

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной  
и исследовательской деятельности  
ФГАОУ ВО «Южный федеральный  
университет»

доктор химических наук

А.В. Метелица

« 14 » сентября 2023 г.



### Отзыв

ведущей организации федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» на диссертацию Кутуева Руслана Азаевича «Поверхностные свойства двойных и многокомпонентных расплавов на основе легкоплавких металлов», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.14 - (Теплофизика и теоретическая теплотехника)

#### **Актуальность исследований, проведенных в диссертационной работе.**

Металлическое состояние вещества является одной из технологических основ современной цивилизации. При этом, в связи с ростом энерговооруженности и частотной селективности устройств и механизмов, естественным образом возрастают и требования к применяемым в них материалам. Особое значение эти требования приобретают по отношению к легкоплавким металлическим системам, использование которых, например, в ядерной промышленности в качестве теплоносителей, в том числе в реакторах перспективных типов, может вывести на новый уровень обеспечение эффективности преобразования энергии и безопасность работы контуров охлаждения. В связи с этим, работа, направленная на установление закономерностей формирования физических свойств легкоплавких сплавов

как на свободных поверхностях, так и на границах с другими средами, является актуальной, а её результаты могут иметь, кроме значительного экономического эффекта в результате совершенствования технологических процессов, критическое значения для безопасности человеческого общества.

Диссертационная работа Кутуева Р.А. посвящена выявлению закономерностей влияния температуры и элементного состава на физико-химические и поверхностные свойства расплавов на основе свинца, висмута, индия, олова, алюминия и цинка, а также влияние этих факторов на смачиваемость ими твердых поверхностей: реакторных сталей, алюминия, меди, титана и сплавов - кобальт-вольфрам, кобальт-хром, никель-хром.

### **Общая характеристика работы.**

Представленная диссертационная работа состоит из введения, шести глав, списка использованной литературы, состоящей из 347 наименований. Общий объем диссертации составляет 314 страниц, включая 80 рисунков, 18 таблиц.

**Введение** посвящено описанию цели и задач, поставленных в работе, ее актуальности и новизны. Дана общая характеристика проведенного исследования и представлены выдвигаемые к защите научные положения.

**Глава 1** диссертационного исследования посвящена рассмотрению вопросов, связанных с понятиями «идеализированная система сравнения», «разделяющая поверхность Гиббса» и «избыточные термодинамические величины». Особое внимание при этом уделено зависимости избыточных величин от положения разделяющей поверхности. Рассматриваются варианты адсорбции по определению Гиббса и по определению Гугтенгейма и Адама. Изложен подход, позволяющий определить площади чистых компонентов в приповерхностном слое многокомпонентных сплавов.

**Во 2 главе** представлены особенности измерения поверхностного натяжения методом большой капли и методом максимального давления в капле. При этом подробно рассмотрены основные источники систематических и случайных погрешностей измерения указанными

методами. Описаны подробности эксперимента и его обработки при помощи программных средств.

**Глава 3** посвящена экспериментальному изучению поверхностного натяжения, плотности и молярных объемов двойных систем таллий-свинец, индий-олово, индий-таллий, олово-таллий, галлий-висмут и медь-алюминий, общей особенностью которых, согласно имеющимся литературным данным, является наличие экстремумов на изотермах поверхностного натяжения.

**В главе 4** проведен обзор литературных данных по поверхностному натяжению и плотности многокомпонентных систем и представлены результаты исследования поверхностных свойств четырехкомпонентных систем индий-олово-свинец-висмут и цинк-алюминий-молибден-магний. Особое внимание в обзорной части уделено результатам изучения поверхностных свойств тройных систем на основе индия, олова, свинца, висмута, таллия, галлия и ртути.

**Глава 5** посвящена изучению поверхностного натяжения и плотности расплавов на основе свинца. Экспериментально определены температурные и концентрационные зависимости поверхностного натяжения и плотности висмутистого свинца, эвтектического расплава свинец-висмут и разбавленных по второму компоненту растворов бинарной системы Pb-Na.

**В главе 6** представлены экспериментальные результаты исследования краевого угла смачивания жидкими металлами и сплавами твердых поверхностей.

В заключении сформулированы **основные результаты работы**.

#### **Научная новизна.**

1. Проведен критический анализ основных положений и понятий теории капиллярности Гиббса и определена зависимость расстояния между различными положениями разделяющей поверхности от состава экспериментально изученных двойных систем. Показано, что максимальное расстояние между положениями разделяющей поверхности, соответствующими различным вариантам определения адсорбции по Гиббсу, Гуггенгейму и Адаму (N, M и V-варианты), не превышает толщину

нескольких атомных слоев, то есть ни одна из рассматриваемых поверхностей при изменении состава бинарной системы не выходит за пределы физической границы раздела фаз.

2. Разработан метод для вычисления свойств межфазного слоя расплавов с неограниченным числом компонентов, который позволяет вычислить по изотермам поверхностного натяжения следующие величины: молярную поверхность, эффективную толщину и усредненный состав поверхностного слоя многокомпонентных растворов.

3. В широкой области концентраций экспериментально определены изотермы и политермы поверхностного натяжения и плотности расплавов: Ga-Bi, Pb-Tl, In-Sn, In-Tl, Sn-Tl, Cu-Al. При этом измерения поверхностного натяжения расплавов индий-олово проведены на одних и тех же образцах двумя независимыми методами – методом максимального давления в капле и методом большой капли.

4. Экспериментально изучены температурные и концентрационные зависимости поверхностного натяжения и плотности четырехкомпонентной системы In-Sn-Pb-Bi. Выявлено, что на разрезах концентрационного тетраэдра с постоянным содержанием висмута (0,05 молярных долей) «впадина» на изотермической поверхности поверхностное натяжение исчезает.

5. По разработанным методам, используя полученные экспериментальные данные, определены концентрационные зависимости термодинамических параметров поверхностного слоя четверных расплавов In-Sn-Pb-Bi.

6. Экспериментально измерена температурная зависимость поверхностного натяжения и плотности расплава сербской бронзы. Выявлен экстремум, связанный с бесконтрольным образованием оксидной пленки на начальном этапе плавления легкоплавкого металла.

7. Экспериментально определены температурные и концентрационные зависимости поверхностного натяжения и плотности свинца, висмута, висмутистого свинца (Bi – 10,6 мас. %) и разбавленных растворов Pb-Na.

8. Экспериментально изучены температурные зависимости краевых углов смачивания целого ряда практически важных металлических систем.

Впервые установлено следующее: температурная зависимость краевого угла смачивания сербской бронзой поверхности вольфрам-кобальтовых подложек имеет нелинейный характер. При этом, углы смачивания сербской бронзой вольфрам-кобальтовых подложек в интервале температур от 730 до 850 К ниже, чем значения углов смачивания этой же поверхности цинком; порогом смачивания характеризуются температурные зависимости краевого угла смачивания: сербской бронзой поверхностей меди (при 813К), стали марки 12Х18Н9Т (при 1050К) и алюминия (при 780 К); висмутистым свинцом поверхностей сталей ЭК-181, ЭП-753А, ЭК-450 в интервале от 900К до 1000К; расплавом медь-алюминий (0,5 масс. долей) поверхностей титана, стали 25Х18Н9С2, Ni-Cr при температурах 925 К, 950 К, 1025 К, соответственно; линейной зависимостью характеризуются политермы краевого угла смачивания: висмутистым свинцом поверхностей стальных подложек ЭК-173 и ЭП-753ТЮР; расплавами алюминий-медь (0,207 и 0,33 масс. долей. Cu) твердых поверхностей Ni-Cr, Ti и стали 25Х18Н9С2; расплавом алюминий-медь (0,5 масс. долей. Cu) твердой поверхности Co-Cr; стальные подложки ЭК-173, ЭП-753ТЮР в изученном интервале температур практически не смачиваются висмутистым свинцом.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Сделанный в работе вывод о том, что ни одна из рассматриваемых разделяющих поверхностей Гиббса при изменении состава бинарной системы не выходит за пределы физической границы раздела фаз, доказывает равнозначность существующих вариантов определения адсорбции (относительная адсорбция Гиббса, N, M и V-варианты адсорбции по Гуггенгейму и Адаму), что имеет научное и практическое значение.

Разработанные автором методы позволяют определить молярные и парциально-молярные поверхности, эффективную толщину и усредненный состав поверхностного слоя.

Данные по температурной зависимости поверхностного натяжения и плотности расплавов сербской бронзы и висмутистого свинца могут использоваться на заводе «Электроцинк» (г. Владикавказ). Данные по температурной зависимости краевых углов смачивания расплавами Pb – 10,6% Bi новых реакторных сталей могут найти применение при разработке тяжелых жидкометаллических теплоносителей для высокоэнергетических ядерных установок. Данные по взаимодействию цинка с вольфрам-кобальтовыми твердыми сплавами могут найти применение при получении микропорошков твердых сплавов, в частности, на заводе «Победит» (г. Владикавказ).

Экспериментальные данные по поверхностному натяжению, плотности и смачиваемости расплавами медь-алюминий (дюралюминий, алюминиевые бронзы) твердых подложек могут быть необходимыми для решения целого ряда прикладных задач, так как эти сплавы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. В частности, они применяются при изготовлении емкостей для жидкого кислорода и водорода, в авиапромышленности для изготовления некоторых деталей турбореактивных двигателей и в электротехнике. Расплавы этой системы нашли применение также в качестве высокотемпературных припоев для пайки титана, нержавеющей сталей и твердых сплавов.

Результаты расчетов поверхностных свойств многокомпонентных систем и полученные в работе экспериментальные данные имеют практическое значение, а также могут стать основой для разработки новых теоретических моделей.

В заключении отмечу, что целый ряд теоретических и экспериментальных результатов диссертационной работы рекомендуется использовать в учебном процессе при изучении обучающимися (бакалаврами и магистрами), а также аспирантами поверхностных свойств двойных и многокомпонентных систем. В частности, вопросы, касающиеся концентрационной зависимости расстояния между различными положениями

разделяющей поверхности Гиббса, а также методы определения термодинамических параметров поверхностного слоя рекомендуются включить в содержание учебных дисциплин «Физика поверхности», «Термодинамика поверхностных явлений» и т.д. Эти методы могут быть использованы также при выполнении аспирантами выпускных квалификационных работ (ВКР)

### **Достоверность и надежность результатов.**

Научные результаты выполненной работы обладают высокой степенью достоверности, что обеспечивается использованием современных экспериментального оборудования и методик, применением теоретических подходов, сравнением экспериментальных данных с результатами теоретических изысканий. Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в высокорейтинговых журналах, входящих в международные базы данных WoS и Scopus. Также достоверность полученных результатов подтверждается неоднократными выступлениями Кутуева Р.А. на международных конференциях с устными докладами по теме диссертационной работы.

Надежность полученных результатов подтверждается их непротиворечивостью основным физическим закономерностям, логике их изменения в заданных обстоятельствах, согласием с известными библиографическими сведениями в данной области

### **Некоторые замечания.**

1. В диссертационной работе автор исследует свойства поверхности сплавов легкоплавких металлов и их границ с твердыми металлами, рассматривая их как структурночувствительные параметры. Удачным было бы дополнить эти данные непосредственным исследованием кристаллической структуры поверхностей сплавов и электрических характеристик, например, работы выхода электрона.
2. В работе не рассматривается влияние малых примесей таких элементов как P, S, F и ряда других, которые, как известно, могут

оказывать критическое влияние как на свойства самих металлов, так и на их поверхности.

3. В работе используются различные марки стали, но в ряде случаев не приводится их химический состав, что создает некоторые неудобства при прочтении диссертации.
4. В работе имеются недостатки в оформлении рисунков и графиков. На некоторых графиках не обозначены доверительные интервалы. На рисунках (3.16; 4.6 и т.д.) вычисленные значения поверхностных свойств обозначены точками, что приводит к восприятию их как экспериментальных данных. На рисунках 6.19-6.21 точки, соответствующие значению краевого угла смачивания, не соединены кривыми, что затрудняет их восприятие.
5. Автор излишне подробно описал последовательность обработки профиля капли при измерении поверхностного натяжения методом большой капли. В частности, рисунок 2.6, можно было опустить.

Отмеченные замечания в значительной степени носят рекомендательный характер, не снижают научной и практической ценности выполненного исследования и не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы. На основании выполненных автором исследований и разработок **осуществлено решение научной проблемы**: особенности влияния состава и температуры на свойства границ раздела чистых металлов, двойных и многокомпонентных металлических расплавов с газовой и кристаллическими фазами (поверхностное натяжение, плотность, угол смачивания, адсорбция компонентов, эффективная толщина и усредненный состав поверхностного слоя). Диссертационная работа Кутуева Р.А. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Работа написана грамотно и аккуратно оформлена. Содержание диссертации полностью

представлено в достаточном количестве публикаций в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ. Автореферат соответствует основному содержанию и структуре диссертации.

Считаю, что диссертационная работа «Поверхностные свойства двойных и многокомпонентных расплавов на основе легкоплавких металлов» отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук в соответствии с «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г. (редакция от 11.09.2021), а ее автор - Кутуев Руслан Азаевич - заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника..

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук (01.04.07), директором НИИ физики Южного федерального университета Вербенко Ильей Александровичем (344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Огородная, 21А, тел.89085195838, эл. почта: iaverbenko@sfnedu.ru).

Отзыв на диссертацию Кутуева Р.А. на тему: «Поверхностные свойства двойных и многокомпонентных расплавов на основе легкоплавких металлов» обсужден и утвержден на семинаре отдела «Интеллектуальных материалов и нанотехнологий» НИИ физики ЮФУ (протокол № 5 от 04.09.2023 года).

Руководитель научного семинара  
директор НИИ физики,  
доктор физико-математических наук



Вербенко Илья Александрович

*Илья Александрович Вербенко*

*Уч. секретарь НИИФ Вербенко И.А. Рейзенберг*