

11;12

Работа выхода электрона сплавов с участием щелочных металлов

© Б.Б. Алчагиров, Р.Х. Архестов, Ф.Ф. Дышекова

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
360004 Нальчик, Россия
e-mail: alchg@kbsu.ru

(Поступило в Редакцию 10 января 2012 г.)

Обсуждены результаты исследований работы выхода электрона сплавов и соединений с участием щелочных металлов, представляющие интерес для практики разработки новых фотокатодных материалов и дальнейшего развития теории электронной эмиссии. Показано, что остаются нерешенными ряд экспериментальных и теоретических задач в области изучения температурных и концентрационных зависимостей работы выхода электрона бинарных металлических систем, в числе которых вопрос о поверхностной активности инертных компонентов в сплавах на основе щелочных металлов и др.

Щелочные металлы и их сплавы с легкоплавкими металлами (Pb, Bi, Ga, In и др.) считаются материалами XXI века, систематические исследования которых будут способствовать решению ряда принципиальных вопросов создания высокоэффективных и ресурсоспособных энергетических термоядерных реакторов. Они же могут быть использованы как и тритий — воспроизводящие вещества и теплоносители в ядерных, а в перспективе и в термоядерных установках [1–3]. Поэтому наряду с изучением ядерно-физических свойств, исследования других физико-химических свойств сплавов с участием щелочных металлов являются весьма актуальными, среди которых работа выхода электрона (РВЭ) занимает особое место, так как она является одной из важнейших энергетических параметров вещества и используется для физико-химического анализа материалов [4–7].

Объекты исследований обсуждаемых работ — сплавы с участием щелочных металлов — обладают исключительно высокой химической активностью и предъявляют повышенные требования к условиям экспериментов по вакууму, чистоте используемых материалов и т.д. В связи с этим в работе рассмотрены в основном более поздние и надежные результаты исследований эмиссионных свойств бинарных легкоплавких сплавов с участием щелочных металлов.

РВЭ сплавов системы Pb–Na (рис. 1) в области малых добавок Na к Pb быстро понижается [8]. Эффект объясняется тем, что Na является поверхностно-активной добавкой к Pb и его концентрация в поверхностном слое больше, чем в объеме сплавов.

Отметим, что характер концентрационной зависимости РВЭ $\varphi(x)$, полученной для жидких сплавов Pb–Na, аналогичен подобной зависимости для сплавов в твердом состоянии при 300 К, но при этом РВЭ для всех сплавов в жидком состоянии несколько выше, чем у твердых растворов. Последний факт связывается с температурной зависимостью адсорбции Na в сплавах с Pb.

Измерение РВЭ системы Pb–Na во всем интервале составов при 300 К показало, что отмеченное выше резкое снижение РВЭ в области малых добавок Na

к Pb сменяется почти пологим участком, начиная с концентраций, соответствующих границе растворимости Na в Pb при комнатной температуре (рис. 1). Далее изотерма $\varphi(x)$ проходит через минимум, соответствующий эквимолярному соединению PbNa. Несмотря на достаточно сложную систему Pb–Na диаграммы состояния системы, во всем остальном интервале составов на изотерме $\varphi(x)$ системы Pb–Na не обнаруживаются какие-либо другие экстремумы. Вместе с тем следует обратить внимание на два существенных факта, касающихся полученных в [8] результатов. Первый из них — понижение РВЭ чистого Na по мере добавления к нему поверхностно-инертного Pb, работа выхода которого более чем в 1.5 раза превышает РВЭ натрия. Вторым заключается в отсутствии экспериментальных точек на изотерме $\varphi(x)$ в этой же области составов сплавов на основе натрия (от чистого Na до Na + 20 at.% Pb), тогда как для выяснения причины понижения РВЭ (а не

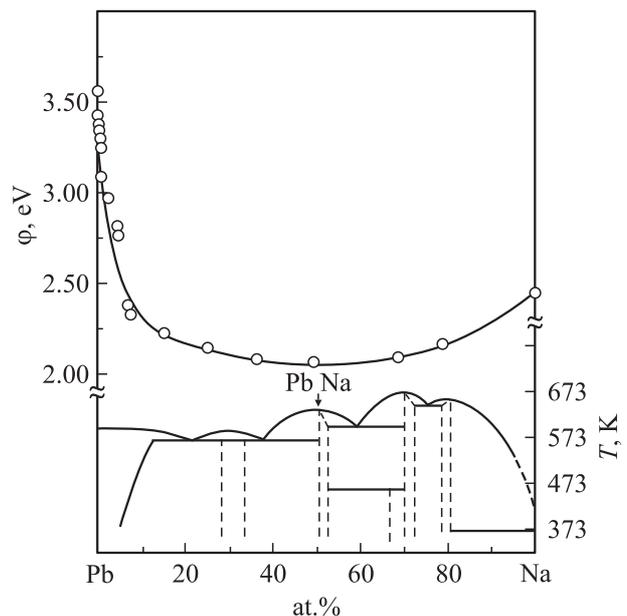


Рис. 1. Изотерма РВЭ сплавов системы Pb–Na при 300 К [8].

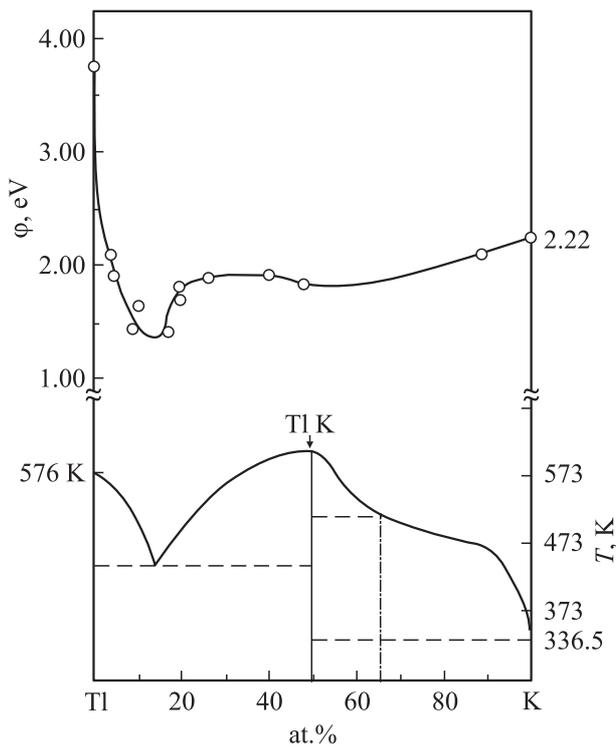


Рис. 2. Работа выхода электрона и диаграмма состояния системы Тl–К при 300 К [9].

ожидаемого ее повышения) у сплавов на основе натрия, следовало бы, напротив, еще более детально, т. е. с малым „шагом“ по концентрации, изучить изотерму $\varphi(x)$ в указанной области составов.

В работе [9] фотоэлектрическим методом Фаулера [4] определена РВЭ сплавов системы Тl–К во всем концентрационном интервале составов (рис. 2). Видно, что после быстрого понижения РВЭ в области малых добавок калия к таллию изотерма РВЭ $\varphi(x)$ проходит через минимум в области концентраций, соответствующих эвтектическому составу. При этом величина РВЭ существенно (на ~ 0.8 eV) меньше, чем у чистого калия. Отметим, что как и в системе Pb–Na [8], в [9] также обнаружена взаимная поверхностная активность компонентов: малые добавки таллия к калию, РВЭ которого более чем в 1.5 раза превышает РВЭ чистого калия, тем не менее приводят к понижению РВЭ калия. Авторы [9] связывают данный эффект с возможным изменением параметров решетки сплавов таллия на основе калия.

На наш взгляд, изотермы РВЭ систем Pb–Na и Тl–К требуют дополнительного уточнения в области составов сплавов свинца на основе натрия и таллия на основе калия, так как подобное явление взаимной активности компонентов обнаруживалось и ранее [10,11], но до сих пор удовлетворительного объяснения данному эффекту не дано. Известны только различные предположения по данной проблеме, в частности А.Р. Регеля с сотр. о том, что появление эффекта взаимной поверхностной активности компонентов раствора в твердом состоянии

может быть связано с особенностями изменения энтропии плавления [12]. Определенную ясность в решении обсуждаемой проблемы может внести анализ изотерм поверхностного натяжения (ПН) ряда бинарных систем, в которых также обнаруживается взаимная поверхностная активность компонентов, так как между РВЭ и ПН, являющимися важнейшими энергетическими параметрами поверхности вещества, теоретически и экспериментально установлена достаточно четкая корреляционная связь не только для чистых металлов, но и их двойных и тройных сплавов [13–15].

Действительно, в литературе описаны изотермы поверхностного натяжения $\sigma(x)$ с минимумом примерно для двух десятков бинарных металлических систем, хотя на их диаграммах состояния отсутствуют химические соединения [16–18]. В. Ниженко [19] полагает, что основным условием появления минимума на изотерме ПН $\sigma(x)$ является пересечение кривых активностей компонента в поверхностном слое и в объеме в зависимости от его поверхностной и объемной концентрации. Однако остается неизвестной причина, обуславливающая пересечение кривых концентрационной зависимости активностей компонентов в поверхностном слое и объеме раствора.

В случае твердых растворов, по мнению автора [11], эффект взаимной поверхностной активности компонентов в твердых растворах связан с разницей работ образования раствора в поверхностном слое и в объеме. Независимо от размера частиц добавки образование раствора в поверхностном слое и в объеме связано с деформацией решетки, причем деформационный вклад в работу образования раствора в поверхностном слое всегда меньше, чем в объеме. Это должно приводить к понижению поверхностного натяжения твердых растворов в области малых добавок компонентов друг к другу, но, как было отмечено выше, подобное поведение изотерм $\sigma_{ж}(x)$ сплавов наблюдается лишь в очень ограниченном числе опытов. Таким образом, лишь теория, последовательно учитывающая все виды энергии взаимодействия частиц в сплавах, в том числе и энергию деформации решетки в объеме и поверхностном слое, по-видимому, даст возможность полностью объяснить эффект взаимной поверхностной активности компонентов в твердых растворах.

В работе [20] методом внешнего фотоэффекта измерены концентрационные зависимости РВЭ $\varphi(x)$ систем In с Na, K, Rb и Cs. Измерения проводились при 300 К на твердофазных образцах в интервале составов от 0 до 25 at.% щелочного металла в индии. Результаты измерений РВЭ представлены на рис. 3, которые свидетельствуют о резком уменьшении РВЭ индия при введении небольших количеств щелочного металла: при содержании около 5 at.% щелочного металла в индии изменение РВЭ завершается, достигнув значения РВЭ чистого щелочного металла. Авторы работы [20] справедливо связывают характер полученных концентрационных зависимостей $\varphi(x)$ сплавов индий–щелочной ме-

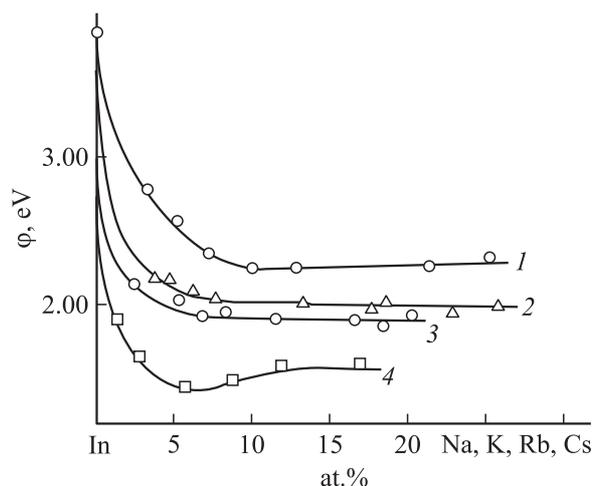


Рис. 3. Зависимость РВЭ сплавов от концентрации щелочного металла в индии [20] при 300 К: 1 — In–Na, 2 — In–K, 3 — In–Rb, 4 — In–Cs.

талл в области малых концентраций с адсорбционными явлениями в сплавах. В [20] также показано, что степень уменьшения РВЭ индия тем значительнее, чем меньше величина РВЭ добавляемого щелочного металла, хотя задолго до появления [20] к такому же выводу пришли и авторы [21,22]. Выводы авторов [20–22] подтверждаются также и результатами исследований концентрационных зависимостей ПН $\sigma(x)$ систем Al и Ga с малыми добавками Li, Na и K [23], согласно которым степень уменьшения поверхностного натяжения алюминия тем значительнее, чем меньше по величине ПН добавляемого щелочного металла. Это еще раз свидетельствует о верности отмеченной выше корреляции между изотермами РВЭ и ПН металлических растворов.

В работе [24] фотоэлектрическим методом Фаулера [4] изучена температурная зависимость РВЭ поверхностей неравновесных (неотожженных) сплавов Al, Pb и In,

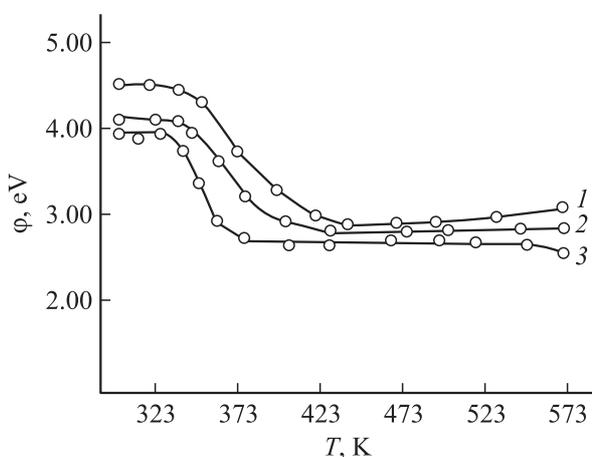


Рис. 4. Температурная зависимость РВЭ неотожженных сплавов Al, Pb и In с малыми добавками цезия [24]: 1 — Al + 0.5 at.% Cs, 2 — Pb + 0.45 at.% Cs, 3 — In + 0.53 at.% Cs.

в каждом из которых содержалось около 0.5 at.% Cs (рис. 4). Как видно из рис. 3 и 4, результаты, полученные для сплава In + 0.5 at.% Cs в [24], находятся в противоречии с результатами работы [20]. Действительно, согласно результатам работы [20], добавка Cs к In приводит к сильному понижению РВЭ In (примерно на 1.2 eV), что легко объяснимо, поскольку РВЭ добавляемого к индию цезия составляет лишь 1.81 eV [4]. По данным же [24] РВЭ исходного сплава с содержанием 0.53 at.% Cs в In при комнатной температуре остается практически неизменной и равной РВЭ чистого индия (около 4 eV, рис. 4). В каком бы неравновесном состоянии ни находились сплавы с участием щелочных металлов, изученные авторами [24], РВЭ этих сплавов должны были оказаться заметно меньше РВЭ чистого индия, о чем свидетельствуют не только данные [20], но и результаты изучения РВЭ всех остальных систем подобного типа. Столь существенные качественные различия между данными, полученными в [20] и [24], по нашему мнению, обусловлены не только неравновесным состоянием исследованных в [24] образцов, но и допущенными в этой работе грубыми методическими просчетами в технологии приготовления сплавов, содержащих щелочные металлы, а также не учетом температурных зависимостей растворимости и адсорбционной активности щелочных металлов в Al, In, Pb и т.д. [25–27]. Исключительная важность учета сделанных замечаний будет показана несколько ниже на примере изучения температурной зависимости состава поверхности сплава $\text{Sn}_{0.8}\text{Li}_{0.2}$ методом ионно-отражательной спектроскопии низких энергий.

Таким образом, результаты работы [24], на наш взгляд, не обладают необходимой надежностью. Поэтому требуются дополнительные исследования температурной и концентрационной зависимостей РВЭ сплавов Al, Pb и In с содержанием в них малых добавок цезия и с обязательным использованием более совершенной методики приготовления исследуемых образцов, а также для проведения сравнительных анализов РВЭ отожженных образцов исследуемых сплавов.

В работе [28] методом контактной разности потенциалов (КРП) [4,6] измерены РВЭ ряда сплавов и соединений Na с Cd, Sn и Zn стехиометрических составов, результаты которых графически представлены на рис. 5. Измерения проводились в атмосфере инертного газа на свежеприготовленных сколах кристаллов, а для идентификации соединений использовался рентгенографический метод. Авторы [28] на изотерме РВЭ выделяют три отдельных участка, на границах которых происходит значительный излом $\varphi(x)$: первый участок — от чистого Cd до соединения NaCd_6 , второй — от NaCd_6 до границы фазы NaCd_2 и третий — правее соединения NaCd_2 .

Если в области гомогенности фаз зависимость $\varphi(x)$ близка к линейной, то в двухфазных областях составов ход концентрационной зависимости РВЭ определяется, по мнению авторов [28], взаимной поверхностной

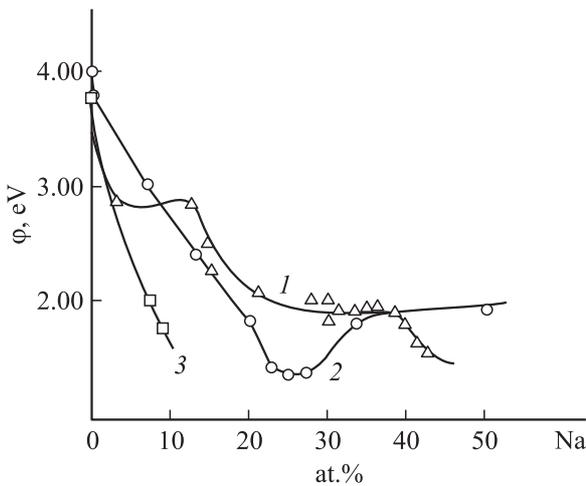


Рис. 5. РВЭ сплавов с участием натрия: 1 — кадмий–натрий, 2 — олово–натрий, 3 — цинк–натрий [28].

активностью соответствующих фаз (например, NaCd_2 по отношению к NaCd_6 , или NaCd_6 по отношению к чистому кадмию). Следует отметить, что наибольшую активность натрий проявляет в сплавах на основе цинка, которые, следовательно, и должны обладать наибольшей эмиссионной способностью (кривая 3 на рис. 5). Тем не менее, изотерма РВЭ сплавов натрия на основе цинка оказалась наименее изученной, — она построена лишь по трем экспериментальным точкам для узкого состава сплавов с содержанием в Zn не более 10 at.% Na. Изотерма $\varphi(x)$ резко обрывается, хотя ее экстраполяция к более обогащенным натрием сплавам цинка четко указывает на дальнейшее уменьшение РВЭ. К этому можно добавить, что сплавы Na на основе Zn обладают самой высокой предельной электронной активностью [29] из трех систем, изученных в [28]. Таким образом, остаются не изученными эмиссионные свойства последующих, более обогащенных натрием сплавов на основе цинка, представляющие, на наш взгляд, интерес для практики разработки достаточно эффективных лекоплавких фотокатодов.

Обращает внимание также наличие глубокого минимума на изотерме $\varphi(x)$ системы Sn–Na в области соединения NaSn_3 : работа выхода NaSn_3 на ~ 1 eV меньше РВЭ чистого Na. Таким образом, для всех вышеперечисленных систем, изученных в [28], наблюдается быстрое уменьшение РВЭ легкоплавких металлов и их сплавов при небольших добавках натрия, что не противоречит общепринятым взглядам и известным критериям поверхностной активности компонентов в бинарных сплавах [16].

В связи с тем, что значительное уменьшение РВЭ металлов при добавлении к ним небольших количеств щелочных металлов многие авторы связывают с адсорбционной активностью последних, представляет интерес, воспользовавшись тесной связью между $\varphi(x)$

и $\sigma(x)$ [13–15], сравнить данные о составе поверхностного слоя сплавов системы Sn–Na, рассчитанные по изотерме ПН $\sigma(x)$ этой же системы, приведенные в [30] (рис. 6). Заметим только, что в [30] в рамках простой статистической модели, основанной на образовании комплексов и базирующейся на концепции наличия слоистой структуры вблизи границы фаз, были изучены термодинамические и поверхностные свойства ряда бинарных жидких сплавов с участием Na, в числе которых и Sn–Na. Как видно на рис. 6, в изученной области составов на поверхности сплавов действительно преобладает Na: при содержании 5 at.% Na в объеме сплава его содержание на поверхности в 5 раз больше, чем в глубине сплава. Но при объемной концентрации Na в Sn, равной около 25 at.%, содержание Na на поверхности сплавов становится почти таким же, как и в объеме. Заметим, что минимум на изотерме $\varphi(x)$ системы Na–Sn соответствует этому же составу сплавов (рис. 6). С другой стороны, согласно [30], по мере дальнейшего повышения концентрации Na в объеме сплавов содержание Na на поверхности сплавов начинает вновь возрастать и превышать его содержание в объеме, целиком заполняя всю поверхность сплава. Поэтому дальнейшее повышение содержания Na в поверхностном слое сплавов системы Sn–Na приводит к повышению и стабилизации РВЭ сплавов на уровне величины, практически равной РВЭ чистого натрия, что согласуется с результатами измерений концентрационной зависимости $\varphi(x)$ [28] (рис. 5, кривая 2).

В работе [31] в широкой концентрационной области исследован ряд бинарных систем на основе лития: Cd–Li, In–Li, Pb–Li и Sn–Li (рис. 7). Измерения РВЭ проводились на твердофазных образцах при комнатной

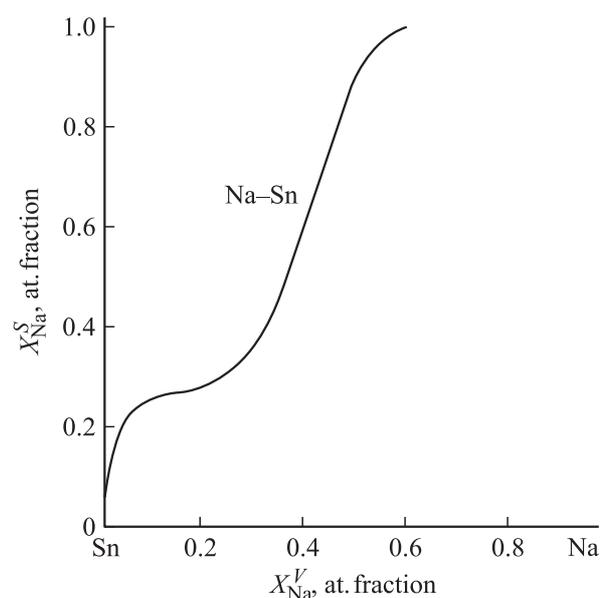


Рис. 6. Поверхностная концентрация натрия (X_{Na}^{S}) в зависимости от его содержания в объеме (X_{Na}^{V}) жидких сплавов системы Sn–Na [30].

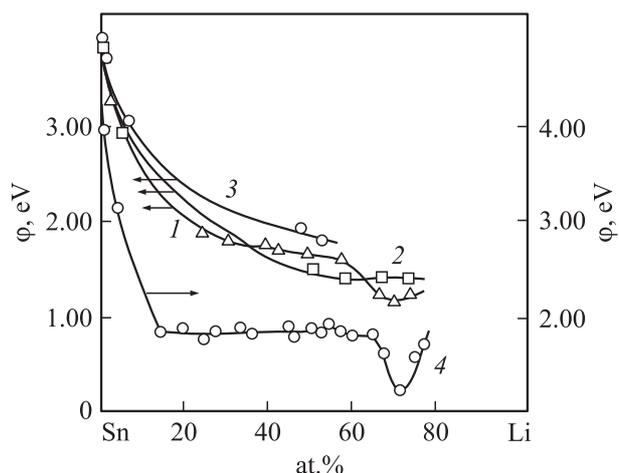


Рис. 7. РВЭ бинарных систем некоторых легкоплавких металлов с литием при температуре 300 К: 1 — Cd–Li, 2 — In–Li, 3 — Pb–Li, 4 — Sn–Li [31].

температуре методом контактной разности потенциалов (КРП). Характерным для изотерм РВЭ является наличие минимума в области соединений, содержащих ~ 70 at.% Li в сплавах с Cd, In и Sn (рис. 7). В системе Cd–Li на изотерме $\varphi(x)$ минимальное значение РВЭ (2.22 eV) достигается для соединения Li_3Cd . Особенно заметен минимум на изотерме $\varphi(x)$ системы Sn–Li, соответствующий сплаву стехиометрического состава Sn_2Li_5 , РВЭ которого составляет всего 1.25 eV. Заметим, однако, что наблюдаемый минимум построен только по трем-четырем экспериментальным точкам, а после „прохождения“ минимума на $\varphi(x)$ наметившаяся вновь тенденция РВЭ сплавов к резкому возрастанию подтверждается лишь двумя экспериментальными точками вблизи составов с содержанием 20 at.% Sn в Li, что совсем недостаточно. Но, с другой стороны, наблюдаемая глубина минимума на изотерме $\varphi(x)$ (около 0.6 eV) в несколько десятков раз превышает пределы заявленной авторами погрешности измерений РВЭ [32]. В связи с этим представляет исключительный интерес рассмотрение результатов прямого изучения адсорбционного поведения лития в сплаве с оловом, приводимых в работе [33], полученных одним из современных методов анализа поверхности — методом ионно-отражательной спектроскопии низких энергий [34,35].

В [33] исследован сплав (к сожалению, только один) „объемного“ состава $\text{Sn}_{0.8}\text{Li}_{0.2}$, приготовленный in-situ из высокочистых компонентов Sn (99.99%) и Li (99.9%), предварительно прокатанных в форме тонких дисковых фольг из Sn (толщиной 250 μm) и Li (50 μm), наложенные затем попеременно друг с другом в форме слоеного „пирога“ перед их сплавлением с целью обеспечения лучшей гомогенизации образующегося жидкого сплава. При зондировании пучком ионов He^+ с энергией ~ 1 keV поверхностей чистых Sn и Li перед их сплавлением (при температуре 300 К) четко видны отдельные

пики, соответствующие чистым компонентам, а также очень слабый сигнал от кислорода, присутствующего в литии в виде малой примеси (рис. 8). Но при температурах от 423 до 573 К, т. е. после полного расплавления и образования сплава, интенсивности сигналов от каждого из компонентов сплава и их соотношения кардинально меняются (рис. 9).

Особенно это заметно у примесного кислорода, содержание которого с температурой на поверхности сплава заметно возрастает, достигая максимального значения при температурах около 673 К (рис. 10). На температурной зависимости равновесного состава поверхности сплава $\text{Sn}_{0.8}\text{Li}_{0.2}$ хорошо видно, что при температуре 673 К поверхность жидкого сплава более чем наполовину покрыта литием, хотя объемное содержание этого элемента в исходном сплаве-образце составляет лишь 20 at.% Li. Очевидно, что только с учетом подобных

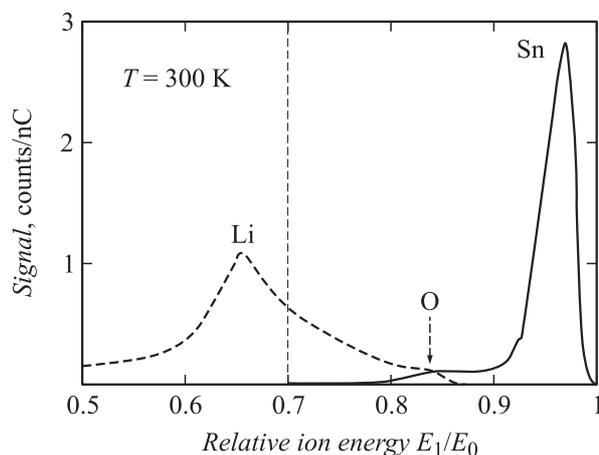


Рис. 8. Энергетические спектры твердых образцов Li и Sn при зондировании пучком ионов He^+ с энергией 1 keV. Сигнал от Sn более интенсивный, чем от Li ввиду увеличения рассеяния в зависимости от атомного номера. Показано также положение сигнала рассеяния от кислорода.

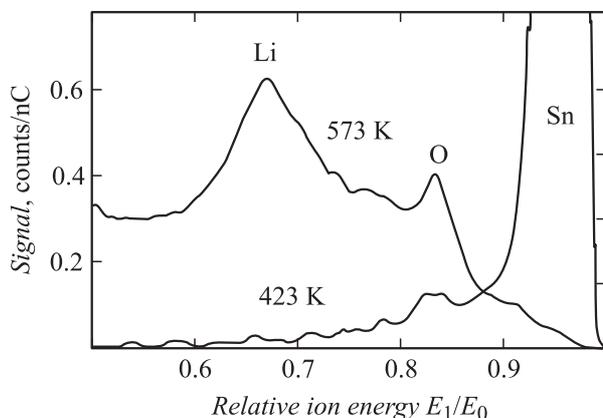


Рис. 9. Спектр интенсивности рассеяния до (423 К) и после (573 К) сплавления компонентов образца SnLi. Пик интенсивности рассеяния сигнала от твердого образца Sn выходит за пределы шкалы на 6 counts/nC.

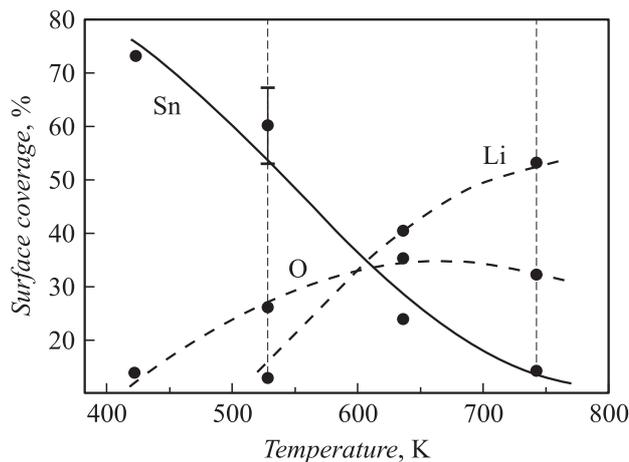


Рис. 10. Зависимость равновесного состава поверхности сплава Sn–Li от температуры, определенной ионной спектроскопией низких энергий.

сведений и данных о различных физико-химических и адсорбционных процессах, протекающих на межфазных границах и руководствуясь ими, можно выбрать оптимальный температурный режим и длительность термовакуумной обработки исследуемых сплавов при их подготовке к опытам, а также в целом строить план эксперимента. Более того, без этого невозможна корректная интерпретация получаемых данных и анализ результатов исследований эмиссионных свойств сплавов, в том числе и с участием щелочных металлов. Таким образом, для успешного решения вопросов, возникающих при анализе результатов исследований РВЭ металлических сплавов, в том числе и обозначенных в данной работе, имеется острая необходимость, не ограничиваясь только отдельными сплавами и соединениями, в более полном и систематическом изучении поверхностей современными электронно-спектроскопическими методами анализа.

Заключение

Из анализа состояния исследований РВЭ сплавов с участием щелочных металлов можно заключить, что

— в подавляющем большинстве исследований измерения РВЭ сплавов $\varphi(x)$ проведены лишь в ограниченных температурных и концентрационных интервалах;

— на концентрационных зависимостях РВЭ значительного числа бинарных систем с участием щелочных металлов наблюдается эффект поверхностной активности заведомо инактивных компонентов на основе щелочных металлов;

— обнаружено, что измерения концентрационных зависимостей РВЭ бинарных систем, в которых наблюдается отмеченный эффект поверхностной активности инактивных компонентов, проведены недостаточно детально и требуют дополнительных исследований в областях составов сплавов на основе щелочных металлов;

— в настоящее время отсутствует удовлетворительное объяснение эффекту поверхностной активности, проявляемой инактивными компонентами в бинарных металлических системах в области составов сплавов на основе щелочных металлов.

Список литературы

- [1] Дриц М.К., Зусман Л.Л. Сплавы щелочных и щелочноземельных металлов. Справочник. М.: Металлургия, 1986. 248 с.
- [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] Kang Y., Terai T. // Fusion Eng. and Des. 2006. Vol. 81. N 17. P. 519–523.
- [4] Фоменко В.С. Эмиссионные свойства материалов. Справочник. 4-е изд. Киев: Наукова думка, 1981. 340 с.
- [5] Савицкий Е.М., Бузов И.В., Пирогова С.В., Литвак Л.Н. Электрические и эмиссионные свойства сплавов. М.: Наука, 1978. 292 с.
- [6] Ибрагимов Х.И., Корольков В.А. Работа выхода электрона в физико-химических исследованиях. М.: Интермет Инжиниринг, 2002. 526 с.
- [7] Алчагиров Б.Б., Хоконов Х.Б. XXI Всесоюзная конференция по эмиссионной электронике. Тез. докл. Л.: РАН СССР. ФТИ, 1990. Т. 1. 198 с.
- [8] Лазарев В.Б., Малов Ю.И. // Известия АН СССР. Серия химич. 1967. № 9. С. 2091–2094.
- [9] Малов Ю.И., Шебзухов М.Д. // Электрохимия. 1974. Т. 10. Вып. 1. С. 95–97.
- [10] Алчагиров Б.Б., Хоконов Х.Б., Калажиков Х.Х. // Поверхность: физика, химия, механика. 1982. № 7. С. 49–55.
- [11] Коков Х.Н. Экспериментальное исследование поверхностного натяжения и работы выхода электрона бинарных металлических растворов в твердом состоянии: Автореф. канд. дис. Калинин, 1978. 17 с.
- [12] Регель А.Р., Глазов В.М. Физические свойства электронных расплавов. М.: Наука, 1980. 268 с.
- [13] Малов Ю.И., Лазарев В.Б. Физическая химия поверхностных явлений в расплавах. Киев: Наукова думка, 1971. С. 45–47.
- [14] Задумкин С.Н., Ибрагимов Х.И., Хоконов Х.Б. // ЖФХ. 1977. Т. 51. № 1. С. 133–137.
- [15] Алчагиров Б.Б. // ЖФХ. 1990. Т. 64. № 11. С. 2983–2987.
- [16] Попель С.И. // Поверхностные явления в расплавах. М.: Металлургия, 1994. 440 с.
- [17] Ниженко В.И., Флока Л.И. Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов (одно- и двухкомпонентные системы). Справочник. М.: Металлургия, 1981. 208 с.
- [18] Ниженко В.И. Адгезия, смачивание и поверхностные свойства расплавов и твердых тел. Киев: Наукова думка, 1986. Вып. 16. С. 3–19.
- [19] Ниженко В.И., Флока Л.И. К прогнозу изотерм поверхностного натяжения двойных металлических расплавов. Сб. научных трудов „Физика поверхностных явлений в расплавах“. Грозный: Чечено-Ингушский госуниверситет, 1977. Ч. 1. С. 37–47.
- [20] Малов Ю.И., Шебзухов М.Д. // Физическая химия поверхности расплавов. Тбилиси: Мецниереба. 1977. С. 200–205.

- [21] Малов Ю.И. Исследование фотоэлектрических свойств некоторых металлических расплавов и образующихся из них фаз: Автореф. канд. дис. М., 1967. 17 с.
- [22] Лазарев В.Б. Исследование поверхностных и фотоэлектрических явлений в расплавах и полупроводниковых веществ: Автореф. докт. дис. М., 1968. 41 с.
- [23] Кононенко В.И., Шевченко В.Г., Торокин В.В., Конокова А.В. // *Металлы*. 2005. № 3. С. 20–25.
- [24] Барсокова К.В., Калажоков З.Х., Калажоков Заур Х., Калажоков Х.Х. // *Вестник КБГУ. Серия „Физические науки“*. 2009. Вып. 12. С. 16–17.
- [25] Чунтонов К.А., Орлов А.Н. // *Высокочистые вещества*. 1989. № 2. С. 100–106.
- [26] Александров Б.Н., Далакова Н.В., Москалец М.В. // *Изв. АН СССР. Металлы*. 1987. № 3. С. 198–207.
- [27] Иванов В.А., Соловьев В.А. Растворимость элементов в литии: Аналитический обзор ОБ-35. Обнинск: ФЭИ, 1977. С. 3–58.
- [28] Онищенко А.В., Малов Ю.И., Лазарев В.Б. // *ФММ*. 1981. Т. 51. Вып. 3. С. 559–561.
- [29] Алчагиров Б.Б. // *ЖТФ*. 2001. Т. 71. № 1. С. 125–127.
- [30] Apisicwui В.С. // *J. Alloys Comp.* 2003. Vol. 359. N 1–2. P. 172–179.
- [31] Онищенко А.В., Малов Ю.И. // *ФММ*. 1982. Т. 54. Вып. 1. С. 94–96.
- [32] Онищенко А.В., Малов Ю.И., Корольков В.А. // *Метрология*. 1979. № 5. С. 49–53.
- [33] Robert Bastasz. // *JAERI–Conf.* 2003–001. P. 12–18.
- [34] Вудраф Д., Делчар Т. *Современные методы исследования поверхности*. Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 564 с.
- [35] Алчагиров Б.Б., Карамурзов Б.С., Хоконов Х.Б. *Современные методы исследования поверхности твердого тела*. Нальчик: КБГУ, 1986. 130 с.