

Поверхностное натяжение расплавов системы натрий – цезий

Б. Б. Алчагиров, Р. Х. Архестов, З. А. Кегадуева,
Л. Х. Афаунова, Ф. Ф. Дышекова

Приводятся экспериментальные данные о поверхностном натяжении (ПН) сплавов системы натрий – цезий в жидком состоянии, полученные методом большой капли на высокочистых образцах. Показано, что в сплавах на основе натрия цезий проявляет высокую поверхностную активность, в пределе достигающую около 3000 мН/(м·ат. доли). Полученные результаты подтверждаются данными о коэффициенте активности цезия в сплавах с натрием, исследованиями работы выхода электронов системы Na – Cs и в основном находятся в удовлетворительном согласии с расчетами изотермы ПН на основе электронно-статистической теории и методами функционала электронной плотности.

Ключевые слова: натрий, цезий, сплавы щелочных металлов, поверхностное натяжение, работа выхода электрона, коэффициенты активности, предельная поверхностная активность.

Experimental data on surface tension in liquid alloys of sodium-cesium system are presented. The measurements were taken with the sessile drop method, using high purity alloy components. It is shown that in sodium based alloys cesium exhibits high surface activity up to 3000 mN/(m·at. %). The experimental results presented are supported by the data on activity coefficient of cesium in sodium alloys, by the authors' previous studies of the electronic work function of the Na – Cs system, and are in satisfactory agreement with surface tension calculations based on electron-statistical theory and electron density functional methods.

Keywords: sodium, cesium, alkali alloys, surface tension, electronic work function, activity coefficient, surface activity limit.

Введение

Исследования поверхностного натяжения щелочных металлов и их сплавов играют важную роль для развития теории поверхностных явлений в расплавах и возникающих из них твердых фазах, в решении практических задач разработки и конструирования теплопередающих систем — тепловых труб и капиллярных насосов, в атомной и ядерной энергетике и т.д. [1–4].

Анализ результатов экспериментальных и расчетно-теоретических работ, посвященных изучению ПН бинарных систем щелочных металлов показывает, что в сравнении с остальными системами щелочных металлов, расплавы Na – Cs менее изучены [5–8].

Цель настоящей работы — более детальное изучение и обобщение собственных и литературных

результатов экспериментальных и расчетно-теоретических исследований температурных и концентрационных зависимостей ПН $\sigma(T, x)$ сплавов системы Na – Cs.

Методика эксперимента

Поверхностное натяжение в значительной степени зависит от состояния поверхностей исследуемых металлов и сплавов, поэтому определение ПН жидкометаллических расплавов различных составов в одних и тех же условиях, особенно для высокоактивных щелочных металлов и их сплавов, приобретает принципиальное значение [9–11]. В частности, в [11] показано, что традиционные методы очистки поверхностей щелочных металлов и сплавов ионными пучками оказываются малоэффективными

и необходимо прибегать к специальным приемам, — с учетом специфических особенностей рассматриваемых в данной работе объектов исследований.

Отличительная особенность использованного нами прибора [12, 13] для измерения ПН сплавов системы Na – Cs в сравнении с существующими устройствами подобного назначения заключается в том, что он позволяет при одной заправке исходными компонентами, без дальнейшего вскрытия и разгерметизации, в высоком статическом вакууме приготавливать и определять ПН каждого из сплавов желаемого состава из всего концентрационного интервала. Это обеспечивает строгую идентичность условий приготовления и самих измерений ПН всех образцов-сплавов, а также гарантировать надежное термодинамическое равновесие поверхности каждого из исследуемых сплавов со своим насыщенным паром. При этом важно отметить, что измерение ПН любого из сплавов можно повторять сколько угодно раз для набора необходимой статистики. Поверхностное натяжение определяли методом большой капли [14, 15] в области от ликвидусных температур и до 430 К. Для приготовления сплавов использовались металлы-компоненты высокой чистоты (табл. 1).

Таблица 1

Содержание примесей (в масс. %) в Na и Cs, использованных для определения поверхностного натяжения сплавов двойной системы Na – Cs

Металл	ТУ	Na	K	Rb	Cs
Натрий	48-4-475-86	99,993	0,005	0,001	0,001
Цезий	48-4-478-86	0,001	0,002	0,002	99,995

Юстировку подложек для формирования осесимметричных капель вдоль горизонтальной плоскости перед измерениями ПН осуществляли катетометром В-630. Фотографирование капель исследуемых расплавов проводили длиннофокусной фотокамерой, обеспечивающей негативное изображение контура капли с оптимальным 4 – 5-кратным увеличением. Измерения ПН осуществляли в воздушном вращающемся термостате, в котором с помощью нескольких секционных нагревателей поддерживалось необходимое безградиентное температурное поле с точностью $\pm 0,3$ К. Погрешность определения поверхностного натяжения составила около 1%. Более детальное описание измерительной ячейки, использованной методики ее заправки и особенностей эксперимента описаны нами в работе [16].

Результаты измерений ПН и их обсуждение

Результаты измерений температурных и концентрационных зависимостей ПН Na, Cs и ряда из

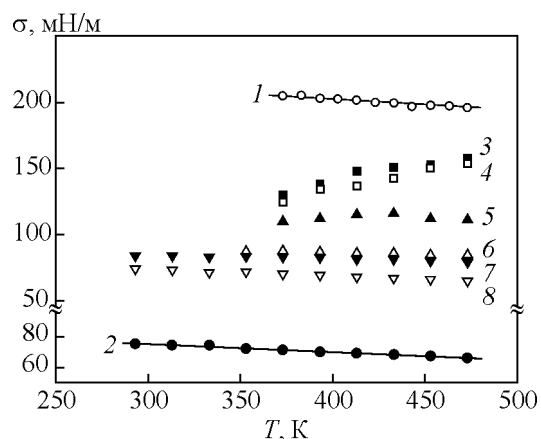


Рис. 1. Температурные зависимости ПН натрия, цезия и некоторых сплавов системы Na – Cs в жидком состоянии: 1 – чистый Na; 2 – чистый Cs; 3 – 0,46 ат. % Cs в Na; 4 – 1,07 ат. % Cs в Na; 5 – 6,10 ат. % Cs в Na; 6 – 37,6 ат. % Cs в Na; 7 – 49,5 ат. % Cs в Na; 8 – 84,5 ат. % Cs в Na.

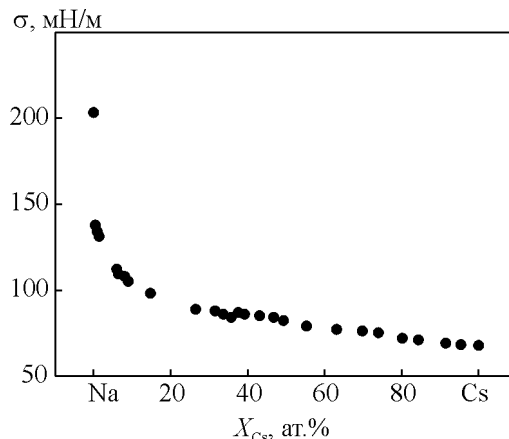


Рис. 2. Изотерма ПН сплавов системы натрий – цезий при 400 К.

изученных нами 25 сплавов, составы которых перекрывают весь концентрационный интервал системы Na – Cs, графически представлены на рис. 1 и 2.

Температурные зависимости ПН сплавов $\sigma(T)$ с малыми (1 – 2 %) добавками цезия к натрию имеют сложный нелинейный характер с положительными и отрицательными температурными коэффициентами ($d\sigma/dT$). На наш взгляд, этого можно было ожидать, так как температурные зависимости ПН данной группы сплавов на основе натрия главным образом определяются одновременным протеканием двух процессов, но противоположным образом влияющие на величину ПН по мере повышения температуры расплавов и обогащения их цезием. С одной стороны, с повышением температуры происходит десорбция поверхностно-активного цезия (величина ПН которого более чем в два раза меньше, чем ПН натрия),

что должно приводить к повышению ПН расплавов. Но одновременно с повышением температуры ослабляются и межчастичные силы взаимодействия в расплавах, приводящие к уменьшению поверхностного натяжения, поскольку ПН отражает энергию межчастичных связей, а работа образования поверхности есть не что иное, как преодоление этих связей при выходе частиц из объема на поверхность. Более того, соотношение отмеченных тенденций может преобразовываться с изменением и температуры, и состава расплавов. В результате для сплавов определенных составов и температур (в нашем случае — с содержанием около 40 ат.% Cs в Na) может установиться некоторое равенство отмеченных противоположных тенденций, приводящее к тому, что для них $d\sigma/dT = 0$, что и наблюдается в наших опытах. Температурные зависимости ПН $\sigma(T)$ сплавов системы Na – Cs с содержанием более 50 ат.% Cs в Na, вплоть до чистого цезия, описываются линейными уравнениями с отрицательными температурными коэффициентами ПН $d\sigma/dT$ (рис. 1).

На рис. 2 представлена концентрационная зависимость ПН (температура 400 К) системы Na – Cs, построенная по политермам ПН чистых компонентов и их 25 изученных сплавов. Она свидетельствует об очень высокой поверхностной активности Cs в сплавах на основе Na: первые же несколько малых (порядка 1–2 ат.%) добавок цезия к натрию приводят к двукратному уменьшению ПН натрия и сплавов. Дальнейшие добавки Cs к Na уменьшают ПН расплавов до значения, соответствующего ПН чистого Cs. Расчеты предельной поверхностной

активности $\lim_{x_{Cs} \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta X} \right)$ цезия в расплавах на основе

натрия показали, что эта величина составляет порядка 3000 мН/(м·ат. доли), что является рекордной для изученных к настоящему времени изотерм ПН $\sigma(x)$ бинарных систем щелочных металлов. О возможности столь высокой поверхностной активности Cs в сплавах с Na также свидетельствуют несколько фактов. Первый из них — экспериментальные и расчетные данные о коэффициентах активности цезия γ_{Cs} в сплавах системы Na – Cs (рис. 3), [17 – 20]: в концентрационной области составов сплавов на основе натрия коэффициент активности цезия в них выше на один порядок, чем во всей остальной области составов. К сожалению, авторы [17–19] не проводили расчеты и измерения коэффициентов активностей Cs для разбавленных по цезию сплавов натрия (от чистого Na до сплавов с содержанием менее 10 ат.% Cs в Na, табл. 2), в противном случае коэффициенты активности Cs в этой области составов могли

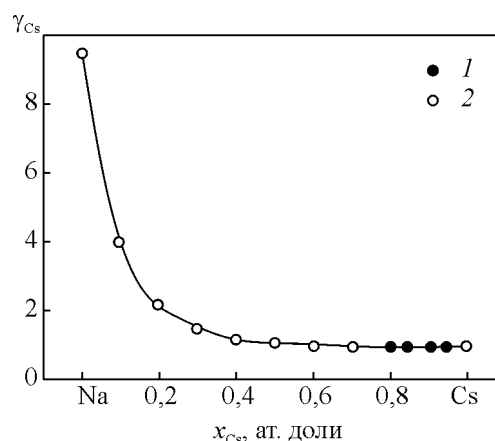


Рис. 3. Расчетные данные [17] коэффициентов активности цезия γ_{Cs} в сплавах натрия – цезий при 384 К: 1 – расчеты на основе данных о теплоте смешения, 2 – на основе данных о диаграмме плавкости [17, 21].

Таблица 2

Радиусы ионов (r) и s-сфер (R) [24], а также температуры плавления Na и Cs, использованные для расчета удельной свободной поверхностной энергии $f^{(\sigma)}$ в [22]

Металл	r , 10^{-10} м	R , 10^{-10} м	$T_{пл}$, К
Натрий	1,439	2,28	371,00
Цезий	1,899	2,83	301,55

оказаться еще более значительными по величине, так как основное уменьшение ПН, как видно из рис. 1, происходит в узкой концентрационной области, примыкающей к чистому натрию.

В литературе имеются расчеты изотермы ПН $\sigma(x)$ сплавов системы Na – Cs на основе электронно-статистической теории [5, 22] и методами функционала электронной плотности в различных вариантах [23]. При проведении численных расчетов поверхностной энергии бинарных сплавов щелочных металлов на границе с вакуумом авторы [5, 22] рассматривают металлический раствор как систему положительных ионов, находящихся в узлах кристаллической решетки, и компенсирующего фона квазисвободных электронов. Затем объем сплава разбивается с помощью плоскостей симметрии на ячейки Вигнера-Зейтца, которые далее заменяются равновеликими по объему s-сферами. Значения радиусов ионов и s-сфер находили теоретически (в рамках модели Томаса – Ферми, [24]) для температуры абсолютного нуля, которые затем приводили к нужной температуре (табл. 2).

Результаты расчетов авторами [22] удельной свободной поверхностной энергии растворов $f^{(\sigma)}$ для системы Na – Cs представлены в табл. 3 и на рис. 4. (Переход к поверхностной энергии растворов основан

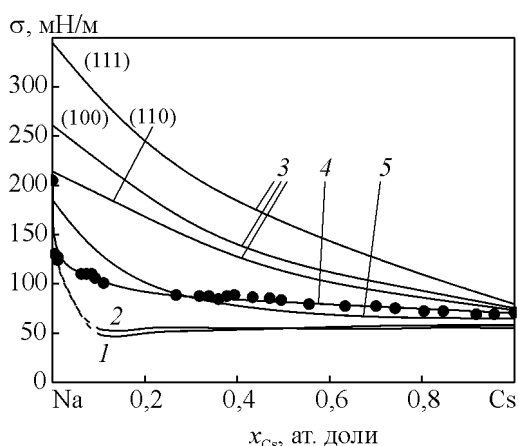


Рис. 4. Результаты теоретических расчетов изотермы ПЭ системы Na – Cs: 1 и 2 – теоретические расчеты ПН на основе электронно-статистической теории металлов [5, 22], при $T = 375$ К и 700 К; 3 – расчеты для граней (111), (110) и (100) на основе функционала электронной плотности [23]; 4 – данные настоящей работы, $T = 400$ К; 5 – расчеты [26, 27].

на статистическом усреднении $f^{(\sigma)}$, [5]). Из полученных в [22] данных следует, что в двухкомпонентных растворах щелочных металлов компонент с большим порядковым номером в периодической таблице Менделеева является поверхностно-активным. В [22] также продемонстрирована знакопеременность температурного коэффициента ПН и существование сплавов, у которых $d\sigma/dT = 0$. Эти выводы авторов [5, 22] хорошо согласуются с данными настоящей работы.

Вместе с тем между результатами теоретических расчетов изотермы ПН $\sigma(x)$ системы Na – Cs и нашими опытными данными имеются принципиальные различия. Во-первых, рассчитанные авторами [5, 22] концентрационные зависимости ПН $\sigma(x)$ системы Na – Cs располагаются значительно ниже экспериментально полученной нами изотермы ПН: максимальное различие достигает 50 мН/м для области составов с содержанием около 10 ат.% Cs (рис. 4).

Во-вторых, хотя по виду экспериментально построенная и расчетная изотермы $\sigma(x)$ в целом имеют сходный характер и теоретические расчеты ПН $\sigma(x)$ системы Na – Cs подтверждают высокую поверхностную активность цезия в сплавах на основе натрия, но по абсолютной величине предельная поверхностная активность (ППА) цезия в натрии

$\lim_{x_{Cs} \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta X} \right)$, полученная в [5, 22], значительно (в 2,3 раза) меньше, чем в настоящей работе. Возможная причина столь большого различия в

значениях ППА цезия, определенных на основе экспериментальных измерений и теоретически рассчитанных изотерм ПН, по-видимому, заключается в том, что авторы [5, 22] и [23] не рассчитывали изотерму ПН для растворов в концентрационной области составов с малыми добавками цезия к натрию (от 0 до 10 ат.% Cs в Na). По данным настоящей работы, в расплавах именно этих составов с малыми концентрациями Cs в Na протекают наиболее интенсивные адсорбционные процессы, которые фактически завершаются при содержании около 20 – 30 ат.% Cs в Na. По этой причине в концентрационной области составов с малыми добавками Cs к Na теоретически рассчитанная изотерма ПН системы Na – Cs является лишь экстраполированной к чистому компоненту, то есть к натрию (рис. 4, пунктирная часть кривых 1 и 2).

В-третьих, главное качественное различие между опытными и расчетно-теоретическими данными ПН заключается в наличии минимума на рассчитанных изотермах $\sigma(x)$ системы Na – Cs (рис. 4, кривые 1 и 2), которые имеются также и на изотермах ПН для других бинарных систем щелочных металлов [5, 22]. В данной работе на изотерме $\sigma(x)$ подобные аномалии отсутствуют. Авторы [5, 22], как это видно из табл. 3, проводили расчеты изотермы ПН тщательно, вплоть до сотых долей мН/м, но, на наш взгляд, лишь с целью подчеркнуть сам факт существования минимума на изотермах $\sigma(x)$ системы Na – Cs, так как “глубина” минимума (около 1 мН/м) заведомо находится в пределах погрешностей измерений ПН металлических расплавов [14, 15, 25], и к тому же взятая ими за основу расчетов электронно-статистическая теория поверхностной энергии металлов имеет намного меньше возможностей.

На рис. 4 (кривые 3) также представлены результаты расчетов изотерм ($T = 0$ К) поверхностной

Таблица 3

Результаты расчетов температурных и концентрационных зависимостей поверхностной энергии (мДж/м²) сплавов системы Na – Cs на основе электронно-статистической теории [22]

x_{Cs} , ат. доли	400 К	500 К	600 К	700 К	800 К	900 К
0,0	145,97	142,62	139,30	135,99	132,73	129,49
0,1	49,90	52,53	53,78	54,30	54,42	54,29
0,2	49,99	52,41	53,74	54,41	54,65	54,62
0,3	51,45	53,45	54,46	54,81	55,02	54,87
0,4	53,40	54,60	55,19	55,36	55,24	54,90
0,5	54,44	55,56	55,75	55,61	55,25	54,71
0,6	56,14	56,28	56,09	55,66	55,07	54,33
0,7	57,04	56,75	56,23	53,69	54,73	53,81
0,8	57,67	57,00	56,20	55,27	54,22	53,19
0,9	58,08	57,09	56,02	54,89	53,72	52,50
1,0	58,03	57,03	55,73	54,42	53,10	51,76

энергии (ПЭ) системы Na – Cs для трех кристаллографических граней (111), (110), (100), полученные на основе функционала электронной плотности и вариационного принципа [23]. Расчеты концентрационных зависимостей ПЭ проводились в предположении, что сплавы имеют ту же кристаллическую структуру, что и образующие их металлы, а сплавы щелочных металлов подчиняются правилу Вегарда, то есть аддитивности атомных объемов. При вычислении вклада псевдопотенциала, зависящего от структуры, использовано приближение виртуального кристалла, в котором неупорядоченный сплав A_xB_{1-x} представлен периодической решеткой средних одноатомных псевдопотенциалов компонентов А и В, что значительно облегчает расчеты для сплавов.

Как видно из рисунка 4 (кривые 3), зависимость ПЭ от концентрации практически монотонная. Сравнение результатов теоретических расчетов авторов [23] с нашими опытными данными показывает еще большее численное различие между ними. Но при этом необходимо отметить, что на изотерме ПЭ системы Na – Cs, рассчитанной авторами [23], отсутствует минимум, как и на изотерме $\sigma(x)$, полученной экспериментально в данной работе.

Лучше всего согласуется с опытными данными настоящей работы изотерма (383 К) ПН $\sigma(x)$ системы Na – Cs, рассчитанная авторами [26, 27] (рис. 4, линия 5). В этих работах в рамках простой статистической модели, основанной на образовании комплексов, и в сочетании со статистической моделью, базирующейся на концепции слоистой структуры поверхностного слоя расплавов вблизи межфазной границы, были изучены термодинамические и поверхностные свойства ряда бинарных жидких сплавов на основе натрия, в том числе и ПН системы Na – Cs.

Появление особенностей в виде минимумов или максимумов на изотермах поверхностных свойств металлических расплавов обычно связывают с присутствием неконтролируемых примесей или загрязнений в расплавах, с нарушениями условий термодинамического равновесия исследуемой поверхности образца со своим насыщенным паром или же с наличием особых точек на диаграммах состояния исследуемых систем (химических соединений, эвтектических точек и т.д.), [9 – 11, 28]. В частности, в литературе обсуждается проблема возможного наличия химического соединения Na_2Cs в исследуемой системе [17, 28, 29]. Измерения поглощения и скорости распространения ультразвука в интервале температур 298 – 523 К в сплавах системы Na – Cs указывают на возможное существование ассоциатов типа Na_2Cs [29]. Но, с другой стороны,

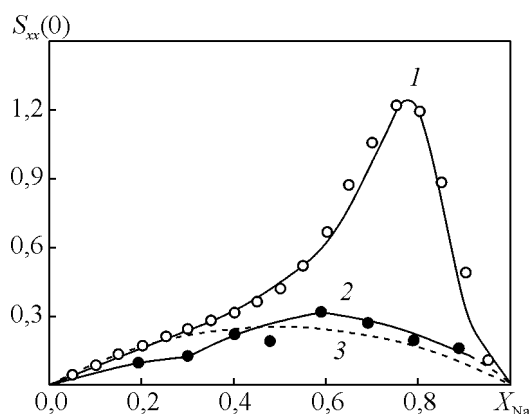


Рис. 5. Функция концентрационных флуктуаций $S_{xx}(0)$ в длинноволновом приближении для расплавов натрий-цезий: 1 – 473 К [17]; 2 – 673 К [17, 18, 31]; 3 – расчет для идеальной смеси [19].

согласно [30], экспериментально было показано, что это соединение малоустойчиво и реакция его образования протекает медленно и не полностью. Более того, структурные исследования сплавов рассматриваемой системы, например, концентрационной зависимости $S_{xx}(0)$ — функции концентрационных флуктуаций [18, 19], свидетельствуют в пользу хаотического характера распределения компонентов в системе Na – Cs, а при температурных перегибах сплавов выше ликвидусных система приближается к идеальной (рис. 5).

Подтверждением отсутствия минимума на полученной нами изотерме ПН $\sigma(x)$ системы Na – Cs также могут служить результаты теоретических [32 – 34] и экспериментальных [28, 35 – 38] исследований работы выхода электрона (РВЭ) двойных систем щелочных металлов, в том числе и системы Na – Cs, так как между ПН и работой выхода электрона (РВЭ) металлов и их сплавов существует корреляционная связь [39 – 42], поскольку ПН и РВЭ являются важнейшими энергетическими характеристиками поверхности вещества. В частности, в работах [28, 35] по экспериментальному определению концентрационной зависимости РВЭ $\phi(x)$ системы Na – Cs при 298 К $\phi(x)$ не имеет особенностей в области составов, соответствующих соединению Na_2Cs , хотя при температуре 183 К на ней был “обнаружен” минимум, рис. 6. Но, как показано нами в [37, 38], появление минимума на изотерме $\phi(x)$ РВЭ сплавов Na – Cs при глубоком охлаждении сплавов (183 К) оказалось следствием методических недоработок и конструктивных недостатков измерительной ячейки, использованной авторами [28, 35]. После разработки нами нового прибора [43, 44], в котором были устранены недостатки измерительной ячейки, использованной

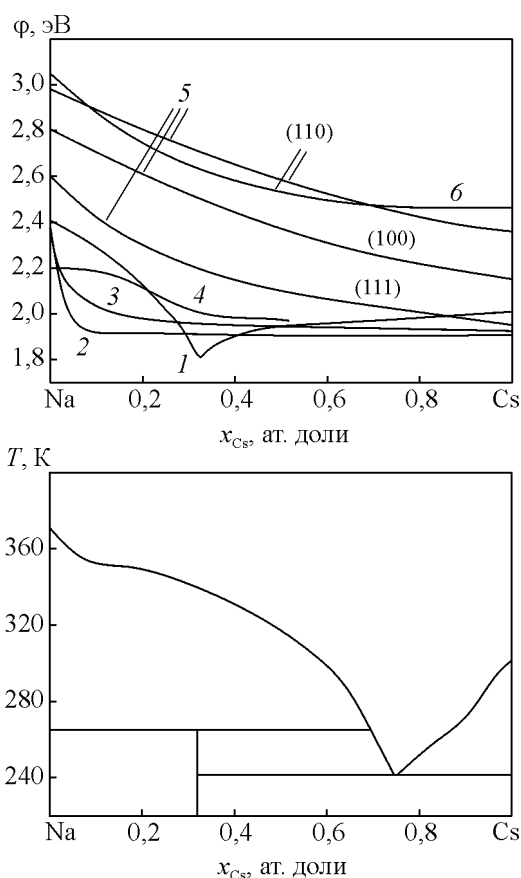


Рис. 6. РВЭ сплавов бинарной системы Na – Cs по данным работ: 1 и 2 – [28, 35], при $T = 300$ К и 183 К; 3 и 4 – [37, 38], при $T = 300$ К и 183 К; 5 – [23], расчеты для граней (111), (110) и (100); 6 – [32, 33], расчеты для грани (110).

авторами [28, 35], наши повторные измерения $\phi(x)$ показали отсутствие минимума на изотерме РВЭ сплавов бинарной системы Na – Cs.

На рис.6 (кривая б) также показаны результаты расчетов изотермы РВЭ $\phi(x)$ системы Na – Cs (грань (110), выполненные в [32, 33]. Здесь была попытка конкретно учесть: а) эффект кристалличности в нулевом и первом порядке теории возмущений, б) отклонения атомных объемов сплавов от аддитивного хода, 3) эффект поверхностной дилатации (связанной с поверхностной сегрегацией). Как следует из рис.6, по сравнению с изотермой РВЭ, рассчитанной в [23], учет перечисленных эффектов в [32, 33] привел к тому, что форма концентрационной зависимости РВЭ стала более вогнутой к оси концентраций и ближе к экспериментально построенной нами изотерме $\phi(x)$.

Таким образом, имеющиеся в литературе результаты теоретических расчетов изотерм ПН $\sigma(x)$ и РВЭ $\phi(x)$ сплавов системы Na – Cs свидетельствуют

об отсутствии на них минимумов или других особых точек, что согласуется с опытными данными настоящей работы.

Выводы

1. Методом большой капли на высокочистых образцах получены экспериментальные данные о поверхностном натяжении сплавов системы натрий – цезий в жидком состоянии.

2. Показано, что в сплавах на основе натрия цезий проявляет высокую поверхностную активность, в пределе достигающую около 3000 мН/(м·ат. доли). Полученные результаты подтверждаются литературными данными о коэффициенте активности цезия в сплавах с натрием, а также исследованиями концентрационной зависимости работы выхода электронов системы Na – Cs.

3. Полученная концентрационная зависимость ПН системы Na – Cs хорошо согласуется с известными критериями поверхностной активности компонентов в бинарных металлических расплавах.

4. Экспериментально показано отсутствие минимума на изотерме поверхностного натяжения $\sigma(x)$ системы Na – Cs.

5. Полученные опытные данные $\sigma(x)$ системы Na – Cs находятся в удовлетворительном согласии с имеющимися в литературе результатами теоретических расчетов ПН и РВЭ.

Авторы выражают благодарность доц. Шебзухову М.Д. за участие в начальном этапе экспериментальных исследований.

Литература

1. Bystrov P.J., Kagan D.N., Krechetova G.A., Shpilrain E.E. Liquid-metal coolants for heat pipes and power plants. Ed. By V.A. Kirillin. New-York, Washington, Philadelphia, London: Hemisphere Publishing corporation, 1990, p. 272.
2. Алчагиров Б.Б., Хоконов Х.Б. Щелочные металлы и сплавы с их участием — перспективные материалы современной техники и энергетики. Сб.: “Физика и химия перспективных материалов”. Нальчик: КБГУ, 1998, с. 40 – 44.
3. Дигилов Р.М., Созаев В.А. К теории поверхностной сегрегации сплавов щелочных металлов. Поверхность. Физика, химия, механика. 1988, № 7, с. 42 – 46.
4. Алчагиров Б.Б., Хоконов Х.Б. Смачиваемость поверхностей твердых тел расплавами щелочных металлов и их сплавов. Теория и методы. ТВТ, 1994, т. 34, №4, с. 590 – 626. Эксперимент. ТВТ, 1994, т. 32, № 5, с. 756.
5. Шебзухов А.А., Осико Т.П., Кожокова Ф.М., Мозговой А.Г. Поверхностное натяжение жидких щелочных ме-

- таллов и сплавов. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. ТФЦ. М.: ИВТАН, 1980, № 5 (31), 142 с.
6. Allen Benjamin C. Handbook of Thermodynamic and transport Properties of Alkali Metals. Chapter 6.8.: Surface Tension. Editor R.W. Ohse, UPAC. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985, p. 691 – 700.
 7. Алчагиров Б.Б. Поверхностное натяжение щелочных металлов и сплавов с их участием. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. ТФЦ.-М.: ИВТАН, 1991, № 3 (89), 4 (90), 180 с.
 8. Ниженко В. И., Флока Л. И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов, Справочник. М.: Metallurgy, 1981, 208 с.
 9. Ибрагимов Х.И., Покровский Н.Л., Пугачевич П.П. О некоторых методических вопросах измерения поверхностного натяжения жидких металлов. Научные труды 2-ой Всесоюзной научной конференции по поверхностным явлениям в расплавах и возникающих из них твердых фазах “Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах”, 25 – 30 ноября 1964 г., Нальчик, Кабардино-Балкарский госуниверситет. Нальчик: КБГУ. Кабардино-Балкарское книжн. изд-во, 1965, с. 198 – 210.
 10. Addison C.C., Addison W.E., Kerridge D.H. The influence of oxide films on the surface tension of liquid sodium. Journ. of the Chemical Society, 1955, № 9, p. 3047 – 3050.
 11. Шериев В.Х., Осико Т.Н., Ашхотов О.Г. Физическая интерпретация данных о поверхностном натяжении бинарных систем щелочных металлов. ТВТ, 1991, т. 29, № 1, с. 85 – 89.
 12. Алчагиров Б.Б. Устройство для определения поверхностного натяжения жидких щелочных металлов и их сплавов. А. С. № 1469318 (СССР). Бюллетень изобретений, 1989, № 12, с. 188.
 13. Алчагиров А.Б., Алчагиров Б.Б., Хоконов Х.Б. Прибор для определения поверхностного натяжения и работы выхода электрона металлических растворов в полном концентрационном интервале составов. Патент № 2086957 от 10.08.1997г.
 14. Алчагиров Б.Б., Дадашев Р.Х. Метод большой капли для определения плотности и поверхностного натяжения металлов и сплавов. Нальчик: Кабардино-Балкарский госуниверситет, 2009, 94 с.
 15. Иващенко Ю.Н., Еременко В.Н. Основы прецизионного измерения поверхностной энергии металлов по методу лежащей капли. Киев: Изд. Наукова думка, 1972, 232 с.
 16. Алчагиров Б.Б., Афаунова Л.Х. Дышекова Ф.Ф., и др. Поверхностное натяжение и адсорбция компонентов в сплавах системы натрий-калий, перспективных как эффективные жидкометаллические теплоносители в ядернокосмической энергетике. Перспективные материалы, 2011, № 2, с. 34 – 41.
 17. Локшин Э.П. Активность компонентов в сплавах натрий – рубидий и натрий – цезий. ТВТ, 1975, т. 13, № 1, с. 75 – 83.
 18. Neale F.E., Cusack N.E. Thermodynamic properties of liquid sodium – cesium alloys. J. Phys. F: Met. Phys., 1982, v. 12, p. 2839 – 2850.
 19. Дергачева М.Б., Панова Н.Л. Термодинамические свойства расплавов натрий-цезий. ТВТ, 1989, т. 27, № 1, с. 52 – 56.
 20. Шпильрайн Э.Э., Сквородько С.Н., Мозговой А.Г. Активность компонентов бинарных сплавов щелочных металлов. Система Na-Cs. ТВТ, 2002, т. 40, № 2, с. 339 – 344.
 21. Шпильрайн Э.Э., Сквородько С.Н., Мозговой А.Г. О взаимосвязи активности компонентов бинарных сплавов щелочных металлов с диаграммой состояния. ТВТ, 2002, т. 40, № 6, с. 1002 – 1004.
 22. Шебзухов А.А., Осико Т.П. К электронно-статистической теории поверхностной энергии бинарных металлических сплавов. Сб.: Физика межфазных явлений. Нальчик: Кабардино-Балкарский госуниверситет, 1977, вып. 2, с. 17 – 24.
 23. Kiejna A., Wojciechowski K.F. Surface properties of alkali-metal alloys. J. Phys. C: Solid State Phys., 1983, v. 16, p. 6883 – 6896.
 24. Гомбаш П. Статистическая теория атома и ее применения. М.: Изд. иностр. лит-ры, 1951, 398 с.
 25. Русанов А.И., Прохоренко В.А. Межфазная тензиометрия. СПб.: “Химия”, 1994, 400 с.
 26. Anusionwu B.C. Surface properties of some sodium-based binary liquid alloys. J. of Alloys and Compounds. 2003, v. 359, p. 172 – 179.
 27. Prasad L.C., Singh R.N., Singh G.P. The role of size effects on surface properties. Phys. Chem. Liq., 1994, v. 27, no. 3, p. 179 – 185.
 28. Малов Ю.И., Лазарев В.Б., Шебзухов М.Д. Работа выхода электрона сплавов бинарных систем с различным видом диаграмм состояния. Научн. Труды Москов. Института стали и сплавов, “Поверхностные явления в полупроводниках”, М.: 1976, № 89, с. 15 – 23.
 29. Kim M.G., Letcher S. V. Ultrasonic velocity and absorption in liquid mixtures of K Rb and Na₃Cs. J. Chem. Phys., 1971, v. 55, no. 3, p. 1164 – 1171.
 30. Ott J.B., Goates J.R., Oyler D.E. Solid-liquid phase equilibrium in the sodium-caesium alloy system. Trans. Faraday Soc., 1971, v. 67, no. 1, p. 31 – 34.
 31. Бхатиа А.Б. В кн: Жидкие металлы. М.: Metallurgy, 1980, с. 27.
 32. Дигилов Р.М., Созаев В.А. Поверхностная энергия и работа выхода электрона сплавов щелочных металлов. Сб.: Физикохимия межфазных явлений. Нальчик: КБГУ, 1986, с. 3 – 13.
 33. Дигилов Р.М., Созаев В.А. Поверхностная энергия и работа выхода щелочных металлов с учетом сегрегации. В кн.: Адгезия и контактное взаимодействие расплавов. Киев: Наукова думка, 1988, с. 87 – 95.
 34. Созаев В.А. Электронные теории поверхностной сегрегации на межфазных границах в металлических системах. Физика и химия обработки материалов, 1997, № 1, с. 109 – 114.
 35. Malov I.U., Shebzukhov M.D., Lazarev V.B. Work functions of binary alloys systems with different kinds of phase diagrams. Surface Science, 1974, v. 44, no. 1, p. 21 – 28.

36. Алчагиров Б.Б., Лазарев В.Б., Хоконов Х.Б. Работа выхода электрона щелочных металлов и сплавов с их участием. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. М.: ТФЦ. РАН, 1989, № 5 (79), 146 с.
37. Алчагиров Б.Б., Архестов Р.Х. О температурной зависимости РВЭ сплавов натрия с цезием. Изв. АН СССР. Сер. физич., 1991, т. 55, № 12, с. 2468 – 2471.
38. Алчагиров Б.Б., Архестов Р.Х., Хоконов Х.Б. Работа выхода электрона бинарной системы натрия-цезий. Расплавы, 1993, № 3, с. 22 – 27.
39. Малов Ю.И., Лазарев В.Б. О линейной зависимости между работой выхода электрона и поверхностным натяжением в двойных и тройных металлических растворах. В кн. “Физическая химия поверхностных явлений в расплавах”. Киев: Наукова думка, 1971, с. 45 – 47.
40. Задумкин С.Н., Ибрагимов Х.И., Хоконов Х.Б. Уравнение, связывающее работу выхода электрона и поверхностное натяжение металлических растворов. ЖФХ, 1977, т. 51, № 1, с. 133 – 137.
41. Алчагиров Б.Б. Связь поверхностной энергии с работой выхода электронов в бинарных металлических растворах. ЖФХ, 1990, т. 64, № 11, с. 2983 – 2987.
42. Алчагиров Б.Б. Концентрационные зависимости поверхностной энергии и работы выхода электрона: связь на основе обобщенного уравнения аддитивности. Сб. науч. Трудов КБГУ “Физика и технология поверхности”. Нальчик, 1990, с. 45 – 51.
43. Калажоков Х.Х., Алчагиров Б.Б., Хоконов Х.Б. Способ определения работы выхода электрона поверхности образца. А.С. № 131462. Бюл. изобр., 1987, № 20, с. 252.
44. Алчагиров Б.Б. Устройство для определения зависимости работы выхода электрона металлов и сплавов от температуры. Патент № 2008659. Бюл. изобр., 1994, № 4.

Статья поступила в редакцию 03.08.2011 г.

Алчагиров Борис Батоквич — Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова (г. Нальчик), доктор физико-математических наук, профессор. Специалист в области эмиссионной электроники, молекулярной физики, теплофизики и материаловедения. E-mail: alchg@kbsu.ru.

Архестов Руслан Хусенович — Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова Министерство образования и науки РФ (г. Нальчик), кандидат физико-математических наук, доцент. Специалист в области молекулярной физики, теплофизики и материаловедения.

Кегадуева Зарета Арсеновна — Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова Министерство образования и науки РФ (г. Нальчик), аспирант. Специалист в области теплофизики и материаловедения.

Афаунова Лиана Хазраталиевна — Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова Министерство образования и науки РФ (г. Нальчик), аспирант. Специалист в области теплофизики и материаловедения.

Дышекова Фатима Феликсовна — Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова Министерство образования и науки РФ (г. Нальчик), аспирант. Специалист в области теплофизики и материаловедения.