

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский университет
им. Х.М. Бербекова»



На правах рукописи

Шерметов Астемир Хусенович

ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ И ПЛОТНОСТЬ РАСПЛАВОВ НА ОСНОВЕ
СВИНЦА И АЛЮМИНИЯ И СМАЧИВАЕМОСТЬ ИМИ ТВЁРДЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ (Cu, Al, Ni –Cr, Co – Cr, КОНСТРУКЦИОННЫХ И РЕАКТОРНЫХ
СТАЛЕЙ).

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
Академик РАО, доктор технических наук,
профессор Карамурзов Барасби Сулейманович

Нальчик – 2021

Работа выполнена на кафедре электроники и информационных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова» (г. Нальчик).

Научный руководитель: Карамурзов Барасби Сулейманович,
доктор технических наук, профессор, Академик РАО

Официальные оппоненты: Саввин Владимир Соломонович,
доктор физико-математических наук, профессор,

НИЯУ МИФИ «Обнинский институт атомной энергетики (ИАТЭ)»

Сдобняков Николай Юрьевич,

кандидат физико-математических наук, доцент,

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», доцент кафедры общей физики, г. Тверь

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова» (ЧГУ), г. Грозный.

Защита состоится «11» февраля 2021г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.308.01 при Кабардино-Балкарском государственном университете им. Х.М. Бербекова по адресу: 360004, КБР, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 173.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова (<http://diser.kbsu.ru/>)

Автореферат разослан «9» декабря 2021__ г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета
24.2.308.01

д.ф.-м.н., профессор



Дышеков Артур Альбекович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертации

Как известно, контакт жидкого металла или сплава с поверхностью твердого, более тугоплавкого материала осуществляется при протекании обширного класса физических явлений и технологических процессов. К данному классу можно отнести:

- процессы зарождения и роста кристаллов из металлического расплава;
- различные металлургические процессы – выплавка, разливка, литье стали и сплавов;
- пайка и сварка; процессы металлокерамического производства керметных материалов.

Кроме того, хорошо известен факт образования плёночного режима течения теплоносителя при плохом смачивании им материала теплообменника. Такой режим течения приводит к снижению эффективности теплоотвода. Особо остро данная проблема стоит в случае ядерных реакторов, где в качестве теплоносителя используются металлические расплавы.

Исходя из вышесказанного, изучение степени смачиваемости жидкими металлами поверхностей теплообменников в атомных реакторах является важной практической задачей. А если учитывать, что по сравнению с чистым натрием теплоноситель на основе бинарного сплава натрия со свинцом обладает более низкой замедляющей способностью и меньшим сечением захвата нейтронов, то важность исследований поверхностных и межфазных характеристик систем с участием натрия и свинца [1-6], становится еще более актуальной.

По данным авторов работ [7-9], при контакте с реакторными сталями свинцово-висмутовые сплавы проявляют высокую коррозионную активность (КА).

В настоящее время эта проблема решается двумя способами.

Первый – легирование реакторных сталей хромом, никелем, алюминием и кремнием. За счёт такой модификации снижается коррозионная активность свинцово-висмутовых сплавов по отношению к реакторным сталям. В работе [10] в частности показано, что при модификации хромом реакторных сталей на поверхностях последних образуется тонкий оксидный слой FeCr_2O_4 , который снижает КА свинцово-висмутовых сплавов.

Второй – это нанесение на поверхность стенок реакторов защитной пленки из оксида алюминия.

Для изготовления сварной, паяной и литой аппаратуры, работающей в условиях средней и повышенной агрессивности, как правило, используют Pb, Cu, Al, Ni и сплавы на их основе. Кроме того, хорошо известно [11,12,14], что никелированная медь используется в качестве теплоотводов интегральных схем. Следовательно, разработка припоев для пайки никеля и его сплавов так же представляет определенный научный и практический интерес и является весьма актуальной задачей.

Очень часто Pb, In и сплавы на их основе находят широкое техническое применение (оптическая промышленность, жидкометаллические подшипники, теплоносители, полупроводниковая техника и т.д.). Индий и свинец обладают неограниченной смешиваемостью, как в твердом, так и в жидком состояниях [13]. Сплавы индия со свинцом обладают большей коррозионной активностью в маслах, применяемых для смазки узлов трения, чем свинец. Сплавы с содержанием не менее 25% индия обладают хорошей коррозионной стойкостью в щелочных растворах и в растворах солей [12].

Сплавы алюминий-медь широко применяются в промышленности (термически упрочняемые сплавы системы Al-Cu (дуралюминий)) при изготовлении некоторых деталей турбореактивных двигателей.

В литературе имеется достаточно много сведений по теплофизическим свойствам системы медь-алюминий [15-20]. Однако, во многих случаях результаты, полученные разными авторами, не только не совпадают, но и противоречат друг другу. Исходя из вышеизложенного можно заключить, что исследование поверхностных свойств (поверхностного натяжения, адсорбции, угла смачивания) рассмотренных выше систем имеет большое научное и практическое значение.

Целью работы является экспериментальное исследование поверхностных свойств расплавов свинца с малыми добавками натрия; расплавов алюминия с добавками меди; степени смачивания твердых металлических поверхностей расплавами на основе свинца и алюминия; смачивания расплавом системы свинец-никель подложек из меди и алюминия.

Для достижения цели работы были поставлены следующие **задачи**:

- изучить температурные и концентрационные зависимости плотности и поверхностного натяжения расплавов двойных систем свинец – натрий и алюминий - медь;
- установить влияние малых добавок Na на характер его адсорбции в расплавах системы Pb-Na;
- изучить смачиваемость расплавами свинец-натрий тугоплавких металлических подложек Co-Cr, Ni-Cr, Ti, нержавеющей стали 25X18H9C2;
- выявить особенности температурной зависимости краевого угла смачивания расплавов свинец-никель на подложках из меди и алюминия;

- исследовать смачиваемость расплавами Al-Cu твердых металлических поверхностей (Ni-Cr, Co-Cr, Ti, нержавеющей стали 25X18H9C2);
- установить степень взаимодействия свинец висмутовых сплавов с реакторными сталями и нержавеющей стали марки 12X18H9T;
- изучить морфологию и состав поверхностей исследованных образцов и подложек с помощью: сканирующего электронного микроскопа Phenom (FEI); сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA3LMH с EDX микрозондом для химического анализа; рентгеновского фотоэлектронного спектрометра системы "K-Alpha" фирмы Thermo Scientific.

Объекты исследования

Сплавы Pb-0,01 ат.% Ni, Pb-0,03 ат.% Ni, Pb-0,05 ат.% Ni, Pb-0,18 ат.% Na, Pb-0,203 ат.% Na, Pb-0,214 ат.% Na, Pb-0,249 ат.% Na, Pb-0,46 ат.% Na; чистый свинец (марки В4), алюминий (99,9%) и медь (99,96 %), свинец висмутовые сплавы. Подложки сплавов Ni-Cr, Co-Cr, стали 25X18H9C2, подложки из титана и реакторных сталей (ЭК 173, ЭК 181, ЭК 450, ЭП 753А, ЭП 753тюр).

Научная новизна полученных результатов

1. В данном исследовании впервые изучено влияние малых добавок натрия на температурные зависимости плотности и поверхностного натяжения расплавов свинец – натрий. Установлены следующие закономерности:
 - плотность и поверхностное натяжение с увеличением концентрации натрия в расплаве понижаются;
 - температурные зависимости плотности и поверхностного натяжения изученных сплавов зависят от режимов - нагревание или охлаждение;
 - полученные зависимости плотности и поверхностного натяжения от концентрации натрия, режимов нагрева и температуры свидетельствуют о том, что в объеме расплава происходят структурные изменения.
2. Впервые исследовано влияние малых добавок натрия на концентрационные зависимости адсорбции и мольного объема в расплавах Pb-Na. Установлено, что в области малых концентраций Na на изотермах адсорбции натрия имеются явно выраженные максимумы.
3. Изучено влияние малых добавок никеля к свинцу на температурную зависимость краевого смачивания подложек из меди и алюминия расплавами Pb-Ni. Установлено, что все изученные расплавы Pb-Ni смачивают подложку из меди, но практически не взаимодействуют с алюминиевой подложкой.
4. Впервые получены данные по краевому углу смачивания различных твердых металлических поверхностей (Ni-Cr, Co-Cr, сталь 12X18H9C2) расплавами Al-Cu.
5. В интервале температур от 450 К до 1050 К экспериментально изучена температурная зависимость краевого угла смачивания расплавом Pb-10,7 ат.% Bi подложек из реакторных сталей: ЭК 173, ЭК 181, ЭК 450, ЭП 753А, ЭП 753тюр. При этом на подложках ЭК 181, ЭК 450, ЭП 753тюр при температуре ~ 1000 К обнаруживаются «пороги» смачивания.
6. Результаты исследований спектроскопическими методами (РФЭС, ОЭС, СЭМ) морфологии и составов поверхностей изученных объектов свидетельствуют о полислоистости и неоднородности поверхностных слоёв.

Методология и методы исследования

Все экспериментальные данные для систем Pb-Ni, Pb-Na и Al-Cu были получены с использованием высокотемпературной вакуумной установки с водоохлаждаемым корпусом из нержавеющей стали методом большой и лежащей капли в атмосфере гелия марки А и при давлении остаточной паровой фазы 10^{-2} Па.

Фотографии профиля исследуемой капли были получены с помощью цифрового фотоаппарата. Для измерения угла смачивания по профилю капли использовались программные комплексы CorelDraw и ImageJ. Измерения плотности и поверхностного натяжения были проведены с использованием программы SigmaC, основанной на идеологии численного интегрирования уравнения Юнга – Лапласа.

Морфология и состав поверхностей исследованных расплавов и подложек изучались с помощью: сканирующего электронного микроскопа Phenom (FEI); сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA3LMH с EDX микрозондом для химического анализа; рентгеновского фотоэлектронного спектрометра системы "K-Alpha" фирмы Thermo Scientific.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Выявленные закономерности влияния малых концентраций натрия на температурные зависимости плотности, поверхностного натяжения, адсорбции, мольного объёма и определённые на основе микроструктурных, химических и электронно-спектроскопических методов анализа, особенности морфологии поверхности закристаллизовавшихся капель расплавов свинец – натрий на разных металлических подложках.
2. Установленные закономерности протекания процесса адсорбции натрия при его малых концентрация в расплавах свинца.
3. Результаты экспериментальных исследований температурных и концентрационных зависимостей плотности, поверхностного натяжения и адсорбции расплавов алюминий-медь;
4. Закономерности смачивания расплавами свинец - натрий тугоплавких металлических подложек;
5. Закономерности температурной зависимости углов смачивания расплавами Pb-Ni (при малых концентрациях Ni) подложек из алюминия и меди.
6. Установленные особенности влияния температуры на плотность, поверхностное натяжение расплавов системы медь алюминий и степень смачиваемости расплавами Al-Cu (с содержанием до 70 ат.% Cu) твердых металлических поверхностей Ni-Cr, Co-Cr, Ti и стали 25X18H9C2.
7. Особенности смачивания висмутистым свинцом нержавеющей стали 12X18H9T и реакторных сталей ЭК 173, ЭК 181, ЭК 450, ЭП 753А, ЭП 753Тюр.

Степень достоверности и обоснованность научных положений, выводов в диссертации, подтверждается:

- применением современных экспериментальных методов измерения поверхностных свойств, основанных на новых информационных технологиях;
- согласованностью результатов, полученных различными методами;
- хорошей воспроизводимостью результатов измерений, полученных на использованной в работе аппаратуре;
- согласованностью анализа и экспериментальных результатов с известными теоретическими уравнениями.

Личный вклад автора

Результаты экспериментальных исследований плотности, поверхностного натяжения и смачиваемости, представленные в диссертации, получены в основном автором лично. Микроструктурные, химические и электронно-спектроскопические исследования (РФЭС, СЭМ и ЭОС) проведены совместно с сотрудниками лабораторий из ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт» (г. Владикавказ), ФГБОУ Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова (г. Нальчик) лаборатория № 134 (Института химии и биологии) и №146 (Институт физики и математики). В соавторстве обсуждались результаты исследований.

Апробация результатов

Материалы диссертации докладывались на трёх всероссийских и восьми международных конференциях:

Российской конференции “Теплофизические, экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах”, Обнинск, 2012, с. 65-67. Международных, междисциплинарных симпозиумах “Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы” (ФПЯ и ФП), Нальчик – п. Лоо, 2012, с. 53-58; Нальчик – Туапсе, 2013 с. 110-113. XIV Российская конференция (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ, г. Казань, 2014, Т.1, с. 280-283. На 8-ой Международной научно-технической конференции «микро-и нанотехнологии в электронике», 30 мая-4 июня 2016, , с. 92-98. 4-м, 5-м, 8-м и 9-м международных и междисциплинарных симпозиумах Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы” (PSP8, PT), Нальчик – Ростов-на-Дону-Грозный-п. Южный, 2014, Т.1, с. 173-176; 2015, вып. 5 с. 102-105; Грозный – п. Шепси 2018, вып. 8, с. 203-206; пос. Эльбрус, 2019, вып. 9, с. 207-210. Всероссийская научно-практическая конференция “Актуальные проблемы современного материаловедения”, Грозный, 2015, с. 115-123. 19-м и 21-м международных симпозиумах “Порядок, беспорядок и свойства оксидов (ОДРО-19)”, Ростов-на-Дону, п.Южный, 2016, вып. 19, Т.1, с. 282-285; 2018, вып. 21, Т.1, с. 129-131.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 23 печатных работах, в том числе 12 работ опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ и входящих в базы данных SCOPUS и VoS.

Объем и структура диссертации.

Материалы диссертации представлены в 5 главах на 174 страницах, содержащих заключение и список цитированной литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* дается обоснование актуальности темы, формулируется цель и задачи диссертационной работы, описана научная и практическая ценность полученных результатов.

В *первой главе* приводится критический анализ литературных данных по теме диссертации. Показано, что система свинец – натрий в области с малым содержанием натрия мало изучена. Так же нет данных по смачиванию тугоплавких металлов расплавами алюминий – медь в области концентраций до 70 ат.% меди. Анализ, имеющихся литературных данных по температурным зависимостям плотности и ПН расплавов на основе свинца с небольшими добавками примесей (серебро, никель, кальций, ртуть, галлий и таллий), а также сплавов Sn-Pb свидетельствует о наличии экстремумов различного характера на политемах плотности и ПН.

Во *второй главе* описывается методика проведения экспериментов. Исследуемые сплавы систем Pb-Na, и Al-Cu готовились в кварцевых ампулах из исходных материалов чистотой: свинец (марки В4), алюминий (99,9%) и медь (99,96 %). Плотность, поверхностное натяжение и краевой угол смачивания изучались методом «большой» капли в атмосфере чистого гелия (марки А). В чашку из графита или на исследуемую подложку капля расплава подавалась через капилляр, далее производилось фотографирование профиля капли с помощью цифрового фотоаппарата. При исследованиях краевого угла смачивания обмер фотографий производился двумя способами. В первом способе снимок капли на подложке обрабатывался с помощью приложения CorelDraw. Этот метод имеет недостаток: один и тот же снимок, измеренный разными людьми и в разное время, даёт разные результаты. Поэтому в данной работе для определения краевого угла смачивания использовался и второй способ – автоматизированный. Этот метод реализуется при помощи компьютерной программы IMAGEJ. Для определения угла смачивания в программу необходимо загрузить два плагина: DropSnake и LB-ADSA, соответственно для случая $\theta > 90^\circ$ и $\theta < 90^\circ$. Изображения экваториальных сечений капли, в случае определения плотности и поверхностного натяжения, обрабатывались при помощи автоматизированного программного комплекса для определения теплофизических свойств веществ, основанного с использованием среды программирования Delphi Л.Б. Директором и И.Л. Майковым в Объединенном институте высоких температур РАН, г. Москва.

Третья глава посвящена исследованию влияния малых концентраций (до 0,46 ат.%) натрия в свинце и добавок меди (до 70 ат.%) в алюминий на плотность и поверхностное натяжение расплавов. Для системы свинец-натрий исследования проводились в двух режимах – нагревания и охлаждения. Скорости нагревания и охлаждения не превышали 1К/минуту. Временная выдержка перед проведением измерений составляла 10 минут. Температурные зависимости плотности исследованных сплавов системы Pb-Na представлены в виде политем на рисунке 1.

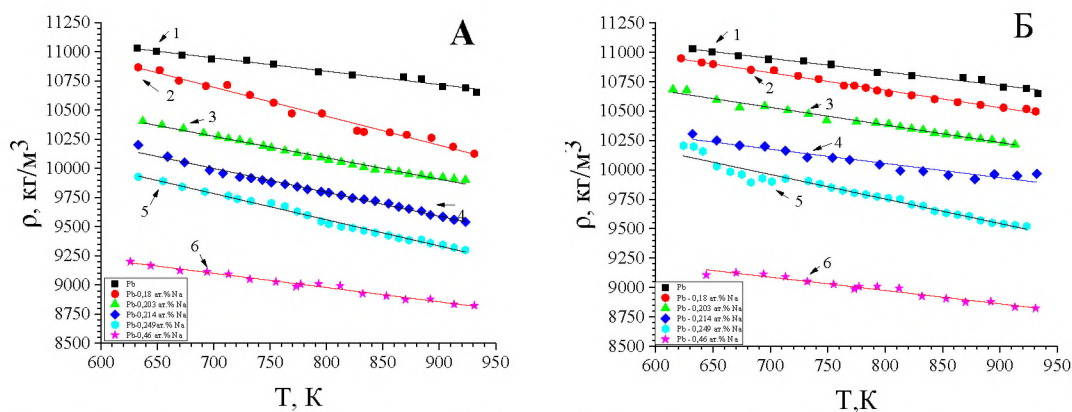


Рисунок 1 – Политемры плотности расплавов Pb-Na при различной концентрации натрия в режиме нагревания (А) и охлаждения (Б); 1 – чистый Pb; 2 – Pb-0,18 ат.% Na, 3 – Pb-0,203 ат.% Na, 4 – Pb-0,214 ат.% Na, 5 – Pb-0,249 ат.% Na, 6 – Pb-0,46 ат.% Na.

В обоих режимах плотности изученных расплавов с повышением температуры уменьшаются практически линейно (рисунок 1).

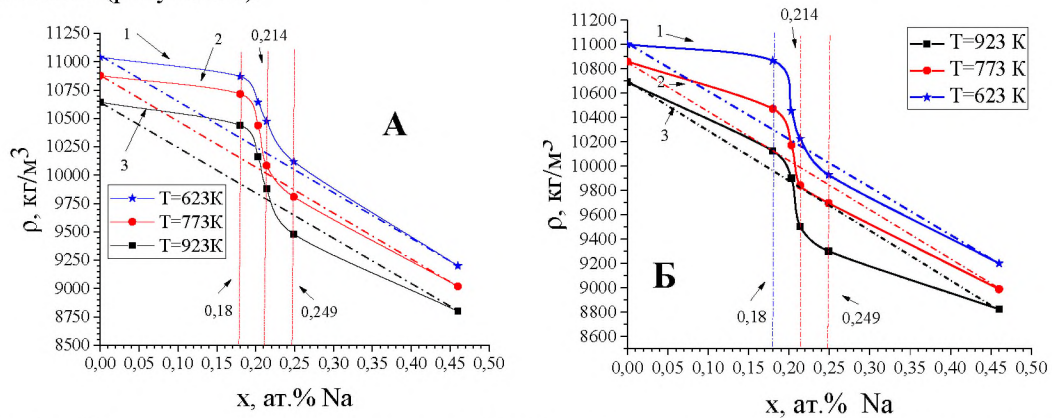


Рисунок 2 – Изотермы плотности расплавов Pb-Na в разных режимах при температурах 623 K (1), 773 K (2) и 923 K (3): А – режим нагревания; Б – режим охлаждения.

Обнаруживается зависимость значений плотностей изученных сплавов от режимов (нагревания или охлаждения) проведения измерений – проявляется гистерезис. В обоих режимах, на изотермах плотности в интервале концентраций от 0,18 до 0,249 ат. % натрия проявляются (рисунок 2) особенности – области перегиба. Более явно особенности проявляются на концентрационной зависимости температурного коэффициента плотности расплавов Pb-Na.

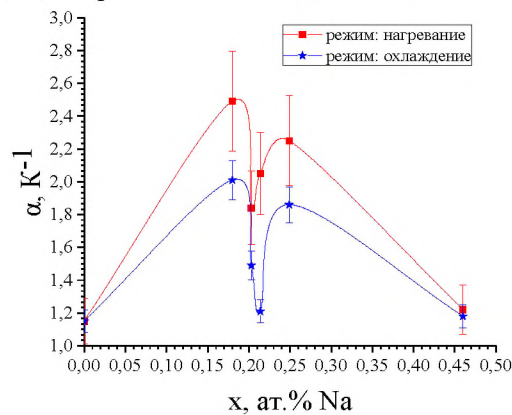


Рисунок 3 – Концентрационная зависимость температурного $\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$ коэффициента плотности расплавов Pb-Na.

Результаты расчетов структурно чувствительных параметров – молярных объемов – в изучаемой области диаграммы состояния системы Pb-Na в виде изотерм представлены на рисунке 3.

Все политермы молярных объемов расплавов свинца с малыми добавками натрия практически линейны и имеют положительный температурный коэффициент. С уменьшением концентрации Na в расплаве значения молярных объемов растут – имеет место декомпрессия.

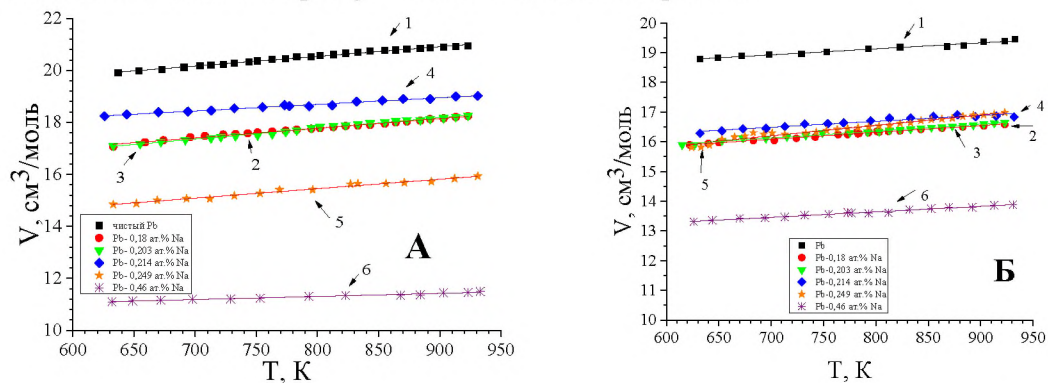


Рисунок 4 – Политермы мольного объема расплавов Pb-Na в режиме нагревания (А) и режиме охлаждения (Б); 1 – Pb-0,18 ат.% Na, 2 – Pb-0,203 ат.% Na, 3 – Pb-0,214 ат.% Na, 4 – Pb-0,249 ат.% Na, 5 – Pb-0,46 ат.% Na; 6 – чистый Pb.

При этом, величины мольных объемов, полученные при разных режимах (нагревания или охлаждения) отличаются друг от друга. На происходящие структурные изменения в объеме расплава указывает и то, что политермы мольных объемов расплава Pb-0,214 ат.% Na, как в режиме нагревания, так и в режиме охлаждения, расположены выше чем политермы Pb-0,18 ат.% Na и Pb-0,203 ат.% Na. Данный факт подтверждает наблюдаемое на изотерме плотности данных расплавов (рисунок 2) резкое изменение хода концентрационной зависимости плотности – появление областей перегиба. Из анализа хода температурного коэффициента мольного объема (рисунок 5) можно заключить, что в объеме расплава свинца с малыми добавками натрия происходят структурные изменения, не нашедшие отражения на диаграмме состояния.

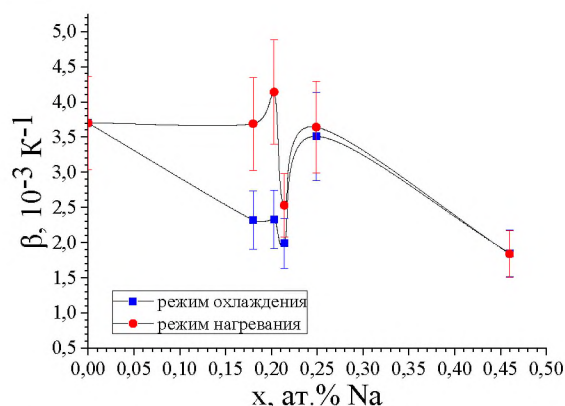


Рисунок 5 – Концентрационная зависимость температурного коэффициента $\beta = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT}$ мольного объема расплавов Pb-Na.

Анализ хода температурных и концентрационных зависимостей ПН натяжения показал, что и они зависят от режимов (нагревания или охлаждения) проведения измерений. Это свидетельствует о том, что наряду с адсорбционно десорбционными процессами в поверхности расплавов системы Pb-Na протекают процессы формирования микрогруппировок типа квазимолекулярных образований. При этом, приведенные в разделе 3.5 диссертационной работы результаты электронно-спектроскопических исследований поверхности расплавов Pb-Na, говорят о её неоднородности, полислойности и неравномерным распределением элементов и химических соединений. При нагревании или охлаждении расплава в поверхностном слое происходит перераспределение атомов, что приводит, соответственно, к образованию или разрушению микрокластеров типа A_nB_m . При охлаждении расплава, образовавшиеся структуры разрушаются медленно, остаются в поверхностном слое, что приводит к проявлению на политермах и изотермах ПН особенностей.

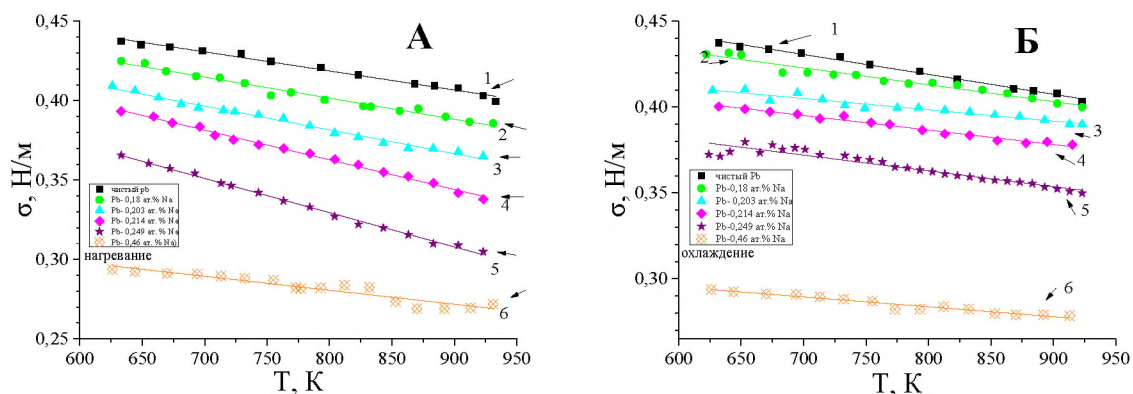


Рисунок 6 – Политермы поверхностного натяжения расплава Pb-Na различной концентрации в режиме нагревания (А) и охлаждения (Б); 1 – чистый Pb; 2 – Pb-0,18 ат.% Na, 3 – Pb-0,203 ат.% Na, 4 – Pb-0,214 ат.% Na, 5 – Pb-0,249 ат.% Na, 6 – Pb-0,46 ат.% Na.

Особенно отчётливо влияние режимов (нагревание или охлаждение) отражается на концентрационных зависимостях температурных коэффициентов поверхностного натяжения (рисунок 7). Сложный ход зависимостей $d\sigma/dT$ указывает на одновременно проходящие в поверхностном слое сложные структурные и адсорбционные процессы при изменениях концентрации и температуры. С одной стороны, они обусловлены структурными изменениями в поверхностном слое – формированием и разрушением квазимолекулярных образований, с другой, идущими одновременно с ними изменениями морфологии поверхности и адсорбционно десорбционными процессами.

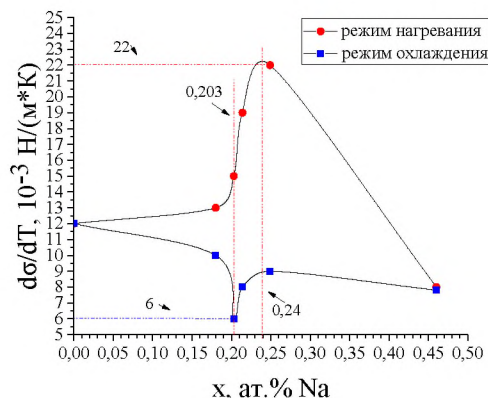


Рисунок 7 – Концентрационная зависимость $d\sigma/dT$ в режиме нагревания и охлаждения.

О сложном характере адсорбционно – десорбционных процессов натрия в поверхностных слоях при малых концентрациях натрия в свинце можно судить и по ходу изотерм поверхностного натяжения и адсорбции (рисунки 8-10). Расчёты адсорбции натрия проводились по известной формуле Гуттенгейма-Адама в N-варианте. На рисунках 8-10 представлены концентрационные зависимости адсорбции Na в системе Pb-Na для трёх температур 623, 773 и 923 К. Из анализа представленных на рисунках 8-10 изотерм адсорбции видно, что при нагревании значения максимумов на изотермах адсорбции значительно выше, чем в режиме охлаждения.

Следовательно, при нагревании поверхностно-активный натрий заполняет поверхность более интенсивно. В режиме нагревания максимум на изотерме адсорбции приходится на температуру - 623 К, а минимум на $T=773$ К. По изотермам адсорбции, построенным для температур 623 и 773 в интервале концентраций 0,15-0,27 ат.% натрия в объёме видно, что его количество в поверхности достигает максимума и начинает убывать. Кроме того, для этих температур (623 и 773 К) максимальная величина адсорбции натрия в поверхностном слое достигается при концентрациях натрия в объёме расплава равных $\sim 0,215$ ат.%. Как видно, положения и значения максимумов на изотермах адсорбции зависят от температуры и с изменением концентрации натрия в объёме меняют свои значения и положения.

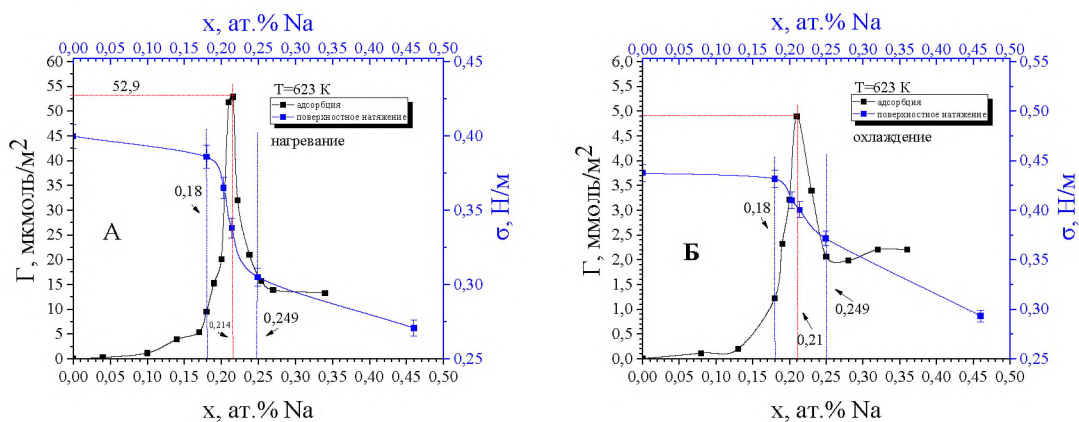


Рисунок 8 – Изотермы адсорбции натрия и ПН в расплавах Pb-Na при $T=623$ К в разных режимах: А – режим нагревания; Б – режим охлаждения.

Для температуры $T=623$ К максимум на изотерме адсорбции, равный $52,9$ ммоль/ м^2 достигается в режиме нагревания при содержании натрия в объеме расплава – $0,214$ ат.%. В режиме охлаждения максимальная адсорбция натрия ($4,9$ ммоль/ м^2) достигается при её концентрации в объеме расплава равной $0,21$ ат.%. Таким образом, наблюдается сильное (практически на порядок) различие в величинах максимумов адсорбции в зависимости от режимов (нагревания и охлаждения.)

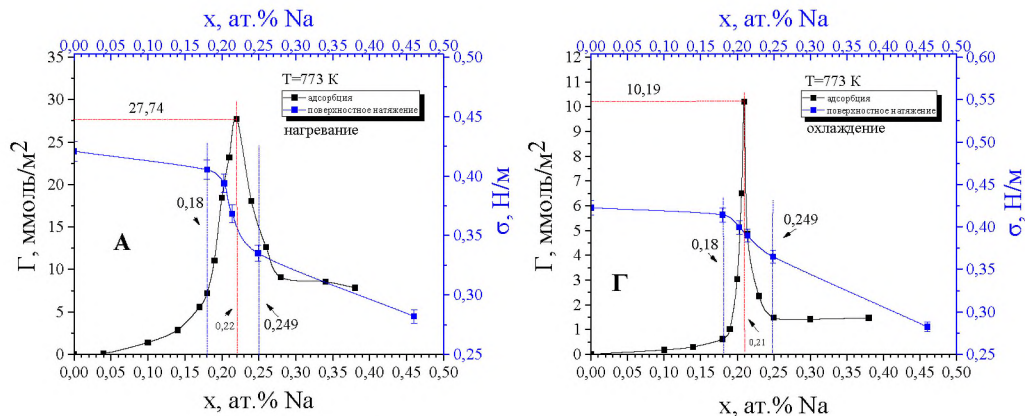


Рисунок 9 – Изотермы адсорбции натрия и ПН в расплавах Pb-Na при $T=773$ К в разных режимах: А– режим нагревания; Б – режим охлаждения.

При повышении температуры до $T=773$ К в режиме нагревания максимум на изотерме адсорбции снижается до $27,74$ ммоль/ м^2 и приходится уже на концентрацию натрия – $0,22$ ат.%, а в режиме охлаждения повышается до $10,19$ ммоль/ м^2 . В режиме охлаждения при данной температуре смещения положения максимума адсорбции относительно концентрационной оси не наблюдается.

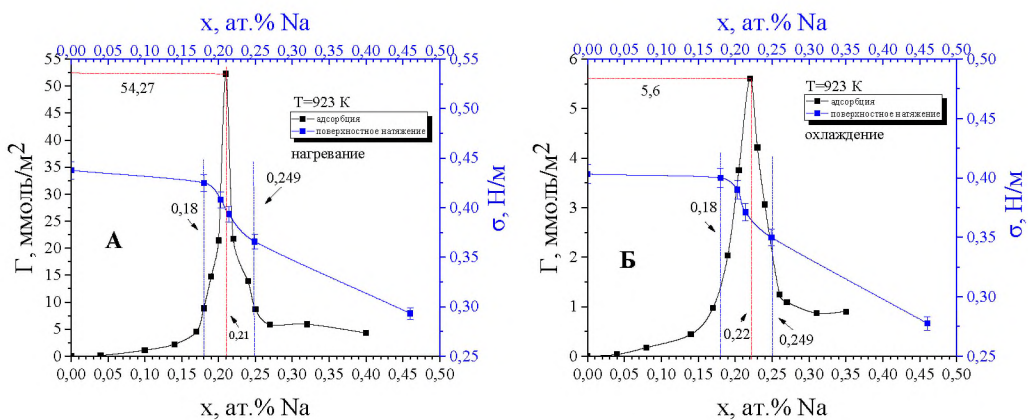


Рисунок 10 – Изотермы адсорбции натрия и ПН в расплавах Pb-Na при $T=923$ К в разных режимах: А– режим нагревания; Б – режим охлаждения.

Дальнейшее повышение температуры до $T=923$ К приводит к изменению значений максимумов адсорбции натрия как в режиме нагревания (увеличение до $52,27$ ммоль/ м^2) так и в режиме охлаждения (снижение до $5,6$ ммоль/ м^2). Смещение максимумов адсорбции по оси концентраций наблюдается не только в режиме нагревания, но и в режиме охлаждения. Максимальное значение адсорбции в режиме нагревания снова приходится в область $0,21$ ат.% Na, а в режиме охлаждения – $0,22$ ат.% Na. Таким образом ход изотерм поверхностного натяжения и адсорбции подтверждает сложность процессов происходящих в поверхностном слое. Анализ совокупности исследованных как объёмных, так и поверхностных параметров позволяет сделать вывод об одновременном протекании в поверхности расплавов Pb-Na в области малых добавок натрия адсорбционно десорбционных процессов и структурных изменений.

Диаграмма состояния системы Al-Cu достаточно сложная и по последним данным содержит до 15 фаз, которые, в основном приходятся на области с содержанием меди более 30 ат.%. Анализ

имеющихся данных по плотности и поверхностному натяжению сплавов системы Al-Cu свидетельствует о том, что со стороны алюминия практически они не исследовались, а имеющиеся литературные данные по этой системе различаются. В связи с этим исследования плотности и поверхностного натяжения этой системы в данной работе проводились со стороны алюминия (рисунок 11). Из рисунка 11 видно, что плотность расплава Al-Cu всех представленных концентраций линейно уменьшается с температурой.

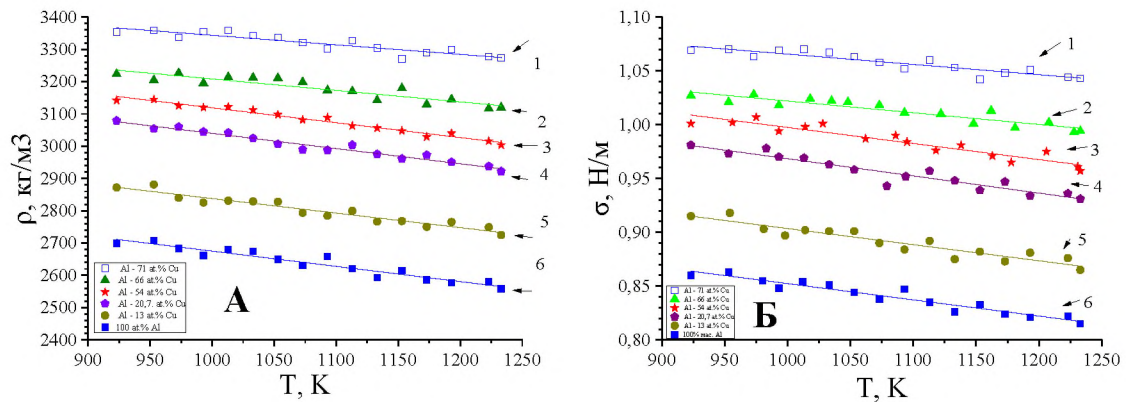


Рисунок 11 – Политермы плотности (А) и ПН (Б) расплавов Al-Cu 1 – Al-71 ат. %Cu, 2 – Al-66 ат. %Cu, 3 – Al-54 ат. %Cu, 4 – Al-39 ат. %Cu, 5 – Al-13 ат. %Cu, 6 – Al.

Представленная на рисунке 12 зависимость температурных коэффициентов плотности от изменения содержания меди свидетельствует об идущих в объеме расплавов сложных структурных изменениях.

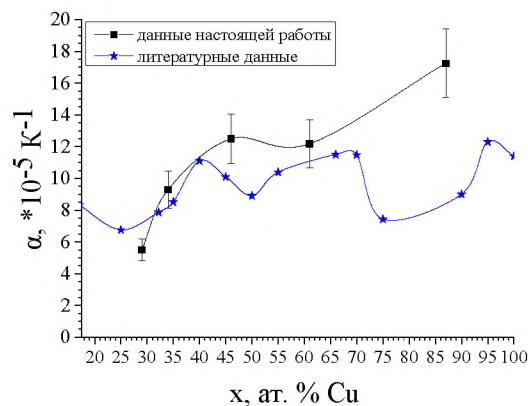


Рисунок 12 – Концентрационные зависимости температурного коэффициента плотности $\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$ по нашим и литературным [21] данным плотности системы Al-Cu.

Сравнение полученной в данной работе зависимости температурных коэффициентов расплавов Al-Cu с литературными данными приводит к заключению, что ход полученной нами концентрационной зависимости температурного коэффициента плотности качественно согласуется с литературными данными и подтверждают проявление структурных изменений в изученных расплавах с увеличением содержания в объеме меди. В частности, проявляющийся в области 40 ат. % меди размытый максимум и намечающийся затем с ростом содержания меди минимум в сочетании с обнаруженными на изотермах плотности и мольного объема говорят о компрессии и последующей декомпрессии, происходящих в объеме расплава вследствие протекания «квазихимических» реакций и формирования микрогруппировок. Изотермы ПН и адсорбции алюминия системы Al-Cu при разных температурах представлены на рисунке 13. Как и в случае системы Pb-Na, максимальные значения адсорбции зависят от температуры. Так при температуре $T=923 \text{ K}$, максимум адсорбции алюминия достигает $20,9 \text{ мкмоль/м}^2$, при $T=1073 \text{ K}$ – $\Gamma=49,7 \text{ мкмоль/м}^2$, а для $T=1233 \text{ K}$ максимум адсорбции алюминия снижается до $20,9 \text{ мкмоль/м}^2$.

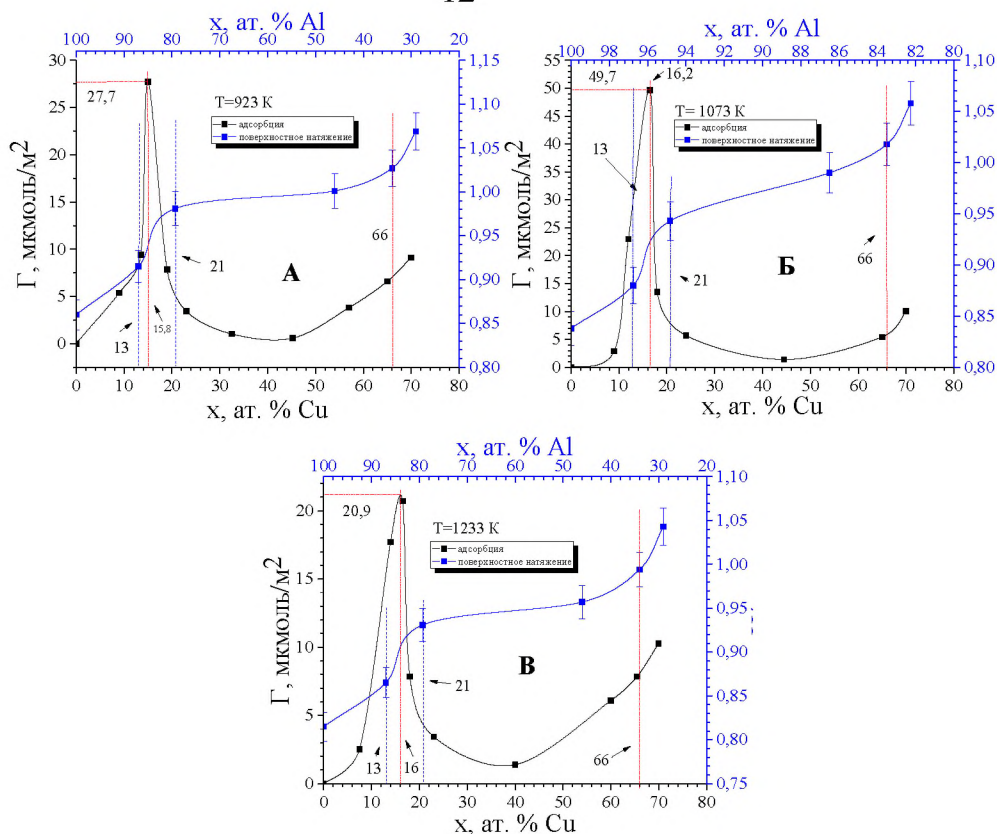


Рисунок 13 – Изотермы поверхностного натяжения и адсорбция Al в расплавах Al-Cu при $T=923\text{ K}$ (A), $T=1073\text{ K}$ (Б) и $T=1223\text{ K}$ (В).

Из сравнительного анализа изотерм ПН и адсорбции можно сделать заключение о том, что в системе алюминий-медь в поверхностном слое адсорбционные процессы и изменение морфологии поверхностного слоя начинаются уже при 13-20,7 ат. % меди в объёме расплава. Кроме того, анализ изотерм адсорбции говорит о проявлении в системе алюминий-медь и концентрационной буферности.

Таким образом, по результатам анализа изотерм ПН и адсорбции, представленных на рисунке 13, можно сделать заключение о том, что с повышением температуры и содержания меди в поверхностном слое расплава Al-Cu начинаются структурные изменения, которые протекают наряду с адсорбционными процессами. Причём, изменение морфологии поверхностного слоя расплавов начинаются уже при 13-20,7 ат. % в объёме, т.е. состав поверхностного слоя может существенно отличаться от состава в объёме расплава.

Подобный вывод был сделан и по результатам исследований состава поверхности в системе Rb-Na методом РФЭС. При определении этим методом содержания натрия в поверхности расплавов было показано, что при концентрации всего 0,18 ат. % в объёме расплава его содержание в поверхностном слое в 12 раз выше и достигает 2,2 ат. %.

Совокупность полученных результатов исследований структурно чувствительных параметров (молярный объём, температурные коэффициенты плотности и молярных объёмов) указывают на наличие структурных образований в объёме расплавов системы Al-Cu, несмотря на то, что они не отражаются на диаграмме состояния выше линии ликвидуса. Причем, такие структуры, вероятнее всего, образуются при концентрациях в объёме ~ 21 -40 ат. % Cu, где по ходу изотерм плотности, её температурного коэффициента и молярных объёмов и можно заключить о наличии компрессии и декомпрессии в расплавах. При этом, как показывают исследования поверхностного натяжения, с изменением концентрации Cu в объёме расплава в поверхности, наряду со структурными изменениями интенсивно идут адсорбционно десорбционные процессы.

По мнению многих авторов (Попель П.С., Баум Б.А., Константинова Н.Ю., Ягодин Д.А. и другие) в таких сложных системах структуру бинарных и многокомпонентных жидких сплавов можно рассматривать как смесь кластеров, которые погружены в жидкий преобладающий компонент. Вследствие этого, металлические растворы становятся микронеоднородными, т.е. такие растворы являются неоднородными в микроскопическом масштабе. Данные кластеры не имеют четких границ, а постепенно изменяются и на расстоянии 1-2 нм от центрального атома совпадают с составом и

структурой матрицы бинарной системы [21]. Именно из-за необратимых разрушений таких микрокластерных образований, по мнению авторов работы [21], на температурных зависимостях плотности, при проведении ими измерений в разных температурных режимах, обнаруживался гистерезис. Полученные в настоящей работе результаты подтверждают наличие гистерезиса плотности, мольного объема и сложной зависимости температурных коэффициентов этих величин. Эти результаты указывают на протекание процессов образования в расплавах агрегатов атомов аналогичных появлению примеси – «псевдокомпонента». Образующиеся квазимолекулярные микрогруппировки (КМО) действуют как «третий компонент» в бинарном расплаве, обуславливая появление экстремумов на изотермах поверхностного натяжения. При этом, одновременно с этим процессом, меняются морфология и состав поверхностного слоя.

Четвертая глава посвящена изучению смачиваемости сплавами на основе свинца различных металлических поверхностей, морфологии и состава поверхности исследуемых образцов. Показано, что с увеличением концентрации натрия в расплаве существенно уменьшаются значения краевых углов смачивания подложек из Ni-Cr, Co-Cr и нержавеющей стали 25X18H9C2. Так же, на политермах обнаруживаются «пороги» смачивания, что связано с характером взаимодействия расплава с подложкой. В изученном концентрационном интервале не наблюдается перехода к режиму смачивания расплавами Pb-Na указанных подложек.

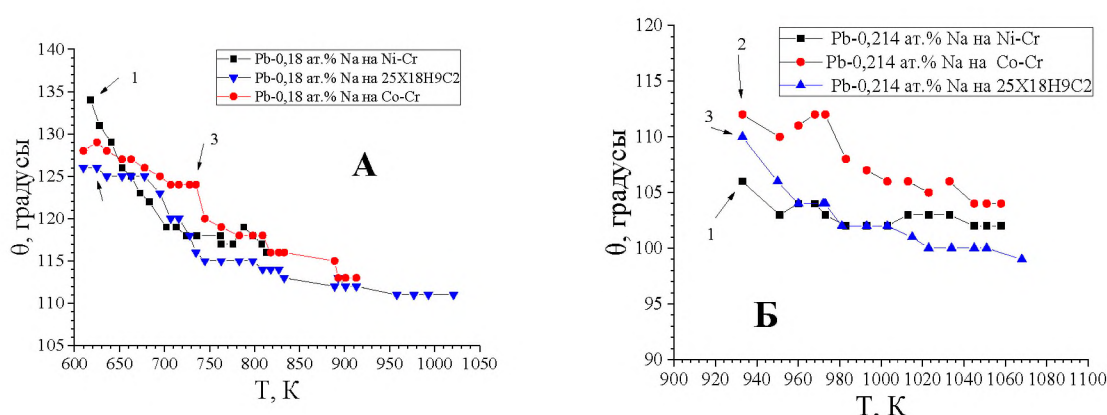


Рисунок 14 – Политермы углов смачивания расплавом Pb-0,18 ат.% Na (А) и Pb-0,214 ат.% Na (Б) подложек из Ni-Cr (1), нержавеющей стали 25X18H9C2 (2) и Co-Cr (3).

Результаты исследования морфологии и состава областей контакта, изученных подложек и расплавов показывают, что на поверхностях подложек проявляется наличие игольчатых образований - фаз с содержанием натрия и дендритов (рис. 15 и 16). При изучении элементного состава образцов выявлено, что в поверхностном слое натрия не обнаруживается при малом содержании последнего в изученных расплавах, но видно, что даже такое малое содержание натрия в расплаве заметно влияет на морфологию поверхности. Морфология области контакта подложек с расплавом Pb-0,214 ат.% Na представлена на рисунке 15 с увеличениями соответственно 570 и 3400 раз.

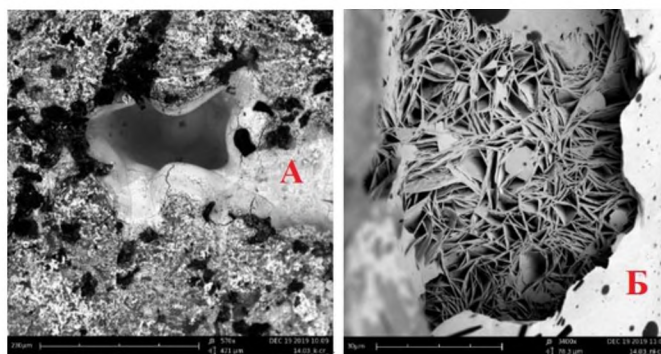


Рисунок – 15. Морфология поверхности подложек из Co-Cr (А-увеличение 570 раз; Б -3400 раз) после взаимодействия с расплавом Pb-0,214 ат.% Na.

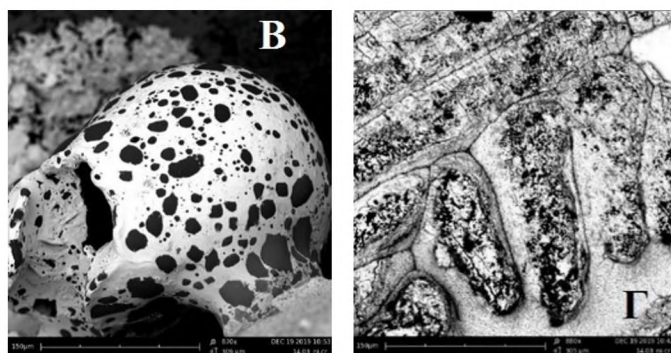


Рисунок – 16. Морфология поверхности подложек Ni-Cr (В-увеличение 870 раз; Г -880 раз) после взаимодействия с расплавом Pb-0,214 ат.% Na.

Морфология области контакта расплава Pb-0,249 ат.% с подложкой Co-Cr с увеличением 2400 раз (рисунок 17 А) приведена вместе с картой химических элементов этой же области (рисунок 17 Б). Легко видеть, что поверхность неоднородная и многослойная с неравномерным распределением элементов и химических соединений как по поверхности, так и по глубине.

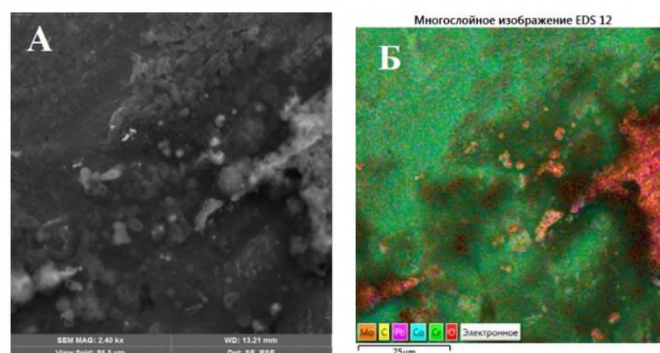


Рисунок 17 – А) морфология поверхности; Б) карта химических элементов на поверхности капли расплава Pb-0,249 ат.% Na на подложке Co-Cr (увеличение 2400 раз).

На рисунке 18 приведены результаты количественного анализа капли расплава на подложке Co-Cr в области представленной на рисунке 17. Как следует из результатов анализа, суммарный спектр карты химических элементов содержит Pb, O, Cr, Ca, Ni и Fe. Причём свинец находится в пяти различных состояниях, а никель, железо и хром находятся в трёх различных состояниях каждый. При этом свинец и кислород в сумме составляют 98,2 весовых %.

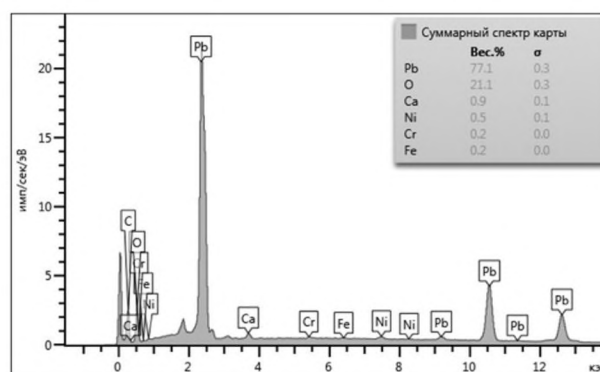


Рисунок 18 – Количественный анализ капли расплава Pb-0,249 ат.% Na на подложке Co-Cr в данной области (рисунок 15).

Для сравнения с этими результатами на рисунке 18 представлен обзорный РФЭС – спектр этой же области поверхности расплава Pb-Na, записанный после ионной (Ar⁺) очистки поверхности.

Очистка поверхности образца проводилась в режиме:

- вакуум порядка $1 \cdot 10^{-7}$ Па;
- энергия ионов 500 эВ;
- время бомбардировки ионами Ar⁺ 20 минут.

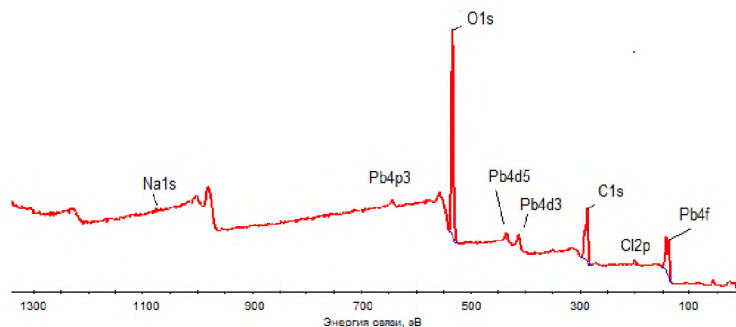


Рисунок 19 – Обзорный спектр поверхности Pb-0,18 ат% Na после ионной очистки.

Как следует из обзорного спектра, в поверхности фиксируются наличие свинца в четырёх состояниях, кислород в состоянии 1s (O_{1s}) и Na в состоянии 1s (Na_{1s}). Так как метод РФЭС определяет состав самого поверхностного слоя, то можно сделать заключение о содержании в нём, в основном, свинца, натрия и кислорода. Фиксируемый углерод, скорее всего, входит в осколки органических загрязнений в поверхностном слое исследуемого образца.

Для более детального выяснения состояния свинца в поверхности был рассмотрен спектр высокого разрешения свинца (Pb_{4f}).

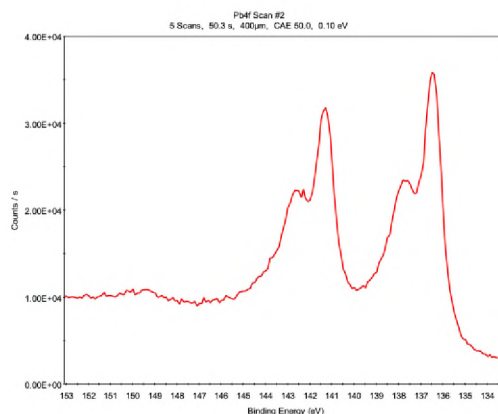


Рисунок – 20. Спектр высокого разрешения пика Pb_{4f} свинца.

Анализ спектра высокого разрешения Pb_{4f_{3/2}} (рисунок 19) показывает, что он состоит из двух максимумов, смещенных друг относительно друга на расстоянии 1,1 эВ. Эти данные говорят, что свинец находится в двух состояниях: в металлическом (Pb_{4f_{3/2}}, 136,6 эВ) и в состоянии оксида (Pb_{4f_{3/2}}, 137,7 эВ). Из анализа спектра высокого разрешения натрия следует, что его содержание в поверхностном слое очень мало. А регистрируемые на уровне шумов состояния натрия это Na₂O (1072,5 эВ) и NaO(1072,6 эВ).

Увеличение содержания натрия до 0,46 ат.% меняет распределение элементов в поверхности и её морфологию (рисунки 21 и 22). Поверхность становится более однородной с практически равномерным распределением по ней химических элементов. Количественный анализ этой области показал, что состав поверхности для сплава Pb-0,46 ат.% Na идентичен составу поверхности расплава Pb-0,249 ат.%Na. В поверхности регистрируются свинец в четырёх состояниях и также кислород, натрий, кальций. Появляются следы кремния. Однако уже меняется соотношения концентрации свинца и кислорода. Доля свинца увеличивается и становится равной 83,8 вес.%, а кислорода уменьшается до 14,7 вес.%. В сумме эти два элемента в поверхности изученного состава составляют 98,5 вес.%.

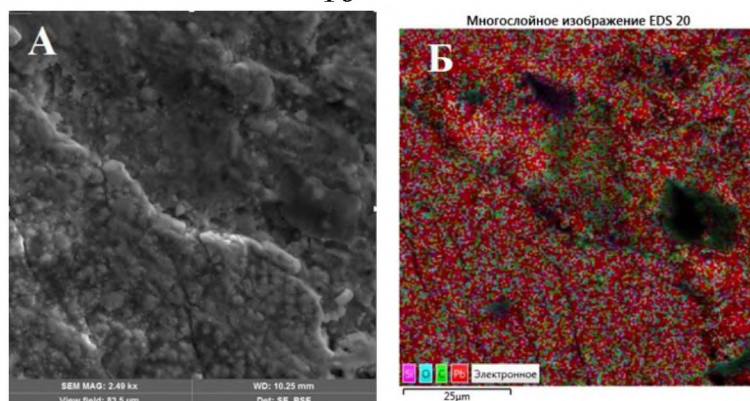


Рисунок 21 – А) морфология поверхности подложки расплава Pb-0,46 ат.% Na после взаимодействия с подложкой Co-Cr; Б) Карта химических элементов данной области (увеличении 2490 раз).

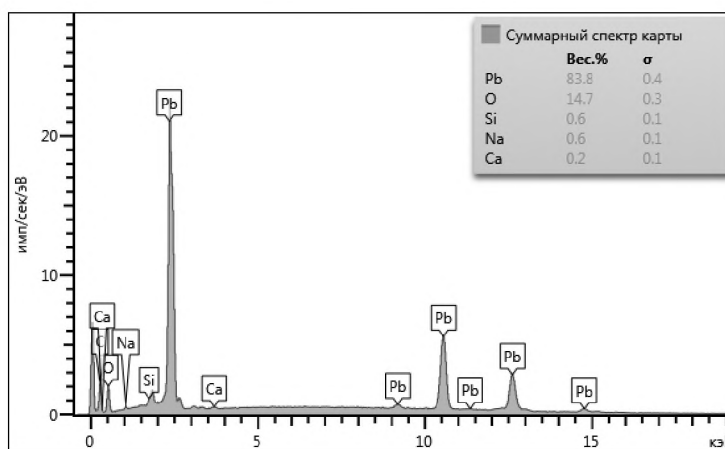


Рисунок 22 – Количественный анализ расплава Pb-0,46 ат.% Na данной области.

В *пятой* главе приводятся результаты экспериментального исследования смачиваемости расплавами на основе свинца, алюминия и меди конструкционных и реакторных сталей.

Установлено, что расплавы Pb-Ni смачивают подложки из меди, но не наблюдается смачивание подложек из алюминия, что объясняется наличием на ней устойчивой оксидной плёнки.

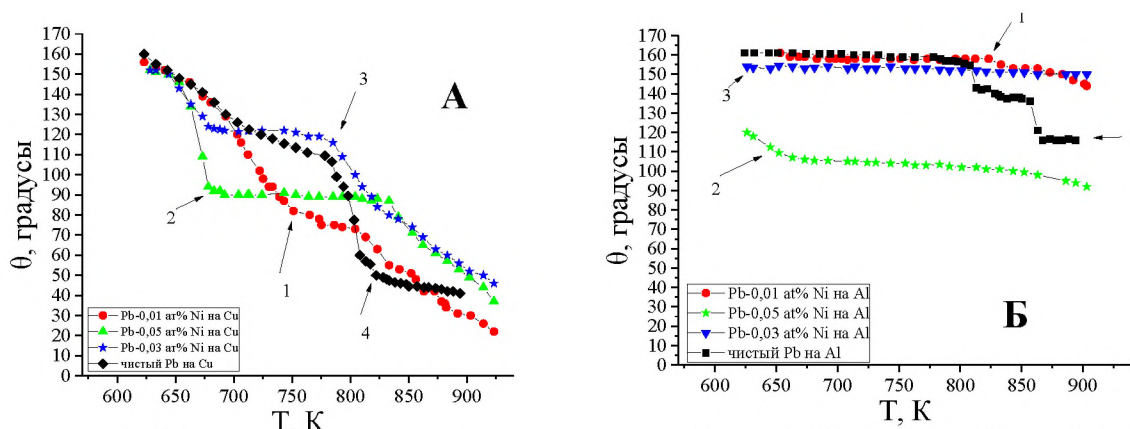


Рисунок 23 – Политермы углов смачивания расплавами Pb-Ni (1- Pb-0,01 ат.% Ni; 2- Pb-0,03 ат.% Ni; 3- Pb-0,05 ат.% Ni; 4- чистый Pb) подложек из Cu(A) и Al (Б)

На политермах краевого угла смачивания расплавами Pb-Ni на медных подложках обнаруживаются пороги смачивания и установлено, что данные расплавы смачивают все исследованные медные подложки, но не взаимодействуют с алюминиевой подложкой. Это объясняется, прежде всего,

наличием устойчивой оксидной плёнки на поверхности алюминиевой подложки и тем, что чистый свинец и алюминий имеют широкую область не смешиваемости.

Из рисунка 24 видно, что расплавы Al-Cu смачивают исследуемые подложки. На политермах углов смачивания расплавов Al-70,2 ат.%Cu обнаруживаются пороги смачивания и полностью растекается на всех исследуемых подложках.

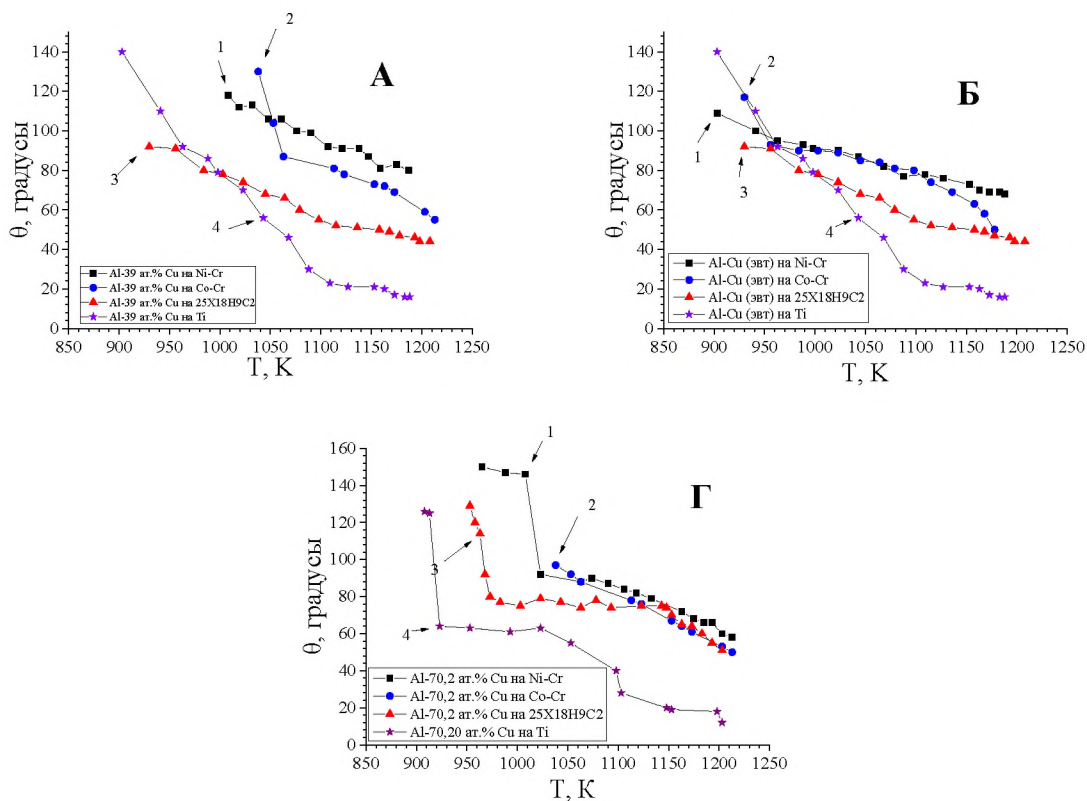


Рисунок 24 – Политермы смачивания подложек из Ni-Cr, Co-Cr, нержавеющей стали 25X18H9C2 и Ti расплавами: А) Al-39 ат.%Cu; Б) Al-Cu (эвт); Г) Al-70,2 ат.%Cu.

При изучении смачиваемости реакторных сталей расплавом Pb-Bi эвтектического состава, так же, обнаруживаются, пороги смачивания. Данные пороги смачивания объясняются тем, что на сталях при температурах выше 900 К разрушаются оксидные пленки хрома, а также испарением с поверхности расплава висмута.

Результаты рентгенофазового анализа поверхности капли свидетельствуют о том, что наличие резкого спада угла смачивания выше 923 К обусловлено тем, что на ней не обнаруживаются фазы свинца – т.е. атомы висмута полностью заполняют собой поверхность капли эвтектического сплава.

Заключение

В работе методом большой капли с использованием современных информационных технологий получены температурные зависимости плотности, поверхностного натяжения расплавов Pb-Na, Al-Cu и изучена смачиваемость ими поверхностей Cu, Al, подложек тугоплавких сплавов Co-Cr, Ni-Cr, Ti, конструкционных (12X18H9T и 25X18H9C2) и ряда реакторных сталей (ЭК 173, ЭК 181, ЭК 450, ЭП 753А, ЭП 753тур). Система Pb-Na исследовалась в области малых (до 0.5 ат.%) концентраций натрия в температурном интервале 623 – 923 К. До настоящего времени поверхностные свойства расплавов системы Pb-Na в указанном интервале концентраций не изучались, хотя они представляют теоретический и практический интерес. Исследования температурной зависимости плотности и поверхностного натяжения этой системы при малых содержаниях натрия проводились как в режиме нагревания, так и в режиме охлаждения, что позволило сделать выводы относительно особенностей строения объёмной фазы и поверхностного слоя. Полученные результаты показали, что в изученном концентрационном интервале на изотермах плотности и поверхностного натяжения проявляются особенности в виде чётко выраженных точек перегиба. Во всех случаях проявляется зависимость хода изотерм плотности и мольного объёма от режимов нагрева. Эти особенности демонстрируют, что в указанном выше интервале концентраций в объёме расплава идут процессы компрессии и декомпрессии,

которые могут быть обусловлены структурными изменениями. В частности, они могут являться следствием образования и разрушения как интерметаллидов, так и квазимолекулярных образований (КМО), не нашедших отражения на диаграмме состояния этой системы при малых концентрациях (до 0,5 ат.%) натрия. Концентрационные зависимости температурных коэффициентов плотности и мольного объема позволяют определить интервал концентраций натрия, при которых происходят эти структурные изменения в объеме расплавов системы Pb - Na. Обнаруженное явление зависимости температурных коэффициентов плотности и мольного объема от структурных изменений в объеме расплава имеет важное практическое применение и является подтверждением того, что в металлических расплавах эти параметры являются структурно чувствительными.

Результаты исследований температурных и концентрационных зависимостей поверхностного натяжения расплавов на основе свинца с малыми добавками натрия показали:

1. Температурные коэффициенты поверхностного натяжения исследованных сплавов системы Pb-Na, оставаясь отрицательными, меняются по абсолютной величине в зависимости от содержания в расплаве натрия;

2. Концентрационные зависимости температурных коэффициентов поверхностного натяжения в сильной степени зависят от того в каком режиме (нагрева или охлаждения) проводятся измерения поверхностного натяжения. Так максимальных значений изотерма температурного коэффициента поверхностного натяжения достигает в режиме нагревания при 0,249 ат.% натрия, а в режиме охлаждения при 0,203 ат.%.

3. На ход изотерм поверхностного натяжения расплавов оказывают влияние несколько факторов: перераспределение Na между объемом и поверхностным слоем капли расплава вследствие адсорбционно-десорбционных процессов, образование микрокластеров типа Pb_mNa_n , а также изменение морфологии поверхностного слоя.

На рассчитанных для разных режимов (нагревания и охлаждения) изотермах адсорбции проявляются максимумы, величины которых разнятся в несколько раз, что является подтверждением наличия различий в механизме протекания адсорбционно-десорбционных процессов при разных режимах. Хотя в обоих режимах максимумы адсорбции располагаются в узком концентрационном интервале, положения максимумов, определенных в режиме охлаждения, сдвигаются в область больших концентраций натрия в объеме расплава. Количество адсорбированных атомов натрия в поверхностном слое в режиме нагревания в несколько раз больше чем в режиме охлаждения.

Результаты исследований поверхностей расплавов свинца с малыми добавками натрия микроструктурными, химическими и электронно-спектроскопическими (РФС, ОЭС, СЭМ) методами показали, что поверхности являются неоднородными, полислойными, с неравномерным распределением химических элементов и соединений. Обнаружено, что свинец в поверхностях изученных расплавов Pb-Na находится в различных состояниях: металлическом и в составе оксидов.

Таким образом, на основании проведенных экспериментальных исследований и анализа полученных результатов можно заключить, что в расплавах свинец-натрий, в интервале концентраций натрия от 0 до 0,5 ат.%, образуются микрогруппировки атомов, которые оказывают заметное влияние на температурный коэффициент плотности. Совокупность результатов, проведенных по исследованию поверхностей расплавов свинца с малыми добавками натрия, позволяет сделать вывод о значительном влиянии концентрации натрия в объеме расплавов на изменение морфологии и состава поверхностных слоев. При этом поверхностный слой этих расплавов обогащен атомами натрия по сравнению с объемной фазой (содержание натрия в поверхности больше примерно в 12 раз), что, в свою очередь, способствует формированию микрогруппировок из атомов свинца и натрия в поверхностном слое. Сформировавшиеся вследствие этих процессов в поверхностном слое КМО, наряду с адсорбционно-десорбционными процессами, оказывают заметное влияние на температурную зависимость поверхностного натяжения. Результаты исследований плотности и поверхностного натяжения системы алюминий – медь показали: в объеме сплавов богатых алюминием с изменением содержания меди протекают структурные изменения, что подтверждается ходом температурных коэффициентов плотности. Сравнительный анализ полученных в работе зависимости температурных коэффициентов плотности расплавов Al–Cu с литературными данными показал, что полученная нами концентрационная зависимость температурного коэффициента плотности качественно согласуется с литературными данными, и подтверждает появление структурных изменений в изученных расплавах с увеличением содержания алюминия в объеме расплава. Наличие сложных структурных изменений и в поверхностном слое системы алюминий – медь подтверждается ходом концентрационной зависимости температурного коэффициента плотности в области концентраций 45-62 ат.% меди. На изотермах поверхностного натяжения в области концентраций в объеме от 13 до 20,7 ат.% Cu фиксируются области перегиба, в которых ход концентрационной зависимости ПН претерпевает резкое изменение. Это означает, что в

поверхностном слое одновременно идут структурные изменения и адсорбционно десорбционные процессы. Указанные процессы происходят в узкой области концентраций меди в объеме расплава - от 13 до 20,7 ат. % Cu. Таким образом, если на концентрационной зависимости температурного коэффициента плотности максимум проявляется только в районе 45-62 ат. % меди, то в поверхностном слое адсорбционные процессы и изменение морфологии поверхностного слоя наблюдаются уже при 13-20,7 ат. % Cu в объеме. Следовательно, уже при 13-20,7 ат. % Cu в объеме расплава в поверхностном слое содержание меди соответствует тем значениям (около 40 ат. %), при которых в объеме начинаются структурные изменения. Таким образом, концентрация меди в поверхности расплава может превышать его содержание в объеме 2,5-3,5 раза. Подобный вывод был сделан и по результатам исследований состава поверхности в системе Pb-Na методом РФЭС. При определении содержания натрия в поверхности было показано, что при концентрации всего 0,18 ат. % в объеме расплава его содержание в поверхностном слое в 12 раз выше и достигает 2,2 ат. %.

При взаимодействии металлических расплавов с поверхностями твердых металлических фаз, важную и определяющую роль играют процессы растворения и образования химических соединений. Это означает, что на межфазных границах в таких системах протекают необратимые процессы.

Анализ условий установления адгезионных связей между металлическими расплавами и поверхностями твердых металлических тел показал, что, в общем случае, в процессе установления связей между контактирующими фазами, на их границе раздела меняется межфазное натяжение, которое проходя через минимум, выходит со временем к статическому значению.

Исследования температурных зависимостей смачиваемости металлических подложек сплавами на основе свинца, алюминия и висмутистого свинца показало, что на всех экспериментально построенных политермах краевого угла смачивания проявляются «пороги» смачивания, наличие которых определяется во всех изученных системах образованием и разрушением оксидных плёнок на поверхностях расплавов.

Расплавы Ni-Cr смачивают все исследованные подложки за исключением алюминиевой, на поверхности которой имеется устойчивая оксидная плёнка.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК, WoS, Scopus:

1. Камболов, Д.А. Смачивание сталей висмутистым свинцом / Кашежев А.З., Кутуев Р.А., Созаев В.А., Шерметов А.Х. // Теплофизические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах» Теплофизика-2012, – с. 65-67.
2. Камболов, Д.А. Политермы плотности, поверхностного натяжения висмутистого свинца и угла смачивания им высоконикелевых и ферритно-мартенситных сталей сплавом Pb-Bi / Кашежев А.З., Кутуев Р.А., Понежев М.Х., Созаев В.А., Шерметов А.Х. // Теплофизика высоких температур. – 2014. – №3. – Т. 52. – с. 392-396.
3. Кашежев, А.З. Политермы углов смачивания поверхности стали 12X18H9T расплавом свинец-висмут эвтектического состава / Кутуев Р.А., Созаев В.А., Хасанов А.И., Шерметов А.Х. // Коллективная монография участников Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного материаловедения», г. Грозный, 2015г., –с. 115-123.
4. Кашежев, А.З. Смачивание стали 12X18H9T свинец-висмутовой эвтектикой / Кутуев Р.А., Созаев В.А., Хасанов А.И., Шерметов А.Х. // Вестник. Академии наук Чеченской республики. 2015, – № 4(29), –с. 22-25.
5. Шерметов, А.Х. Политермы углов смачивания расплавом Pb-Ni (0,3 ат. %) никелевых подложек / Елекоева К.М., Коротков П.К., Кутуев Р.А., Манукянц А.Р., Понежев М.Х., Созаев В.А. // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2017, –№12, –с. 62-65.
6. Шерметов, А.Х. Смачивание расплавом свинец – никель подложек из алюминия и меди / Шокаров А.А., Понежев М.Х., Созаев В.А., Карамурзов Б.С. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общ. ред. В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2018. – Вып. 10. – с. 671-676.
7. Карамурзов, Б.С. Плотность и поверхностное натяжение расплавов свинец-натрий / Б.С. Карамурзов, Кутуев Р.А., Понежев М.Х., Созаев В.А., Шерметов А.Х., Шокаров А.А. // Известия РАН. Серия физическая, 2019, – т. 83, – №6, – с. 845-847.
8. Карамурзов, Б.С. Температурная зависимость угла смачивания тугоплавких металлов расплавов свинца с натрием / Б.С. Карамурзов, Кутуев Р.А., Понежев М.Х., Созаев В.А., Шерметов А.Х., Шокаров А.А. // Инженерный вестник Дона, 2020, – №2, – с. 9.
9. Карамурзов, Б.С. Политермы угла смачивания тугоплавких металлов расплавов свинца с натрием / Б.С. Карамурзов, Кутуев Р.А., Понежев М.Х., Созаев В.А., Шерметов А.Х.,

Шокаров А.А. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, 2020, – вып. 12, –стр. 113-119.

10. Карамурзов, Б.С. Изотермы плотности, поверхностного натяжения и адсорбции Na в расплавах Pb – Na / Б.С. Карамурзов, Кутуев Р.А., Понежев М.Х., Созаев В.А., Шерметов А.Х., Шокаров А.А. // Известия РАН. Серия физическая, 2021, –т. 85, –№9, – с. 1309-1313.

11. Karamurзов, B.S. Isotermes of Density, surface Tension, and Na Adsorptiot in Pd-Na melts / B. S. Karamurзов, R. A. Kutuev, M. Kh. Ponezhev, V. A. Sozaev, A. H. Shermetov & A. A. Shokarov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2021, – issue 85, – pp. 1008-1011.

12. Карамурзов, Б.С. Политермы поверхностных свойств сплавов медь-алюминий / Б.С. Карамурзов, Кутуев Р.А., Понежев М.Х., Созаев В.А., Шерметов А.Х., Шокаров А.А. // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2021, – №6, – с. 109-112.

13. Карамурзов, Б.С. Изучение адсорбции натрия в расплавах бинарной системы Pb-Na методами РФЭС и РЭМ / Б.С. Карамурзов, Калажоков Х.Х., Калажоков З.Х., Понежев М.Х., Созаев В.А., Шерметов А.Х., Реуцкая Н.С. // (в печати в журнале «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования»)

Публикации в материалах конференций:

1. Российской конференции “Теплофизические, экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах”, Обнинск, 2012, с. 65-67

2. Международных, междисциплинарных симпозиумах “Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы” (ФПЯ и ФП), Нальчик – п. Лоо, 2012, с. 53-58; Нальчик – Туапсе, 2013, с. 110-113

3. XIV Российская конференция (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ, г. Казань, 2014, Т.1, с. 280-283.

4. На 8-ой Международной научно-технической конференции «микро-и нанотехнологии в электронике», 30 мая-4 июня 2016, , с. 92-98.

5. 4-м, 5-м, 8-м и 9-м международных и междисциплинарных симпозиумах Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы” (PSP8, PT), Нальчик – Ростов-на-Дону-Грозный-п. Южный, 2014, Т.1, с. 173-176; 2015, вып. 5 с. 102-105; Грозный – п. Шепси 2018, вып. 8, с. 203-206; пос. Эльбрус, 2019, вып. 9, с. 207-210

6. Всероссийская научно-практическая конференция “Актуальные проблемы современного материаловедения”, Грозный, 2015, с. 115-123

7. 19-м и 21-м международных симпозиумах “Порядок, беспорядок и свойства оксидов (ODPO-19)”, Ростов-на-Дону, п. Южный, 2016, вып. 19, Т.1, с. 282-285; 2018, вып. 21, Т.1, с. 129-131.

Список цитируемой литературы

1. Дадашев, Р.Х. Поверхностные свойства сплавов на основе свинца, олова, индия, кадмия. Монография / Р.Х. Дадашев, Р.А. Кутуев, В.А. Созаев // М: Физматлит, 2016. – 208 с. – ISBN 978-5-9221-1669-5.

2. Кашежев, А.З. Политермы углов смачивания пористых Ni и Cu расплавами Sn-Ba и In-Na / А.З. Кашежев, Р.А. Кутуев, А.Р. Манукянц, М.Х. Понежев, В.А. Созаев // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55. – № 5. – с. 850-853.

3. Карамурзов, Б.С. Плотность и поверхностное натяжение расплавов свинец-натрий / Б.С. Карамурзов, Р.А. Кутуев, М.Х. Понежев, В.А. Созаев, А.Х. Шерметов, А.А. Шокаров //8 Междисциплинарный симпозиум «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы». PSP&PT8. 12-16 сентября 2018 г. Труды симпозиума. – Нальчик – Ростов н/Д – Грозный – пос. Шепси, –2018. – Вып.8. – С. 207-210.

4. Карамурзов, Б.С. Плотность и поверхностное натяжение расплавов свинец-натрий / Б.С. Карамурзов, Р.А. Кутуев, М.Х. Понежев, В.А. Созаев, А.Х. Шерметов, А.А. Шокаров // Известия РАН. Серия Физическая. – 2019. – Т. 83. – № 6. – С. 845-847.

5. Карамурзов, Б.С. Политермы углов смачивания расплавами тугоплавких материалов / Б.С. Карамурзов, Р.А. Кутуев, М.Х. Понежев, В.А. Созаев, А.Х. Шерметов, А.А. Шокаров // Труды межвузовского сборника «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. –Тверь, ТГУ. – 2020. – Вып. 12.

6. Kozyrev, E.N. Development of Diamond-Metal Composition for Diamond Tools/ E.N. Kozyrev, V.K. Kumykov, A.S. Kushhabiev, A.R. Manukyants, Y.N. Kasumov, V.A. Sozaev // *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. –2020. – Т. 14. – № 13. – p. 639-642.
7. Кузьмин, А.М. Исследование характеристик внутренней самозащищенности быстрого реактора с натриево-свинцовым охлаждением активной зоны/ А.М.Кузьмин, В.С. Окунев // *Изв. вузов. Ядерная энергетика*. – – 2000. - №2.
8. Delofree, P. Corrosion and deposition of ferrous alloys in molten lead-bismuth/ P. Delofree, A. Terlain, F. Barbier // *J. Nucl. Mater.* – 2002. – V. 301. – p. 35.
9. Benamati, G. Corrosion behaviour of steels and refractory metals in flowing Lead-Bismuth Eutectic at low oxygen activity / G. Benamati, A. Gessi, G. Scadozzo // *Journal of Materials Science*. – vol. 40. 2005. – issue 9-10. – pp. 2465-2470.
10. Субботин, В. И. Жидкометаллические носители в ядерной энергетике // В сб.: *Материалы докладов Российской межотраслевой конференции «Тепломассообмен и свойства жидких металлов»*. – Обнинск: ФЭИ. – 2002. – Т. 1. – С. 15-16.
11. Дриц, М.Е. Сплавы щелочных и щелочноземельных металлов / Л.А. Зусман – М.: *Металлургия* –1986.
12. Чуларис А.А. Исследование переходной зоны взаимодействия никеля с алюминием в условиях пайки / А.А. Чуларис, Г.В.Чумаченко, П.И. Селезнев // *Вестник ДГТУ*, – 2006. – Т.6. – №2(29).
13. Лякишев, Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем –М.: *Машиностроение*, – 2001, – книга 1, – т. 3. – с. 31.
14. Захаров, А.М. Справочник по пайке: М. –1984. –2 изд.
15. Шокаров, А.А. Политермы угла смачивания металлических поверхностей системой алюминий-медь /А.А. Шокаров, А.Х. Шерметов, М.Х. Понежев, Б.С. Карамурзов, В.А. Созаев //8 Междисциплинарный симпозиум «Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы». PSP&PT8. 12-16 сентября 2018 г. Труды симпозиума. – Нальчик – Ростов н/Д – Грозный – пос. Шепси. – 2018. – Вып.8. – с. 199-202.
16. Molina, J. M. The surface tension of liquid aluminium in high vacuum: The role of surface condition/ J. M. Molina, R. Voytavych, E. Louis, N. Eustathopoulos // *International Journal Of Adhesion and Adhesives*, Vol. 27, – 2007, – pp.394-401.
17. Витюнин М.А. Растекание расплавов на основе алюминия по поверхности твердых тел и особенности микроструктуры закристаллизованных материалов: диссертация кандидата химических наук: 02.00.21 – 2009. – 124 с.
18. Egry, I. Density and Thermal Expantion of liquid binary Ai – Ag and Al – Cu alloys / J. Wespall // *Int. J. Mat. Res.* – 2008. – p.162.
19. Константинова, Н.Ю. Вязкость расплавов медь – алюминий / Н.Ю. Константинова, А.Р. Курочкин, А.В. Борисенко, В.В. Филиппов, П.С. Попель // *Расплавы*. – Том 2. – 2016. – с. 157-164.
20. Мальцев, М.В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов // – М. – 2 изд., – 1970.
21. Попель, П.С. Влияние термической обработки исходного расплава на структуру и свойства кристаллических слитков или отливок. / П.С. Попель, В.Е. Сидоров, И.Г. Бродова, М. Кальво-Дальборг, У. Дальборг // *Расплавы*. – №1. – 2020. - с. 3-36.

Благодарность:

Автор выражает глубокую благодарность профессору Созаеву В.А. и доценту кафедры теоретической и экспериментальной физики Понежеву М.Х. за всестороннюю поддержку, внимание и интерес к настоящей диссертационной работе, а также за помощь при проведении экспериментальных исследований и обсуждении результатов.