

УДК 536.6,546.655.681

В.А. Новоженев

Исследование физико-химических свойств жидких сплавов РЗМ с галлием

Сплавы редкоземельных металлов с галлием обладают разнообразными физико-химическими свойствами как в компактном [1–4], так и в тонкопленочном состоянии. Но многие их физические и химические свойства не изучены. Так, достаточно слабо исследованы термодинамические свойства сплавов, особенно в твердом состоянии.

Вследствие большого различия в атомных и электрохимических характеристиках атомов металлов [5] растворимость РЗМ в галлии незначительна. Это хорошо видно из графика растворимости Даркена и Гурри, построенного нами для галлия (рис. 1).

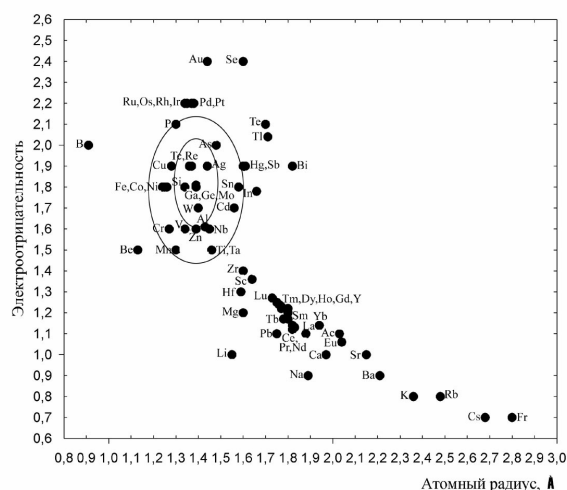


Рис. 1. График растворимости для галлия

РЗМ находятся вне эллипсов графиков растворимости галлия. По данным различных авторов, растворимость РЗМ в галлии составляет несколько атомных процентов [6–14] (табл. 1). Зависимости растворимости РЗМ в галлии при различных температурах, построенные по данным работ [6–14, 17] приведены на рисунках 2 и 3.

Исследованиям термодинамических характеристик сплавов РЗМ с галлием посвящено много работ [8–14, 16–18], но большинство работ проводили в области жидких сплавов при достаточно высоких температурах. Для РЗМ цериевой подгруппы жидкие сплавы с галлием изучали в работах [9]. Нами такие исследования проводились для жидкометаллических систем самария, европия, гадолиния,

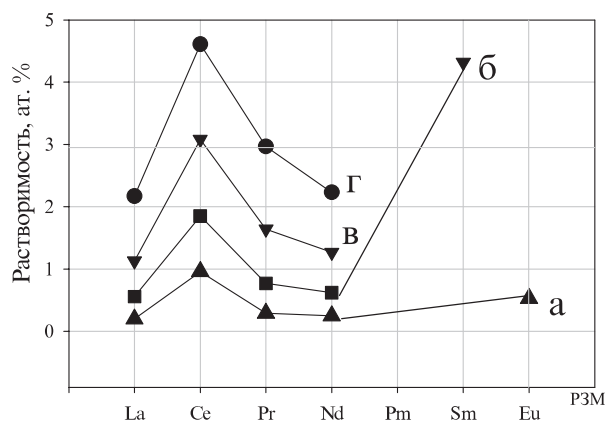


Рис. 2. Изменение растворимости РЗМ цериевой подгруппы по ряду при 673 (а), 773 (б), 873 (в) и 973 (г) К

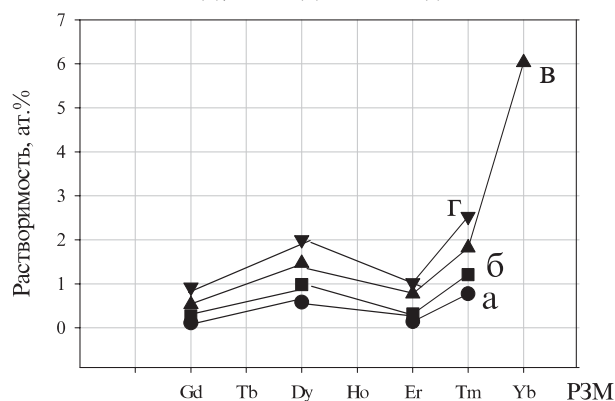


Рис. 3. Изменение растворимости РЗМ иттриевой подгруппы по ряду при 673 (а), 773 (б), 873 (в) и 973 (г) К

диспрозия, эрбия и тулия с галлием [10, 11, 12]. В [8, 13, 14] приведены результаты исследования жидких сплавов европия, гольмия и лютеция с галлием. Средние коэффициенты активности РЗМ в жидких сплавах с галлием даны в таблице 2. Зависимости активности РЗМ в сплавах с галлием показаны на рисунках 4–7.

Температурные зависимости величин избыточного изобарно-изотермического потенциала РЗМ в сплавах с галлием по данным работ [8, 9–14] описываются следующими уравнениями:

$$\Delta \bar{G}_{La(me.)}^{изб.} = -251,3 + 0,091T \pm 0,1 \text{ кДж/моль ат.}$$

$$\Delta \bar{G}_{Ce(me.)}^{изб.} = -290,5 + 0,145T \pm 0,8 \text{ кДж/моль ат.}$$

Растворимость редкоземельных металлов в галлии

РЗМ	Т, К	%, ат. %	РЗМ	Т, К	%, ат. %
Sc [6]	673	0,77	Eu	900	0,52[13]; 2,6 [8]
	773	2,55		1000	0,85[13]; 4,17 [8]
	873	6,41		1100	1,25[13]; 6,14 [8]
Y [6]	673	0,29	Gd	673	0,11
	773	0,84		773	0,27
	873			873	0,53
La [17]	673	0,27		973	0,92
	725	0,34	Tb [7]	673	0,38
	775	0,55		773	0,66
	875	1,18		873	1,0
La[9]	675	0,20	Dy	673	0,58
	775	0,56		773	0,98
	875	1,13		873	1,47
	975	2,16		973	2,0
	975	2,17	Ho [14]	673	0,66
Ce[7]	873	3,8		773	1,06
Ce [9]	675	0,96		873	1,53
	775	1,85	Er	673	0,14
	875	3,08		773	0,31
	975	4,61		873	0,77
Pr[9]	675	0,29		973	1,02
	775	0,77	Tm	673	0,77
	875	1,64		773	1,21
	975	2,97		873	1,82
Nd[9]	675	0,25		973	2,53
	775	0,62	Yb[7]	673	1,76
	875	1,27		773	3,51
	975	2,23		873	6,03
Sm[7]	673	0,37	Lu [7]	673	0,005
	773	1,48		773	0,014
	873	4,32		873	0,030
Eu	673	0,53			
	773	1,19			
	873	2,24			

$$= -259,9 + 0,102T \pm 0,4 \text{ кДж/моль ат;}$$

$$\Delta \bar{G}_{Nd(me.)}^{изб.} = -264,2 + 0,110 T \pm 0,2 \text{ кДж/моль ат;}$$

$$\Delta \bar{G}_{Ho}^{изб.} = -211,4 + 84,3 \cdot 10^{-3} T \text{ кДж/моль ат в интервале температур 660–887 К;}$$

$$\Delta \bar{G}_{Gd(me.)}^{изб.} \pm 1,3 = (-368,2 \pm 4,2) + (0,63 \pm 0,001) T \text{ кДж/моль ат;}$$

$$\Delta \bar{G}_{Dy(me.)}^{изб.} \pm 4,2 = (-313,8 \pm 25,1) + (0,045 \pm 0,006) T \text{ кДж/моль ат;}$$

$$\Delta \bar{G}_{Er(me.)}^{изб.} \pm 4,2 = (-251,0 \pm 16,7) + (0,0354 \pm 0,0044) T \text{ кДж/моль ат;}$$

$$\Delta \bar{G}_{Tm(me.)}^{изб.} \pm 4,2 = (-288,7 \pm 33,5) + (0,0474 \pm 0,0097) T \text{ кДж/моль ат;}$$

$$\Delta \bar{G}_{Lu(me.)}^{изб.} = -139,1 + 11200T \text{ кДж/моль ат.}$$

Обсуждение результатов

Галлий по электронной конфигурации отличается от алюминия. Предвнешний кайно-симметричный 3d-электронный подуровень полностью заполнен. Это приводит к тому, что на атомные характеристики галлия оказывает сильное влияние 3d-сжатие. Увеличивается первый потенциал ионизации, электроотрицательность, уменьшается радиус атома [1]. Все это

Таблица 2

Средние коэффициенты активности РЗМ в сплавах с галлием
(стандартное состояние твердый и переохлажденный жидкий РЗМ) [9, 10, 11, 12]

РЗМ	Коэффициенты активности			
	673 К	773 К	873 К	973 К
La _(ТВ.)	$8,1 \cdot 10^{-16}$	$2,9 \cdot 10^{-12}$	$2,8 \cdot 10^{-11}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
Ce _(ТВ.)	$8,1 \cdot 10^{-16}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$	—	—
Pr _(ТВ.)	$1,6 \cdot 10^{-15}$	$7,3 \cdot 10^{-13}$	$6,6 \cdot 10^{-11}$	$8,6 \cdot 10^{-9}$
Nd _(ТВ.)	$2,0 \cdot 10^{-15}$	$9,5 \cdot 10^{-13}$	$9,8 \cdot 10^{-11}$	$4,0 \cdot 10^{-9}$
Sm _(ТВ.)		$2,4 \cdot 10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Eu _(ТВ.)		$0,17 \cdot 10^{-10}$	$0,74 \cdot 10^{-9}$	$0,12 \cdot 10^{-6}$
La _(Ж.)	$4,1 \cdot 10^{-16}$	$1,8 \cdot 10^{-13}$	$2,0 \cdot 10^{-11}$	$8,9 \cdot 10^{-10}$
Ce _(Ж.)	$4,2 \cdot 10^{-16}$	$9,2 \cdot 10^{-13}$	—	—
Pr _(Ж.)	$7,5 \cdot 10^{-16}$	$4,3 \cdot 10^{-13}$	$4,5 \cdot 10^{-11}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$
Nd _(Ж.)	$9,1 \cdot 10^{-16}$	$5,2 \cdot 10^{-13}$	$6,6 \cdot 10^{-11}$	$3,1 \cdot 10^{-9}$
Dy _(ТВ.)	$3,3 \cdot 10^{-15}$	$4,6 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$
Er _(ТВ.)	$1,7 \cdot 10^{-12}$	$6,2 \cdot 10^{-10}$	$5,9 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Tm _(ТВ.)	$1,9 \cdot 10^{-11}$	$9,7 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$
Gd _(Ж.)	$3,0 \cdot 10^{-16}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$2,4 \cdot 10^{-9}$	$5,8 \cdot 10^{-7}$
Dy _(Ж.)	$3,8 \cdot 10^{-16}$	$9,1 \cdot 10^{-13}$	$3,7 \cdot 10^{-10}$	$4,3 \cdot 10^{-8}$
Er _(Ж.)	$4,7 \cdot 10^{-13}$	$2,2 \cdot 10^{-10}$	$2,4 \cdot 10^{-8}$	$9,5 \cdot 10^{-6}$
Tm _(Ж.)	$2,4 \cdot 10^{-11}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$

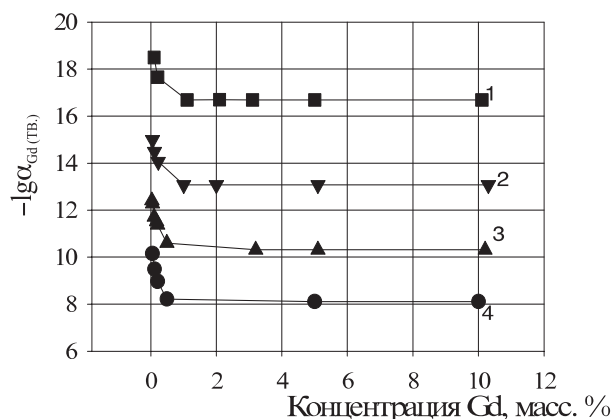


Рис. 4. Зависимость активности гадолиния в жидком сплаве с галлием от содержания Gd при температурах: 1 – 673; 2 – 773; 3 – 873; 4 – 973 (ст. сост. твердый металл)

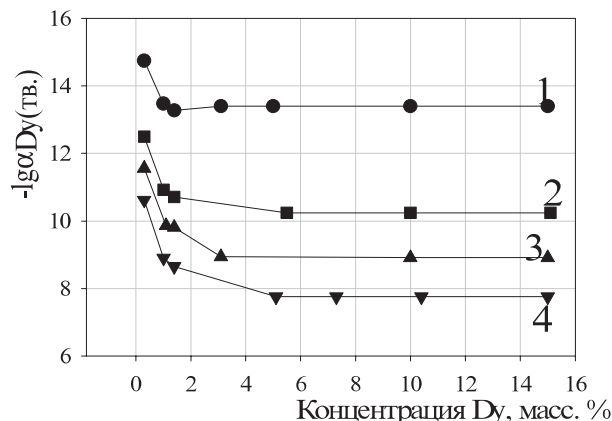


Рис. 5. Зависимость логарифма активности диспрозия в жидком сплаве с галлием при температурах: 1 – 773; 2 – 873; 3 – 923; 4 – 973 (ст. сост. твердый металл)

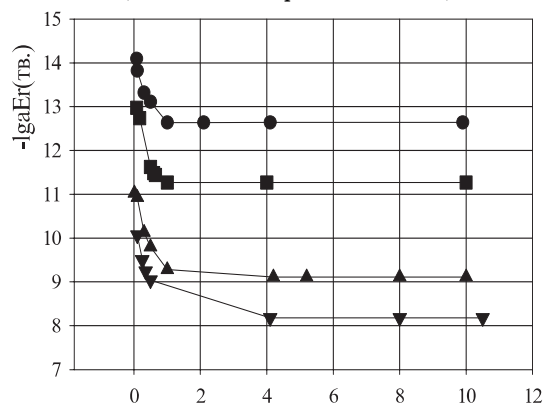


Рис. 6. Зависимость активности эрбия в сплавах с галлием от концентрации при температурах: 1 – 723; 2 – 773; 3 – 873; 4 – 923 (ст. сост. твердый РЗ металл)

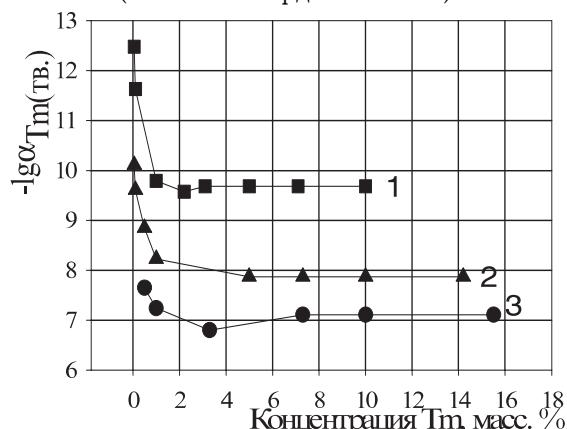


Рис. 7. Зависимость активности тулия в жидких сплавах с галлием при температурах: 1 – 773; 2 – 873; 3 – 923; 4 – 973 (ст. сост. твердый РЗМ)

приводит к тому, что галлий уже в свободном состоянии резко отличается от алюминия. В узлах кристаллической решетки галлия содержатся молекулы Ga_2 , что обуславливает очень низкую температуру плавления – 302,78 К (температура плавления алюминия 933 К). Основные свойства галлия выражены слабее, чем у алюминия.

Вследствие легкого перехода галлия в жидкое состояние взаимодействие его с РЗМ начинается при более низкой температуре – 523 К, а для европия, самария и иттербия температуры начала взаимодействия с галлием лежат в интервале 453–460 К. На температуру взаимодействия оказывает значительное влияние дисперсность и чистота исходных металлов [15].

Состав продуктов в основном близок к составу металллов в системах РЗМ – алюминий: LnGa_4 , LnGa_3 , LnGa_2 , LnGa , Ln_3Ga_3 , Ln_3Ga . Но наличие в структуре металлического галлия группировок Ga_2 , сохраняющихся и в жидком состоянии, приводит к образованию металллов LnGa_6 , и, возможно, LnGa_8 .

Так же, как в системах с алюминием, РЗМ образуют с галлием одно или два интерметаллических соединения с конгруэнтной точкой плавления: LnGa_2 и LnGa . Металллы другого состава образуются по перитектическим реакциям. Металллы состава LnGa_6 и LnGa_4 образуются при достаточно мягких условиях, так как имеют небольшие температурные интервалы устойчивости, могут разлагаться даже при растрении с выделением галлия. У европия и иттербия металллы LnGa_4 более устойчивы.

Вследствие резкого отличия атомных характеристик галлия от алюминия, РЗМ растворяются в нем незначительно (табл. 1). Растворимость в алюминии значительно выше. Эвтектика со стороны галлия сдвинута к температуре плавления чистого галлия.

Растворимость в галлии определена не для всех РЗМ. Для многих РЗМ получены достаточно противоречивые данные. Так, для европия в работе [13] получена растворимость при температурах 900, 1000 и 1100 К, равная 0,52; 0,85; 1,25 ат.% соответственно, а в работе [8] растворимость европия при тех же условиях составляет 2,6; 4,17; 6,14 ат.% соответственно. Аналогичные расхождения наблюдаются и для растворимости других РЗМ в галлии. Такие расхождения результатов можно объяснить различной чистотой металлов, используемых в работах, особенно в более ранних. Кроме того, большинство результатов по раствори-

мости РЗМ в галлии, да и в других р-металлах III группы, получено с помощью метода эдс при высоких температурах, которые достаточно трудно поддерживать постоянными длительное время эксперимента. Это могло приводить к разбросу данных по растворимости в интервалах больше, чем допускается погрешностью эксперимента. Ведь изменение температуры даже в несколько градусов, в соответствии с правилом Вант-Гоффа, может привести к увеличению или уменьшению скорости реакции в значительных пределах.

Растворимость РЗМ в галлии увеличивается с повышением температуры для всех РЗМ (рис. 2–7). Но по ряду РЗМ изменение растворимости не является монотонным. Наблюдаются четкие пики растворимости тех РЗМ, которые обладают способностью изменять степень окисления, особенно при высоких температурах: Ce, Sm, Eu, Dy, Tm и Yb. Наименьшие растворимости в своих подгруппах (цериевой или иттриевой) имеют лантан и гадолиний, в электронных структурах которых присутствуют d-электроны.

Нами и в [10] проведено исследование методом эдс сплавов галлия с самарием и европием и с РЗМ иттриевой группы, а в [9] – цериевой (La, Ce, Pr, Nd), в [13, 14] исследованы жидкие сплавы европия и гольмия с галлием. Установка и методика исследования описана в [10, 11].

Термодинамические свойства гомогенных сплавов галлия с РЗМ изучены в пределах концентрации до 0,01–15 масс.% РЗМ в галлии. Растворение РЗМ в галлии сопровождается уменьшением парциальной молярной энтальпии и энтропии. Избыточный парциальный изобарный потенциал имеет низкое отрицательное значение. Низкие отрицательные величины термодинамических характеристик жидких сплавов указывают на интенсивное взаимодействие галлия с РЗМ, что согласуется с работами многих авторов, где рассмотрено взаимодействие с галлием [7–18]. Сплавы РЗМ с галлием показали большие отрицательные отклонения от идеальных растворов. Отрицательные значения избыточных энтропий свидетельствуют о том, что парциальные энтропии значительно меньше идеальных энтропий смешения. Это в свою очередь указывает на сильное межатомное взаимодействие, которое является причиной образования интерметаллических соединений. Коэффициенты активности РЗМ в галлии при содержании РЗМ до концентрации соответствующей области насыщенных растворов, остаются близкими при данной температуре. Отрицательные отклоне-

ния термодинамических величин также связаны с тенденцией компонентов к образованию интерметаллических соединений.

Исследования термодинамических характеристик жидких сплавов металлов проведены методом эдс при температурах 673–1000 К. Большие отрицательные значения энтальпий и энергий Гиббса образования для этих температур дают возможность полагать, что структурные группы ближнего порядка интерметаллических соединений в изученных системах сохраняются и в жидком состоянии. Низкие величины коэффициентов активности $\text{Ln} - \text{Ga}$ сплавов (табл. 2) тоже подтверждают сильное межатомное взаимодействие компонентов сплава. На образование в растворе $\text{Ln} - \text{Ga}$ упорядоченных группировок разнородных атомов указывает отрицательное изменение относительной избыточной энтропии (рис. 10). Коэффициенты активности с повышением температуры возрастают. Значения коэффициентов активности по ряду от лантана к лютецию увеличиваются. Область гомогенных растворов, как видно на рисунках 4–7, характеризуется наклонными прямыми.

Общая теоретическая зависимость между физико-химическими свойствами исходных металлов-компонентов и термодинамическими свойствами сплавов в настоящее время еще окончательно не установлена. На уменьшение энтропии смещения влияет сильное взаимодействие атомов компонентов, а на ее увеличение – различие в размерах этих атомов. На термодинамические свойства сплавов металлов влияют следующие факторы: различие в размерах атомов компонентов, различие электроотрицательности компонентов и валентность компонентов [19, 20]. Так, различие в размерах атомов компонентов способствует увеличению значений избыточных мольных термодинамических функций смещения, а различие электроотрицательности металлов компонентов – их уменьшению. Однако эти закономерности во многих системах не соблюдаются. Для системы галлий – РЗМ различие в размерах атомов значительно. Металлический радиус галлия $1,39\text{\AA}$, а радиус РЗМ изменяется от La к Lu в пределах $1,877\text{--}1,734\text{\AA}$ [21]. Следовательно, разница между атомными радиусами РЗМ цериевой группы и галлием больше, чем между РЗМ иттриевой группы. Поэтому система более упорядоченная для цериевой группы, чем для иттриевой. На это же указывают большие величины термодинамических характеристик в жидких сплавах РЗМ цериевой подгруппы, чем для иттриевой.

Для жидких систем металлов делают попытки установить зависимость между значениями избыточных мольных термодинамических функций смешения жидких фаз и положением металлов – компонентов в периодической системе элементов.

При изучении взаимодействия галлия с РЗМ в жидких сплавах можно наблюдать некоторые закономерности. Так, зависимость коэффициентов активности РЗМ в сплавах с галлием от порядкового номера имеет пилообразный характер, что согласуется с изменением разности электроотрицательностей и первого потенциала ионизации от величины атомного номера. Потенциал ионизации изменяется немонотонно с изменением электронной конфигурации атомов металлов. Зависимость первого потенциала ионизации от порядкового номера элемента приведена на рисунке 8.

Термодинамические характеристики взаимодействия европия и самария с галлием для жидких гомогенных сплавов взяты из работы [12]. Эти величины использованы при построении графиков зависимости коэффициентов активности, изменения парциальной молярной энтальпии, избыточных парциальных молярных энтропий и изобарно-изотермического потенциала от порядкового номера РЗМ в ряду La – Lu для жидких гомогенных $\text{Ln} - \text{Ga}$ растворов (рис. 9–11). Коэффициенты активности РЗМ в сплавах с галлием по ряду увеличиваются, исключение составляют Eu, Yb и диспрозий.

Сравним термодинамические характеристики для жидких сплавов цинка и галлия с эрбием. Значения коэффициентов активности для этих систем в пределах порядка удовлетворительно согласуются между собой. Так, при температуре 773 К для сплавов $\text{Zn} - \text{Er}$ $\gamma = 2,4 \cdot 10^{-11}$, изменение избыточной парциальной энергии Гиббса – $157,3$ кДж/моль ат [18], а для системы $\text{Ga} - \text{Er}$ $\gamma = 1,9 \cdot 10^{-10}$, $\Delta G = -142,3$ кДж/моль ат. Значения изменения избыточной парциальной энтропии и теплоты смешения для системы $\text{Zn} - \text{Er}$ $\Delta \bar{S}^{\text{изб.}} = -205,0$ Дж/моль атК, $\Delta \bar{H} = -315,5$ кДж/моль ат. [22], у сплавов $\text{Ga} - \text{Er}$ $\Delta \bar{S}^{\text{изб.}} = -188,3$ Дж/моль атК, $\Delta \bar{H} = -292,9$ кДж/моль ат. Из сравнения этих данных видим, что термодинамические величины обеих систем незначительно отличаются друг от друга. Избыточная мольная энтропия образования сплавов, содержащих переходные металлы, как правило, меньше, чем этого следовало ожидать,

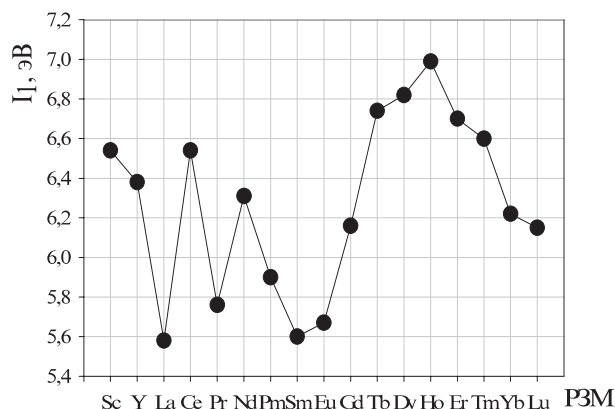


Рис. 8. Изменение потенциалов ионизации редкоземельных элементов по ряду

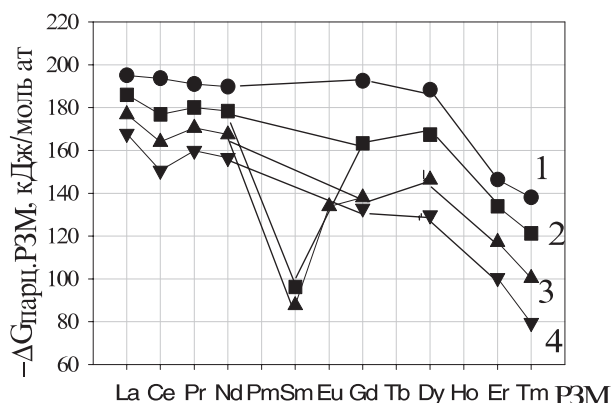


Рис. 9. Изменение парциальных величин изобарно-изотермического потенциала РЗМ в сплавах с галлием по ряду:
1 – 673, 2 – 773, 3 – 873, 4 – 973 К
(ст. сост. тв. РЗМ)

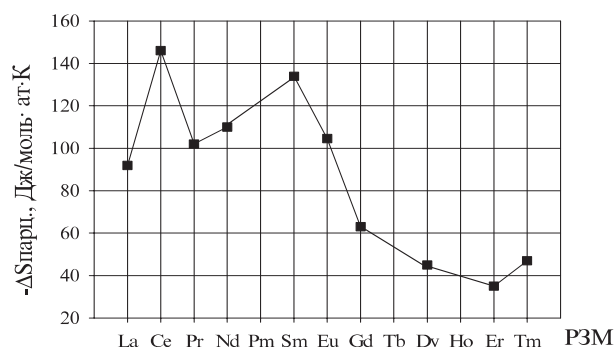


Рис. 10. Изменение величины парциальной молярной энтропии смешения РЗМ с галлием по ряду РЗМ

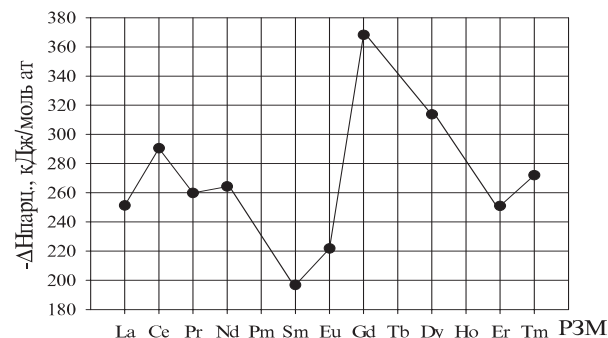


Рис. 11. Изменение величины парциальной молярной энтальпии смешения РЗМ с галлием по ряду РЗМ

исходя из одной только упорядоченности расположения атомов компонентов в кристаллической решетке. Вышеуказанные исключения можно объяснить электронным строением РЗМ. Появление степени окисления 2^+ и 4^+ связано с электронными конфигурациями. Электронные конфигурации f^0 , f^7 , f^{14} отличаются особой устойчивостью. Конфигурация f^0 объясняет существование Ce^{4+} , f^7 – существование Eu^{2+} и Tb^{4+} , а f^{14} – Yb^{2+} . Однако заселение f-орбиталей, близких к вакантным, наполовину заполненным или полностью заполненным орбиталям, также могут благоприятствовать устойчивости. Так, Pr^{4+} имеет конфигурацию f^1 , Sm^{2+} – конфигурацию f^6 , Dy^{4+} – f^8 , Tm^{2+} – f^{13} . Есть мнение, что 4f-электроны непосредственно не участвуют в образовании химической связи в соединениях, но за счет $f \rightarrow d$ – переходов могут принимать в этом участие. В работе [23] на примере РЗМ в отношении электронов f-оболочки показано, что электроны, находящиеся на более глубоких оболоч-

ках, по-видимому, оказывают определенное влияние на поведение металлов при их сплавлении. Высказывается предположение, что на образование химических соединений оказывают влияние не только валентные, но и более глубокие электронные уровни [23].

Многие свойства РЗМ в зависимости от атомного номера обнаруживают плавное уменьшение или возрастание, исключение составляют европий и иттербий. Такой сложный ход кривых наблюдается в изменении плотности РЗМ, температуры плавления, коэффициентов термического расширения и т.д. Но не все свойства изменяются монотонно в зависимости от атомного номера элемента: например, изменения электросопротивления, потенциалов ионизации, магнитной восприимчивости не монотонны. Предполагают, что это связано с влиянием 4f-электронов [23].

Величина изменения относительной избыточной парциальной молярной энергии Гиббса по ряду от лантана к лутецию уменьшается.

Из исследуемых сплавов исключение составляет диспрозий, что объясняется по аналогии с церием частичным переходом в повышенное валентное состояние (IV) в некоторых сплавах. В целом для жидких сплавов РЗМ с галлием возможны отклонения от степени окисления +3, а для таких металлов, как церий,

празеодим, самарий, европий, диспрозий, тербий, тулий, иттербий, при использовании в методе эдс расплавов KCl+LiCl отклонение от степени окисления +3 подтверждено экспериментально в работах Внучковой [9], Школьниковой [10], Баянова [16].

Литература

1. Савицкий Е.М., Терехова В.Ф. Металловедение РЗМ. М., 1975.
2. Тейлор К., Дарби М. Физика редкоземельных соединений. М., 1974.
3. Тейлор К. Интерметаллические соединения редкоземельных металлов. М., 1974.
4. Яценко С.П., Федорова Е.Г. Редкоземельные элементы. Взаимодействие с р-металлами. М., 1990.
5. Даркен Л.Е., Гурри Р.В. Физическая химия металлов. М., 1960.
6. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник / Под ред. Н.П. Лякишева. М., 1996. Т. 1.
7. Яценко С.П., Аникин Ю.А., Диева Э. Растворимость редкоземельных металлов в жидком галлии // Известия АН СССР. Металлы. 1972. Т. 2.
8. Лебедев В.А., Кобер В.И., Ямщиков В.Ф. Термохимия сплавов редкоземельных и актиноидных металлов. Челябинск, 1989.
9. Внучкова Л.А. Термодинамические свойства лантана, церия, праеодима и неодима с галлием: Дис. ... канд. хим. наук. Томск, 1971.
10. Школьников Т.М. Исследование сплавов Gd, Ku, Er, Tm с галлием и равновесие металлических Sm и Tm с их хлоридами в расплавах KCl – LiCl: Дис. ... канд. хим. наук. Томск, 1974.
11. Серебренников В.В., Перов Э.И., Школьников Т.М., Новоженев В.А. Исследование состояния диспрозия в жидком галлии методом эдс // ЖФХ. 1971. Т. 45. Вып. 6.
12. Серебренников В.В., Перов Э.И., Школьников Т.М., Новоженев В.А. Исследование взаимодействия некоторых редкоземельных металлов с мышьяком и галлием и магнитных свойств сплавов при малом содержании редкоземельных металлов (0,01–1 масс. %): Научный отчет. Томск, 1969.
13. Дубинин В.А., Кобер В.И., Кочкин В.П., Распопин С.П. Термодинамические свойства жидкометаллических европий-галлиевых растворов // Известия вузов. Цветная металлургия. 1984.
14. Ямщиков Л.Ф., Лебедев В.А., Распопин С.П., Архипов П.А. Термодинамика образования жидкометаллических сплавов галлия и свинца с гольмием. // Журнал физической химии. 1986. №2.
15. Новоженев В.А. Металлохимия сплавов редкоземельных металлов с галлием // Известия АлтГУ. 1997. №1.
16. Баянов А.П. Энергетические эффекты взаимодействия редкоземельных металлов с элементами периодической системы: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. Томск, 1975.
17. Дегтярь В.А. Термодинамика взаимодействия редкоземельных металлов с р-элементами третьей группы таблицы Менделеева: Дис. ... канд. хим. наук. Томск, 1971.
18. Баянов А.П., Серебренников В.В. Изучение термодинамических свойств церия и эрбия в некоторых расплавленных металлах методом эдс // Журнал физ. химии. 1965. Т. 39. Вып. 3.
19. Григорович В.К. Металлическая связь и структура металлов. М., 1988.
20. Юм-Розери В. Введение в физическое металловедение. М., 1965.
21. Соколовская Е.М., Гузей Л.С. Металлохимия. М., 1986.
22. Евсеев А.М., Воронин Г.Ф. Термодинамика и структура жидких металлических сплавов. М., 1966.
23. Ионова Г.В., Вохмин В.Г., Спицын В.И. Закономерности изменения свойств лантанидов и актиноидов. М., 1990.