения сплавов по мере удаления от

поверхности A . Средняя длина хорд d_{Zn} не превышает 2 мкм. Объёмная доля Zn V_{Zn} увеличивается, а удельная поверхность $S_{MФГ}$ уменьшается с увеличением расстояния от поверхности A (рисунок 3). Выявлено, что начальная стадия кристаллизации связана с переохлаждением не менее 100 °С, и пересыщения жидкости оловом и цинком, с последующим распадом пересыщенных жидких растворов по спинодальному механизму, в ходе которого образуется пересыщенный твёрдый раствор Sn и дисперсные выделения Zn, выделившиеся в результате распада при $t_{комн.}$

Для быстрозатвердевших сплавов Sn – (40 – 80) мас. % Zn кристаллизация протекает по механизму образования и роста зародышей. Выявлено, что выделения фаз не превышают 1 мкм. Их распределение в поперечном сечении неоднородно, и степень неоднородности повышается с увеличением концентрации Zn. В фольгах, концентрация Zn в которых более 70 мас. %, в прилегающем к поверхности A слое толщиной 15-20 мкм образуются дисперсные вытянутые выделения Sn. Их образование в прилегающем слое, имеющем высокую поверхностную энергию, обусловлено значительной скоростью охлаждения, однако по мере уменьшения степени переохлаждения энергетически выгоден рост частиц крупных размеров.

Выявлено, что в фольгах $(Sn - Zn)_{эвт} - 2$ мас. % Sb образуются выделения, обогащённые цинком, распределённые в эвтектической смеси, а также отдельные фазы Zn_4Sb_3 .

Четвёртая глава включает в себя результаты исследований зёрновой структуры и текстуры фольг сплавов Sn-Zn. Легирование исходных компонентов приводит к уменьшению среднего размера зерна. Для быстрозатвердевших сплавов Sn-Zn наблюдается микрокристаллическая структура, формирование которой связано со значительным переохлаждением расплава. При этом

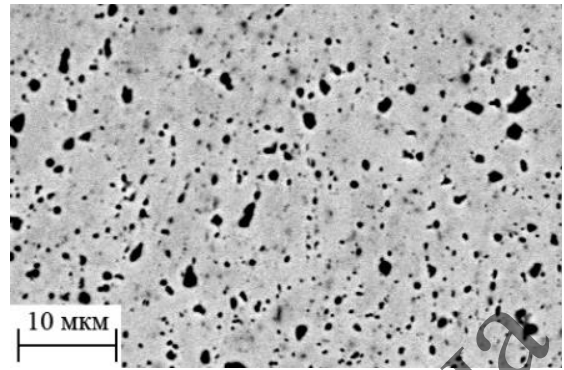


Рисунок 2 – Микроструктура быстрозатвердевшей фольги сплава Sn – 8,8 мас. % Zn

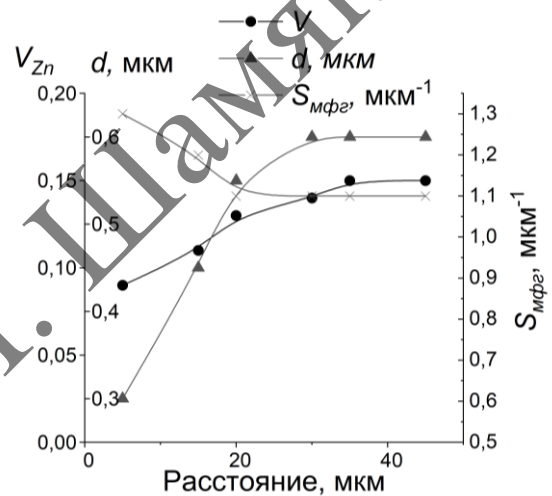


Рисунок 3 – Зависимость объёмной доли цинка V_{Zn} (1), средней длины хорд d_{Zn} (2) и удельной поверхности межфазной границы $S_{MФГ}$ (3) фольги сплава Sn – 15 мас. % Zn

увеличивается скорость образования центров кристаллизации, которая превосходит увеличение скорости роста зёрен, что способствует их измельчению. Средний размер зёрен не превышает 5 мкм. Изменение скорости вращения кристаллизатора с 15 до 70 об/с приводит к уменьшению среднего размера зёрен. В фольгах исходных компонентов формируются чётковыраженные текстуры, ослабляющиеся при легировании. В сплавах Sn – (40 – 70) мас. % Zn возникает новая текстура (10 $\bar{1}$ 0) цинка вследствие влияния чужеродных атомов, затормаживающих рост зёрен. Формирование текстур подтверждается методом дифракции отраженных электронов.

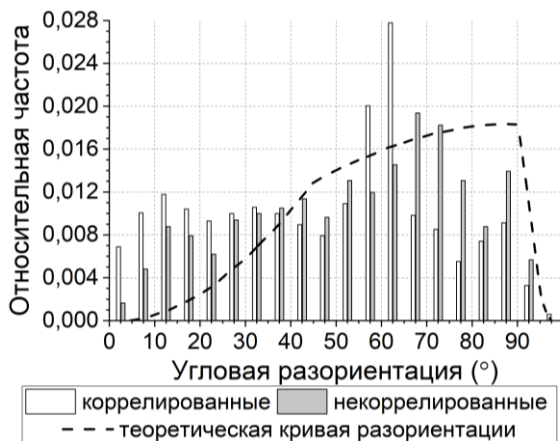


Рисунок 4 – Разориентация зёрен Sn в фольге Sn – 8,8 мас. % Zn (поверхность А)

В быстрозатвердевших сплавах Sn – 8,8 мас. % Zn, Zn – 5 мас. % Sn и Sn – 8,8 мас. % Zn – 2 мас. % Sb выявлены максимумы (рисунок 4) в распределении углов разориентации соседних зёрен Sn и Zn, что может быть связано со способностью Sn и Zn испытывать двойникование в плоскостях (301) и (10 $\bar{1}$ 2) для зёрен олова и цинка соответственно, под действием напряжений, возникающих при охлаждении фольги.

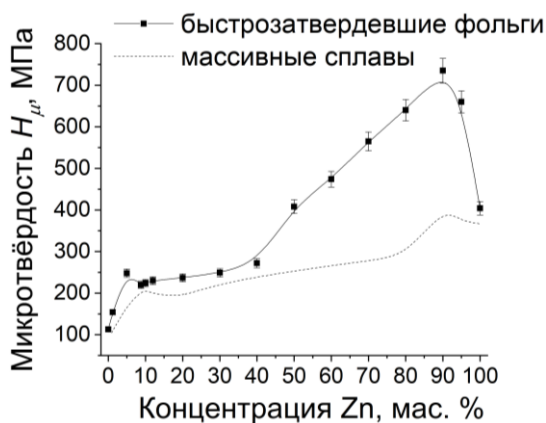


Рисунок 5 – Зависимость микротвёрдости H_{μ} сплавов системы Sn-Zn

Пятая глава посвящена исследованию стабильности структур и механических свойств при выдержке и термической обработке. На графике зависимости микротвёрдости от концентрации цинка (рисунок 5) первый максимум возникает вследствие действия механизмов твёрдорастворного упрочнения легирующими элементами и дисперсными выделениями Zn и Sn; полагая зависимость в фольгах сплавов Sn – (10 – 40) мас. % Zn связана с одновременным действием проскальзывания и влиянием упрочняющего действия Zn; монотонный рост микротвёрдости в области составов (40 – 85) мас. % Zn связан с увеличением содержания Zn и снижением Sn. Для эвтектики Sn-Zn, легированной Sb, наблюдается увеличение микротвёрдости с ростом концентрации Sb, связанное с упрочняющим действием измельчённых частиц Zn и дисперсного соединения Zn₄Sb₃.

повышение температуры отжига фольг приводит к дальнейшему протеканию диффузионных процессов, начавшихся на этапе распада пересыщенного твёрдого раствора, и при нагреве фольг выше 60 °С микротвёрдость уменьшается (рисунок 6, б), что обусловлено изменениями фазовых границ и облегчением деформаций зёрен.

Исследования структур паяных соединений фольг сплавов Sn-Zn при пайке на медные и латунные подложки позволило выявить наличие концентрационного скачка, соответствующего фазе γ -Cu₅Zn₈, шириной ~ 2-3 мкм в области паяного соединения между подложкой и припоем (рисунок 7).

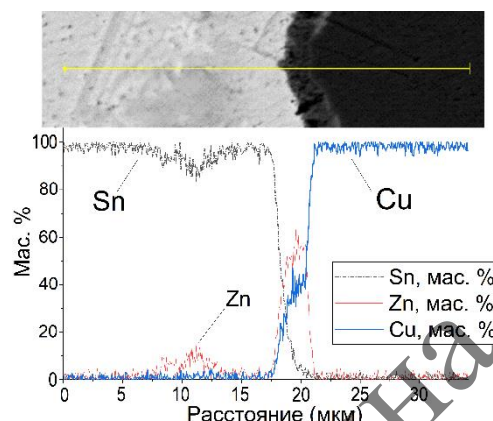


Рисунок 7 – Структура поперечного слоя системы Cu – (Sn-6 мас. % Zn) – Cu вблизи подложки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. С помощью растровой электронной микроскопии, методами дифракции отражённых электронов и рентгеноструктурного анализа установлено формирование в быстрозатвердевших фольгах системы Sn-Zn двухфазной структуры, состоящей из твёрдых растворов на основе олова и цинка; в тройных сплавах Sn – 8,8 мас. % Zn – x мас. % Sb ($x = 1 - 5$) наблюдается выделение дисперсных частиц цинка и интерметаллидной фазы антимонида цинка Zn₄Sb₃. В поперечных сечениях быстрозатвердевших сплавов Sn-Zn выявлено неоднородное распределение частиц второй фазы, изменяющееся с перемещением фронта кристаллизации от гладкой поверхности *A*, к противоположной *B*, связанное с выделением теплоты при кристаллизации поверхностного слоя *A*, и уменьшением переохлаждения расплава, приводящее к снижению скорости зародышеобразования в последующих слоях закристаллизовавшегося сплава [1, 2, 6, 7, 19, 21, 22, 24, 29].

2. Методами растровой электронной микроскопии, дифракции отражённых электронов и рентгеноструктурного анализа выявлено в системах Sn-Zn с содержанием легирующих элементов до 2 мас. % наличие дисперсных выделений вторых фаз размером не более 0,5 мкм в поперечном сечении, формирующихся вследствие захвата легирующих элементов при сверхбыстром охлаждении, и образованием пересыщенных кристаллических твёрдых

растворов с последующим их распадом путём образования и роста зародышей. Установлено формирование дисперсной структуры с наличием дисперсных частиц второй фазы равноосной формы размером менее 2 мкм в поперечном сечении в быстрозатвердевших фольгах Sn-Zn составов, близких к эвтектическим, с начальной стадией кристаллизации при переохлаждении не менее 100 °С, и пересыщения жидкости оловом и цинком, с последующим образованием неравновесной эвтектики в результате расслоения жидкой фазы, с последующим образованием пересыщенного твёрдого раствора олова и дисперсных выделений цинка. В быстрозатвердевших сплавах, содержащих 40 – 90 мас. % Zn, кристаллизация протекает по механизму образования и роста зародышей, с формированием при перемещении фронта кристаллизации выделений олова и цинка, средний размер которых не превышает 1 мкм в поперечном сечении [3, 5, 8, 9, 31, 32].

3. Методами дифракции отраженных электронов и рентгеноструктурного анализа установлено, что в быстрозатвердевших фольгах бинарных сплавов олово-цинк, а также в эвтектических системах Sn-Zn, легированных Al и Sb до 4 мас. %, формируется микрокристаллическая структура со средней хордой на сечениях зёрен олова от 4,5 до 2,5 мкм и зёрен цинка от 3,7 до 1,5 мкм, что связано с высоким переохлаждением жидкости, приводящем к увеличению скорости образования центров кристаллизации. В быстрозатвердевших фольгах сплавов Sn-Zn выявлена разница в размере зёрен, выраженная в их увеличении по мере перемещения фронта кристаллизации вследствие переохлаждения [3, 4, 7, 9, 27].

4. Методами дифракции отраженных электронов и рентгеноструктурного анализа установлено, что легирование олова цинком и цинка оловом вызывает ослабление текстуры (100) олова и (0001) цинка, а также появление новой текстуры (10 $\bar{1}$ 0) цинка в сплавах Sn – (40 – 70) мас. % Zn. Выявлено, что преобладающая текстура (100) олова в быстрозатвердевшем эвтектическом сплаве исчезает при легировании малыми добавками сурьмы. В быстрозатвердевших фольгах сплавов Sn – 8,8 мас. % Zn, Zn – 5 мас. % Sn и Sn – 8,8 мас. % Zn – 2 мас. % Sb в результате анализа экспериментальных и расчётных значений углов разориентировки соседних зёрен олова и цинка между двойником и матрицей было установлено, что в указанных системах может происходить процесс двойникования в олове и цинке [2, 3, 4, 5, 7, 13, 14, 17, 18, 19, 22, 23, 26, 29].

5. Методом Виккерса при локально контактном индентировании установлено, что в быстрозатвердевших сплавах системы Sn-Zn легирование олова цинком или цинка оловом в областях малых концентраций приводит к увеличению микротвёрдости, что связано с действием механизмов

дисперсионного и твёрдорастворного упрочнения легирующими элементами, обусловленного выделениями цинка и олова; выявлено появление минимума микротвёрдости при концентрации Sn – 10 мас. % Zn, связанное с образованием микрокристаллической структуры и возникновением проскальзывания по границам зёрен вследствие высоких гомологических температур; незначительное изменение микротвёрдости в интервале 10 – 40 мас. % Zn связано с одновременным действием механизмов дисперсионного упрочнения и межзёренного проскальзывания; в областях концентраций 40 – 85 мас. % Zn рост микротвёрдости и появление максимального его значения вызвано действием объёмного фактора фазы цинка; в эвтектических системах Sn-Zn, легированных до 4 мас. % Sb, микротвёрдость увеличивается с ростом концентрации легирующих добавок Sb, что связано с упрочняющим действием дисперсной интерметаллидной фазы антимонида цинка Zn_4Sb_3 в сплавах Sn-Zn-Sb и выделениями дисперсных частиц цинка [7, 16, 18, 20, 28].

6. Методом одноосного растяжения выявлено, что в быстрозатвердевших фольгах сплавов Sn-Zn в интервале 15 – 80 и 15 – 60 мас. % Zn наблюдается рост предела прочности и относительного удлинения соответственно, что связано с увеличением объёмной доли цинка и с действием механизма зернограницного проскальзывания. По проведённому анализу паяных слоёв в поперечном сечении быстрозатвердевших фольг сплавов Sn-Zn установлено однородное распределение компонентов припоя и формирование в переходной зоне слоя интерметаллического соединения Cu_5Zn_8 между припоем и Cu-подложкой. Методом Виккерса при локально контактном индентировании выявлено увеличение микротвёрдости быстрозатвердевших фольг сплавов олово-цинк при выдержке при комнатной температуре и последующее её уменьшение через 5-7 часов после изготовления, что связано с началом распада пересыщенного твёрдого раствора и последующего выделения дисперсных частиц второй фазы, являющихся препятствием на пути движения дислокаций, а также уменьшением вклада зернограницного проскальзывания. Уменьшение микротвёрдости связано с процессом слияния дисперсных частиц второй фазы в более крупные формирования, а также с совершенствованием структуры границ зёрен, приводящим к облегчению движения дислокаций. Установлено, что изохронный отжиг быстрозатвердевших фольг сплавов Sn-Zn приводит к уменьшению микротвёрдости до 30 %, что связано с изменениями межфазовых границ и границ зёрен, выраженными в их совершенстве, что обеспечивает лучшую деформацию отдельных зёрен обеих фаз, а также с растворением мелких выделений и ростом крупных. Выявлено, что изотермический и изохронный отжики быстрозатвердевших фольг при 160 °C вызывают увеличение размера выделений фаз, уменьшение удельной поверхности межфазных границ и

неизменность текстуры олова и цинка с совершенствованием границ зёрен матричной фазы при выдержке фольг и уменьшением числа ступенек и уступов [1, 6, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 30, 33, 34, 35].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты могут являться физической основой для разработки методов получения легкоплавких припоев в виде тонких лент или фольг, что подтверждается проведёнными исследованиями структур паяных соединений; для создания защитных износостойких и антикоррозионных покрытий, а также при разработке режимов термической обработки быстрозатвердевших фольг для оптимизации свойств. Возможно использование быстрозатвердевших сплавов олово-цинк в качестве вязких паяльных паст.

Основная практическая ценность полученных результатов состоит в доказательстве перспективности применения бессвинцовых оловянно-цинковых сплавов, в том числе сплавов Sn-Zn эвтектических составов, легированных Al и Sb для нужд таких машиностроительных сфер, как транспортная, станко- и приборостроительная. Проведённые исследования структуры и свойств фольг имеют прогностическую ценность для разработки оловянно-цинковых сплавов с повышенными конструкционными характеристиками. Метод сверхбыстрого затвердевания, относящийся к энерго- и ресурсосберегающей технологии получения материалов, позволяет достичь однородного распределения компонентов фаз и улучшить механические характеристики при сохранении невысокой стоимости изделий за счёт экономного использования легирующих компонентов. Выявленные закономерности изменения свойств фольг при отжиге позволяют определить оптимальные режимы термической обработки быстрозатвердевших сплавов Sn-Zn для технических применений. Установление особенностей протекания процессов при старении и дальнейшей термообработке фольг даёт возможность создания нового класса сплавов для использования их при повышенных температурах. Рассмотренная модель распада пересыщенного твёрдого раствора расширяет представления физики твёрдого тела и физического металловедения о структуре и свойствах быстрозатвердевшего состояния сплавов Sn-Zn и их изменения при различных температурных интервалах использования.

Полученные результаты были внедрены в образовательный процесс по дисциплине «Физика реальных кристаллов» для студентов специальности 1-31 04 08 «Компьютерная физика» (имеется 1 акт о внедрении). Методы исследования, применяемые в научной работе, могут быть использованы при чтении специальных курсов в высших учебных заведениях (БГУ, БГТУ, БНТУ, МГПУ имени И.П. Шамякина и др.).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень изданий, и в иностранных научных изданиях

1. Шепелевич, В. Г. Структура быстрозатвердевшей фольги эвтектического сплава Sn – 8,8 мас. % Zn / В. Г. Шепелевич, Д. А. Зерница // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2020. – № 1. – С. 67–72.

2. Зерница, Д. А. Формирование структуры быстрозатвердевшей фольги эвтектического сплава Sn – 8,8 мас. % Zn / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов / Мин. науки и высш. обр. РФ, ФГБОУ ВО “Тверской гос. ун-т”. – Тверь, 2020. – Вып. 12. – С. 601–608.

3. Шепелевич, В. Г. Формирование структуры сплавов системы олово-цинк при высокоскоростном затвердевании / В. Г. Шепелевич, Д. А. Зерница // Материаловедение. Научно-технический журнал. – 2021. – № 2. – С. 19–24.

4. Shepelevich, V. G. The Formation of the Structure of the Alloys of the Tin-Zinc System upon High-Speed Solidification / V. G. Shepelevich, D. A. Zernitsa // Inorganic Materials : Applied Research. – 2021. – Vol. 12, № 4. – P. 1094–1099.

5. Шепелевич, В. Г. Микроструктура быстрозатвердевшей фольги доэвтектического сплава Sn – 4,4 мас. % Zn / В. Г. Шепелевич, Д. А. Зерница // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2021. – № 2. – С. 44–52.

6. Зерница, Д. А. Исследование структуры и свойств бессвинцовых быстрозатвердевших сплавов на основе цинка при термической обработке / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов / Мин. науки и высш. обр. РФ, ФГБОУ ВО “Тверской гос. ун-т”. – Тверь, 2021. – Вып. 13. – С. 672–681.

7. Зерница, Д. А. Исследование структуры и свойств быстрозатвердевших оловянно-цинковых эвтектических сплавов, легированных сурьмой / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Материаловедение. Научно-технический журнал. – 2022. – № 5. – С. 9–21.

8. Зерница, Д. А. Формирование структуры бессвинцовых сплавов олово-цинк, полученных методом высокоскоростного затвердения, и особенности их кристаллизации / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2022. – № 3. – С. 48–55.

9. Зерница, Д. А. Кристаллизация бессвинцовых бинарных сплавов олово-цинк, полученных методом сверхбыстрой закалки из расплава

/ Д. А. Зерница // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов / Мин. науки и высш. обр. РФ, ФГБОУ ВО «Тверской гос. ун-т». – Тверь, 2022. – Вып. 14. – С. 92–100.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

10. Зерница, Д. А. Влияние изотермического отжига на фазовый состав фольг Sn – 20 мас. % Zn, полученных сверхбыстрым затвердеванием [Электронный ресурс] / Д. А. Зерница // Физика конденсированного состояния: материалы XXVII Междунар. науч.-практич. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 18 апреля 2019 г. / ГрГУ имени Я. Купалы; редкол.: А. Е. Герман (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2019. – С. 32–34. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

11. Зерница, Д. А. Исследование микротвердости быстрозатвердевших оловянно-цинковых сплавов с использованием метода локально-контактного индентирования [Электронный ресурс] / Д. А. Зерница // Молодежь в науке и творчестве : материалы Междунар. науч. форума обучающихся, Гжель, 03 апреля 2019 г. / ФГБОУВО «Гжельский государственный университет». – Гжель, 2019. – С. 870–872. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

12. Зерница, Д. А. Влияние отжига на микроструктуру сплава Sn – 8,8 мас. % Zn / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Приборостроение – 2019: материалы 12-й Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 13-15 ноября 2019 г. / Мин. обр. Респ. Бел., Гос. ком. по стандартизации Респ. Бел., Белорус. нац. технич. ун-т, РУП «Бел. гос. ин-т метрологии», Ин-т приклад. физики НАН Беларуси; редкол.: О.К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 295–297.

13. Шепелевич, В. Г. Высокоскоростное затвердевание эвтектического сплава Sn – 8,8 мас. % Zn / В. Г. Шепелевич, Д. А. Зерница // Быстрозакаленные материалы и покрытия: материалы XVI-й Междунар. науч.-технич. конф., Москва, 15-16 октября 2019 г. / Мин. науки и высш. обр. РФ, ФГБОУ ВО «Моск. авиац. ин-т (национальный исслед. ун-т)»; редкол.: А. А. Лозован [и др.]. – М., 2019. – С. 30–35.

14. Структура, микротвердость и стабильность быстрозатвердевших фольг сплавов системы олово-алюминий / О. В. Гусакова, Д. А. Зерница, В. О. Петрушенко, В. Г. Шепелевич // Быстрозакаленные материалы и покрытия: материалы XVI-й Междунар. науч.-технич. конф., Москва, 15-16 октября 2019 г. / Мин. науки и высш. обр. РФ, ФГБОУ ВО «Моск. авиац. ин-т (национальный исслед. ун-т)»; редкол.: А.А. Лозован [и др.]. – М., 2019. – С. 36–40.

15. Зерница, Д. А. Исследование быстрозатвердевших фольг сплавов (Sn-Zn)_{ЭВТ} – 4 мас. % (Sb) и (Sn-Zn)_{ЭВТ} – 4 мас. % (Al) [Электронный ресурс]

/ Д. А. Зерница // Физика конденсированного состояния: материалы XXVIII Междунар. науч.-практич. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 17 апреля 2020 г. / ГрГУ имени Я. Купалы; редкол.: А.Е. Герман (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2020. – С. 52–54. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

16. Зерница, Д. А. Структура, микротвердость фольг эвтектических сплавов, легированных сурьмой / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-технич. конф., Могилев, 23-24 апреля 2020 г. / Мин. обр. Респ. Бел., Мин. науки и высш. обр. РФ, Межгос. образоват. учреждение высш. обр. «Белорусско-Российский университет»; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2020. – С. 114–115.

17. Зерница, Д. А. Текстура быстрозатвердевших фольг сплавов системы олово-цинк, легированной дополнительно алюминием и сурьмой / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-технич. конф., Могилев, 23-24 апреля 2020 г. / Мин. обр. Респ. Бел., Мин. науки и высш. обр. РФ, Межгос. образоват. учреждение высш. обр. «Белорусско-Российский университет»; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2020. – С. 116–117.

18. Зерница, Д. А. Исследование текстуры и микротвердости в быстрозатвердевших фольгах эвтектических сплавов системы Sn-Zn, легированных сурьмой / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам : материалы XII Междунар. науч.-практич. конф., Мозырь, 5-6 марта 2020 г. / Мин. обр. Респ. Бел., УО «Мозырский гос. пед. ун-т имени И.П. Шамякина»; редкол.: И. Н. Ковальчук (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2020. – С. 142–143.

19. Зерница, Д. А. Коалесценция частиц второй фазы в быстрозатвердевших фольгах сплавов системы Sn-Zn / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Быстрозакаленные материалы и покрытия : материалы XVII Междунар. науч.-технич. конф., Москва, 20-21 октября 2020 г. / Мин. науки и высш. обр. РФ, ФГБОУ ВО «Моск. авиац. ин-т (нац. исслед. ун-т)»; редкол.: А. А. Лозован (рук.) [и др.]. – М., 2020. – С. 18–23.

20. Зерница, Д. А. Стабильность структуры и свойств быстрозатвердевших сплавов системы Sn-Zn при отжиге / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Приборостроение – 2020: материалы 13-й Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 18-20 ноября 2020 г. / Мин. обр. Респ. Бел., Белорус. нац. технич. ун-т,

Бел. гос. ин-т метрологии, Ин-т приклад. физики НАН Беларуси; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 254–255.

21. Зерница, Д. А. Структура и стабильность бессвинцового сплава Zn – 10 мас. % Sn, полученного сверхбыстрым затвердеванием / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Современные проблемы машиноведения: материалы XIII Междунар. науч.-технич. конф. (научные чтения, посвящ. 125-летию со дня рождения П.О. Сухого), Гомель, 22 октября 2020 г. / Мин. обр. Респ. Бел., УО «Гомель. гос. технич. ун-т имени П. О. Сухого», ПАО «КОМПАНИЯ» «СУХОЙ» ОКБ «Сухого». – Гомель, 2020. – С. 67–70.

22. Зерница, Д. А. Исследование структуры и свойств бессвинцовых сплавов на основе цинка, полученных сверхбыстрым затвердеванием / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Инновационные материалы и технологии – 2021 : материалы Междунар. науч.-технич. конф. молодых ученых, Минск, 19-21 января 2021 г. / Мин. обр. Респ. Бел., УО «Бел. гос. технол. ун-т»; редкол.: И. В. Войтов (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 139–142.

23. Зерница, Д. А. Особенности распределения углов разориентации в быстрозатвердевших бессвинцовых фольгах системы Sn-Zn / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам : материалы XIII Междунар. науч.-практич. интернет-конф., Мозырь, 25-26 марта 2021 г. / Мин. обр. Респ. Бел., УО «Мозыр. гос. пед. ун-т имени И.П. Шамякина»; редкол.: И. Н. Ковальчук (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2021. – С. 216–218.

24. Зерница, Д. А. Структура быстрозатвердевших фольг сплавов Zn-Sn / Д. А. Зерница, М. В. Гольцев, В. Г. Шепелевич // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-технич. конф., Могилев, 22-23 апреля 2021 г. / Мин. обр. Респ. Бел., Мин. науки и высш. обр. РФ, Межгос. образоват. учреждение высш. обр. «Белорусско-Российский университет»; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2021. – С. 128–129.

25. Зерница, Д. А. Стабильность структуры и термическая обработка быстрозатвердевших фольг сплавов Zn-Sn / Д. А. Зерница, А. А. Иванов, В. Г. Шепелевич // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-технич. конф., Могилев, 22-23 апреля 2021 г. / Мин. обр. Респ. Бел., Мин. науки и высш. обр. РФ, Межгос. образоват. учреждение высш. обр. «Белорусско-Российский университет»; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2021. – С. 130–131.

26. Зерница, Д. А. Особенности формирования текстуры в бессвинцовых фольгах Sn-Zn, полученных методом сверхбыстрого затвердевания из расплава с разными скоростями вращения кристаллизатора [Электронный ресурс]

/ Д. А. Зерница // Физика конденсированного состояния : материалы XXIX Междунар. науч.-практич. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 22-23 апреля 2021 г. / УО «Гродненский гос. ун-т имени Янки Купалы»; редкол.: Г. А. Гачко (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2021. – С. 48–50. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

27. Зерница, Д. А. Особенности формирования микроструктуры и текстуры доэвтектического сплава Sn – 4,4 мас. % Zn, полученного сверхбыстрым затвердеванием из расплава / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике. КЭЛТ-2021 : тез. докл. объединенной конф., г. Черногловка, 13–17 сентября 2021 г. / ФГБУН «Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН», АО «НИИ молекуляр. электроники». – М., 2021. – С. 87–88.

28. Зерница, Д. А. Механические характеристики быстрозатвердевших сплавов системы олово-цинк / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Быстрозакаленные материалы и покрытия : материалы XVIII Междунар. науч.-технич. конф., Москва, 19-20 октября 2021 г. / Мин. науки и высш. обр. РФ, ФГБОУВО «Моск. авиац. ин-т (националь. исслед. ун-т)»; редкол.: А. А. Лозован (рук.) [и др.]. – М., 2021. – С. 25–29.

29. Зерница, Д. А. Структурные особенности и формирование текстуры в быстрозатвердевших фольгах сплавов системы олово-цинк / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Приборостроение – 2021 : материалы 14-й Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 17-19 ноября 2021 г. / Мин. обр. Респ. Бел., Гос. ком. по стандартизации Респ. Бел., БНТУ, Бел. гос. ин-т метрологии, Ин-т прикладной физики НАН Беларуси; редкол.: О. К. Гусев (пред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 280–281.

30. Зерница, Д. А. Микроструктура паяного соединения пластин меди припоем в виде быстрозатвердевшей фольги доэвтектического сплава Sn – 6 мас. % Zn / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам : материалы XIV Междунар. науч.-практич. интернет-конф., Мозырь, 29 марта 2022 г. / Мин. обр. Респ. Бел., УО «Мозыр. гос. пед. ун-т имени И.П. Шамякина»; редкол.: И. Н. Ковальчук (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2022. – С. 231–233.

31. Зерница, Д. А. Формирование структуры и особенности протекания распада в фольгах системы «олово-цинк», полученных методом высокоскоростной кристаллизации из расплава [Электронный ресурс] / Д. А. Зерница // Физика конденсированного состояния : материалы XXX Междунар. науч.-практич. конф. аспирантов, магистрантов и студентов,

Гродно, 7-8 апреля 2022 г. / УО «Гродненский гос. ун-т имени Янки Купалы»; редкол.: Г. А. Гачко (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2022. – С. 35–37. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

32. Зерница, Д. А. Особенности кристаллизации бессвинцовых быстрозатвердевших сплавов олово-цинк / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-технич. конф., Могилев, 21-22 апреля 2022 г. / Мин. обр. Респ. Бел., Мин. науки и высш. обр. РФ, Межгос. образоват. учр-е высш. обр. «Белорусско-Российский университет»; редкол.: М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2022. – С. 130–131.

33. Зерница, Д. А. Влияние естественного старения и изохронного отжига на микротвердость быстрозатвердевших фольг сплавов системы олово-цинк / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич // Быстрозакаленные материалы и покрытия : материалы XIX Междунар. науч.-технич. конф., Москва, 18-19 октября 2022 г. / Мин. науки и высш. обр. РФ, ФГБОУ ВО «Моск. авиац. ин-т (националь. исслед. ун-т)»; редкол.: А. А. Лозован (рук.) [и др.]. – М., 2022. – С. 9–13.

Тезисы докладов на конференциях

34. Зерница, Д. А. Исследование закономерностей поведения быстрозатвердевших эвтектических сплавов, легированных сурьмой при деформировании одноосным растяжением [Электронный ресурс] / Д. А. Зерница, В. Г. Шепелевич, В. С. Савенко // Механические свойства современных конструкционных материалов : научные чтения им. чл.-корр. РАН Ивана Августовича Одингга : сб. материалов, Москва, 17-18 октября 2020 г. / ФГБУН «Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН». – М., 2022. – С. 71–72. – Режим доступа: http://files.imetran.ru/2020/Oding/Programm_Digest.pdf. – Дата доступа: 19.05.2023.

35. Зерница, Д. А. Исследование структур паяных соединений медных пластин быстрозатвердевшими припоями в виде тонких фольг из бессвинцового сплава / Д. А. Зерница // Приоритетные направления развития образования и науки : сб. материалов VIII Междунар. науч.-практич. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, г. Стерлитамак, РФ, г. Актобе, Республика Казахстан, 25 марта 2022 г. / Мин. науки и высш. обр. РФ, Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВО «Башкирский гос. ун-т»; редкол.: С. Ю. Широкова (отв. ред.) [и др.]. – Стерлитамак-Актобе, 2022. – С. 85–86.



РЕЗЮМЕ

Зерница Денис Александрович

«Структурно-фазовые состояния и физические свойства сплавов цинка, полученных высокоскоростной кристаллизацией»

Ключевые слова: быстрозатвердевшие фольги, высокоскоростная кристаллизация, микрокристаллическая структура, микротвёрдость, зерно, текстура, пересыщенный твёрдый раствор, отжиг.

Цель работы: установление закономерностей формирования при высокоскоростной кристаллизации структуры сплавов цинка, её термической стабильности и изменения физических свойств.

Методы исследования и использованная аппаратура. Сканирующая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, растровая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, измерения микротвёрдости и растяжения, изохронный и изотермический отжиги.

Полученные результаты и их новизна. Установлены закономерности формирования фазового состава и структуры при высокоскоростной кристаллизации сплавов Sn-Zn, а также эвтектики Sn-Zn, легированной сурьмой и алюминием. Выявлено формирование дисперсной двухфазной структуры в исследуемых сплавах. Установлен механизм кристаллизации в системах Sn-Zn с максимальным содержанием легирующих элементов до 2 мас. %, заключающийся в формировании дисперсных выделений вторых фаз вследствие захвата легирующих элементов при сверхбыстром охлаждении и образовании пересыщенных твёрдых растворов с последующим их распадом путём образования и роста зародышей. Для концентраций 4,4–15 мас. % Zn кристаллизация связана с переохлаждением пересыщенных жидких растворов и образованием неравновесной эвтектики в результате расслоения жидкой фазы, с формированием пересыщенных твёрдых растворов олова и цинка и последующего их распада с образованием дисперсных выделений цинка. В областях концентраций 40–80 мас. % Zn кристаллизация протекает по механизму образования и роста зародышей. Установлены механизмы формирования микрокристаллической структуры и текстуры в быстрозатвердевших сплавах Sn-Zn. Выявлены механизмы изменения механических свойств быстрозатвердевших сплавов Sn-Zn в исходном состоянии, а также при изотермическом и изохронном отжигах. Установлено увеличение прочности и пластичности, связанное с упрочняющим действием цинка и вкладом олова в зернограничное проскальзывание соответственно.

Рекомендации по использованию. Полученные результаты внедрены в учебный процесс физико-инженерного факультета МГПУ имени И. П. Шамякина и могут быть использованы для создания бессвинцовых припоев в электротехнических устройствах в виде тонких фольг.

Область применения. Материаловедение, приборостроение, электроника.

РЭЗЮМЭ

Зярніца Дзеніс Аляксандравіч

«Структурна-фазавыя станы і фізічныя ўласцівасці сплаваў цынку, атрыманых
высакахуткаснай крышталізацыяй»

Ключавыя словы: хутказацвярдзелыя фольгі, высакахуткасная крышталізацыя, мікракрышталічная структура, мікрацвёрдасць, зярно, тэкстура, перасычаны цвёрды раствор, адпал.

Мэта работы: устанаўленне заканамернасцей фарміравання пры высакахуткаснай крышталізацыі структуры сплаваў цынку, яе тэрмічнай стабільнасці і змены фізічных уласцівасцей.

Метады даследавання і выкарыстаная апаратура. Сканавальная электронная мікраскапія, рэнтгенаспектральны мікрааналіз, растравая электронная мікраскапія, рэнтгенаструктурны аналіз, вымярэнне мікрацвёрдасці і расцяжэння, ізахронны і ізатэрмічны адпалы.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Устаноўлены заканамернасці фарміравання фазавага складу і структуры пры высакахуткаснай крышталізацыі сплаваў Sn-Zn, а таксама эўтэктыкі Sn-Zn, легаванай сурмой і алюмініем. Выяўлена фарміраванне дысперснай двухфазнай структуры ў даследуемых сплавах. Устаноўлены механізм крышталізацыі ў сістэмах Sn-Zn з максімальным утрыманнем легіруючых элементаў да 2 мас. %, які заключаецца ў фарміраванні дысперсных вылучэнняў другіх фаз у выніку захопу легіруючых элементаў пры звышхуткім ахалоджванні і ўтварэнні перасычаных цвёрдых раствораў з наступным іх распадам шляхам фарміравання і росту зародкаў. Для канцэнтрацый 4,4–15 мас. % Zn крышталізацыя звязана з пераахалоджваннем перасычаных вадкіх раствораў і ўтварэннем нераўнаважнай эўтэктыкі ў выніку расслаення вадкай фазы, з фарміраваннем перанасычаных цвёрдых раствораў волава і цынку і наступнага іх распаду з утварэннем дысперсных вылучэнняў цынку. У абласцях канцэнтрацый 40–80 мас. % Zn крышталізацыя працякае паводле механізма ўтварэння і росту зародкаў. Устаноўлены механізмы фарміравання мікракрышталічнай структуры і тэкстуры ў хутказацвярдзелых сплавах Sn-Zn. Выяўлены механізмы змены механічных уласцівасцей хутказацвярдзелых сплаваў Sn-Zn у зыходным стане, а таксама пры ізатэрмічным і ізахронным адпалах. Устаноўлена павелічэнне трываласці і пластычнасці, звязанае з умацавальным дзеяннем цынку і ўкладам волава ў зернепамежнае праслізгванне адпаведна.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Атрыманыя вынікі ўкаранёныя ў навучальны працэс фізіка-інжынернага факультэта УА МДПУ імя І. П. Шамякіна і могуць быць выкарыстаны для стварэння бессвінцовых прыпояў у электратэхнічных прыладах у выглядзе тонкіх фольг.

Галіна прымянення. Матэрыялазнаўства, прыборабудаванне, электроніка.

SUMMARY

Zernitsa Denis Alexandrovich

«Structural-phase states and physical properties of zinc alloys obtained by rapidly crystallization»

Key words: rapidly solidified foils, rapidly crystallization, microcrystalline structure, microhardness, grain, texture, supersaturated solid solution, annealing.

The purpose of the work: to establish the patterns of formation during rapidly crystallization of the structure of zinc alloys, its thermal stability and changes in physical properties.

Research methods and equipment used. Scanning electron microscopy, X-ray spectral microanalysis, scanning electron microscopy, X-ray diffraction analysis, microhardness and tension measurements, isochronous and isothermal annealing.

The results obtained and their novelty. Regularities in the formation of the phase composition and structure during rapidly crystallization of Sn-Zn alloys, as well as the Sn-Zn eutectic alloyed with antimony and aluminum, have been established. The formation of a dispersed two-phase structure in the alloys under study was revealed. The mechanism of crystallization in Sn-Zn systems with a maximum content of alloying elements up to 2 wt. %, which consists in the formation of dispersed precipitates of the second phases due to the capture of alloying elements during rapidly cooling, and the formation of supersaturated solid solutions with their subsequent decay through the formation and growth of nuclei. For concentrations of 4.4-15 wt. % Zn crystallization is associated with supercooling of supersaturated liquid solutions and the formation of a nonequilibrium eutectic as a result of liquid phase separation, with the formation of supersaturated solid solutions of tin and zinc, and their subsequent decomposition with the formation of dispersed zinc precipitates. In the areas of concentrations of 40-80 wt. % Zn crystallization proceeds according to the mechanism of formation and growth of nuclei. The mechanisms of microcrystalline structure and texture formation in rapidly solidified Sn-Zn alloys have been established. The mechanisms of change in the mechanical properties of rapidly solidified Sn-Zn alloys in the initial state, as well as during isothermal and isochronous annealing, are revealed. An increase in strength and ductility associated with the strengthening effect of zinc and the contribution of tin to grain boundary slip, respectively, has been established.

Recommendations for use. The results obtained are introduced into the educational process of the Faculty of Physics and Engineering of the Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin and can be used to create lead-free solders in electrical devices in the form of thin foils.

Application area. Materials science, instrument making, electronics.



МГПУ им. И. П. Шамякина

Подписано в печать 18.10.2023. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,75.
Тираж 70 экз. Заказ 344.

Отпечатано с оригинала-макета заказчика
в республиканском унитарном предприятии
«Издательский центр Белорусского государственного университета».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/63 от 19.03.2014.
Ул. Красноармейская, 6, 220030, Минск.