

ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ БИНАРНЫХ СИСТЕМ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

Калажиков З.Х. *, Кереева М.А., Гогия А.Р., Калажиков Х.Х.

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

*z-kalazh@yandex.ru

В работе приведены результаты расчетов поверхностных свойств сплавов бинарных металлических систем щелочных металлов. Для твердых растворов расчеты проводились с использованием уравнения, связывающего поверхностное натяжение (ПН, $\sigma(x)$) с работой выхода электрона (РВЭ, $\varphi(x)$), где $\sigma(x)$ и $\varphi(x)$ монотонные функции изотерм ПН и РВЭ. Показано, что $\sigma(x)$ и $\varphi(x)$ описывают эксперимент во всей области составов с высокой точностью. При этом важными параметрами, определяемыми из обработки экспериментальных данных, являются α_0 , β_0 и F – постоянные для рассматриваемой бинарной системы А-В. Оказалось, что на предельную поверхностную активность по Ребиндеру существенно влияет произведение $\alpha_0(F-1)$ или $\beta_0(F-1)$ в случае неидеальных систем, а в случае идеальных систем эти произведения очень малы. Таким образом, эти произведения определяют степень неидеальности бинарной системы. Анализ построенных кривых изотерм ПН и РВЭ, адсорбций и поверхностных концентраций показывает их схожесть в жидком и твердом состояниях. Этому неожиданному результату дано качественное объяснение.

Ключевые слова: изотерма, работа выхода электрона, поверхностное натяжение, адсорбция, бинарная система, компонент.

SURFACE PROPERTIES OF BINARY ALLOYS ALKALI METAL SYSTEMS

Kalazhikov Z.Kh., Kerefova M.A., Gogia A.R., Kalazhikov Kh.Kh.

Kabardino-Balkarian State University

The paper presents the results of calculations of the surface properties of alloys of binary metal systems of alkali metals. For solid solutions, calculations were carried out using an equation relating surface tension (ST, $\sigma(x)$) with the electron work function (EWF, $\varphi(x)$), where $\sigma(x)$ and $\varphi(x)$ are monotonic functions of the ST and EW isotherms. It is shown that $\sigma(x)$ and $\varphi(x)$ describe the experiment in the entire range of compositions with high accuracy. In this case, the important parameters determined from the processing of experimental data are α_0 , β_0 and F – constants for the binary system A-B under consideration. It turned out that the product $\alpha_0(F-1)$ or $\beta_0(F-1)$ in the case of non-ideal systems makes a significant contribution to the limiting surface activity according to Rehbinder, and in the case of ideal systems these products are very small. Thus, these products determine the degree of nonideality of the binary system. An analysis of the plotted curves of the ST and EW isotherms, adsorptions and surface concentrations shows their similarity in the liquid and solid states. A qualitative explanation is given for this unexpected result.

Keywords: isotherm, electron work function, surface tension, adsorption, binary system, component.

Введение

Изучением поверхностных свойств металлических расплавов исследователи занимаются давно [1–3]. Соответствующая методика для обработки экспериментальных данных жидких растворов разработана на основе термодинамики Гиббса [4] и используется довольно успешно. Однако трудности возникают при изучении поверхностных свойств растворов, находящихся в твердом состоянии. Разработка подобной методики при изучении поверхностных свойств растворов, находящихся в твердом состоянии, была невозможной из-за отсутствия надежного и достаточно точного способа определения поверхностного натяжения (ПН) [5]. С введением в исследовательскую практику уравнения изотермы работы выхода электрона (РВЭ) [6, 7] появилась надежда на получение поверхностных свойств сплавов в твердом состоянии. В настоящем сообщении рассмотрим решение данного вопроса.

1. Методики расчетов поверхностных характеристик бинарных металлических систем

Поверхностные свойства сплавов бинарных систем можно определить двумя способами:

1. Измеряя или построив изотерму ПН бинарной системы и, обработав полученную экспериментальную изотерму ПН по традиционной методике на основе термодинамики Гиббса [4].

2. Построив изотерму РВЭ бинарной системы [6, 7] и, определив с использованием этой изотермы параметры системы, необходимые для расчетов поверхностных свойств изучаемой системы.

Заметим, что первый способ позволит определить характеристики поверхности в приближении идеального раствора в жидком состоянии, а второй – в приближении реального раствора как в жидком, так и в твердом состоянии.

Второй способ можно реализовать двумя путями:

1. Расчет изотермы ПН бинарной системы с использованием уравнения связи РВЭ и ПН [8];

2. Расчет изотермы РВЭ бинарной системы и определение ее параметров α_0 и F из данных опытов.

Таким образом, важными параметрами поверхности, определяемыми в экспериментах при изучении поверхностных свойств расплавов, являются поверхностное натяжение (ПН, σ) и работа выхода электрона (РВЭ, ϕ). Практика показывает [9], что величина РВЭ меняется по тому же закону, что и ПН (рис. 1).

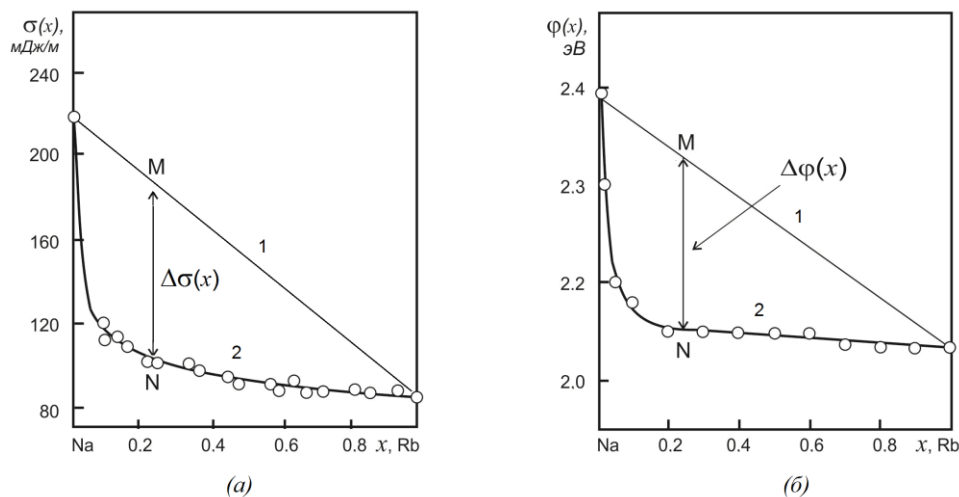


Рис. 1. Экспериментальные изотермы поверхностного натяжения (при $T=373$ К) [10] и РВЭ (при $T=300$ К) системы Na-Rb [11]

Следует отметить, что в отличие от ПН, РВЭ можно измерить как в жидком, так и в твердом состоянии, что и позволит нам получить поверхностные свойства растворов в твердом состоянии.

При этом, измеряя РВЭ для сплавов в твердом состоянии, можем получить такую же богатую информацию о поверхности, что и при измерении ПН и обработке результатов экспериментов на основе хорошо разработанной методики Гиббса [4]. Рассмотрим кратко эти методики.

2. Расчет поверхностных характеристик бинарных систем щелочных металлов

а) Расчет изотерм поверхностного натяжения жидких растворов бинарных систем. Для расчетов поверхностных свойств бинарных сплавов в [12] было предложено уравнение

$$\sigma(x) = \sigma_A(1-x) + \sigma_B x + \beta_0 \frac{(F-1)(1-x)x}{1+(F-1)x}, \quad (1)$$

которое описывает изотерму ПН жидких бинарных растворов достаточно точно. Здесь σ_A и σ_B – ПН чистых металлов, β_0 и F – постоянные параметры уравнения (1).

На рис. 1а и 2 в качестве примеров приведены результаты расчетов изотерм ПН $\sigma(x)$, полученные в [11].

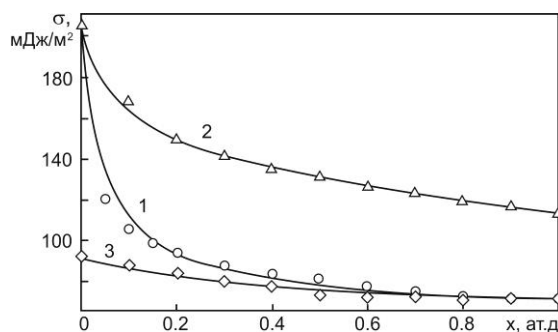


Рис. 2. Изотермы поверхностного натяжения бинарных систем (расчет по (1)): 1-Na-Cs, 2-Na-K, 3-Rb-Cs при температуре 373 К

Из приведенных примеров видно, что уравнение (1) описывает экспериментальную изотерму ПН с достаточной точностью во всей области составов, независимо от степени идеальности бинарной системы А-В.

Предлагаемая в настоящей работе методика расчетов поверхностных свойств сплавов бинарных систем основана на уравнении, полученном в [6, 7] для аналитического описания концентрационной зависимости РВЭ

$$\varphi(x) = \varphi_A(1-x) + \varphi_B x + \alpha_0 \frac{(F-1)(1-x)x}{1+(F-1)x}, \quad (2)$$

где φ_A и φ_B – РВЭ чистых металлов А и В бинарной системы А-В, α_0 и F – постоянные параметры для данной системы А-В.

б) Расчет адсорбции компонентов жидких растворов бинарных систем. При этом адсорбции компонентов растворов определяют с использованием известного выражения [1-3]

$$\Gamma_B^N(x) = -\frac{(1-x)x}{RT} \left(\frac{\partial \sigma(x)}{\partial x} \right)_{P,T}. \quad (3)$$

Уравнения (3) позволяет вычислить адсорбции компонентов достаточно точно, но, к сожалению, для растворов в жидком состоянии и в приближении идеального раствора.

Для вычисления адсорбции нами использовано выражение, которое получено из (1) и (3) [12]:

$$\Gamma_i^{(N)}(x) = -\frac{(1-x)x}{RT} \left[\frac{\beta_0(F-1)[1-2x-(F-1)x^2]}{[1+(F-1)x]^2} - (\sigma_A - \sigma_B) \right]. \quad (4)$$

в) Расчет адсорбции компонентов твердых растворов бинарных систем. Для описания поверхностных свойств растворов в твердом состоянии необходимо иметь экспериментальную изотерму ПН – $\sigma(x)$ для бинарной системы А-В. К сожалению, в настоящее время нет ни надежных экспериментальных способов для определения изотерм ПН растворов, ни достаточно точных теоретических выражений для расчетов изотерм ПН – $\sigma(x)$, позволяющих определить изотерму ПН растворов в твердом состоянии, работающих во всей области концентрации, независимо от степени идеальности рассматриваемой системы.

Для выхода из этого положения в [13] было рекомендовано определить изотерму ПН для твердого состояния с использованием уравнения связи, между ПН и РВЭ [14], которое позволяет вычислить изотерму ПН в твердом состоянии раствора [14] с использованием экспериментальных данных по РВЭ сплавов

$$\sigma(x) = \sigma_A - \gamma(\varphi(x) - \varphi_A), \quad (5)$$

где

$$\gamma = \frac{\sigma_A - \sigma_B}{\varphi_A - \varphi_B}, \quad (6)$$

а $\varphi(x)$ определено уравнением (2).

Тогда для бинарных систем адсорбцию в приближении идеальных растворов можно определить с использованием данных РВЭ по выражению [14], полученному из (2) и (5)

$$\Gamma_i^{(N)}(x) = -\frac{(1-x)x}{RT} \gamma \left[\frac{\alpha_0(F-1)[1-2x-(F-1)x^2]}{[1+(F-1)x]^2} - (\varphi_A - \varphi_B) \right], \quad (7)$$

где α_0 и F – постоянные для данной бинарной системы А-В параметры уравнения [7]. К сожалению, формулы (4) и (7) позволяют определить адсорбцию в приближении идеальных растворов [1–3].

з) Расчет адсорбции компонентов бинарного сплава в приближении реального раствора

Адсорбцию определим в N -варианте по Гуггенгейму-Адаму

$$\Gamma_B^N(x) = \frac{x^\sigma - x}{\omega_m(x)}, \quad (8)$$

где

$$\omega_m(x) = \omega_A(1-x) + \omega_B x \quad (9)$$

– мольная площадь бинарного раствора состава x . Здесь ω_A и ω_B – мольные площади компонентов рассматриваемой бинарной системы А-В.

$$\omega_m(x) = \frac{k}{n} (N_0)^{1/3} (V_m(x))^{2/3}, \quad (10)$$

k – коэффициент упаковки, n – число устойчивых монослоев поверхности раствора, N_0 – число Авогадро, $V_m(x)$ – определяемый из опыта мольный объем раствора.

Величину избыточной концентрации второго компонента определим по В.К. Семенченко [1]

$$x^\sigma - x = \frac{(F-1)(1-x)x}{1+(F-1)x}, \quad (11)$$

где F – константа адсорбционного равновесия [1], которая определяется по методике [15] из данных экспериментов.

Таким образом, определение адсорбции компонента раствора сводится к определению параметров F и $V_m(x)$.

Имея аналитическую изотерму $\sigma(x)$, адсорбцию можно вычислить по (2), что нас избавляет от графического и недостаточно точного вычисления $(\partial\sigma(x)/\partial x)_{p,T}$. Используя (1) и (2) были вычислены адсорбции компонентов бинарных растворов щелочных металлов [16].

Из анализа данных рис. 3 видно, что максимальная разница между кривыми 1 и 2 больше для систем Na–Cs и Na–K, чем для системы Rb–Cs. Это говорит о неидеальности системы Na–Cs, по сравнению с системой Na–K или Rb–Cs.

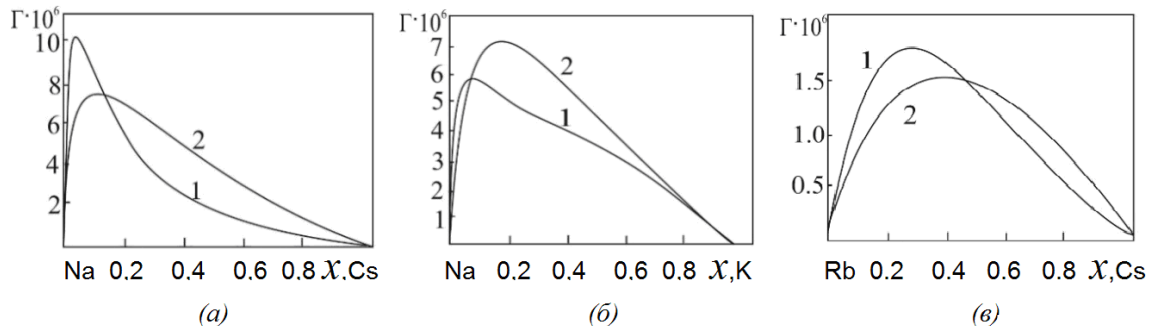


Рис. 3. Зависимость адсорбции (Γ) второго компонента B от состава раствора бинарных систем А-В: Na–Cs (а), Na–К (б), Rb–Cs (в): 1– по (4); 2 – по (8) при $T=373$ К

д) Расчет поверхностного состава бинарного раствора

Содержание второго компонента в поверхностном слое бинарного сплава определим по формуле [1]

$$x^\sigma = \frac{F x}{1 + (F - 1)x} \quad (12)$$

Итак, наличие параметра α_0 и F позволит нам вычислить изотермы РВЭ, адсорбций и поверхностных концентраций компонентов раствора любого состава в твердом состоянии. Ниже приводятся результаты наших расчетов параметров α_0 и F .

3. Входные данные для расчетов поверхностных характеристик бинарных систем Na–Cs, Na–Rb, K–Cs, Na–K, Rb–Cs, K–Rb, Li–Na.

В табл. 1 и 2 приведены входные данные и результаты наших расчетов параметров β_0 , α_0 , F , а также значения ПН (σ) и РВЭ (φ) чистых металлов, и другие, необходимые для расчетов поверхностных характеристик бинарных систем щелочных металлов.

Обработав результаты измерений РВЭ в зависимости от состава по методике [9], получим значения α_0 и F для каждой системы А-В (см. табл. 1). Подставляя их в уравнение (2), будем иметь выражение для расчета РВЭ для сплава любого состава рассматриваемой бинарной системы.

Таблица 1

Значения некоторых параметров уравнения (1) для расплавов в жидком состоянии (Т=375 К)

Система	σ_A	σ_B	β_0	F_σ	r_d/r_b	$\beta_0(F_\sigma-1)$	$\sigma_A-\sigma_B$	G_0^σ
Na-Cs	205	71,4	-125,0	27,7	1,82	3,33	0,13	3,47
Na-Rb	205	94	-108,1	27,5	1,65	2,86	0,11	2,97
K-Cs	113,9	71,4	-34,7	25	1,21	0,83	0,042	0,87
Na-K	205	113,6	-76,9	9,7	1,50	0,67	0,091	0,76
Rb-Cs	94	71,4	-32,3	2,6	1,10	0,05	0,022	0,07
K-Rb	113,6	94	-8,5	4,2	1,10	0,03	0,019	0,05
Li-Na	405	205	-	-	1,21	-	0,2	-

Таблица 2

Результаты расчетов α_0 , F и значения φ_A , φ_B и $V_{m_i}(x)$ для бинарных систем щелочных металлов в твердом состоянии (Т=300 К)

Система	φ_A	φ_B	$V_A \cdot 10^6$	$V_B \cdot 10^6$	α_0	F	$\gamma\alpha_0(F_\sigma-1)$	$\Delta\varphi\chi\gamma$	G_0^φ
Na–Cs	2,42	2,02	24,74	73,75	-0,48	58,7	9,2	0,13	9,33
Na–Rb	2,38	2,13	24,84	58,49	-0,24	35,9	3,7	0,11	3,81
K–Cs	2,25	1,97	47,71	73,74	-0,29	18,5	0,8	0,04	0,84
Na–K	2,33	2,23	24,84	47,72	-0,15	6,2	0,7	0,09	0,79
Rb–Cs	2,17	1,96	58,43	73,45	-0,32	1,6	0,02	0,02	0,04
K–Rb	2,27	2,18	47,79	58,43	-0,1	1,3	0,06	0,019	0,079
Li–Na*	2,64	2,35	15,8	24,84	-0,31	19,7	0,4	0,2	0,60

*Данные для системы Li-Na взяты из [17]

Далее рассмотрим конкретные примеры расчетов изотерм РВЭ, адсорбций и поверхностных концентраций компонентов раствора.

Из сравнения экспериментальных изотерм РВЭ (точки) с расчетными данными (сплошные линии) мы видим вполне удовлетворительное согласие. Тогда мы можем использовать их для расчетов других характеристик поверхности раствора – $\Gamma_B^N(x)$ и x^ω (рис. 4).

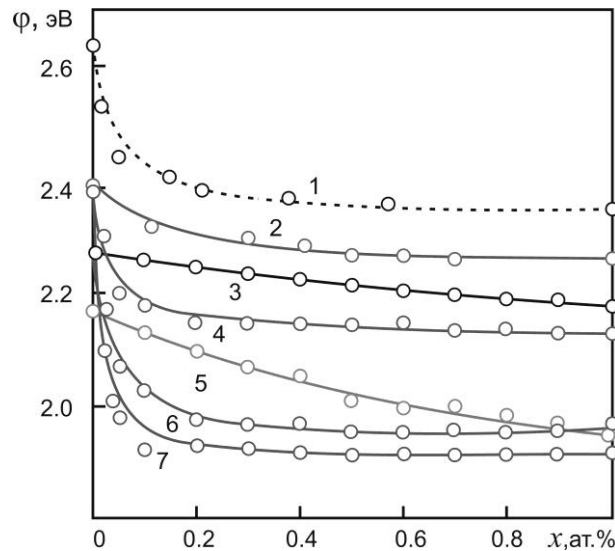


Рис. 4. Изотермы работы выхода электрона бинарных систем при $T=300\text{K}$:
1 – Li–Na, 2 – Na–K, 3 – K–Rb, 4 – Na–Rb, 5 – Rb–Cs, 6 – K–Cs, 7 – Na–Cs

а) Результаты расчетов адсорбций и поверхностных концентраций в бинарных системах щелочных металлов

Получив необходимые данные, нами проведены расчеты адсорбций по (8) и поверхностных концентраций компонентов бинарных сплавов щелочных металлов по известной формуле (12) при $T=300\text{K}$. На рис. 5 (а) и (б) приведены результаты расчетов адсорбции и поверхностных концентраций компонентов сплавов бинарных систем щелочных металлов.

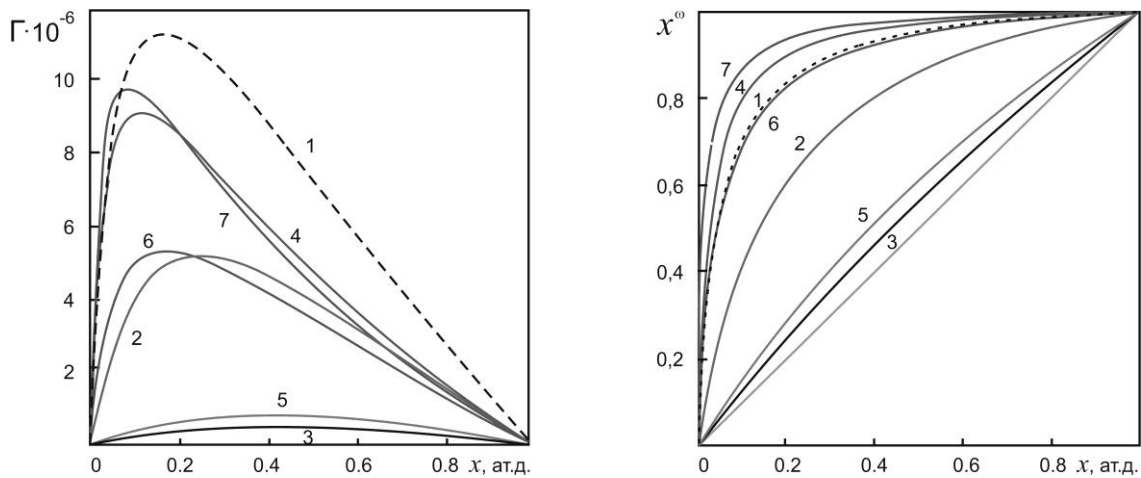


Рис. 5. Результаты расчетов адсорбции (Γ) – (а) и поверхностных концентраций (x^0) – (б) компонентов бинарных систем щелочных металлов (при 300 К):
1 – Li–Na, 2 – Na–K, 3 – K–Rb, 4 – Na–Rb, 5 – Rb–Cs, 6 – K–Cs, 7 – Na–Cs

Из рис. 5 (а) видим, что бинарные системы разделяются четко на три группы по степени идеальности: 1-идеальные (K–Rb, Rb–Cs), 2-средние по степени идеальности (Na–K, K–Rb) и 3-сугубо неидеальные (Li–Na, Na–Cs, Na–Rb). Такая же картина получается и из рис. 5 (б).

Заметим интересный результат, который следует из сравнений изотерм ПН (рис. 2, при 375 К) и РВЭ (рис. 4, при 300 К). Таковую же картину видим и при сравнении изотерм адсорбции (рис. 5, при 300 К). Эти изотермы имеют почти одинаковый вид. Это неожиданный результат, так как в сплавах в твердом состоянии (при 300 К) подвижности атомов ограничены (меньше), по сравнению с подвижно-

стью атомов при 375 К в жидком состоянии. А эксперименты показывают примерное совпадение изотерм. Такой результат, по-видимому, связан с тем, что:

1) сплав определенной массы охлаждать моментально невозможно. Процесс адсорбции по времени продолжается довольно долго. За это время в системе может произойти перераспределение частиц полностью;

2) толщина поверхностного слоя, в котором происходит распределение компонентов, очень небольшая. А содержание ПА компонента в таком слое, в случае полного перераспределения компонентов, достаточно для изменения свойств поверхности практически как в жидкости.

б) Оценка величины поверхностной активности по Ребиндеру

Коэффициент поверхностной активности по Ребиндеру определяется как

$$G_0 = -\lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial x} \right)_{P,T} . \quad (13)$$

Тогда, определив G_0 через изотермы ПН $\sigma(x)$ и РВЭ $\varphi(x)$, (1) и (7) будем иметь

$$G^\sigma = -\beta(F-1) - (\sigma_A - \sigma_B) \quad (14)$$

– для жидких бинарных расплавов
и

$$G_0 = -\gamma(\alpha_0(F-1) - (\varphi_A - \varphi_B)) \quad (15)$$

для растворов в твердом состоянии.

Подставляя значения γ , α_0 , F , φ_A и φ_B в (14) и (15), получим значения:

$\beta_0(F-1)$ и $\gamma\alpha_0(F-1)$ см. данные табл. 1 и 2.

Заметим, что эти вклады в G_0 значительны для систем неидеальных и практически нулевые для идеальных систем.

Выводы

1. Показана возможность построения изотерм ПН, адсорбции и поверхностных концентраций в твердом состоянии сплавов с использованием экспериментальных данных по РВЭ.

2. Адсорбция натрия в системе Li-Na в твердом состоянии значительно больше адсорбции Na в других системах щелочных металлов в жидком состоянии;

3. Уравнение изотермы РВЭ описывает экспериментальные изотермы щелочных металлов вполне удовлетворительно. При этом измеряемое значение РВЭ является усредненным по поверхностям выходящим на поверхность поликристалла граням микрокристалликов.

4. Показана возможность построения изотерм ПН, адсорбции $\Gamma_B^N(x)$ и поверхностных концентраций x_i^σ в твердом состоянии сплавов с использованием экспериментальных данных по РВЭ.

5. Установленное при изучении изотерм ПН щелочных металлов утверждение о том, что бинарные системы Na-Cs, Na-Rb далеки от идеальности, системы Na-K, K-Cs можно отнести к средним по идеальности, а системы Rb-Cs, K-Rb – к идеальным подтверждается полностью по данным измерений РВЭ.

6. Адсорбции цезия и натрия в системах Na-Cs и Li-Na в твердых растворах значительно больше адсорбции цезия и натрия в других системах щелочных металлов в жидком состоянии.

7. Вклады $\beta_0(F-1)$ и $\gamma\alpha_0(F-1)$ в предельную поверхностную активность поверхностно-активных компонентов бинарных систем значительны для систем неидеальных, а для систем идеальных почти нулевые. Для систем средних по идеальности эти вклады средние;

8. Таким образом, измерение РВЭ и расчет других параметров поверхности на основе термодинамики Гиббса может стать одним из способов изучения поверхностных свойств сплавов в твердом состоянии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Внутреннего гранта КБГУ

Библиография

1. Семенченко В.К. Поверхностные явления в металлах и сплавах. М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1957. 491 с.
2. Попель С.И. Поверхностные явления в расплавах. М.: Металлургия, 1994. 440 с.
3. Русанов А.И. Фазовые равновесия и поверхностные явления. Л.: Химия, 1967. 388 с.
4. Гиббс Дж.В. Термодинамические работы. М.-Л.: 1950. 492 с.
5. Хоконов Х.Б., Таова Т.М., Шебзухова И.Г., Кумыков В.К., Алчагиров Б.Б. Поверхностные энергия и натяжение металлов и двойных металлических сплавов в твердом состоянии // Тр. Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы. 2018. № 8. С. 5–12.
6. Зихова К.В., Калажоков З.Х., Калажоков Заур Х., Калажоков Х.Х. Расчет концентрационной зависимости работы выхода электрона бинарных сплавов // Известия вузов. Сев.-Кав. регион. Серия естественные науки. г. Ростов-на-Дону. 2010. № 6. С. 47–48.
7. Х.Х. Калажоков, Х.Х. Калажоков, Б.С. Карамурзов, Заур.Х. Калажоков, Уравнение изотермы работы выхода электрона бинарных металлических систем // Тр. Упорядочение в минералах и сплавах (ОМА-18). Ростов-на-Дону-п.Южный. 2015г. С. 302–305.
8. Калажоков З.Х., Калажоков З.Х., Кумышева З.А., Карданова З.В., Хоконов Х.Л. К вопросу о связи между поверхностным натяжением и работой выхода электрона бинарных сплавов // Тр. Физика поверхностных явлений, межфазных границ и фазовые переходы. Ростов-на-Дону: СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2013 г. В. 3. С. 97–99.
9. Лазарев В.Б., Семенченко В.К., Малов Ю.И. О связи между поверхностными свойствами расплавов и образующихся из них твердых фазах // Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах. Нальчик, 1965. С. 185–189.
10. Алчагиров Б.Б., Лазарев В.Б., Хоконов Х.Б. Работа выхода электронов щелочных металлов и сплавов с их участием // Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. ТФЦ. М.: ИВТАН. 1989. Т. 79, № 5. С. 76–146.
11. Алчагиров Б.Б. Поверхностное натяжение щелочных металлов и сплавов с их участием // Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. М.: ИВТАН, ТФЦ. 1991. № 3/4. 180 с.
12. Калажоков З.Х., Калажоков З.Х., Зихова К.В., Калажоков Заур Х., Калажоков Х.Х., Хоконов Х.Б. // Расчет изотерм поверхностного натяжения и адсорбции бинарных систем р-металлов // ТВТ. 2012. Т. 50, № 6. С. 781–784.
13. Малов Ю.И., Лазарев В.Б. О линейной зависимости между работой выхода электрона и поверхностным натяжением в двойных и тройных металлических растворах // Физическая химия поверхностных явлений в расплавах, 1971. С. 45–47.
14. Калажоков З.Х., Калажоков З.Х., Кумышева З.А., Карданова З.В. Хоконов Х.Л. К вопросу о связи между поверхностным натяжением и работой выхода электрона бинарных сплавов // Третий международный междисциплинарный симпозиума «ФПЯ и ФП». Ростов-н/Д: СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 17–21 сент. 2013 г. Вып. 3. С. 97–99.
15. Калажоков З.Х., Калажоков З.Х., Калажоков Х.Х., Карамурзов Б.С., Хоконов Х.Б. Уравнение изотермы поверхностного натяжения бинарных сплавов металлических систем // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 21. С. 104–107.
16. Калажоков З.Х., Калажоков Заур Х., Барагунова З.В., Калажоков Х.Х., Квашин В.А., Реуцкая Н.С., Хоконов М.А. Поверхностные свойства расплавов бинарных систем щелочных металлов // ТВТ. 2019. Т. 57, № 3. С. 377–382.
17. Калажоков З.Х., Калажоков Заур Х., Хацукова Р.И., Шериева Э.Х., Калажоков Х.Х. Расчет изотерм поверхностного натяжения, адсорбции и поверхностных концентраций компонентов сплавов системы литий-натрий в твердом состоянии // Межвузовский сборник научных трудов: Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, 2014. В. 6. С.135–140.