

УДК 532.6

## ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ И ПЛОТНОСТЬ РАСПЛАВОВ ИНДИЙ–ОЛОВО И ИХ ЗАВИСИМОСТЬ ОТ СОСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЫ

© 2023 г. Р. Х. Дадашев<sup>a, b, \*</sup>, Р. А. Кутуев<sup>a, c</sup>, Д. З. Элимханов<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Чеченский государственный университет им. А.А. Кадырова, Грозный, Россия

<sup>b</sup>Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова, Грозный, Россия

<sup>c</sup>Академия наук Чеченской Республики, Грозный, Россия

\*e-mail: edzhabrail@mail.ru

Поступила в редакцию 17.08.2022 г.

После доработки 10.09.2022 г.

Принята к публикации 20.09.2022 г.

В работе представлены результаты измерения поверхностного натяжения ( $\sigma$ ) и плотности ( $\rho$ ) расплавов индий–олово. Измерения  $\sigma$  и  $\rho$  проведены разными методами. Поверхностное натяжение измерено методом лежащей капли и максимального давления в капле, а плотность – ареометром и методами лежащей капли. Для исследований использованы металлы высокой чистоты In-00, олово – ОВЧ. Максимальная ошибка измерения  $\sigma$  равна 0.8%, а  $\rho$  – 0.2%. Зависимость  $\sigma$  расплавов In–Sn от состава характеризуется экстремумом (пологим минимумом) в области эквимольного состава. С ростом температуры глубина минимума уменьшается, его положение смещается в сторону чистого индия. Молярные объемы имеют небольшие положительные отклонения от аддитивных значений. С увеличением температуры молярные объемы приближаются к аддитивным величинам. Методом лежащей капли были измерены температурные зависимости  $\sigma$  и  $\rho$  разбавленных по индию растворов In–Sn. Показано, что добавки индия понижают поверхностное натяжения олова. С учетом того, что значение поверхностного натяжения индия выше, чем у олова, такой результат свидетельствует о том, что изотермы поверхностного натяжения системы индий–олово должны пройти через минимум.

*Ключевые слова:* поверхностное натяжение, плотность, бинарные системы, изотермы поверхностного натяжения

**DOI:** 10.31857/S0235010623010024, **EDN:** NIKJRG

### ВВЕДЕНИЕ

Сплавы легкоплавких металлов, в частности расплавы индий–олово, нашли широкое применение в различных отраслях современной техники [1, 2]. Поэтому не удивительно, что экспериментальному изучению зависимости поверхностного натяжения ( $\sigma$ ) и плотности ( $\rho$ ) расплавов индий–олово от состава и температуры посвящено большое количество работ [1–8]. Критический анализ имеющихся экспериментальных данных по величине  $\sigma$  и  $\rho$  системы индий–олово, проведенный автором [3], показал, что результаты, полученные разными авторами, отличаются друг от друга не только количественно, но и качественно.

Так для концентрационной зависимости  $\rho$  этих расплавов авторы [4] получили аддитивную зависимость. Аддитивные прямые для концентрационной зависимости молярных объемов в этой системе получили сравнительно недавно и авторы [5]. В работе [6] для концентрационной зависимости  $\rho$  этой системы получены положительные отклонения, а в работе [7] – отрицательные.

Качественно отличаются друг от друга и экспериментальные данные по изотермам  $\sigma$  этих расплавов. Если авторами [4, 5] показано, что изотермы  $\sigma$  этой системы передаются монотонной кривой, то авторами [7] на изотермах  $\sigma$  выявлены минимумы эквимолярных составов.

В работе [9] методом Ожэ-спектроскопии был определен состав поверхностного слоя расплавов индий–олово, и по полученным данным была вычислена концентрационная зависимость  $\sigma$ . Полученные результаты показали, что изотермы  $\sigma$  характеризуются не минимумом, а максимумами в области 0.4–0.6 молярных долей олова. Сложные изотермы  $\sigma$ , содержащие как минимум, так и максимум, получены относительно недавно авторами [10–14]. Такая несогласованность экспериментальных данных, полученных разными авторами, может быть обусловлена тем, что значения  $\sigma$  чистых компонентов индия и олова близки друг к другу, и даже незначительные отклонения экспериментально полученных данных от аддитивных значений приводят к экстремуму на изотермах  $\sigma$ . При этом эти особенности могут быть обусловлены особенностями строения исследуемых расплавов.

Таким образом, вопрос о концентрационной зависимости  $\sigma$  и  $\rho$  расплавов индий–олово, несмотря на актуальность, остается до конца не решенным. В связи с этим экспериментальное исследование концентрационной и температурной зависимости  $\sigma$  и  $\rho$  расплавов этой системы наиболее точными и надежными методами представляет определенный научный и практический интерес.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные измерения  $\sigma$  и  $\rho$  проведены в приборе, конструкционные особенности которого подробно описаны в [15]. Отличительной особенностью этого прибора является то, что в нем предусмотрена возможность приготовления в вакууме сплавов различных составов и измерения температурной зависимости  $\sigma$  и  $\rho$  этих расплавов. При этом  $\sigma$  измеряется методом максимального давления в капле, а  $\rho$  – ареометрическим.

Прибор, использованный нами для экспериментальных исследований, был изготовлен из боросиликатного стекла, температура размягчения которого не ниже 800 К. Измерения  $\sigma$  и  $\rho$  проводились нами от температур ликвидус до 773 К. Для приготовления расплавов были использованы металлы высокой чистоты (индий In-00, олово марки ОВЧ Sn-000).

Следует отметить, что метод максимального давления в капле был существенно усовершенствован П.П. Пугачевичем. Стекланные приборы [16, 17], сконструированные им, имеют целый ряд преимуществ, которые значительно повышают достоверность и точность получаемых экспериментальных данных. Подробное описание этих приборов, работающих на гравитационном принципе, и методических особенностей измерения поверхностного натяжения с их использованием дается в работах [15–17]. Поэтому отметим только то, что использование этих приборов позволило на порядок повысить точность измерения поверхностного натяжения.

Следующим шагом в направлении усовершенствования этой методики является создание комбинированного прибора, который подробно описан в работе [16]. Он имеет целый ряд преимуществ перед остальными. Поэтому исследования  $\sigma$  и  $\rho$  расплавов индий–олово нами проведены этим прибором.

Порядок проведения эксперимента следующий. Предварительно подготовленный для экспериментальных исследований прибор припаивают к вакуумной системе, откачивают до давления  $10^{-6}$  Па. После длительной термовакуумной обработки при вакууме  $10^{-6}$  Па и температуре 800 К прибор отпаивают от вакуумной системы и переносят в воздушный термостат, где и проводят измерения  $\sigma$  и  $\rho$  при различных температурах. Перед проведением измерений  $\sigma$  и  $\rho$  при данной температуре измерительную

ячейку с расплавом выдерживают при этой температуре не менее 2 ч. Принятые меры (предварительная откачка прибора до  $10^{-6}$  Па, ее отпайка от остальной части, длительное термостатирование) позволяют снизить влияние посторонних газов и паров масел на измеряемое свойство, и проводить измерения в условиях термодинамического равновесия расплава с собственным паром.

Максимальная возможная суммарная погрешность измерения  $\sigma$  при доверительной вероятности 0.95 составляет 0.8%. Обычно при измерении  $\sigma$  методом максимального давления в капле экспериментаторы указывают на существенно меньшую величину погрешности измерения (от 0.1 до 0.2%). Расчеты погрешности измерения  $\sigma$  без учета влияния эллиптичности капилляра действительно дают такие значения, так как радиус капилляра определяется с высокой точностью. Однако используемые в экспериментальных исследованиях капилляры, несмотря на тщательный отбор, имеют эллиптичность.

К сожалению, до настоящего времени, несмотря на важность и актуальность, никем не проведены исследования влияния эллиптичности капилляра на измеряемое значение  $\sigma$ . Поэтому при определении максимально возможной погрешности измерения  $\sigma$  мы приняли, что погрешность определения радиуса капилляра равна разности между максимальным и минимальным значением диаметров эллипса.

При этом следует иметь в виду, что при использовании в экспериментальных исследованиях прибора с одним и тем же капилляром, разброс экспериментальных данных определяются случайной погрешностью, которая равна 0.2%.

Значения  $\sigma$  чистых металлов индия и олова близки друг к другу, и глубина минимума на изотермах  $\sigma$  не сильно превышает погрешности измерения  $\sigma$ . Поэтому нами проводились как повторные измерения, так и повторные опыты, направленные на повышение достоверности и надежности конечных результатов. В частности, при каждой температуре измерение  $\sigma$  и  $\rho$  повторялось не менее 10 раз, а полученные результаты усреднялись. Если по каким-то причинам (недостаточная гомогенность, отсутствие термического равновесия и т.д.) разброс результатов повторных измерений превышал  $+1$  мДж/м<sup>2</sup>, то после выявления и ликвидации причин разброса измерения  $\sigma$  повторялись многократно.

Кроме этого, нами были поставлены несколько независимых (с использованием нового прибора) серий опытов по измерению  $\sigma$  и  $\rho$  чистых металлов и сплавов, в каждой из которых вся процедура предварительной подготовки прибора к измерениям (промывка, сушка, достижение вакуума и т.д.) повторялась и новый прибор в вакууме заправлялся необходимыми порциями металлов.

В первой серии опытов в измерительную ячейку (вакуум  $10^{-6}$  мм рт. ст.) был переплавлен индий, а в дополнительный баллон — олово. По методике, подробно нами описанной в [15], от температуры плавления до 773 К определена температурная зависимость  $\sigma$  и  $\rho$  чистого индия. Затем через калиброванную микробюретку к индию было добавлено небольшое количество олова, и после тщательного перемешивания измерена температурная зависимость  $\sigma$  и  $\rho$  полученного расплава. Аналогично проводилась подготовка и измерение свойств остальных расплавов.

Таким образом, в первой серии измерений были изучены  $\sigma$  и  $\rho$  (12–16 замеров для каждой серии) расплавов индий–олово, составы которых лежат от 0 до 59 ат. % олова. Полученные результаты представлены в табл. 1, 2 и изображены на рис. 1 со сплошной заливкой маркеров.

Вторая серия опытов, которая была нацелена на изучение влияния добавок индия на  $\sigma$  и  $\rho$  олова, проведена в том же приборе. Достигнуто это тем, что в измерительную ячейку переплавляется олово, а в дополнительный баллон — индий. После измерения  $\sigma$  олова, как и в первой серии опытов, с помощью микробюретки-дозатора готовились

**Таблица 1.** Плотность ( $\text{кг/м}^3$ ) расплавов индий–олово. Коэффициенты уравнения (1) и соответствующие доверительные интервалы при доверительной вероятности 0.95

Мол. доля олова	$\rho \cdot 10^{-3}$ $\text{кг/м}^3$	$\alpha \cdot 10$ $\text{кг/м}^3 \cdot \text{К}$	$\Delta\rho_0 \cdot 10^{-3}$ $\text{кг/м}^3$	$\Delta\alpha \cdot 10$ $\text{кг/м}^3 \cdot \text{К}$	$\Delta\rho \cdot 10^{-3}$ $\text{кг/м}^3$
0.000	7.040	7.9	0.037	1.2	0.033
0.082	7.136	6.8	0.043	1.3	0.026
0.122	7.151	6.8	0.010	0.0	0.010
0.149	7.103	5.9	0.036	0.9	0.019
0.201	7.096	6.1	0.050	1.4	0.023
0.221	7.100	5.9	0.066	1.8	0.029
0.252	7.081	5.9	0.025	0.7	0.017
0.259	7.122	6.7	0.012	0.3	0.005
0.328	7.064	5.5	0.022	0.7	0.020
0.379	7.034	4.7	0.027	0.8	0.016
0.386	7.039	4.5	0.031	0.9	0.025
0.441	7.067	6.0	0.029	0.9	0.025
0.453	7.055	4.9	0.029	0.9	0.018
0.494	7.121	6.8	0.011	0.3	0.004
0.504	7.088	6.4	0.021	0.6	0.009
0.560	7.142	7.1	0.030	0.9	0.019
0.596	7.089	6.1	0.016	0.5	0.014
0.642	7.094	6.2	0.015	0.5	0.012
0.712	7.124	6.9	0.016	0.5	0.009
0.750	7.121	5.7	0.043	0.9	0.040
0.807	7.172	7.1	0.067	2.1	0.022
0.890	7.134	6.8	0.023	0.7	0.010
0.900	7.157	6.6	0.041	0.8	0.036
1.000	7.001	7.0	0.060	0.1	0.051

расплавы новых концентраций и измерялись их свойства. Полученные результаты представлены в табл. 2 и на рис. 1 и обозначены светлой маркировкой.

Третья серия опытов фактически повторяет первую серию. Однако в этой серии для измерения  $\sigma$  и  $\rho$  расплавов использован новый прибор с новым капилляром, а плотность измерена другим ареометром. Как видно из рис. 1, экспериментальные данные, полученные в этих опытах, расположены несколько выше результатов, полученных в первой серии. При этом расхождения этих данных не превышают погрешности измерения  $\sigma$ . Помимо этого, при исследовании концентрационной зависимости  $\sigma$  и плотности тройных систем индий–олово–свинец и индий–олово–галлий [15] по лучевым сечениям концентрационного треугольника с постоянным отношением молярных долей индия и олова  $X_{\text{In}} : X_{\text{Sn}} = \text{const}$  нами измерены температурные зависимости  $\sigma$  и плотности соответствующих расплавов индий–олово. При этом для экспериментальных измерений были использованы новые приборы. Полученные экспериментальные данные (на рис. 1 обозначены крестиками) приведены в табл. 1.

**Таблица 2.** Результаты измерения поверхностного натяжения (мН/м) системы индий–олово

Мол. доля олова	433 К	473 К	523 К	573 К	623 К	673 К	723 К	773 К
0	–	–	570	565	560	557	550	–
0.041	–	549	548	547	542	537	533	529
0.082	–	550	548	544	540	537	534	530
0.122	–	548	544	540	536	534	530	527
0.148	–	548	545	542	539	536	532	529
0.20	–	–	540	537	534	532	528	525
0.201	–	–	540	537	534	531	528	525
0.229	–	–	538	537	534	532	528	525
0.252	–	542	540	537	534	531	528	525
0.259	–	542	539	536	534	532	529	524
0.328	540	536	537	534	533	530	527	523
0.348	–	539	538	535	532	529	526	523
0.379	537	535	534	531	529	526	523	522
0.386	540	538	536	533	530	527	524	521
0.441	535	535	534	531	528	526	523	520
0.453	540	538	535	532	529	526	523	521
0.494	537	538	534	532	530	527	524	519
0.504	539	535	535	533	528	525	521	519
0.563	537	535	533	531	529	525	523	518
0.596	536	535	533	531	528	524	521	517
0.642	537	535	533	531	529	525	521	519
0.712	–	536	534	531	528	525	522	522
0.750	–	–	535	533	530	527	524	521
0.807	–	–	536	534	532	529	526	524
0.890	–	–	539	536	533	530	527	524
1	–	546	–	538	–	530	534	524

Таким образом, для изучения концентрационной зависимости  $\sigma$  и  $\rho$  системы индий–олово в комбинированном приборе нами поставлены несколько серий независимых опытов по измерению  $\sigma$  и  $\rho$  расплавов индий–олово различных концентраций. Для измерения  $\sigma$  и  $\rho$  были использованы три различных прибора, что должно, на наш взгляд, повысить достоверность полученных результатов и сделанных выводов.

Помимо этого, методом большой капли нами изучены температурные зависимости  $\sigma$  и  $\rho$  разбавленных растворов индия в олове, т.е. расплавов, составы которых лежат в области, прилегающей к чистому олову. Эти исследования показали, что индий проявляет поверхностную активность на олове, т.е. при небольших добавках понижает  $\sigma$  олова. Значение  $\sigma$  индия выше, чем у олова. Следовательно, понижение  $\sigma$  олова при добавках индия свидетельствуют о наличии минимума на изотермах ПН двойной системы индий–олово. Рассмотрим полученные экспериментальные данные более подробно.

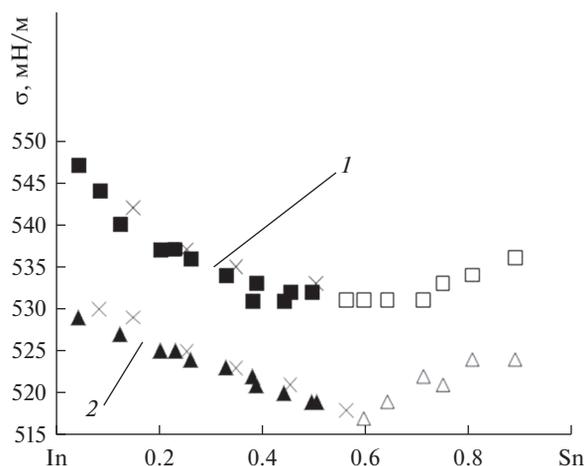


Рис. 1. Изотермы поверхностного натяжения: 1 – 523, 2 – 723 К в системе индий–олово.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нами измерена температурная зависимость  $\sigma$  и  $\rho$  25 расплавов In–Sn. Температурная зависимость  $\rho$  описывается линейным уравнением:

$$\rho = \rho_0 - \alpha(T - 273), \quad (1)$$

где  $\rho_0$  и  $\alpha$  – постоянные, значения которых приведены в табл. 1.

Из рис. 2 видно, что молярные объемы расплавов индий–олово имеют положительные отклонения от аддитивных значений. Максимальные отклонения экспериментальных данных от аддитивных значений при 523 К составляют 1%. Как и следовало ожидать, с ростом температуры изотермы молярных объемов приближаются к аддитивным прямым.

В последние годы заметно возрос интерес исследователей к изучению концентрационной зависимости температурного коэффициента поверхностного натяжения  $\left(\frac{d\sigma}{dT}\right)$ , что обусловлено большой информативностью этих данных.

Однако серьезным препятствием на этом пути является то, что погрешность измерения температурного коэффициента ПН на порядок выше ошибки измерения ПН, что не дает возможности с достаточной точностью экспериментально определить изотермы температурного коэффициента ПН. Однако, несмотря на близость абсолютных значений температурного коэффициента ПН индия и олова, что создает определенные трудности в экспериментальном определении концентрационной зависимости  $\left(\frac{d\sigma}{dT}\right)$ , полученные нами экспериментальные данные позволили установить, что с увеличением в расплаве молярных долей олова температурный коэффициент по абсолютной величине уменьшается. При этом изотерма  $\left(\frac{d\sigma}{dT}\right)$  проходит через минимум эквимолярного состава.

Температурная зависимость  $\sigma$  большинства расплавов в пределах погрешности эксперимента описывается линейными уравнениями. Однако политермы  $\sigma$  расплавов, обогащенных индием, характеризуются небольшими отклонениями от линейной за-

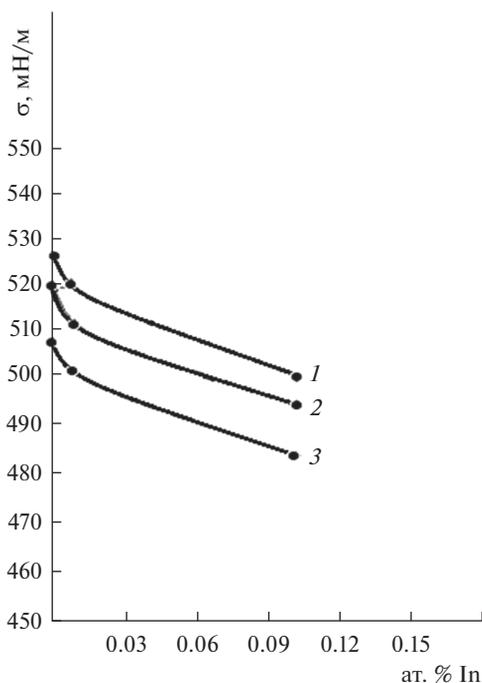


Рис. 2. Изотермы ПН олова при малых добавках индия (0; 0.01; 0.1): 1 – 523; 2 – 623; 3 – 773 К.

висимости. Следует отметить, что ошибки аппроксимации экспериментальных данных линейной зависимостью немного превышают погрешности измерений  $\sigma$ . Однако при температурах, близких к температуре ликвидус, отклонения экспериментальных данных от линейности наблюдаются как на температурной зависимости  $\sigma$  чистого индия, так и на политермах  $\sigma$  всех исследованных расплавов, богатых содержанием индия. Поэтому вопрос о природе этих особенностей требует внимательного рассмотрения.

Экспериментально обнаруженная нелинейность политерм  $\sigma$  индия и расплавов индий-олово может быть обусловлена наличием примесей в индии, или влиянием остаточных оксидов на температурную зависимость  $\sigma$ . Предположение о том, что эти особенности могут быть обусловлены влиянием остаточных оксидов, подтверждается и данными по окисляемости сплавов индий-олово. Авторами [14] экспериментально установлено, что в окалине на расплавах In–Sn при малом содержании в исходном сплаве индия содержится  $\text{In}_2\text{O}_3$ , в то время как олово в окалине появляется только при содержании в исходном сплаве более 40 ат. % олова.

Особенности на температурной зависимости  $\sigma$  могут быть обусловлены и десорбцией поверхностно активного олова. С увеличением температуры сосредоточенные преимущественно в поверхностном слое атомы олова десорбируются. Это приводит к росту значения  $\sigma$ , что оказывает заметное влияние на температурный коэффициент  $\sigma$ . Десорбцией поверхностноактивного компонента объясняются авторами [19] особенности концентрационной зависимости температурного коэффициента  $\sigma$  эвтектических систем.

С учетом нелинейности политерм  $\sigma$  нами, наряду с коэффициентами аппроксимирующего уравнения, в табл. 2 приведены и значения  $\sigma$  изученных сплавов.

Изотермы  $\sigma$  в системе индий–олово приведены на рис. 1, откуда видно, что они характеризуются непривычным для идеальных расплавов пологим минимумом вблизи эквимолярного состава.

Согласно этим результатам (рис. 1), олово и индий, проявляют взаимную поверхностную активность.

Как и следовало ожидать, с ростом температуры изотермы  $\sigma$  приближаются к идеальным, т.е. глубина минимума уменьшается. При этом экспериментально обнаружено некоторое смещение положения минимума на оси составов в сторону сплавов, обогащенных индием.

Исходя из вышеизложенного, нами дополнительно изучено  $\sigma$  разбавленных расплавов этой системы методом большой капли. Эти исследования позволили определить знак и значение предельной поверхностной активности индия на олове, что в свою очередь подтверждает вывод о наличии минимума на изотермах ПН этой системы. Индий должен повышать ПН олова, так как значение ПН индия выше, чем у олова. Только при наличии минимума на изотермах ПН двойной системы индий–олово индий может понижать значение ПН олова, т.е. проявить поверхностную активность.

Таким образом, для решения вопроса о наличии минимума на изотермах ПН двойной системы индий–олово нет необходимости проводить трудоемкие опыты по повторному измерению ПН расплавов в широкой области составов. Для этого вполне достаточно изучить область сильного разбавления индия в олове. Точное определение предельной поверхностной активности индия на олове позволит выяснить наличие или отсутствие минимума на изотермах ПН.

Исходя из вышеизложенного, нами методом большой капли экспериментально измерены температурные зависимости  $\rho$  и  $\sigma$  разбавленных расплавов Sn–In в широком интервале температур. Не останавливаясь подробно на конструктивных особенностях прибора и методике проведения измерений  $\sigma$  и  $\rho$ , которые подробно описаны в работе [2], отметим, что для обработки профиля капли использован автоматизированный программный комплекс.

Нами экспериментально были определены температурные зависимости плотности и  $\sigma$  чистых металлов: олова (марки ОВЧ), индия (марки Индий-00) и расплавов олово-индий при содержании индия {0.01; 0.10 ат. %}.

Исследованные сплавы бинарной системы индий–олово были приготовлены в Физико-техническом институте низких температур им. Б.И. Веркина (г. Харьков, Украина).

Полученные экспериментальные данные показывают, что температурные зависимости плотности и  $\sigma$  всех изученных сплавов линейные с отрицательными температурными коэффициентами.

Предельная поверхностная активность компонента в бинарных системах определяется выражением

$$G_{0i} = \lim_{x_i \rightarrow 0} \left( \frac{\partial \sigma}{\partial x_i} \right)_T, \quad (2)$$

которое характеризует влияние малых добавок  $i$ -го компонента (примеси) на  $\sigma$  основного компонента (растворителя).

Как видно из рис. 2, небольшие добавки индия заметно снижают ПН олова ( $G_{In} = 4933$  мН/м).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты экспериментальных исследований зависимости  $\sigma$  расплавов индий–олово от состава и температуры двумя независимыми методами: методом максимального давления в капле (во всей области составов) и методом большой капли (в области, прилегающей к олову) показали, что изотермы  $\sigma$  двойных систем

индий—олово характеризуются пологими минимумами в области близких к эквипотенциальному. Глубина минимума на изотермах  $\sigma$  с увеличением температуры уменьшается и положение минимума на оси составов смещается в сторону чистого олова.

Результаты измерения плотности расплавов индий—олово ареометром показали, что изотермы молярных объемов при 523 К, вычисленные по этим значениям плотности, близки к аддитивным прямым и только в области близких к эквипотенциальному молярные объемы имеют небольшие положительные отклонения от аддитивных значений.

С увеличением температуры изотермы молярных объемов приближаются к аддитивным прямым.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субботин В.И. Жидкометаллические носители в ядерной энергетике // В сб.: Материалы докладов Российской межотраслевой конференции “Тепломассообмен и свойства жидких металлов”. Обнинск: ФЭИ, 2002. **1**. С. 15–16.
2. Дадашев Р.Х., Кутуев Р.А., Созаев В.А. Поверхностные свойства сплавов на основе свинца, олова, индия, кадмия. М.: Физматлит, 2016.
3. Keene B.J. The surface tension of tin and its alloys with particular reference to solders, DMM(A) 113, National Physical Laboratory Teddington, 1993. P. 131.
4. Кононенко В.Н., Яценко С.И., Сухман Л.Я. Поверхностные свойства сплавов. In–Ga и In–Sn // ЖФХ. 1972. **46**. С. 1589–1590.
5. Tanaka T. et al. Measurement of surface tension of liquid Ga-base alloys by a sessile drop method // Z. Metallkd. 2001. **92**. P. 1242–1246.
6. Predel B., Eman A. Die Volumenänderung bei der bildung flüssiger legierungen des systems Ga–Sn, Ga–In, In–Bi, In–Pb, In–Sn und In–Ti // I. Less-Common Metals. 1969. **18**. P. 385–397.
7. Ковальчук В.Ф., Кузнецов Б.А. Поверхностное натяжение сплавов индий—олово и таллий—свинец // Поверхностные явления в расплавах. Киев: Наукова думка. 1968. С. 187–191.
8. Ибрагимов Х.И., Дадашев Р.Х. Комбинированный прибор для измерения поверхностного натяжения, работы выхода электрона и плотности жидких металлов и сплавов // К изучению поверхностных явлений в металлических расплавах. Орджоникидзе: Изд-во СОГУ, 1989. С. 68–71.
9. Шебзухов А.А., Ашхотов О.Г. Исследование ближнего порядка на поверхности жидких растворов индий—галлий и индий—олово // Доклады Академии наук СССР. 1984. **274**. № 6. С. 1427.
10. Guo Z., Hindler M., Yuan W., Mikula A. The density and surface tension of In–Sn and Cu–In–Sn alloys Monatsh // Chem. 2011. **142**. P. 579–584.
11. Z. Moser W. Gaşior J. Pstrús. I. Kaban W. Hoyer thermophysical properties of liquid In–Sn alloys // Int. J. Thermophys. 2009. **30**. P. 1811–1822.
12. Novakovic R., Giuranno D., Ricci E., Lanata T. Surface and transport properties of In–Sn liquid alloys // Surface Science. 2008. **602**. P. 1957–1963.
13. Liu X.J., Inohana, Y., Takaku, Y., Ohnuma, I., Kainuma R., Ishida K., Moser Z., Gasior W., Pstrus J. Experimental determination and thermodynamic calculation of the phase equilibria and surface tension in the Sn–Ag–In system // J. Electronic Materials. 2002. **31**. № 11. P. 1139–1151.
14. Lee V.J., Oh C.S., Shim J.S. Thermodynamic assessments of the Sn–In and Sn–Bi binary systems // J. Electronic Materials. 1996. **25**. № 6. P. 983–991.
15. Дадашев Р.Х. Термодинамика поверхностных явлений. 2-е изд. испр. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.
16. Ибрагимов Х.И., Покровский Н.Л., Пугачевич П.П. О некоторых методических вопросах измерения поверхностного натяжения металлических расплавов // Поверхностные явления в расплавах и возникающих из них твердых фазах. Нальчик: КБГУ. 1965. С. 198–210.
17. Ибрагимов Х.И., Саввин В.С. Приборы для совместного измерения плотности, поверхностного натяжения и работы выхода электрона жидких металлических растворов // Методы исследования и свойства границ раздела контактирующих фаз. Киев: Наукова думка, 1977. С. 40–46.
18. Дадашев Р.Х., Ибрагимов Х.И., Юшаев С.М. Поверхностные свойства расплавов индий—олово и таллий—висмут // Изв. вузов. Цветная металлургия. 1984. № 1. С. 121–122.
19. Дадашев Р.Х., Алчагиров Б.Б., Элимханов Д.З., Талхигова Х.С., Дадашева З.И. Температурная зависимость поверхностного натяжения эвтектического сплава // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2020. **26**. № 1. С. 124–132.

## SURFACE TENSION AND DENSITY OF INDIUM–TIN MELTS AND THEIR DEPENDENCE ON COMPOSITION AND TEMPERATURE

**R. Kh. Dadashev<sup>1, 2</sup>, R. A. Kutuev<sup>1, 3</sup>, D. Z. Elimkhanov<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Chechen State University named after A.A. Kadyrova, Grozny, Russia*

<sup>2</sup>*Complex Research Institute named after H.I. Ibragimova, Grozny, Russia*

<sup>3</sup>*Academy of Sciences of the Chechen Republic, Grozny, Russia*

The paper presents the results of measuring the surface tension ( $\sigma$ ) and density ( $\rho$ ) of indium-tin melts. The measurements of  $\sigma$  and  $\rho$  were carried out by different methods. The surface tension was measured by the sessile drop method and the maximum pressure in the droplet, while the density was measured by the areometer and sessile drop methods. High-purity metals In-00, tin – VHF were used for research. The maximum measurement error  $\sigma$  is 0.8%, and  $\rho$  is 0.2%. The dependence of  $\sigma$  of In–Sn melts on the composition is characterized by an extremum (flat minimum) in the region of equimolar composition. As the temperature increases, the depth of the minimum decreases, and its position shifts towards pure indium. Molar volumes have small positive deviations from additive values. As the temperature increases, the molar volumes approach additive values. The sessile drop method was used to measure the temperature dependences of  $\sigma$  and  $\rho$  of In–Sn solutions diluted with indium. It has been shown that indium additives lower the surface tension of tin. Given that the value of the surface tension of indium is higher than that of tin, this result indicates that the surface tension isotherms of the indium-tin system must pass through a minimum.

*Keywords:* surface tension, density, binary systems, surface tension isotherms

### REFERENCES

1. Subbotin V.I. Zhidkometallicheskie nositeli v yadornoj energetike [Liquid metal carriers in nuclear power engineering] // *Materialy dokladov Rossijskoj mezhotraslevoj konferencii “Teplomassoobmen i svoystva zhidkih metallov”*. Obninsk: FEI, 2002. **1**. P. 15–16. [In Russian].
2. Dadashev R.H., Kutuev R.A., Sozaev V.A. Poverhnostnye svoystva splavov na osnove svinca, olova, indiya, kadmiya [Surface properties of alloys based on lead, tin, indium, cadmium]. Moscow: Nauka, 2016. [In Russian].
3. Keene B.J. The surface tension of tin and its alloys with particular reference to solders, DMM(A) 113, National Physical Laboratory Teddington, 1993. P. 131.
4. Kononenko V.N., Yacenko S.I., Suhman L.YA. Poverhnostnye svoystva splavov. In–Ga i In–Sn [Surface properties of alloys. In–Ga and In–Sn] // *ZHFH*. 1972. **46**. P. 1589–1590. [In Russian].
5. Tanaka T. et al. Measurement of surface tension of liquid Ga-base alloys by a sessile drop method // *Z. Metallkd.* 2001. **92**. P. 1242–1246.
6. Predel B., Eman A. Die Volumenanderung bei der bildung flussiger legierungen des systems Ga–Sn, Ga–In, In–Bi, In–Pb, In–Sn und In–Tl // *I. Less-Common Metals*. 1969. **18**. P. 385–397.
7. Koval’chuk V.F., Kuznecov B.A. Poverhnostnoe natyazhenie splavov indij-olovo i tallij-svinec [Surface tension of indium-tin and thallium-lead alloys] // *Poverhnostnye yavleniya v rasplavah*. Kiev: Naukova dumka. 1968. P. 187–191.
8. Ibragimov H.I., Dadashev R.H. Kombinirovannyj pribor dlya izmereniya poverhnostnogo natyazheniya, raboty vyhoda elektrona i plotnosti zhidkih metallov i splavov [Combined instrument for measuring surface tension, electron work function and density of liquid metals and alloys] // *K izucheniyu poverhnostnyh yavlenij v metallicheskih rasplavah*. Ordzhonikidze: Izd-vo SOGU. 1989. P. 68–71. [In Russian].
9. Shebzuhev A.A., Ashkhotov O.G. Issledovanie blizhnego poryadka na poverhnosti zhidkih rastvorov indij–gallij i indij–olovo [Investigation of the short-range order on the surface of liquid solutions of indium–gallium and indium–tin] // *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1984. **274**. № 6. P. 1427. [In Russian].
10. Guo Z., Hindler M., Yuan W., Mikula A. The density and surface tension of In–Sn and Cu–In–Sn alloys *Monatsh // Chem*. 2011. **142**. P. 579–584.
11. Z. Moser W. Gaşior J. Pstrús. I. Kaban W. Hoyer thermophysical properties of liquid In–Sn alloys // *Int. J. Thermophys.* 2009. **30**. P. 1811–1822.
12. Novakovic R., Giuranno D., Ricci E., Lanata T. Surface and transport properties of In–Sn liquid alloys // *Surface Science*. 2008. **602**. P. 1957–1963.

13. Liu X.J., Inohana, Y., Takaku, Y., Ohnuma, I., Kainuma R., Ishida K., Moser Z., Gasior W., Pstrus J. Experimental determination and thermodynamic calculation of the phase equilibria and surface tension in the Sn–Ag–In system // *J. Electronic Materials*. 2002. **31**. № 11. P. 1139–1151.
14. Lee B.J., Oh C.S., Shim J.S. Thermodynamic assessments of the Sn–In and Sn–Bi binary systems // *J. Electronic Materials*. 1996. **25**. № 6. P. 983–991.
15. Dadashev R.H. *Termodinamika poverhnostnyh yavlenij* [Thermodynamics of surface phenomena] M.: Nauka. 2008. [In Russian].
16. Ibragimov H.I., Pokrovskij N.L., Pugachevich P.P. O nekotoryh metodicheskikh voprosah izmereniya poverhnostnogo natyazheniya metallicheskih rasplavov [On some methodological issues of measuring the surface tension of metal melts] // *Poverhnostnye yavleniya v rasplavah i vznikayushchih iz nih tverdyh fazah. Nal'chik: KBGU*. 1965. P. 198–210. [In Russian].
17. Ibragimov H.I., Savvin B.C. Pribory dlya sovmestnogo izmereniya plotnosti, poverhnostnogo natyazheniya i raboty vyhoda elektrona zhidkih metallicheskih rastvorov [Devices for combined measurement of density, surface tension and work function of an electron in liquid metallic solutions] // *Metody issledovaniya i svojstva granic razdela kontaktiruyushchih faz. Kiev: Naukova dumka*. 1977. P. 40–46. [In Russian].
18. Dadashev R.H., Ibragimov H.I., YUshaev S.M. Poverhnostnye svojstva rasplavov indij-olovo i tallij-vismut [Surface properties of indium-tin and thallium-bismuth melts] // *Izv. vuzov. Cvetnaya metallurgiya*. 1984. № 1. P. 121–122. [In Russian].
19. Dadashev R.H., Alchagirov B.B., Elimhanov D.Z., Talhigova H.S., Dadasheva Z.I. [Temperatur-naya zavisimost' poverhnostnogo natyazheniya evtecticheskogo splava Temperature dependence of the surface tension of the eutectic alloy] // *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020. **26**. № 1. P. 124–132. [In Russian].