

На правах рукописи

Дышекова Фатима Феликсовна

**ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ РАСПЛАВОВ СВИНЦА И
ВИСМУТА С УЧАСТИЕМ ЛИТИЯ И СМАЧИВАЕМОСТЬ ИМИ
РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

НАЛЬЧИК – 2016

Работа выполнена на кафедре физики конденсированного состояния ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова»

Научный руководитель: **Алчагиров Борис Батокович,**
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты: **Дохов Магомед Пашевич,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский
государственный аграрный университет
им. В.М. Кокова», профессор кафедры техни-
ческой механики и физики

Саввин Владимир Соломонович,
доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры ОиСФ ИАТЭ
НИЯУ МИФИ

Ведущая организация: Институт металлургии и материаловедения
имени акад. А. А. Байкова РАН, г. Москва

Защита состоится «9» июня 2016 года в 13⁰⁰ часов на заседании Диссертационного совета Д 212.076.02 при Кабардино-Балкарском государственном университете им. Х.М. Бербекова, 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.

Автореферат разослан «4» мая 2016 года.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова по адресу: 360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



А.А. Ахкубеков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Поиск и изучение теплофизических свойств новых металлических сплавов и систем, пригодных для разработки и создания высокоэффективных теплоносителей и тритий-воспроизводящих материалов для ядерных и термоядерных реакторов являются актуальной проблемой, когда в рамках Федеральной Целевой Программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2020 года» создаются реакторные установки, в которых в I-м контуре используются тяжелые жидкометаллические теплоносители.

Тяжелые жидкометаллические теплоносители с участием лития, свинца, висмута, олова, индия и др. – наиболее возможные материалы для охлаждения blankets термоядерного реактора, которые обеспечат большую безопасность ядерных энергетических установок. Они не горят на воздухе и не столь активно взаимодействуют с рабочим телом реактора, как щелочные металлы, в том числе и с используемыми в цикле Ренкина. Их применение также будет способствовать решению ряда принципиальных проблем, возникающих при создании высокоэффективного энергетического термоядерного реактора. В частности, двух- и трехкомпонентные сплавы системы свинец-висмут-литий обладают благоприятными ядерно-физическими свойствами, что делает их особенно привлекательными для использования в качестве теплоносителей и тритий-воспроизводящих материалов в проектах будущих термоядерных реакторов. В связи с этим исследование поверхностных свойств расплавов тройной системы свинец-висмут-литий является весьма актуальными.

Степень разработанности темы исследования. Экспериментальные исследования поверхностных свойств сплавов, содержащих литий, весьма сложны и затруднительны. При общем дефиците сведений о поверхностном натяжении (ПН, $\sigma(x)$) сплавов бинарных систем с участием лития в подавляющем большинстве исследований измерения ПН проведены лишь в ограниченных температурных и концентрационных интервалах в виде малых добавок Li. На изотермах ПН $\sigma(x)$ ряда из них обнаружены особые точки, достоверность которых ставится под сомнение, поскольку изотермы ПН были построены лишь по нескольким экспериментальным точкам. Более того, при недостаточности данных о ПН двойных сплавов систем лития с висмутом и свинцом вообще отсутствуют экспериментальные работы, посвященные изучению поверхностных свойств тройных сплавов, по составам принадлежащих концентрационному треугольнику системы Pb–Bi–Li.

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование поверхностного натяжения двойных и тройных сплавов системы

свинец-висмут-литий, а также степени смачиваемости ими поверхностей новых конструкционных реакторных сталей.

В рамках поставленной цели решались задачи:

1. Модернизация и автоматизация экспериментальных установок и разработка новых устройств и приборов для изучения ПН металлов и сплавов, а также смачиваемости ими твердых поверхностей.
2. Разработка и внедрение в практику оригинального программного пакета для автоматизации физического эксперимента по измерению ПН жидкостей методом большой капли.
3. Исследования температурных и концентрационных зависимостей ПН сплавов систем свинец-литий, висмут-литий и свинец-висмут-литий.
4. Расчеты адсорбции лития в системах свинец-литий, висмут-литий и свинец-висмут-литий, составов поверхностных слоев и оценка предельной поверхностной активности лития в них.
5. Экспериментальное изучение температурных зависимостей смачиваемости реакторных сталей 12X18Н10Т и ЭК-173 жидкими двойными и тройными сплавами системы свинец-висмут-литий в широкой области температур.

Научная новизна результатов исследования:

1. Новые приборы и устройства, позволяющие осуществлять измерения теплофизических и поверхностных свойств жидкометаллических расплавов с участием лития в условиях высокого статического вакуума, защищенные авторскими свидетельствами на изобретения.
2. Оригинальный программный пакет «SigmaDrop», позволивший автоматизировать процессы расчета ПН методом большой капли. На программный пакет «SigmaDrop» получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614191 от 08.04.2015.
3. Впервые определены температурные и концентрационные зависимости ПН 13 сплавов лития на основе свинца в области составов с содержанием до 20 ат. % лития в свинце и интервале температур от ликвидусных до 700 К.
4. Впервые построены температурные и концентрационные зависимости ПН 11 сплавов системы Bi-Li в интервале составов с содержанием до 10,46 ат. % Li.
5. Впервые определены температурные и концентрационные зависимости ПН 13 тройных сплавов лития на основе эвтектического расплава $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ в области составов с содержанием до 33,1 ат. % Li.
6. Проведены расчеты адсорбции лития в сплавах систем Pb-Li, Bi-Li и Pb-Bi-Li в пакете «MathCAD» по соотношению Гуттенгейма-Адама («N» – вариант) и предельной поверхностной активности лития.
7. Экспериментально исследованы температурные зависимости смачиваемости поверхностей конструкционных сталей жидкими двойными и тройными сплавами системы свинец-висмут-литий в зависимости от концентрации лития в широкой области температур.

Теоретическая и практическая значимость работы. Приборы и устройства, разработанные и усовершенствованные в процессе работы, открывают новые возможности для исследований перспективного класса сплавов с участием лития, позволяют повысить точность и надежность получаемых результатов, экономить расходные материалы и ускорить исследования. Об этом свидетельствуют полученные Патенты на изобретения и успешное практическое использование разработанных приборов и методики при выполнении с участием соискателя гранта РФФИ по теме «Теплофизические свойства сплавов тройной системы литий-свинец-висмут» проект № 13-08-0021а (2013–2015 гг.) и государственного задания № В.003.14 в сфере научной деятельности по теме «Физика межфазных явлений в многокомпонентных системах щелочных и низкоплавких металлов, их сплавов и соединений, включая наносистемы». Экспериментальные установки и программный пакет «SigmaDrop» используются в научно-исследовательской лаборатории «Физика межфазных явлений в расплавах» и в лабораториях по спецдисциплинам «Физика межфазных явлений в конденсированных средах», «Общий физический практикум» для студентов по направлениям 03.03.02 – физика, бакалавр, 03.04.02 – физика, магистр и аспирантов по специальностям 01.04.07 – Физика конденсированного состояния и 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований вошли в спецкурсы по физике межфазных явлений и в выпускные работы бакалавров и магистров.

Полученные данные о ПН сплавов системы свинец-висмут-литий и смачиваемости ими реакторных сталей 12X18Н10Т и ЭК–173 могут быть использованы для дальнейшего развития теории поверхностных явлений в металлах и сплавах, при разработке новых составов тяжелых теплоносителей, конструировании и модернизации атомных и ядерных энергетических установок, а также включены в справочные издания по теплофизическим свойствам веществ.

Методология и методы исследования. Для выполнения работы использованы в основном разработанные оригинальные приборы и устройства, позволяющие получать надежные данные о поверхностных свойствах жидкометаллических систем с участием лития, свинца и висмута. Для измерения ПН использовался программный пакет «SigmaDrop», позволивший автоматизировать процессы расчета ПН методом большой капли. ПН и смачиваемость поверхностей твердых тел определялись в условиях высокого статического вакуума и инертной атмосфере аргона с погрешностью ~ 2 и 1,5%, соответственно. Адсорбции компонентов в изученных сплавах рассчитаны по соотношению Гуггенгейма-Адама с использованием программного пакета «MathCAD».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Созданные новые приборы и устройства для изучения теплофизических и поверхностных свойств легкоплавких металлов и их сплавов с участием лития, а также разработанная и внедренная в практику программа ЭВМ для автоматизации экспериментальной установки по определению ПН жидкометаллических расплавов методом большой капли.
2. Температурные и концентрационные зависимости ПН двойных сплавов системы Pb–Li и Bi–Li в интервале составов с содержаниями до 20 ат. % Li в свинце и до 10,46 ат. % лития в висмуте и обнаруженные особенности на изотермах ПН сплавов систем Pb–Li и Bi–Li в виде неглубокого минимума в области составов с содержанием около 5–6 ат. % Li в сплавах со свинцом и около 4 ат. % Li в сплавах с висмутом.
3. Температурные и концентрационные зависимости ПН тройных сплавов лития на основе эвтектического расплава $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ в области составов с содержанием до 33,1 ат. % Li и обнаруженная слабая поверхностная активность лития в эвтектическом расплаве свинец-висмут.
4. Закономерности и особенности адсорбционных процессов на поверхностях сплавов свинец-литий, висмут-литий и свинец-висмут-литий, а также сведения о термодинамических характеристиках поверхностных слоев изученных сплавов: литий в сплавах на основе Pb, Bi и $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ проявляет малую поверхностную активность, максимальное значение которой достигается в области составов с содержанием, соответственно, около 1,5, 0,8 и 0,5 ат. % Li, а предельная поверхностная активность лития в сплавах со свинцом, висмутом и эвтектическим расплавом $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ составила около 10, 1,4 и 1,2 Н/м·ат. доли.
5. Экспериментально обнаруженные особенности смачиваемости стали 12X18H10T в условиях вакуума и инертной атмосферы (аргон) в области высоких температур: а) жидкий сплав $(PbBi)_{эвт}$ при добавлении 20,9 ат. % Li в условиях вакуума смачивает поверхность указанной стали, тогда как в атмосфере аргона эвтектический сплав $(PbBi)_{эвт}$ с содержанием 23,6 ат. % Li не смачивает поверхность стали; б) установленная тенденция улучшения смачиваемости стали с повышением содержания лития в эвтектическом сплаве $(PbBi)_{эвт}$: температурная зависимость углов смачиваемости $\theta(T)$ поверхности стали 12X18H10T жидким сплавом $(PbBi)_{эвт} + 20,9$ ат. % Li систематически превышает на $20\text{--}30^\circ$ аналогичную зависимость $\theta(T)$ сплавом $(PbBi)_{эвт} + 35,1$ ат. % Li.

Степень достоверности результатов подтверждается согласованностью полученных результатов и следствий из них с известными теоретическими и экспериментальными данными, в частности с критериями поверхностной активности компонентов в бинарных жидкометаллических расплавах. Результаты, полученные в диссертационной работе, физически обоснованы.

ваны и не противоречат современным представлениям физикохимии поверхности.

В экспериментах для получения сплавов использованы высокочистые образцы – висмут марки Ви-0000, свинец С0000 и дополнительно очищенный вакуумной перегонкой литий марки ЛЭ-1.

Разработанные оригинальные приборы и устройства, а также программный пакет «SigmaDrop», позволяющие получать надежные данные о теплофизических свойствах жидкометаллических систем с участием лития, свинца и висмута, прошли проверку метрологической службы КБГУ и защищены авторскими свидетельством и патентом.

Апробация результатов. Основные результаты были представлены на: Межотраслевом семинаре «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в быстрых реакторах» (Обнинск, 2010, 2012); XIII Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ (с международным участием) (Новосибирск, 2011); Международных междисциплинарных симпозиумах «Физика межфазных границ и фазовые переходы» (Лео, 2011, 2012, Туапсе, 2013, 2014, 2015); 6-м Всероссийском семинаре «Физикохимия поверхностей и наноразмерных систем» (Москва, 2015); 19th Symposium on Thermophysical Properties (USA, Colorado, 2015); Второй Всероссийской молодежной научно-технической конференции с международным участием «Инновации в материаловедении» (Москва, 2015); XIII Российско-Китайском Симпозиуме «Новые материалы и технологии» (Казань, 2015).

Личный вклад автора. Диссертация в целом является итогом самостоятельной работы автора, который обобщил полученные лично им и в соавторстве результаты. Задачи разработки методик, новых приборов и устройств и экспериментального изучения ПН бинарных и тройных сплавов системы свинец-висмут-литий и смачиваемости ими поверхностей конструкционных сталей поставлены научным руководителем Б.Б. Алчагировым, который принимал участие в обсуждении полученных результатов. Эксперименты проводились с участием сотрудников лаборатории физики межфазных явлений в расплавах.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 20 работ: 10 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, из которых 4 работы индексируются международными системами цитирования Scopus и Web of Science, 8 – в сборниках конференций и 2 патента.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 128 страницах, содержит 65 рисунков и 8 таблиц. Она состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 187 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены задачи и цели исследований, изложены научная и практическая ценности полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору и анализу результатов исследований ПН и смачиваемости поверхностей легкоплавких сплавов с участием щелочных металлов, имеющих в литературе, из которого следует, что данные свойства сплавов с участием лития слабо изучены, а сведения о поверхностных свойствах сплавов системы свинец-висмут-литий вовсе отсутствуют.

Во **второй главе** дается описание разработанных соискателем новых приборов и экспериментальных установок, методики расчета ПН на базе программного пакета «SigmaDrop», подготовки образцов и заправки ими измерительных ячеек, а также особенностей диаграммы состояния исследуемых систем. Отмечено, что в литературе имеются лишь фрагментарные сведения о диаграмме состояния системы свинец-висмут-литий.

Отличительной особенностью разработанного первого из приборов, предназначенного для изучения температурных и концентрационных зависимостей плотности, ПН и работы выхода электрона (РВЭ) чистого лития и его сплавов, является исключение прямого контакта жидкого лития и его сплавов со стенками прибора (т.е. стеклом), так как литий подается из молибденового контейнера непосредственно в стакан-подложку, изготовленную из вольфрам-рениевого сплава, не взаимодействующего с исследуемыми образцами.

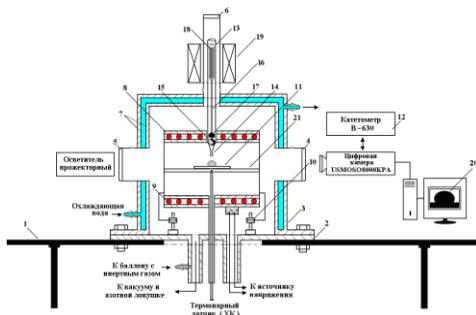


Рисунок 1 – Экспериментальная установка для изучения смачиваемости поверхностей конструкционных сталей жидкими металлическими расплавами

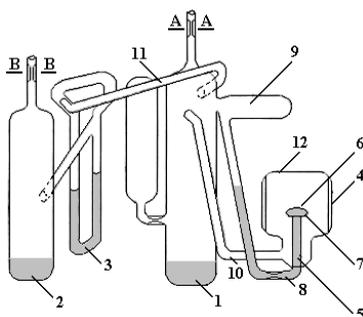


Рисунок 2 – Прибор для измерения ПН жидких металлов методом большой капли

Для изучения смачиваемости поверхностей конструкционных сталей металлическими расплавами модернизировано загрузочное устройство 13 и автоматизирована экспериментальная установка (рисунок 1), позволяющая

раздельную термовакуумную обработку жидких образцов и подложек, а также подачу образца на подложку в любой момент времени и при нужной температуре, т.е. в строго контролируемых условиях.

Для изучения ПН жидкометаллических систем использован прибор, схематически показанный на рисунке 2, обеспечивающий возможность приготовления множества сплавов с желаемым шагом по концентрации. При одной заправке чистыми компонентами емкостей 1 и 2 прибор позволяет без разгерметизации измерять ПН сплавов в широком интервале составов.

Для автоматизации экспериментальной установки (рисунок 3) разработан оригинальный программный пакет «SigmaDrop» в среде программирования C Sharp 5.0, позволивший автоматизировать процесс регистрации и цифровой обработки изображений с помощью ЭВМ исследуемых образцов. В нем реализованы функции прецизионного выделения контуров капель с помощью дифференциальных операторов, автоматизированного измерения геометрических параметров профиля капли и расчета ПН.



Рисунок 3 – Блок-схема экспериментальной установки для измерения ПН жидких металлов и сплавов методом большой капли

В третьей главе представлены результаты измерений ПН чистых Li, Pb, Bi и их двойных и тройных сплавов, а также расчетные данные адсорбции и предельной поверхностной активности лития в изученных сплавах. Обработка методом наименьших квадратов полученных политерм $\sigma(T)$ чистых компонентов показала, что они описываются линейными уравнениями с отрицательными температурными коэффициентами и согласуются с наиболее достоверными литературными данными, таблица 1.

На рисунке 4 показаны отклонения экспериментальных данных $\sigma_{\text{эк}}$ жидкого свинца и висмута от рассчитанных по аппроксимирующим уравнениям $\sigma(T)$, которые для сплавов Pb с Li представлены в таблице 2.

Главной особенностью изотермы ПН системы Pb–Li (рисунок 5) является наличие неглубокого минимума на $\sigma(x)$ в области составов с содержанием около 6 ат. % Li в Pb. На форму изотермы $\sigma(x)$ решающее влияние оказало наличие кластеров Li_4Pb и других структурных единиц в сплавах Li–Pb. Согласно Прохоренко С.В. [1], после плавления околоэвтектических сплавов системы Pb–Li определяющую роль в структуре расплавов играют ионно-ковалентные комплексы Li_4Pb и LiPb .

Таблица 1 – Поверхностное натяжение чистых свинца, висмута и лития

| Металлы | ТУ, (ГОСТ) | Чистота металлов, масс. % | Температурная зависимость $\sigma(T) = \sigma_0 - d\sigma/dT(T - T_0)$, мН/м | Средне квадратичная погрешность ε , % |
|---------|------------------------|---------------------------|---|---|
| Свинец | 22861-93 | 99,9999 | $\sigma(T) = 465,9 - 0,17(T - T_{пл})$ | 0,02 |
| Висмут | 48-6-114-89 | 99,9999 | $\sigma(T) = 374,6 - 0,12(T - 683)$ | 0,13 |
| Литий | 8774-75 (доп. очистка) | 99,9 | $\sigma_0 = 405,0 \pm 1,8$ | – |

С повышением температуры сплавов протекают процессы размывания кластеров и комплексов, при этом структура уплотняется за счёт проникновения в кластеры атомов чистых компонент. Об этом свидетельствуют полимеры ПН двух сплавов, близких по составу к эвтектическому, с содержанием в Pb соответственно 19,2 и 20 ат. % Li, отличающиеся от всех остальных положительными знаками температурного коэффициента ПН $d\sigma/dT$, таблица 2.

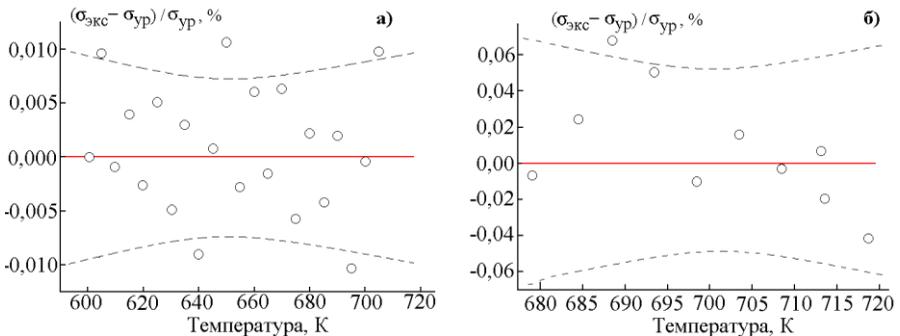


Рисунок 4 – Отклонение экспериментальных значений ПН от рассчитанных по аппроксимирующему уравнению $\sigma(T) = \sigma_0 - d\sigma/dT(T - T_0)$: а) жидкого свинца; б) жидкого висмута

По мере дальнейшего обогащения свинца литием и приближения к эвтектическому составу, обнаруживается тенденция к повышению ПН. Это можно объяснить, по-видимому, наличием в приэвтектических расплавах соединений типа Li_4Pb : каждый из атомов Pb, присоединяя к себе и связывая

по четыре атома Li, может привести к уменьшению концентрации атомов Li на поверхности расплавов.

Таблица 2 – Поверхностное натяжение свинца и сплавов Pb–Li

| № | Составы сплавов, ат. % | | Температурная зависимость $\sigma(T) = \sigma_0 - d\sigma/dT(T - T_0)$, мН/м | Среднеквадратичная погрешность ε , % |
|----|------------------------|-------|---|--|
| | Pb | Li | | |
| 1 | 100 | 0 | $\sigma(T) = 465,9 - 0,17(T - T_{пл})$ | 0,02 |
| 2 | 98,59 | 1,41 | $\sigma(T) = 451,0 - 0,05(T - 633)$ | 1,3 |
| 3 | 97,30 | 2,70 | $\sigma(T) = 449,4 - 0,20(T - 628)$ | 1,5 |
| 4 | 96,39 | 3,61 | $\sigma(T) = 446,5 - 0,08(T - 633)$ | 2,0 |
| 5 | 94,69 | 5,31 | $\sigma(T) = 444,0 - 0,01(T - 633)$ | 1,4 |
| 6 | 92,80 | 7,20 | $\sigma(T) = 442,9 - 0,09(T - 628)$ | 1,0 |
| 7 | 90,04 | 9,96 | $\sigma(T) = 445,5 - 0,05(T - 633)$ | 0,9 |
| 8 | 87,47 | 12,53 | $\sigma(T) = 448,8 - 0,08(T - 618)$ | 2,0 |
| 9 | 85,78 | 14,22 | $\sigma(T) = 455,4 - 0,05(T - 553)$ | 0,9 |
| 10 | 84,37 | 15,63 | $\sigma(T) = 459,0 - 0,07(T - 553)$ | 2,0 |
| 11 | 83,13 | 16,87 | $\sigma(T) = 459,4 - 0,04(T - 518)$ | 2,0 |
| 12 | 81,92 | 18,08 | $\sigma(T) = 460,3 - 0,01(T - 518)$ | 0,8 |
| 13 | 80,83 | 19,17 | $\sigma(T) = 458,4 + 0,01(T - 513)$ | 1,0 |
| 14 | 80,0 | 20,0 | $\sigma(T) = 454,4 + 0,05(T - 543)$ | 2,0 |

Уменьшение же содержания хотя и слабого, но все же поверхностно-активного лития на поверхности расплавов должно способствовать некоторому возрастанию ПН расплавов, что и наблюдается на опыте, рисунок 5.

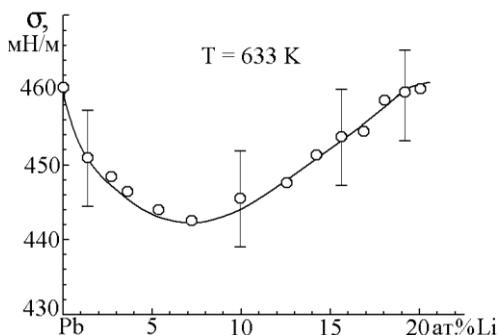


Рисунок 5 – Концентрационная зависимость поверхностного натяжения сплавов Pb–Li при 633 К

Для чистого висмута и его 11 сплавов с Li получены линейные полимеры ПН с отрицательными коэффициентами $d\sigma/dT$, таблица 3.

Таблица 3 – Поверхностное натяжение сплавов висмут-литий

| № | Составы сплавов, ат. % | | Температурная зависимость $\sigma(T) = \sigma_0 - d\sigma/dT(T - T_0)$, мН/м | Среднеквадратичная погрешность ϵ , % |
|----|------------------------|-------|---|---|
| | Bi | Li | | |
| 1 | 100 | 0 | $\sigma(T) = 374,6 - 0,12(T - 683)$ | 0,13 |
| 2 | 99,51 | 0,49 | $\sigma(T) = 371,9 - 0,13(T - 663)$ | 2,0 |
| 3 | 98,78 | 1,22 | $\sigma(T) = 371,2 - 0,14(T - 663)$ | 1,2 |
| 4 | 97,90 | 2,10 | $\sigma(T) = 367,8 - 0,04(T - 658)$ | 2,0 |
| 5 | 96,84 | 3,16 | $\sigma(T) = 372,0 - 0,07(T - 653)$ | 2,0 |
| 6 | 95,67 | 4,33 | $\sigma(T) = 373,0 - 0,01(T - 658)$ | 2,0 |
| 7 | 94,76 | 5,24 | $\sigma(T) = 380,2 - 0,18(T - 658)$ | 1,7 |
| 8 | 93,85 | 6,15 | $\sigma(T) = 377,4 - 0,07(T - 653)$ | 1,5 |
| 9 | 92,67 | 7,33 | $\sigma(T) = 374,8 - 0,01(T - 673)$ | 0,7 |
| 10 | 91,33 | 8,67 | $\sigma(T) = 378,1 - 0,09(T - 673)$ | 2,0 |
| 11 | 90,50 | 9,50 | $\sigma(T) = 377,8 - 0,03(T - 653)$ | 2,0 |
| 12 | 89,54 | 10,46 | $\sigma(T) = 384,4 - 0,13(T - 653)$ | 0,8 |

На изотерме $\sigma(x)$ сплавов системы Bi–Li отмечается пологий минимум, глубина которого достигает 7–8 мН/м, рисунок 6. Это означает, что Li проявляет слабую активность, хотя его ПН на 7–8% превышает ПН Bi и, в согласии с критериями поверхностной активности компонентов в бинарных сплавах, добавки Li должны были привести к слабому повышению ПН сплавов.

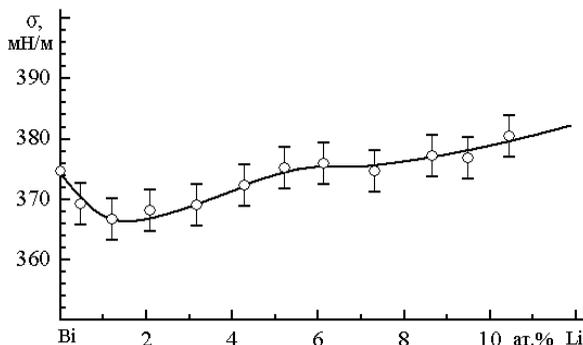


Рисунок 6 – Концентрационная зависимость ПН сплавов Bi–Li при 683 К

Подобные «нарушения» критериев поверхностной активности сплавов с почти одинаковыми значениями ПН компонентов в двойных сплавах, особенно в концентрационной области малых взаимных добавок компонентов, отмечались в литературе, но и в настоящее время отсутствует удовлетворительное объяснение подобным фактам. С ростом содержания Li в висмуте до

10–11 ат. % Li ПН сплавов Bi–Li начинает повышаться, поскольку по отношению к висмуту литий в целом является слабым поверхностно-инактивным компонентом.

В литературе отсутствуют данные об активности Li в сплавах с Bi, которые могли бы прояснить характер процессов, протекающих в исследуемых сплавах при варьировании температур и составов. Отметим только, что в них возможны процессы седиментации, поскольку плотности компонентов различаются в 20 раз, а также вероятность влияния соединений и структурных превращений на изотерму ПН сплавов системы Bi–Li.

Впервые измерены $\sigma(T, x)$ 13 сплавов Li на основе эвтектического расплава $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ с содержанием до 33,1 ат. % Li, рисунок 7 и таблица 4.

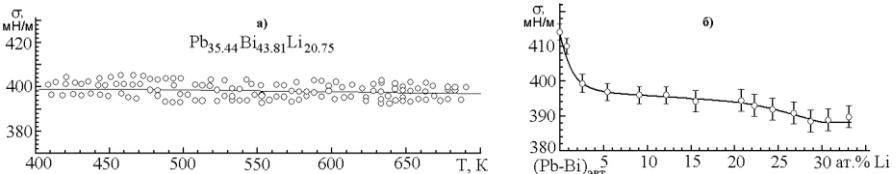


Рисунок 7 – а) Температурная зависимость ПН эвтектического расплава PbBi с содержанием 20,75 ат. % лития; б) Концентрационная зависимость ПН сплавов лития на основе эвтектического расплава $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ при 400 К

Таблица 4 – Температурная и концентрационная зависимости поверхностного натяжения тройных сплавов Pb–Bi–Li

| № | Составы сплавов, ат. % | | | Температурная зависимость $\sigma(T) = \sigma_{пл} - d\sigma/dT(T - T_{пл})$, мН/м | Среднеквадратичная погрешность ε , % |
|----|------------------------|-------|-------|---|--|
| | Pb | Bi | Li | | |
| 1 | 44,71 | 55,29 | 0 | $\sigma(T) = 414,0 - 0,08(T - 400)$ | 0,2 |
| 2 | 44,33 | 54,83 | 0,84 | $\sigma(T) = 410,0 - 0,30(T - 400) + 2,59 \cdot 10^{-4}(T - 400)^2$ | 1,7 |
| 3 | 43,63 | 54,03 | 2,34 | $\sigma(T) = 399,0 - 0,05(T - 400)$ | 0,3 |
| 4 | 42,18 | 52,46 | 5,36 | $\sigma(T) = 397,0 - 0,02(T - 400)$ | 0,03 |
| 5 | 40,61 | 50,23 | 9,16 | $\sigma(T) = 396,2 - 0,02(T - 400)$ | 0,1 |
| 6 | 39,10 | 48,36 | 12,54 | $\sigma(T) = 396,0 - 0,02(T - 400)$ | 0,2 |
| 7 | 37,77 | 46,70 | 15,53 | $\sigma(T) = 394,1 - 0,02(T - 400)$ | 0,2 |
| 8 | 35,44 | 43,81 | 20,75 | $\sigma(T) = 393,7 - 0,01(T - 433)$ | 2,0 |
| 9 | 34,79 | 42,99 | 22,22 | $\sigma(T) = 394,0 - 0,004(T - 433)$ | 1,8 |
| 10 | 33,85 | 41,84 | 24,31 | $\sigma(T) = 392,0 - 0,003(T - 433)$ | 2,0 |
| 11 | 32,92 | 40,68 | 26,40 | $\sigma(T) = 391,0 - 0,003(T - 433)$ | 2,0 |
| 12 | 32,03 | 39,60 | 28,37 | $\sigma(T) = 388,4 - 0,002(T - 433)$ | 1,3 |
| 13 | 30,99 | 38,31 | 30,70 | $\sigma(T) = 388,6 - 0,01(T - 433)$ | 1,9 |
| 14 | 29,93 | 37,00 | 33,07 | $\sigma(T) = 389,3 - 0,02(T - 433)$ | 1,8 |

На рисунке видно, что первые добавки Li (до 5 ат. %) к расплаву $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ приводят к понижению ПН на 3,5%, которое объясняется адсорбционно-десорбционными процессами, обычно протекающие наиболее интенсивно в области составов с малым содержанием поверхностно-активного компонента, т.е. лития (ПН расплава $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ и чистого Li равны 415 и 405 мН/м соответственно).

Дальнейшее обогащение эвтектического расплава $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ литием до 33 ат. % Li приводит к некоторому изменению характера изотерм $\sigma(x)$ сплавов (рисунок 7б), так как, в отличие от предшествующих сплавов с более широкой областью однофазного жидкого состояния, каждый из отдельных тройных сплавов теперь проходит через ограниченные небольшими температурными и концентрационными интервалами различные фазовые области, каждая из которых имеет свои особенности строения тройных сплавов в соответствии с фазовой диаграммой состояния системы Pb–Bi–Li, рисунок 8.

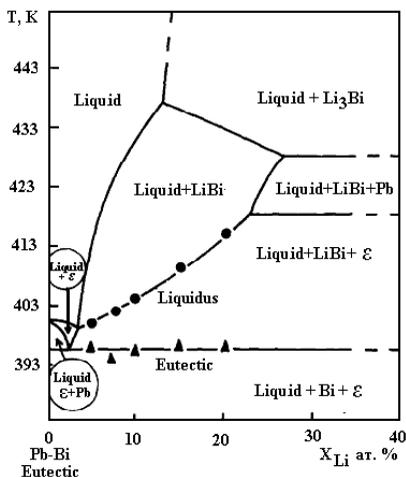


Рисунок 8 – Фрагмент предполагаемой фазовой диаграммы состояния системы Pb–Bi–Li, прилегающей к эвтектическому сплаву $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ [2]

По полученным данным ПН для всех изученных систем проведены расчеты адсорбции лития $\Gamma_{Li}^{(N)}$ в «N» – варианте по соотношению Гуггенгейма-Адама

$$\Gamma_{Li}^{(N)} = -\frac{x_2(1-x_2)}{RT} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial x_2} \right)_T$$

в котором x_2 – атомные доли второго компонента (лития) при условии нормировки $x_1 + x_2 = 1$, R – универсальная газовая постоянная, T – температура в К. Результаты расчетов адсорбций лития в системах Pb–Li и Bi–Li (рисунок 9) и предельной поверхностной ак-

тивности (ППА) $a_{Li} = \left(\lim_{x_{Li} \rightarrow 0} \frac{\Delta\sigma}{\Delta x} \right)_T$ подтвердили, что Li в сплавах на основе Pb

и Bi проявляет малую поверхностную активность, максимальное значение которой достигается в области составов с содержанием, соответственно, около 1,5 и 0,8 ат. % Li. ППА лития в сплавах со свинцом и висмутом составили

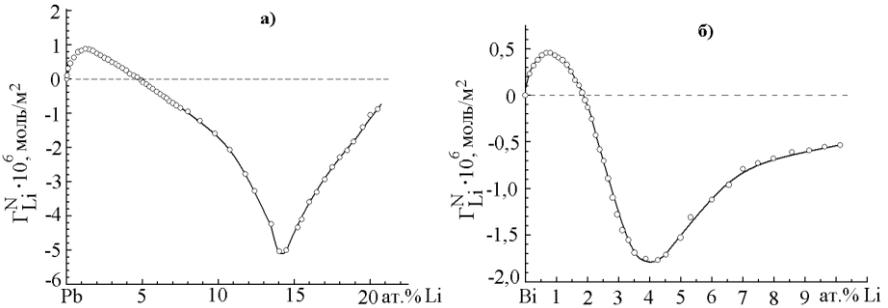


Рисунок 9 – Адсорбция лития в системах: а) Pb–Li (633 К) и б) Bi–Li (683 К)

около 10 и 1,4 Н/м·ат. доли соответственно. При расчетах адсорбции Li в тройных сплавах Pb–Bi–Li допущено упрощение, принимая эвтектический расплав как отдельный («первый») компонент в квазибинарной системе $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ –Li. На рисунке 10а видно, что в области небольшого содержания Li в расплаве $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ литий проявляет поверхностную активность, максимальное значение которой достигается в области составов с содержанием около 0,5 ат. % Li, а в сплавах с содержанием 20–28 ат. % Li на изотерме адсорбции отмечается минимум. Его появление связано с особенностями строения жидких сплавов с содержанием 20–28 ат. % Li, в которых, согласно диаграмме состояния (рисунок 8) присутствуют соединения типа LiBi и ϵ - фаза.

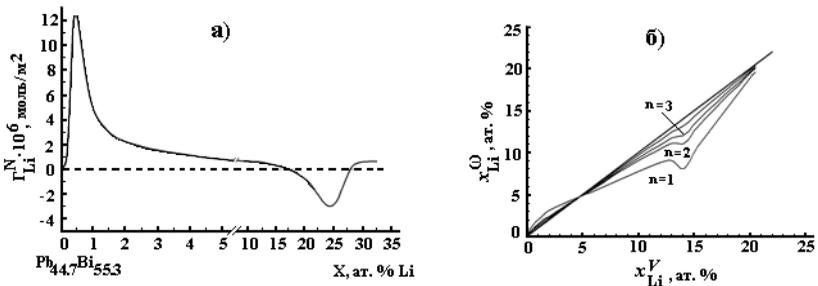


Рисунок 10 – а) Адсорбция лития в системе $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ – Li при 400 К;

б) Концентрации лития в поверхностном слое x_{Li}^{ω} и в объеме x_{Li}^V жидких сплавов Pb–Li

Предельная поверхностная активность лития в эвтектическом расплаве $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ при 400 К составила около 1,2 Н/м·ат. доли, что также свидетельствует о невысокой активности лития в изученных сплавах.

Расчеты составов поверхностного слоя и молярных площадей для сплавов системы Pb–Li проводились по известным соотношениям

$$x_2^\omega = \frac{x_2 + \omega_{01}x_1\Gamma_2^{(1)}}{1 - (\omega_{02} - \omega_{01})x_1\Gamma_2^{(1)}} \quad \text{и} \quad \omega_{0i} = \frac{(V_{oi}^\omega)^{2/3} N_A^{1/3}}{n},$$

где $\Gamma_2^{(1)}$ – относительная адсорбция второго, поверхностно-активного компонента, ω_{0i} – молярная площадь чистого i -го компонента, V_{oi} – молярный объем i – го чистого компонента, N_A – число Авогадро, n – число монослоев в поверхностном слое расплава.

Результаты проведенных расчетов состава поверхностного слоя для системы Pb–Li при $T = 633$ К показаны на рисунке 10б, согласно которым поверхностный слой в области околэвтектических сплавов состоит из двух монослоев лития.

В четвертой главе приводятся результаты исследований смачиваемости поверхностей реакторных сталей 12Х18Н10Т и ЭК–173 жидкими Pb, Bi и их двойными и тройными сплавами системы Pb–Bi–Li в широкой области температур в условиях вакуума и атмосфере аргона (99,999%).

На рисунке 11 представлены данные о политермах углов смачивания $\theta(T)$ жидкими Pb, Bi и эвтектическим сплавом $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ стали ЭК–173 в зависимости от температуры.

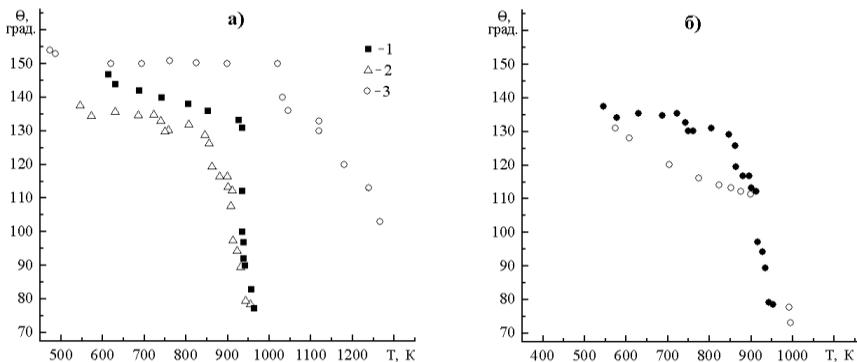


Рисунок 11 – а) Температурная зависимость углов смачивания реакторной стали ЭК-173: 1 – жидким свинцом; 2 – жидким висмутом; 3 – жидким эвтектическим расплавом PbBi; б) Температурная зависимость углов смачивания реакторной стали ЭК-173 жидким висмутом:

● – данные настоящей работы; ○ – результаты работы [3]

На рисунке 11а видно, что в температурной области $T_{пл} - 923$ К угол смачивания стали ЭК–173 жидким свинцом сперва уменьшается по линейному закону, но в области более высоких температур (923 К) углы θ быстро уменьшаются от 130 до 70°, т.е. на зависимости $\theta(T)$ системы «Pb – сталь ЭК–173» обнаруживается критическая температура смачивания (КТС), равная около 920 К.

Из данных смачиваемости стали ЭК–173 следует, что она не смачивается вплоть до 870 К, что можно объяснить тем, что примеси Al (1,2 мас. %) в стали ЭК–173 за счет сегрегации накапливаются на межфазной границе и образуют защитные оксидные пленки. Дальнейшее повышение температуры приводит к их разрушению и смачиванию стали. Сравнение наших данных с литературными [3] показывает, что в [3] также обнаружена КТС, но превышающая на 100 К определенное нами значение КТС.

Причиной неопределенности значения КТС в [3] является отсутствие экспериментальных точек на $\theta(T)$ в области температур 890–990 К (рисунок 11), хотя при 990 К на $\theta(T)$ имеются две экспериментальные точки с θ , равными 78 и 76°.

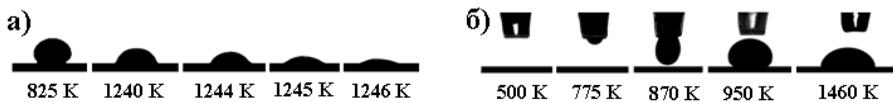


Рисунок 12 – Температурная зависимость смачиваемости поверхности стали 12X18H10T жидким эвтектическим сплавом: а) в условиях вакуума $5 \cdot 10^{-4}$ Па, б) в атмосфере аргона

Снимки капель, полученные при изучении смачиваемости стали 12X18H10T расплавом $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ в условиях вакуума и атмосфере аргона (рисунки 12а и 12б), а также результаты обработки фотоизображений капель представлены на рисунках 13а и 13б. На них видно, что в условиях вакуума при $T > 920$ К эвтектический сплав начинает смачивать сталь 12X18H10T ($\theta \sim 80^\circ$), а при 1250 К наступает порог смачиваемости – катастрофическое уменьшение угла смачивания при температуре $T_{кр} = 1250$ К, т.е. обнаруживается критическая температура смачивания.

Сравнение фотоизображений капель (рисунок 12а и 12б), показывает, что в вакууме, до наступления смачивания подложки, при температурах около 1200 К начинается интенсивное испарение капли, фактически завершающееся ее исчезновением. Компонентный состав капли расплава при этом будет меняться и отличаться от исходного состава. В связи с этим требуется необходимость уточнения самого понятия КТС, поставив его в зависимость от условий (вакуум, газовая среда, ее давление и т.д.), в которых проводятся эксперименты по изучению $\theta(T)$.

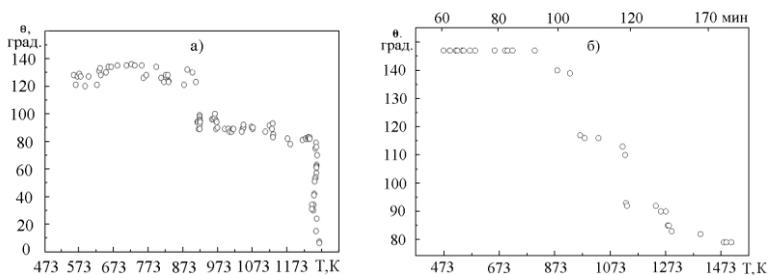


Рисунок 13 – Температурная зависимость углов смачивания стали 12X18N10T эвтектическим расплавом $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$: а) в условиях вакуума $5 \cdot 10^{-4}$ Па; б) атмосфере аргона

Опыты показали, что в атмосфере аргона (рисунок 12б) до температуры 1520 К капля расплава $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ остается вполне стабильной по объему. При этом краевой угол смачивания при 1400 К не становится заметно меньше 80° , а обнаруженный при измерениях $\theta(T, \tau)$ в условиях вакуума КТС хотя и сохраняется, но оказывается «размытым» вдоль оси температур на 300 К, (рисунок 13б). Таким образом, в атмосфере аргона КТС составила около 1600 К.

Обнаруженный порог смачивания можно объяснить следующим образом. По данным фотоэлектронной спектроскопии [4], поверхность стали покрыта оксидной пленкой толщиной в 1–3 нм, которая с повышением температуры начинает разрушаться. При этом степень стабильности пленки определяется оксидом хрома, который при 870 К рекомбинирует в вакууме с хромом с образованием летучего оксида: $Cr + Cr_2O_3 \rightarrow 3CrO$, приводящего к уменьшению углов θ . В изученной нами стали 12X18N10T содержится, согласно ГОСТу 5632-72, около 17-19 мас. % Cr, что также способствовать к еще большей зависимости толщины оксидных пленок от температуры.

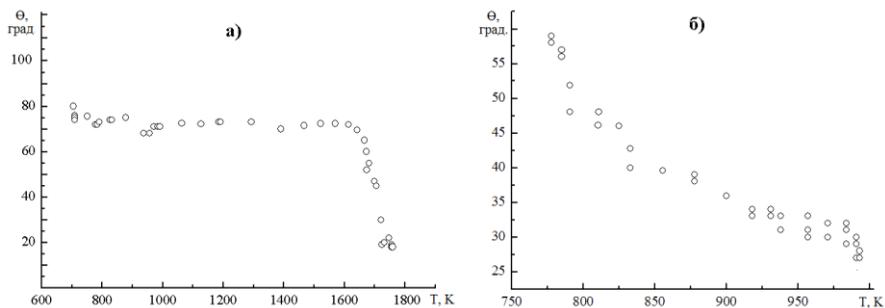


Рисунок 14 – Температурные зависимости смачиваемости реакторной стали 12X18N10T тройными расплавами $(PbBi)_{эвт}$ с содержанием: а) 20,9 ат. % Li и б) 35,1 ат. % Li в условиях вакуума

Результаты изучения влияния содержания лития в тройных сплавах с (PbBi)_{эвт} на температурные зависимости $\theta(T)$ смачиваемости стали 12X18H10T в условиях вакуума показаны на рисунке 14. На них видно, что расплав (PbBi)_{эвт}+20,9 ат. % Li при 700 К смачивает подложку из 12X18H10T, образуя краевой угол около 75°. Этот угол остается постоянным до температуры 1600 К и только затем быстро уменьшается до $\theta = 20^\circ$. Расплав (PbBi)_{эвт} + 35,1 ат. % Li в интервале 775–1000 К смачивает сталь 12X18H10T: при $T = 775$ К ($\theta = 55^\circ$) и, по мере повышения температуры, угол смачивания достигает при 975 К значения $\theta = 25^\circ$, что обусловлено большим (на 12 ат. % Li) содержанием лития в исходном сплаве (PbBi)_{эвт}, чем в сплаве с 20,9 ат. % Li.

В работе изучалось влияние условий смачиваемости (вакуум и инертная среда - аргон) стали 12X18H10T сплавами (PbBi)_{эвт}, мало отличающиеся по содержанию в них лития (рисунки 14а и 15).

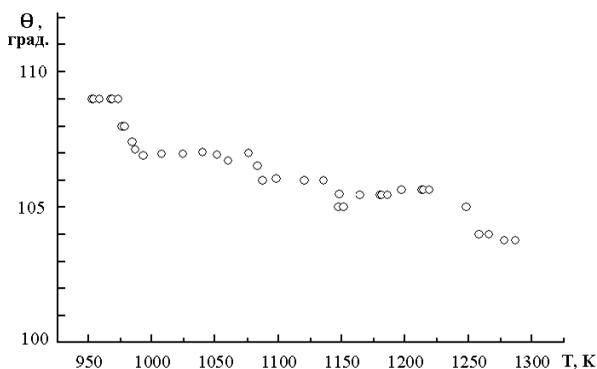


Рисунок 15 – Температурная зависимость углов смачивания жидким сплавом $Pb_{34,1}Bi_{42,3}Li_{23,6}$ поверхности стали 12X18H10T в атмосфере аргона

Сравнение полученных данных о $\theta(T)$ показывает, что они качественно различаются: сплав (PbBi)_{эвт} + 20,9 ат. % Li в условиях вакуума в изученном интервале температур смачивает сталь, рисунок 14б, тогда как в атмосфере аргона расплав (PbBi)_{эвт} + 23,6 ат. % Li не смачивает сталь 12X18H10T, рисунок 15.

Более того, в условиях вакуума на зависимости $\theta(T)$ обнаруживается КТС, которая отсутствует при измерениях в инертной атмосфере аргона. Лучшая смачиваемость сталей расплавом (PbBi)_{эвт} с практически равными добавками лития в условиях вакуума, чем в инертной атмосфере, обусловлена тем, что в вакууме поверхность подложки вдоль основания капли расплава покрывается пленкой легкоиспаряющихся компонентов сплавов Pb–Bi–Li, тогда как в атмосфере аргона распыление компонентов смачивающей жидкости затруднено.

Заключение

1. Разработаны и внедрены в исследовательскую практику новые приборы и устройства, а также программное обеспечение «SigmaDrop», позволяющие осуществлять измерения теплофизических и поверхностных свойств металлических расплавов с участием лития в условиях высокого статического вакуума или инертной атмосфере. На их базе создана оригинальная автоматизированная экспериментальная установка для измерения ПН сплавов двойных и тройных металлических систем в широком концентрационном интервале, а также смачиваемость ими поверхностей реакторных сталей.

2. Впервые определены температурные и концентрационные зависимости ПН бинарных сплавов систем Pb–Li и Bi–Li. Показано, что на изотермах ПН обеих систем наблюдаются пологие минимумы, обусловленные адсорбционно-десорбционными процессами и сложностью строения сплавов изученных систем.

3. Экспериментально определены и построены политермы и изотермы ПН тройных сплавов лития на основе эвтектического расплава $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ в области составов с содержанием до 33,1 ат. % Li. Показано, что литий является слабой поверхностно-активной добавкой в эвтектическом расплаве свинец-висмут, а на изотерме ПН обнаруживается пологий минимум, обусловленный наличием в них, в зависимости от температуры, ϵ – фазы и кластеров типа Li_4Pb и $LiPb$.

4. Установлены особенности изотерм адсорбций и оценены значения предельной поверхностной активности лития в изученных двойных и тройных сплавах системы Pb–Bi–Li. Показано, что максимальное значение адсорбции лития в висмуте достигается при 0,8 ат. % Li, а в свинце – в области составов с 1,5 ат. % Li. Предельные поверхностные активности лития в висмуте и свинце соответственно составляют 1,4 и 10 Н/м·ат. доли Li.

В расплаве $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ –Li адсорбция лития достигает максимального значения в области составов с содержанием около 0,5 ат. %. Предельная поверхностная активность лития в эвтектическом расплаве $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ при температуре 400 К составила 1,2 Н/м·ат. доли.

5. Проведены расчеты составов и числа поверхностных слоев сплавов Pb–Li, из которых следует, что в области околэвтектических составов при $T = 633$ К поверхностный слой сплавов Pb–Li составляет около двух монослоев Li.

6. Изучена смачиваемость реакторных сталей ЭК–173 и 12X18Н10Т эвтектическим расплавом $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$ в широкой области температур в вакууме и атмосфере аргона. Показано качественное различие смачиваемости сталей в вакууме и атмосфере инертной среды (аргон): в условиях вакуума смачиваемость сталей заметно лучше, чем в защитной атмосфере аргона, особенно при высоких температурах.

7. Определены политермы краевых углов смачиваемости поверхности стали 12X18H10T жидкими тройными сплавами Pb–Bi–Li в зависимости от содержания лития в эвтектическом расплаве PbBi. Обнаружено улучшение смачиваемости поверхности сталей с повышением содержания лития в исходном эвтектическом расплаве $Pb_{44,7}Bi_{55,3}$.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Имеется настоятельная необходимость:

- продолжения разработки новых приборов, устройств и методов для экспериментальных исследований поверхностных и теплофизических свойств сплавов с участием лития;
- проведения детальных прецизионных измерений плотности и поверхностного натяжения сплавов тройной системы Pb–Bi–Li во всем концентрационном треугольнике составов;
- уточнения имеющихся в литературе фрагментарных сведений о структурно-фазовых областях и построения полной диаграммы состояния тройной системы Pb–Bi–Li.

Цитируемая литература

1. Прохоренко С.В. Структура и физические свойства околоэвтектических литиевых расплавов: автореф. дис.... канд. физ.-мат. наук: 01.04.13 / Прохоренко Сергей Викторович. – Львов: ЛГУ им. И. Франка, 1996. – 18 с.
2. Hubberstey, P. Pb–17Li-bismuth interaction: an electrical resistivity study / P. Hubberstey, T. Sample, M.J. Capaldi, M.G. Barker // Journal of Nuclear Materials. – 1994. – P. 93–103.
3. Кашежев, А.З. Смачивание свинцом и висмутом реакторных сталей / А.З. Кашежев, А.Г. Мозговой, М.Х. Понежев, В.А. Созаев, А.И. Хасанов // Вестник КБГУ. Сер. физические науки. – 2008. – Вып. 11. – С. 7–8.
4. Protsenko, P. Wetting of Fe-7.8 wt.% Cr stainless steel by molten Pb and Pb-17Li / P. Protsenko, A. Terlain, M. Jeymond, N. Eustathopoulos / Proceedings of the 10 International conference on fusion reactor materials. – Baden-Baden, Germany. – 2001. – P. 177–182.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях

1. Алчагиров, Б.Б. Плотность и поверхностное натяжение жидкого лития при температуре плавления / Б.Б. Алчагиров, Л.Х. Афаунова, **Ф.Ф. Дышекova**, А.Г. Мозговой, Т.М. Таова, Р.Х. Архестов // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47, № 2. – С. 307–311 (0,31 п.л. / 0,052 п.л.) – **из перечня ВАК.**
2. Алчагиров, Б.Б. Прибор для измерения теплофизических характеристик металлов и сплавов / Б.Б. Алчагиров, Л.Х. Афаунова, **Ф.Ф. Дышекova**,

Т.М. Таова, Р.Х. Архестов, А.Г. Мозговой, З.А. Коков // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 3. – С. 148–151 (0,25 п.л. / 0,038 п.л.) – **из перечня ВАК.**

3. Алчагиров, Б.Б. Компьютерная реализация расчетов адсорбции компонентов в металлических расплавах в пакете «MathCAD» / Б.Б. Алчагиров, В.Н. Лесев, Л.Х. Афаунова, Р.Х. Архестов, **Ф.Ф. Дышекова**, З.А. Кегадуева // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной Академии Наук. – 2009. – Т. 11, № 1. – С. 125–127 (0,19 п.л. / 0,03 п.л.) – **из перечня ВАК.**

4. Алчагиров, Б.Б. Изучение смачиваемости реакторной стали ЭК–173 свинцом, висмутом и эвтектическим расплавом PbBi / Б.Б. Алчагиров, **Ф.Ф. Дышекова**, Л.Х. Афаунова, Л.Г. Алчагирова, А.Р. Тебуева // Межотраслевой семинар «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в быстрых реакторах» (Теплофизика-2010). Тезисы докладов. Обнинск, – 2010. – С. 79–81 (0,19 п.л. / 0,11 п.л.).

5. Алчагиров, Б.Б. Работа выхода электрона сплавов с участием щелочных металлов / Б.Б. Алчагиров, Р.Х. Архестов, **Ф.Ф. Дышекова** // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, № 11. – С. 76–82 (0,44 п.л. / 0,15 п.л.) – **из перечня ВАК.**

6. Афаунова, Л.Х. Прибор для изучения поверхностного натяжения и работы выхода электрона расплавов с участием лития / Л.Х. Афаунова, **Ф.Ф. Дышекова**, Б.Б. Алчагиров // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной Академии Наук. – 2012. – Т. 14, № 1. – С. 128–131 (0,25 п.л. / 0,08 п.л.) – **из перечня ВАК.**

7. Алчагиров, Б.Б. Поверхностное натяжение сплавов с участием щелочных металлов / Б.Б. Алчагиров, Р.Х. Архестов, **Ф.Ф. Дышекова**, Т.М. Таова // Теплофизика высоких температур. – 2013. – Т. 51, № 2. – С. 210–223 (0,89 п.л. / 0,35 п.л.) – **из перечня ВАК.**

8. Алчагиров, Б.Б. Прибор для совместного измерения поверхностного натяжения и работы выхода электрона жидкометаллических систем с участием компонентов с высокой упругостью насыщенного пара металлов и сплавов / Б.Б. Алчагиров, Д.Х. Альбердиева, Р.Х. Архестов, В.Г. Горчханов, Р.Х. Дадашев, **Ф.Ф. Дышекова**, Т.М. Таова / Патент на изобретение № 2511277 от МПК G01N13/02 (2006.01). Опубликовано:10.04.2014; Бюл. 10; 11 с. (0,69 п.л. / 0,21 п.л.).

9. Алчагиров, Б.Б. Смачиваемость эвтектическим расплавом PbBi реакторной стали 12X18H10T в вакууме и инертной среде / Б.Б. Алчагиров, **Ф.Ф. Дышекова**, З.А. Коков, С.М. Хаудова, Х.Л. Хоконов // Доклады Адыг-

ской (Черкесской) Международной Академии Наук. – 2014. – Т. 16, № 3. – С. 77–83. (0,44 п.л. / 0,22 п.л.) – **из перечня ВАК.**

10. Алчагиров, Б.Б. Поверхностное натяжение тройных сплавов лития на основе эвтектического расплава свинец-висмут / Б.Б. Алчагиров, **Ф.Ф. Дышекова**, М.М. Тлупова // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной Академии Наук. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 85–90 (0,38 п.л. / 0,19 п.л.) – **из перечня ВАК.**

11. Алчагиров, Б.Б. Смачиваемость реакторной стали 12X18H10T эвтектическим расплавом PbBi / Б.Б. Алчагиров, **Ф.Ф. Дышекова**, Дж.Х. Ворокова, С.М. Хаудова // Труды Международного междисциплинарного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы». 16–21 сентября 2014 г. –г.Ростов-на-Дону.– С. 199–202 (0,25 п.л. / 0,13 п.л.).

12. Alchagirov, B.B. Wettability of 12Cr18Ni10Ti Reactor Steel by the Eutectic Alloy of PbBiLi / B.B. Alchagirov, **F.F. Dyshekova**, B.S. Karamurzov, T.M. Taova, Kh.B. Khokonov // Nineteenth Symposium on Thermophysical Properties. June 21-26, 2015. University of Colorado at Boulder, – Colorado, USA. P. 3354 (0,06 п.л. / 0,03 п.л.).

13. Alchagirov, B.B. Surface Tension of Ternary Lithium Alloys Based on the Lead-Bismuth Eutectic Alloy / B.B. Alchagirov, **F.F. Dyshekova** // Nineteenth Symposium on Thermophysical Properties. June 21-26, 2015. University of Colorado at Boulder, – Colorado, USA. P. 3355 (0,06 п.л. / 0,03 п.л.).

14. **Дышекова, Ф.Ф.** Концентрационная зависимость поверхностного натяжения тройных сплавов лития на основе эвтектического расплава свинец-висмут / Ф.Ф. Дышекова, Б.Б. Алчагиров // Вторая Всероссийская молодежная научно-техническая конференция с международным участием «Инновации в материаловедении». Сб. материалов / Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН – М.: ООО «Ваш полиграфический партнер», 2015. – С. 353–354 (0,13 п.л. / 0,08 п.л.).

15. Алчагиров, Б.Б. Поверхностное натяжение и адсорбция компонентов сплавов свинец-литий / Б.Б. Алчагиров, **Ф.Ф. Дышекова**, Р.Х. Архестов // Сборник трудов XIII Российско-Китайского Симпозиума «Новые материалы и технологии» / Под общей редакцией академика РАН К.А. Солнцева. – Т. 1. М.: Интерконтакт Наука, 2015. – С. 21–27 (0,44 п.л. / 0,26 п.л.).

16. Алчагиров, Б.Б. Смачиваемость реакторной стали 12Cr18Ni10Ti эвтектическим расплавом PbBi и его сплавами с литием / Б.Б. Алчагиров, **Ф.Ф. Дышекова**, Б.С. Карамурзов, Т.М. Таова, Х.Б. Хоконов // Труды международного междисциплинарного симпозиума «Физика поверхностных яв-

лений, межфазных границ и фазовые переходы». 16-21 сентября 2015 г. – г.Ростов-на-Дону. – Вып. 5. – С. 20–29 (0,63 п.л. / 0,28 п.л.).

17. Алчагиров, Б.Б. Поверхностное натяжение сплавов свинец-литий / Б.Б. Алчагиров, **Ф.Ф. Дышекoва**, Р.Х. Архестов // Труды международного междисциплинарного симпозиума «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы». 16-21 сентября 2015 г. –г.Ростов-на-Дону – Вып. 5. – С. 89–96 (0,5 п.л. / 0,2 п.л.).

18. Алчагиров, Б.Б. Программно-аппаратный комплекс для автоматизации физического эксперимента по измерению поверхностного натяжения жидких металлов и сплавов методом лежащей капли / Б.Б. Алчагиров, Д.Х. Альбердиева, Р.Х. Архестов, **Ф.Ф. Дышекoва**, З.А. Кегадуева, А.А. Коков, З.А. Коков // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной Академии Наук. – 2015. – Т. 17, № 2. – С. 63-69. (0,44 п.л. / 0,063 п.л.) – **из перечня ВАК.**

19. Алчагиров, Б.Б. Поверхностное натяжение сплавов лития на основе висмута / Б.Б. Алчагиров, Р.Х. Архестов, **Ф.Ф. Дышекoва**, О.Х. Кясова // Доклады Адыгской (Черкесской) Международной Академии Наук. – 2015. – Т. 18, № 3. – С. 78–85. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.) – **из перечня ВАК.**

20. Коков, З.А. Программа автоматизации физического эксперимента по измерению поверхностного натяжения жидкостей методом лежащей капли / З.А. Коков, **Ф.Ф. Дышекoва**, А.А. Коков, Б.Б. Алчагиров, Р.Х. Архестов, З.А. Кегадуева / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2015614191 от 08.04.2015. (1,8 п.л. / 0,31 п.л.).

В печать 04.04.2016. Тираж 100 экз. Заказ № _____.

Полиграфический участок ИПЦ КБГУ
360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.