

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТ СО РАН

член-корреспондент РАН

Маркович Дмитрий Маркович



Маркович

« 15 » января 2019 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация Абдуллаева Расула Нажмудиновича на соискание степени кандидата физико-математических наук «Термические свойства и коэффициенты взаимной диффузии жидких сплавов натрий–свинец и калий–свинец с частично ионным характером межатомного взаимодействия» выполнена в Лаборатории термодинамики веществ и материалов № 3.3 Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

В период подготовки диссертации соискатель работал в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук в лаборатории термодинамики веществ и материалов в должности инженера-исследователя и младшего научного сотрудника. В 2011 году окончил магистратуру Новосибирского государственного университета по направлению «физика», по специальности «физика кинетических явлений». Соискатель проходил обучение в очной аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» с 2011 по 2014 год. В 2013 году сдал на «хорошо» кандидатский экзамен по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Хайрулин Рашид Амирович, работает главным научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Цель работы

Получение достоверных экспериментальных данных по плотности, объемным коэффициентам теплового расширения и коэффициентам взаимной диффузии жидких систем Na–Pb и K–Pb в широких интервалах температур и концентраций; разработка справочных таблиц для научного и практического использования; построение на основе полученных результатов и литературных данных температурных и концентрационных зависимостей изученных свойств; анализ полученных зависимостей и установление их взаимосвязи со структурой расплавов.

Актуальность темы

Жидкие сплавы щелочных металлов со свинцом относятся к интересному классу так называемых ионных расплавов, в которых, помимо металлического типа химической связи, в той или иной степени проявляется ионная связь. Это приводит к необычному поведению температурных и концентрационных зависимостей многих физических свойств таких систем. В пионерской работе Nguyen и Enderby (*Philosophical Magazine*, 1977, Vol. 35, P. 1013–1019) было экспериментально обнаружено, что на концентрационной зависимости удельного электросопротивления жидкой системы литий–свинец имеется острый пик в районе 20 ат. % Pb, где сопротивление жидкого сплава примерно в 20 раз превосходит сопротивление чистого лития. Ряд исследований, выполненных в последующие десятилетия, показал, что аналогичные аномалии при определенных стехиометрических составах (в литературе это явление именуется «концентрационный переход металл – неметалл» или «переход металл – ионный расплав») в той или иной степени наблюдаются у большинства жидких систем щелочных и щелочноземельных металлов с металлами, обладающими относительно высокой электроотрицательностью. Было также установлено, что при этих же концентрациях имеются особенности у многих других физических свойств жидких систем: термо-ЭДС, избыточный удельный объем, избыточная свободная энергия Гиббса, теплоемкость, магнитные свойства и др. Однако, следует отметить, что теория этого явления разработана недостаточно полно. Не определен круг систем, в которых наблюдается концентрационный переход «металл – неметалл», не до конца ясно, как он связан со свойствами компонентов и видом фазовой диаграммы. В первую очередь это обусловлено отсутствием или недостатком подробных и надежных экспериментальных данных по многим структурно-чувствительным и, в частности, теплофизическим свойствам жидких сплавов, в которых проявляется ионный характер межатомного взаимодействия.

Практический интерес к исследованиям жидких сплавов натрия и калия со свинцом связан с тем, что эти расплавы рассматриваются как возможные теплоносители для нового поколения ядерных реакторов на быстрых нейтронах. Так, расплавы Na–Pb (с содержанием свинца до 10 ат. %) предлагаются как пожаробезопасная альтернатива жидкому натрию, используемому в реакторах типа БН. Небольшие добавки калия в жидкий свинец приводят к значительному уменьшению коррозионной и эрозионной активности этого теплоносителя по отношению к конструкционным материалам охлаждающего контура реактора типа БРЕСТ.

Отсутствие надежных и систематизированных данных по теплофизическим свойствам жидких систем Na–Pb и K–Pb делает невозможным выбор состава оптимального теплоносителя и его успешное внедрение. Это затрудняет проектирование и разработку новых, более безопасных и экологически чистых реакторов на быстрых нейтронах, реализующих технологии замыкания ядерного топливного цикла. В первую очередь в тщательном исследовании нуждаются такие характеристики как плотность, тепловое расширение, теплоемкость, теплопроводность и вязкость. Надежные данные по этим свойствам необходимы для проведения научных и инженерных расчетов полей температур и напряжений в элементах конструкции реакторов, а также обеспечения внутренней безопасности (охлаждение за счет естественной конвекции) и прогнозирования последствий аварийных ситуаций. Немаловажным является и экспериментальное исследование взаимной диффузии в жидких сплавах этих систем, так как эти данные требуются для прогнозирования поведения теплоносителя при работе реактора, например, для расчета режимов охлаждающего контура при его запуске и в аварийных ситуациях (затвердевание теплоносителя), сопровождаемых сегрегацией бинарного сплава. Все вышеизложенное показывает, что экспериментальные исследования теплофизических свойств жидких сплавов натрий–свинец и калий–свинец актуальны как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения.

Личный вклад автора

Автором подготовлены и проведены экспериментальные исследования по определению температурной зависимости плотности и объемного коэффициента теплового расширения жидких никеля, меди, натрия, калия и ряда расплавов систем Na–Pb, K–Pb, Bi–Sn, Ag–Sn и Bi–In–Sn; а также по получению экспериментальных данных по коэффициентам взаимной диффузии в ряде расплавов систем Na–Pb, K–Pb, Bi–Sn и Ag–Sn в широком интервале температур. Обработка и анализ данных, полученных в этих исследованиях, проведены автором лично. Обобщение и интерпретация результатов работы, а также подготовка статей для публикации в рецензируемых журналах выполнены автором совместно с научным руководителем Р.А. Хайрулиным и С.В. Станкусом.

Поставлены и решены следующие задачи:

1. Получение достоверных экспериментальных данных по плотности и объемным коэффициентам теплового расширения расплавов систем Na–Pb, K–Pb, Bi–Sn, Ag–Sn, эвтектического сплава Bi–In–Sn, а также жидких никеля и меди.
2. Получение экспериментальных данных по коэффициентам взаимной диффузии в расплавах систем Na–Pb, K–Pb, Bi–Sn и Ag–Sn в широком интервале температур 550–970 К.
3. Построение температурных и концентрационных зависимостей термических свойств и коэффициента взаимной диффузии для исследованных жидких бинарных систем, поиск закономерностей в их поведении.
4. Разработка и апробация нового метода оценки вязкости расплавов бинарных систем, с использованием экспериментальных данных по их функции стабильности и коэффициентам взаимной диффузии.

Достоверность

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается использованием надежных и апробированных экспериментальных методик и установок, детальным анализом погрешностей измерений, проведением комплекса тарировочных и тестовых опытов, воспроизводимостью результатов экспериментов, а также их сопоставлением с литературными данными.

Научная новизна

1. Получены новые достоверные экспериментальные данные по термическим свойствам ряда жидких сплавов системы Na–Pb (с содержанием свинца 2,50; 5,00; 7,50; 9,99; 21,03; 30,77; 41,10; 50,00; 63,50; 70,01 ат. %) и системы K–Pb (с содержанием свинца 30,01; 39,99; 50,00; 66,66; 84,40; 90,70 ат. %), трех расплавов жидкой системы Bi–Sn (29,97; 43,96; 53,97 ат. % Bi), двух расплавов системы Ag–Sn (59,30; 96,15 ат. % Sn) и эвтектического сплава Bi–In–Sn (с содержанием висмута 42,70 ат. % и индия 33,65 ат. %) в интервале температур от ликвидуса до 950–1000 К. Для сплавов некоторых составов, кроме того, впервые определены скачки плотности при плавлении–кристаллизации и термические свойства твердых фаз.
2. Впервые измерены коэффициенты взаимной диффузии в семи расплавах системы Na–Pb (2,50; 5,00; 7,50; 9,99; 21,03; 41,10; 50,00 ат. % Pb), пяти жидких сплавах системы K–Pb (30,01; 39,99; 50,00; 66,66; 84,40 ат. % Pb), двух расплавах системы Bi–Sn (43,96; 53,97 ат. % Bi) и жидком сплаве Ag–Sn (с содержанием олова 59,30 ат. %) при температурах от 550 до 970 К.
3. Впервые экспериментально обнаружены максимумы на концентрационных зависимостях коэффициента теплового расширения для жидкой системы Na–Pb в окрестности 20 ат. % Pb и коэффициента взаимной диффузии для жидких систем Na–Pb

и К–Рb в области 20 и 40–50 ат. % Рb, соответственно. Предложено объяснение для обнаруженных эффектов на основе современных представлений о концентрационных переходах «металл – неметалл» в жидкометаллических системах.

4. Предложен и апробирован новый метод оценки вязкости расплавов бинарных систем, с использованием экспериментальных данных по функции стабильности Даркена и коэффициентам взаимной диффузии.

Научная и практическая ценность

Проведенные в работе анализ и обобщение собственных и литературных данных по термическим и переносным свойствам расплавов натрий–свинец и калий–свинец, построенные концентрационные зависимости свойств, впервые обнаруженные особенности в их поведении и установленные между ними корреляции могут служить научной базой для развития теории ионных расплавов и, в частности, для прояснения механизма концентрационного перехода «металл – неметалл» в жидкометаллических системах с частично ионным характером химической связи.

Новые надежные экспериментальные результаты по плотности, объемным коэффициентам теплового расширения и коэффициентам взаимной диффузии расплавов систем Na–Рb и К–Рb могут быть включены в справочные издания и базы данных по теплофизическим свойствам веществ и материалов и использованы при разработке и внедрении новых жидкометаллических теплоносителей для перспективных реакторов на быстрых нейтронах, а также при моделировании работы реакторов в штатных и аварийных режимах.

Экспериментальные данные по плотности, объемным коэффициентам теплового расширения и скачкам плотности при фазовом переходе сплавов Bi–Sn, Ag–Sn и Bi–In–Sn эвтектического состава могут быть использованы для разработки технологий производства и применения перспективных безсвинцовых припоев на основе этих материалов.

Основные публикации автора по материалам диссертации

1. Хайрулин Р.А. Плотность и коэффициенты взаимной диффузии расплавов висмут–олово эвтектического и околоэвтектического составов / Р.А. Хайрулин, С.В. Станкус, Р.Н. Абдуллаев, В.М. Склярчук // Теплофизика высоких температур. – 2010. – Т. 48, № 2. – С. 206–209. Из списка ВАК.
2. Хайрулин Р.А. Плотность и коэффициенты взаимной диффузии расплавов системы серебро–олово / Р.А. Хайрулин, С.В. Станкус, Р.Н. Абдуллаев, Ю.А. Плевачук, К.Ю. Шуняев // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т. 17, № 3. – С. 419–424. Из списка ВАК.
3. Khairulin R.A. The Interdiffusion in Sodium–Lead Melts of Compositions from 2.5 to 41.1 at. % Pb / R.A. Khairulin, S.V. Stankus, R.N. Abdullaev, V.A. Morozov // Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2012. – Vol. 33, No. 5. – P. 369–374. Из списка ВАК.
4. Абдуллаев Р.Н. Плотность сплава калий–свинец эвтектического состава / Р.Н. Абдуллаев, Р.А. Хайрулин, С.В. Станкус // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т. 20, № 1. – С. 89–94. Из списка ВАК.
5. Хайрулин Р.А. Плотность и тепловое расширение жидких сплавов системы Na–Рb с малым содержанием свинца / Р.А. Хайрулин, С.В. Станкус, Р.Н. Абдуллаев // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т. 20, № 2. – С. 225–228. Из списка ВАК.
6. Хайрулин Р.А. Плотность тройного сплава висмут–индий–олово эвтектического состава в жидком состоянии и в области плавления–кристаллизации / Р.А. Хайрулин, Р.Н. Абдуллаев, С.В. Станкус // Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2013. – Т. 8, № 1. – С. 104–106. Из списка ВАК.

7. Khairulin R.A. Density, thermal expansion and binary diffusion coefficients of sodium–lead melts / R.A. Khairulin, S.V. Stankus, R.N. Abdullaev // High Temperatures – High Pressures. – 2013. – Vol. 42, No. 6. – P. 493–507. Из списка ВАК.
8. Абдуллаев Р.Н. Взаимная диффузия в расплавах системы калий–свинец в широком интервале концентраций / Р.Н. Абдуллаев, Р.А. Хайрулин, С.В. Станкус // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21, № 3. – С. 365–372. Из списка ВАК.
9. Abdullaev R.N. Density and Thermal Expansion of High Purity Nickel over the Temperature Range from 150 K to 2030 K / R.N. Abdullaev, Yu.M. Kozlovskii, R.A. Khairulin, S.V. Stankus // International Journal of Thermophysics. – 2015. – Vol. 36, No. 4. – P. 603–619. Из списка ВАК.
10. Хайрулин Р.А. Термические свойства жидких сплавов системы К–Pb / Р.А. Хайрулин, С.В. Станкус, Р.Н. Абдуллаев // Теплофизика и аэромеханика. – 2015. – Т. 22, № 3. – С. 359–364. Из списка ВАК.
11. Станкус С.В. Изменение плотности висмута и щелочных металлов при переходе к жидкому состоянию / С.В. Станкус, Р.Н. Абдуллаев, Р.А. Хайрулин // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23, №6. – С. 951–956. Из списка ВАК.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на 47-ой, 48-ой, 51-ой Международных научных студенческих конференциях "Студент и научно-технический прогресс" (Новосибирск, 2009, 2010, 2013); Пятой Российской научно-практической конференции «Физические свойства металлов и сплавов» (Екатеринбург, 2009); 9th Asian Thermophysical Properties Conference (Beijing, China, 2010); Всероссийской конференции «XXIX Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2010); Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2010); XIII Российской конференции по теплофизическим свойствам веществ (с международным участием) (Новосибирск, 2011); 19-th European Conference on Thermophysical Properties (Thessaloniki, Greece, 2011); Научно-технической конференции "Теплофизические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования в обоснование характеристик и безопасности ядерных реакторов на быстрых нейтронах" (Обнинск, 2012); XII Международной конференции молодых учёных "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики" (Новосибирск, 2012); Школе-конференции молодых ученых "Неорганические соединения и функциональные материалы", посвященной памяти проф. С.В. Земскова (Новосибирск, 2013); 9-ом семинаре СО РАН – УрО РАН "Термодинамика и материаловедение" (Новосибирск, 2014); 20-th European Conference on Thermophysical Properties (Porto, Portugal, 2014); XIV Российской конференции (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ РКТС-14 (Казань, 2014); XIII Всероссийской школе-конференции (с международным участием) молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2014); XV Российской конференции (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ РКТС-15 (Москва, 2018).

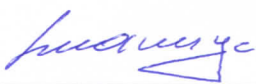
Полнота работы

Диссертация «Термические свойства и коэффициенты взаимной диффузии жидких сплавов натрий–свинец и калий–свинец с частично ионным характером межатомного взаимодействия» Абдуллаева Расула Нажмудиновича является завершенной научно-исследовательской работой, содержащей новые результаты по теплофизическим свойствам ионно-металлических расплавов, выполнена на высоком научном уровне и соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Следует отметить большое количество публикаций автора по теме диссертации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК, в которых достаточно полно отражены основные результаты работы.

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация «Термические свойства и коэффициенты взаимной диффузии жидких сплавов натрия–свинец и калия–свинец с частично ионным характером межатомного взаимодействия» Абдуллаева Расула Нажмуудиновича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Заключение принято на заседании расширенного семинара лаборатории термодинамики веществ и материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук под руководством д.ф.-м.н. Станкуса С.В. Присутствовало на заседании 31 чел., в том числе 10 докторов и 7 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» - 31 человек, «против» - 0, «воздерж.» - 0, протокол № 124 от «25» декабря 2018 г.



Председатель семинара
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник лаборатории
термодинамики веществ и материалов ИТ СО РАН
Станкус Сергей Всеволодович



Секретарь семинара
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
термодинамики веществ и материалов ИТ СО РАН
Савченко Игорь Васильевич