



РАХИМОВ ФАРРУХ КАЮМОВИЧ

**ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
СПЛАВОВ ЕВРОПИЯ И ИТТЕРБИЯ**

02.00.04 – физическая химия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата химических наук

Работа выполнена на кафедре «Металлургия цветных металлов» Таджикского технического университета им. акад. М.С.Осими.

Научные руководители:

Джураев Тухтасун Джураевич
доктор химических наук, профессор, профессор
кафедры «Металлургия цветных металлов» ТТУ им.
акад. М.С. Осими

Газизова Эльвира Рашитовна
кандидат химических наук, доцент кафедры
«Металлургия цветных металлов» ТТУ им. акад. М.С.
Осими

Официальные оппоненты:

Сафаров Ахрор Мирзоевич
доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой
«Технология машиностроения, металлорежущие
станки и инструменты» ТТУ им. акад. М.С. Осими

Эшов Бахтиер Бадалович
кандидат химических наук, директор
Государственного
научно-экспериментального и производственного
учреждения
АН РТ.

Ведущая организация:

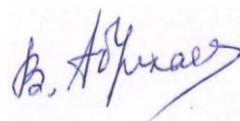
Таджикский государственный педагогический
университет им. С.Айни, кафедра «Общая и
неорганическая химия»

Защита состоится «__» _____ 2015 года в ____ часов на заседании диссертационного совета ДМ 047.003.02 при Институте химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан по адресу: 734063, г. Душанбе, ул. Айни, 299/2. E-mail: gulchera@list.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан и на сайте Института химии им. В.И. Никитина АН Республики Таджикистан www/chemistry.tj

Автореферат разослан «__» _____ 2015 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор химических наук, профессор



Абулхаев В.Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние годы всевозрастающим темпом ведутся научно-исследовательские работы по применению европия и иттербия в различных отраслях современной науки, техники и технологии. Несмотря на недостаточную изученность физико-химических и термических свойств европия, иттербия и их соединений, они находят широкое применение в атомной энергетике в качестве поглотителей нейтронов, электронной, авиационной, металлургической промышленности, а также в медицине и сельском хозяйстве. Исходя из столь уникального и перспективного применения европия и иттербия, вполне оправдан интерес к рассмотрению характера их физико-химического взаимодействия с элементами периодической таблицы и выявлению некоторых закономерностей при этом. Для оценки характера взаимодействия компонентов необходимо иметь сведения о диаграммах состояния. Именно они составляют современную теоретическую основу разработки материалов.

Учитывая вышеизложенное, актуальным становится вопрос о возможности рассмотрения и изучения взаимодействия европия и иттербия с другими элементами периодической таблицы с применением более современных методов анализа, построения диаграмм состояния и определения термодинамических свойств сплавов на их основе.

Целью работы явился анализ и систематизация типов взаимодействия, расчёт и экспериментальное построение двойных и тройных диаграмм состояния европия и иттербия с некоторыми элементами периодической таблицы, а также оценка термодинамических свойств двойных сплавов на основе европия и иттербия.

Для достижения поставленных целей в работе решали следующие основные задачи:

- систематизация видов взаимодействия европия и иттербия с элементами периодической системы с целью выявления общих закономерностей фазовых равновесий в двойных системах;
- оценка взаимодействия компонентов в расслаивающихся системах на основе европия и иттербия с применением статистических и термодинамических критериев;
- расчёт и экспериментальное построение диаграмм состояния двойных и тройных систем с участием европия и иттербия;
- оценка термодинамических свойств сплавов двойных и тройных систем на основе европия и иттербия.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- впервые построено 40 двойных расчётных диаграмм состояния систем Eu (Yb)-PЗМ (Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu), Eu-Al (Sr, Co, Zr, Nb, Mo, Ta, Re), Yb-Sr (Nb, Ta, W) с применением уравнений двухзонной модели и теории регулярных растворов.
- расчётным путём впервые получены значения энергии взаимообмена, энергии связи одноимённых и разноимённых частиц, степени ближнего порядка европия и иттербия с элементами периодической таблицы, а также теплоёмкости, энтропии, энтальпий плавления и образования, двухкомпонентных 52 химических соединений европия и 62 - иттербия;
- на основании построенных диаграмм состояния несмешивающихся систем европия и иттербия с другими редкоземельными металлами рассчитаны константы межчастичного взаимодействия, активности компонентов и избыточная свободная энергия Гиббса в зависимости от концентрации с использованием приближения теории регулярных растворов.
- экспериментально построены диаграммы состояния двойной Yb-Sr и квазибинарной YbAl₂-SrAl₄ систем и поверхности ликвидуса квазитройной системы Al-YbAl₂-SrAl₄ методом симплексного планирования.

Практическая значимость. Полученные сведения по построенным диаграммам состояния и термодинамическим свойствам сплавов европия и иттербия способствуют более широкой научно-обоснованной разработке технологии по получению и применению их в современных областях науки и техники. Предложенные технология и оптимальные составы сплавов системы Al-Mg-Zn-Yb с высокими физико-механическими свойствами, защищённые малыми патентами Республики Таджикистан, могут быть использованы в авиа-, ракето- и машиностроении в качестве акустодемпфирующих материалов. Определение термодинамических характеристик соединений европия и иттербия пополнит банк термодинамических величин новыми данными. Результаты работы используются и могут быть применены в научных исследованиях и в учебном процессе в Таджикском национальном университете, Таджикском техническом университете, Институте химии АН и других вузах республики.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены на III-ей, IV-ой, V-ой и VI-ой Международных научно-практических конференциях

«Перспективы развития науки и образования в XXI веке» (Душанбе, 2008, 2010-2012 гг.), VII-ом международном научно-техническом симпозиуме «Наследственность в литейных процессах» (РФ, Самара, 2008 г.), VI-ом Нумановском чтении (Душанбе, 2009 г.), Республиканской научно-практической конференции «Современные проблемы химии, химической технологии и металлургии» (Душанбе, 2009 г.), Республиканской научно-практической конференции «Горные, геологические, экологические аспекты и развитие горнорудной промышленности в XXI веке» (Душанбе, 2010 г.), Республиканской научно-практической конференции «Академик М.С.Осими и развитие культуры» (Душанбе, 2010 г.), Республиканской научно-практической конференции «Современные проблемы химии, химической технологии и металлургии» (Душанбе, 2011 г.), IV-ой Всероссийской с международным участием научной Бергмановской конференции «Физико-химический анализ: состояние, проблемы, перспективы развития» (РФ, Махачкала, 2012 г.), Республиканской конференции «Перспективы развития исследований в области химии и технологии гетеросоединений» (Душанбе, 2012), 5-ом Всероссийском научно-техническом совещании «Взаимодействие науки и литейно-металлургического производства» (РФ, Самара, 2013).

Основные положения, выносимые на защиту:

- результаты статистического и термодинамического прогнозирования типов и расчёта параметров взаимодействия европия и иттербия с элементами периодической таблицы и построения их диаграмм состояния;
- результаты расчёта термодинамических характеристик (теплоёмкости, энтропии, энтальпий плавления и образования, констант межчастичного взаимодействия, активности компонентов и избыточной свободной энергии Гиббса) двойных сплавов европия и иттербия;
- результаты экспериментального построения диаграмм состояния двойной Yb-Sr и квазибинарной $YbAl_2$ - $SrAl_4$ систем и поверхности ликвидуса квазитройной Al-YbAl₂- $SrAl_4$ и трёхкомпонентной Al-Yb-Sr систем методом симплексного планирования;
- результаты экспериментального исследования физико-механических свойств сплавов системы Al-Mg-Zn-Yb.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 27 работ, в том числе 19 статей, 4 из них в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 тезиса докладов, 2 малых патента на изобретение и 2 учебно-методических разработки.

Вклад автора в работу, выполненную в соавторстве, состоял в систематизации литературных данных по проблеме тематики с целью выявления закономерностей, проведении расчётов на ЭВМ, получении экспериментальных данных, анализе и обобщении результатов, формулировке основных выводов и положений диссертации.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка литературы из 113 наименований библиографических ссылок, приложения. Работа изложена на 161 страницах машинописного текста, включая 42 таблицы, 42 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная и практическая значимость работы.

В первой главе дана оценка степени изученности и произведён статистический прогноз видов взаимодействия двойных диаграмм состояния систем европия и иттербия с другими элементами периодической таблицы.

Во второй главе приведены методика и результаты расчёта параметров взаимодействия и построения двойных диаграмм состояния систем европия и иттербия с редкоземельными, щелочноземельными и некоторыми переходными металлами.

Третья глава посвящена расчёту и анализу термодинамических свойств (теплоёмкости, энтропии, энтальпий плавления и образования, констант межчастичного взаимодействия, активности компонентов и избыточной свободной энергии Гиббса) сплавов двойных систем на основе европия и иттербия.

Четвёртая глава посвящена экспериментальному исследованию взаимодействия в системах Yb-Sr, SrAl₄-YbAl₂ и Al-YbAl₂-SrAl₄, построению их диаграмм состояния и изучению влияния иттербия на механические и акустодемпфирующие свойства сплавов системы Al-Mg-Zn.

Диссертационная работа завершается общими выводами, списком цитированной литературы и приложением.

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЕВРОПИЯ И ИТТЕРБИЯ С ЭЛЕМЕНТАМИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЫ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА (ПТ)

Оценка степени изученности двойных диаграмм состояния систем европия и иттербия с элементами периодической таблицы ПТ. Обобщение диаграмм состояния двойных систем европия и иттербия показало недостаточный объём изучения их

взаимодействия с другими элементами. В литературе опубликовано сравнительно мало полностью построенных диаграмм состояния систем с их участием, что составило 27% и 39% от общего количества систем европия и иттербия с 93 элементами, соответственно. В большинстве случаев построенные диаграммы состояния подлежат уточнению с использованием более чистых исходных материалов и современных методов физико-химического анализа и термодинамических расчётов. На основании проведённого анализа следует отметить:

1) металлические европий и иттербий в обычных условиях образуют с кальцием, барием и друг с другом диаграммы состояния с неограниченной растворимостью как в жидком, так и в твёрдом состояниях;

2) европий с 32, а иттербий с 40 элементами образуют химические соединения;

3) к почти полностью изученным системам с построенными диаграммами состояния относятся 25 систем европия и 36 систем иттербия с элементами периодической таблицы, которые характеризуются ограниченной и неограниченной растворимостью в твёрдом и жидком состояниях, образованием эвтектических равновесий, химических соединений и отсутствием взаимодействия;

4) образование ограниченных твёрдых растворов европия и иттербия с другими элементами изучено недостаточно;

5) к неизученным или малоизученным системам относятся системы европия с 68 и иттербия с 57 элементами, в частности, с элементами IA (ЩМ), IIA (Be, Sr, Ra), IIIA (PЗМ и PAM), IVA (Ti, Ku), VA (Nb, Ta, Ns), VIA (Mo, W), VIIA (Tc, Re), VIIIA (Ru, Os, Ir), IVB (C, Si), VB (N, P), VIB (O, S, Se, Po), VIIB (H) групп периодической таблицы.

Прогноз взаимной растворимости в жидком и твёрдом состояниях, образования металлических соединений, невариантных превращений и невариантных точек в системах европия и иттербия с другими элементами периодической таблицы. Основной теоретический фундамент в разработке новых промышленных сплавов был заложен в начале прошлого столетия академиком Н.С. Курнаковым и укреплен в трудах его последователей. Из учёных других научных школ наибольший вклад в эти разработки внесли Юм-Розери, Мотт, Полинг, Миедема, Кубашевский, Гшнейдер и прочие. Согласно теории металлических сплавов, на тип диаграммы состояния оказывают влияние физико-химические факторы, зависящие от положения элементов в периодической системе: электронное строение элементов, их валентность, атомный радиус, электроотрицательность, ионизационный потенциал, теплота испарения,

энтропия, температура плавления и кипения, коэффициент всестороннего сжатия, тип кристаллической решётки, объём элементарной ячейки и другие факторы. Ни одно из этих свойств в отдельности не является достаточным для определения характера взаимодействия элементов. В работе нами рассматривались во взаимосвязи вышеуказанные свойства для определения характера физико-химического взаимодействия в каждом конкретном случае для систем европия и иттербия с другими элементами:

- 1) смешиваемость или расслаивание в жидком состоянии;
- 2) взаимная растворимость металлов в твердом состоянии;
- 3) образование металлических соединений;
- 4) образование невариантных превращений и невариантных точек и возможность предсказания на их основе типа диаграмм состояния.

Для оценки случая (1) применили критерий Воздвиженского; для случая (2) – Гладышева В.П., графические методы Даркена - Гурри и Воздвиженского; для случаев (3) и (4) - графические методы Воздвиженского, где во всех случаях выборочно учитывались теплоты сублимации, структурный, размерный, объёмный, электрохимический и температурный факторы с учётом поверхностного натяжения и ионизационных потенциалов компонентов.

На основании результатов прогноза видов взаимодействия в двойных системах европия и иттербия с элементами периодической таблицы, полученных в данной работе и проведённых с использованием разнообразных статистических критериев, можно заключить следующее.

1. Европий и иттербий с щелочными металлами – элементами IA (Li, Na, K, Rb, Cs, Fr) группы ПТ, предположительно, могут образовывать системы с отсутствием взаимодействия или с частичной растворимостью компонентов друг в друге в жидком и твёрдом состояниях. В системах Eu (Yb)-Li, Yb-Rb, Yb-Cs и Yb-Fr возможно образование интерметаллидов.

2. Образование европием и иттербием с элементами-кристаллохимическими аналогами кальцием и барием диаграмм состояния с неограниченной растворимостью как в жидком, так и в твёрдом состояниях, установленное ранее экспериментально, однозначно подтверждается рядом критериев. Такой же тип взаимодействия характерен между двумя этими металлами европием и иттербием. Ещё две системы, для которых

прогнозируется второй тип диаграммы состояния – тип сигары, это системы европия и иттербия со стронцием.

3. Статистический прогноз по системам европия и иттербия с Be и Mg подтверждает наличие ограниченной растворимости в них, образование химических соединений и неинвариантных превращений, а с Ra даёт возможность предположить образование диаграммы состояния монотектического типа.

4. Европий и иттербий с элементами IIIA (Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr) группы ПТ по характеру прогноза могут образовать диаграммы состояния с ограниченной растворимостью в жидком и твёрдом состояниях (монотектический тип взаимодействия). Однако, согласно ряда критериев, в системах европия и иттербия со Sc, Y, Ce, La, Pr, Nd, Sm, Pm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Eu, Lu, Ac, Pa, U, Th, Np, Pu, Am прогнозируется образование устойчивых и неустойчивых промежуточных фаз, по-видимому, кристаллизующихся в твёрдом состоянии при более низких температурах.

5. В системах европия и иттербия с элементами IVA (Ti, Zr, Hf), VA (V, Nb, Ta), VIA (Cr, Mo, W), VIIA (Mn, Tc, Re), VIIIA (Fe, Ru, Os, Co, Rh, Ir, Ni, Pd, Pt) и IB (Cu, Ag, Au) групп ПТ прогнозируется отсутствие растворимости в жидком и твёрдом состояниях, однако некоторые критерии указывают на образование промежуточных фаз (в т.ч. фаз Лавеса) и эвтектической смеси в этих системах.

6. С элементами IIB (Zn, Cd, Hg), IIIB (B, Al, Ga, In, Tl), IVB (Si, Ge, Sn, Pb), VB (As, Sb, Bi) и VIB (Se, Te, Po) групп ПТ европий и иттербий должны иметь весьма ограниченные растворимости или отсутствие взаимодействия в твёрдом и жидком состояниях. Европий с Zn, Cd, Al, In, Sn, Sb, Po, Te может образовать химические соединения (в т.ч. фазы Лавеса) и эвтектическую смесь. Перитектическое равновесие и неустойчивые химические соединения могут образоваться в системах европия с In, Tl, Pb, Bi и иттербия с Zn, Hg, Sn, Bi, Te, а устойчивые химические соединения и эвтектическую смесь с иттербием образуют Cd, Ge, Sn, Ge, As, Sb.

Таким образом, взаимодействие европия и иттербия с элементами периодической таблицы поддаётся прогнозу и достаточно хорошо описывается в общих чертах с помощью существующих и предложенных критериев.

ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ПОСТРОЕНИЕ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЯ Бинарных систем европия и иттербия с некоторыми ЭЛЕМЕНТАМИ ПТ

Расчёт параметров взаимодействия европия и иттербия с элементами периодической таблицы. Для подтверждения ранее проведённых в работе статистических прогнозов взаимодействия в неизученных системах, использовали термодинамический метод расчёта параметров взаимодействия европия и иттербия с элементами периодической таблицы с целью построения их диаграмм состояния. В связи с этим был применён расчёт, основанный на использовании электроотрицательностей (E), мольных объёмов (V) и параметров растворимости (δ) в приближении Гильдебранда - Мотта:

$$Q_{12} = V(\delta_1 - \delta_2)^2 - 23.06 \cdot z / 2(E_1 - E_2)^2, \text{ кДж/г-атом.} \quad (1)$$

На основании расчёта и анализа значений энергии взаимообмена (Q_{12} , кДж/г-ат.) установлено, что все системы европия и иттербия с другими элементами делятся на два различных класса: 1) с энергией взаимообмена $Q_{12} < 0$; 2) с энергией взаимообмена $Q_{12} > 0$. В соответствии с квазихимической теорией при $Q_{12} < 0$ сплав между компонентами 1-2 может существовать. Вид диаграммы фазового равновесия таких систем характеризуется образованием жидких и твёрдых растворов и наличием промежуточных фаз. В случае $Q_{12} > 0$ компоненты 1-2 в системе (бериллий-элемент) не смешиваются в жидком состоянии. Сделанные предсказания согласуются с имеющимися расчётными и экспериментальными данными.

Учитывая, что энергия взаимообмена с характерным значением $Q_{12} > 0$, которое для всего набора видов диаграмм состояния с расслаиванием является недостаточным критерием и носит качественный характер, в работе нами была использована в качестве дополнительного критерия - степень ближнего порядка (σ_{12}), которую определяли соотношением:

$$(1 - \sigma) / (1 + \sigma) = \exp(-\Delta H / RT), \quad (2)$$

где R – постоянная Больцмана, а $\Delta H = [0.5(H_{11} + H_{22})]$.

Таким образом, на примере систем, включающих европий (иттербий), показано, что полному расслаиванию соответствуют значения $Q_{12} > 0$ и $\sigma_{12} \approx -1$ ($\sigma_{12} \neq -1$), а монотектическому равновесию - $Q_{12} > 0$ и $\sigma_{12} = 1$.

Рассчитанные нами значения Q_{12} и σ_{12} по уравнениям (1, 2) анализировались для систем европия и иттербия с другими элементами, отвечающих условию $Q_{12} > 0$.

Установлено, что к системам европия, имеющим $Q_{12} > 0$ и $\sigma_{12} \approx 1$, относятся системы с Li, K, Sc, Ti, Mn, Ni, Rb, Y, Ru, Cs, Os, Ir, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu Th, Pa, U, Np, Pu, Am, а к системам иттербия с такими же параметрами – системы с Li, K, Sc, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Rb, Y, Mo, Ru, Pd, Cs, Hf, Re, Os, Ir, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu, Th, Pa, U. Они характеризуются расслаиванием компонентов в жидком состоянии и образованием ограниченных растворов в твёрдом состоянии, т.е. в них проявляется нонвариантное монотектическое равновесие.

К системам европия (иттербия) с другими элементами, имеющим $Q_{12} > 0$ и $\sigma \approx -1$, относятся системы европия с Be, B, C, V, Cr, Mn, Fe, Co, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta, W, Re, а к системам иттербия – Be, B, C, V, Zr, Nb, Ta, W. Это указывает на преобладающее образование обособленных группировок одноименных атомов. В этих системах при охлаждении расплава происходит последовательная кристаллизация каждого из компонентов в зависимости от их температур плавления.

Следует отметить, что существующая весьма незначительная растворимость в жидком и в твёрдом состояниях в таких системах уменьшается, по-видимому, с приближением абсолютного значения σ_{12} к минус единице. В системах, для которых значения σ_{12} близки к нулю, можно предположить образование промежуточных видов расслаивания, многие из них подтверждены экспериментально.

Расчёт взаимной растворимости компонентов в жидком и твёрдом состояниях в системах европия и иттербия с другими редкоземельными металлами и построение их диаграмм состояния. Отсутствие экспериментальных данных по взаимной растворимости европия и иттербия с другими редкоземельными металлами (РЗМ) побудило нас восполнить этот пробел. С этой целью были применены расчётно-теоретические методы. Установлено, что выше предполагаемые эвтектические превращения и незначительная растворимость РЗМ в европии (иттербии) и европия (иттербия) в РЗМ в твёрдом состоянии объясняется большими различиями размерного, структурного и электрохимического факторов у взаимодействующих компонентов.

Значения предельной растворимости компонентов в жидком и твёрдом состояниях для систем Eu-РЗМ и Yb-РЗМ получены согласно теории двухзонной модели твёрдых растворов (А.К. Бескровный), величины температур превращений в них рассчитывались по методу Шредера-Ван-Лаара, а координаты критического распада – по методу Б.П. Бурылёва.

На основании этих расчётов нами, не прибегая к эксперименту, что весьма важно для практических целей, были впервые построены диаграммы состояния европия и иттербия с другими редкоземельными металлами, которые представляют собой системы монотектического типа с наличием областей гомогенности (например, рис. 1). Во всех системах европия (иттербия) с другими РЗМ со стороны ординаты легкоплавкого компонента (в данном случае европия и иттербия) наблюдаются эвтектические превращения, а со стороны тугоплавкого компонента (другие РЗМ) – монотектические равновесия. Исключение составляют лишь системы европия и иттербия с церием, где со стороны церия можно наблюдать эвтектические реакции.

Диаграммы фазового равновесия расслаивающихся систем на основе европия и иттербия с некоторыми переходными металлами.

При анализе полученных значений Q_{12} и σ_{12} для систем европия и иттербия с элементами IV-VIIA, имеющих $Q_{12} > 0$, установлено, что среди них выделяется ряд систем с отрицательными значениями σ_{12} (системы европия с Co, Zr, Nb, Mo, Ta и Re и системы иттербия с Nb, Ta и W). Диаграммы состояния этих систем характеризуются полной несмешиваемостью компонентов в жидком и отсутствием растворимости в твёрдом состояниях.

Взаимное легирование европия и иттербия вторыми компонентами, так и вторых компонентов европием и иттербием практически не изменяет температуры плавления компонентов. В этих системах при охлаждении расплава происходит последовательная кристаллизация каждого из компонентов в зависимости от температур плавления.

На рисунке 2 в качестве примера приведены впервые нами построенные диаграммы состояния европия и иттербия с ниобием.

Можно видеть (рис. 2), что температура ликвидуса в данных системах совпадает с температурой тугоплавкого компонента, а температура солидуса – с температурой легкоплавкого компонента. Температуры неинвариантных превращений на представленных диаграммах соответствуют температурам плавления чистых Eu (822°C), Yb (819°C) и Nb (2469°C), а температура 795°C соответствует аллотропному превращению иттербия.

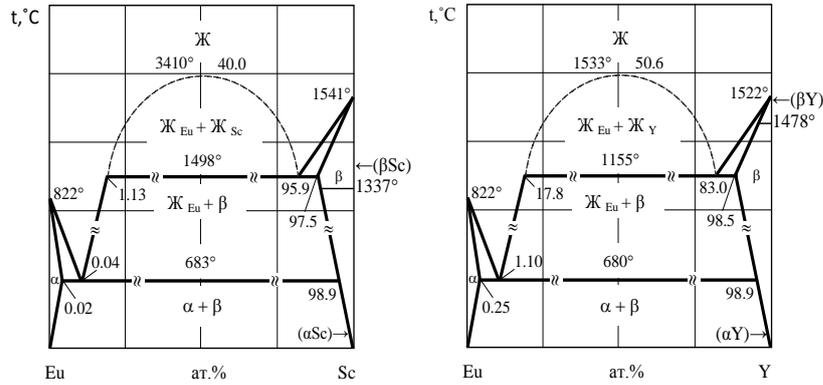


Рисунок 1. Расчётные диаграммы состояния двойных систем европия со скандием и иттрием.

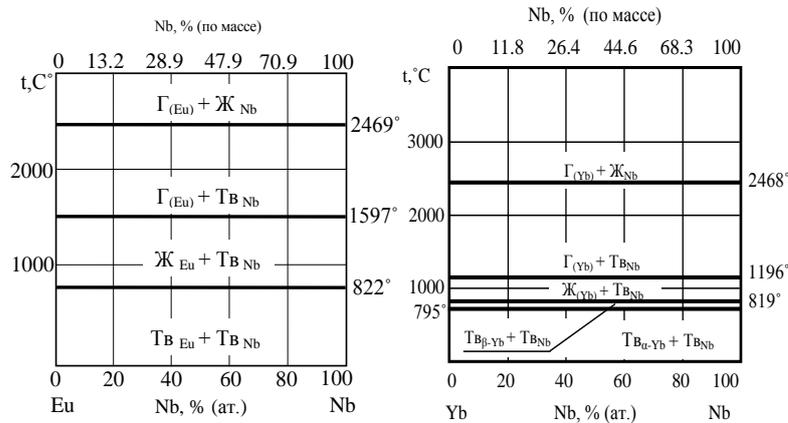


Рисунок 2. Расчётные диаграммы состояния двухкомпонентных систем европия и иттербия с ниобием.

Прогноз и расчёт диаграмм состояния с неограниченной растворимостью европия и иттербия с кальцием, стронцием и барием. Исходя из общих закономерностей сплавообразования установлено, что к семейству, образуемому с европием и иттербием неограниченные жидкие и твёрдые растворы, относятся элементы кальций, стронций и барий, имеющие изоморфную структуру, очень близкие химические свойства и являющиеся кристаллохимическими аналогами европия и иттербия. Из рассматриваемого семейства систем известны в литературе диаграммы фазового равновесия, подтверждающие наши прогнозы.

Так, например, в системах Eu-Ca, Eu-Ba, Eu-Yb, Yb-Ca и Yb-Ba экспериментально различными авторами установлена полная их смешиваемость в твёрдом и жидком состояниях. Для систем Eu-Sr и Yb-Sr диаграммы состояния не построены. В связи с этим, применяя расчётные методы, мы построили диаграммы состояния этих двух неизученных систем.

Расчёт двойных диаграмм состояния эвтектического типа с устойчивыми химическими соединениями. Поскольку в литературе отсутствуют сведения, касающиеся физико-химического взаимодействия в системе алюминий-европий, лишь установлено образование трёх соединений EuAl_4 , EuAl_2 EuAl и эвтектического равновесия при температуре 628°C и содержании в эвтектике 2.25% (ат.) Eu , нами была произведена попытка расчёта диаграммы состояния этой системы.

Согласно выполненным расчётам, установлено, что соединение Al_4Eu плавится конгруэнтно при температуре 1135°C , а соединения Al_2Eu и AlEu образуются по перитектическим реакциям при температурах 908 и 753°C , соответственно. Растворимость Eu в (Al) при температуре 655°C составляет 0.8% (ат.), а Al в (Eu) при 520°C – 4.7% (ат.). Соединения Al_4Eu и AlEu участвуют в эвтектических превращениях: $\text{Ж} \leftrightarrow (\text{Al}) + \text{Al}_4\text{Eu}$ при температуре 655°C и содержании 1.2% (ат.) Eu ; $\text{Ж} \leftrightarrow (\alpha\text{Eu}) + \text{AlEu}$ при температуре 520°C и содержании 73.5% (ат.) Eu . Следует отметить, что при расчётах и построении диаграммы состояния системы Al-Eu нами была использована аналогия большинства характеристик кальция, стронция и бария с европием, выражающаяся в одинаковом характере физико-химического взаимодействия и сходстве диаграмм состояния систем Al-Ca , Al-Sr и Al-Ba .

РАСЧЁТ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЛАВОВ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЕВРОПИЯ И ИТТЕРБИЯ

Расчёт теплоёмкости, энтропии и энтальпии плавления интерметаллических соединений на основе европия и иттербия. Расчётными методами нами оценены теплоёмкость, энтропия и энтальпия плавления двухкомпонентных 52 химических соединений европия и 62 - иттербия.

Для оценки теплоёмкости применено корреляционное приближение, которое известно, как правило, Неймана-Коппа:

$$(C_p)_{\text{AmBn}} = m(C_p)_A + n(C_p)_B \quad (3)$$

Энтропию плавления рассчитывали по методу Кубашевского:

$$\Delta S_{\text{AmBn}}^{\text{пл}} = m\Delta S_A^{\text{пл}} + n\Delta S_B^{\text{пл}}, \quad (4)$$

а энтальпию плавления фаз по равенству:

$$\Delta H_{\text{AmBn}}^{\text{пл}} = \Delta S_{\text{AmBn}}^{\text{пл}} \cdot T_{\text{пл}} \quad (5)$$

Анализ полученных значений термодинамических характеристик показал, что как при «анионном», так при «катионном» замещении компонентов теплоёмкость, энтропия

и энтальпия плавления соединений европия и иттербия изменяются в строго определенной последовательности, что свидетельствует о широком проявлении химической аналогии между европием и иттербием.

Установлено, что значения теплоёмкости, энтропии и энтальпии плавления интерметаллидов находятся в пределах допустимого, согласно правилам Дюлонга-Пти, Ричардса и Трутона ($C_p \approx 27.2$; $\Delta S_{\text{пл.}} \approx 8.4$ и $\Delta H_{\text{пл.}} \approx 8.73$) для одного грамм атома твёрдой фазы, соответственно.

Энтропия и теплота плавления интерметаллидов европия и иттербия пропорционально изменяются с атомным номером второго компонента, т.е. с ростом порядкового номера значения уменьшаются. Кроме того, соединения с различными стехиометрическими составами в пределах одной системы имеют энтропии и теплоты плавления по величине очень близкие между собой, то есть в системе наблюдается постоянство энтропии и энтальпии плавления. Максимальное значение энтальпии плавления соответствует соединениям, образующимся с открытым максимумом.

Энтальпия образования двойных интерметаллических соединений на основе европия и иттербия. В литературе на данный момент экспериментально установлены значения энтальпии образования интерметаллидов рассматриваемых металлов лишь для систем Yb-Al и Yb-Ga для составов YbAl₂, YbAl₃, YbAl₄, YbAl, YbGa₂, YbGa₃, YbGa₄ и YbGa.

В работе нами с использованием модели Полинга, Кубашевского, Миедымы, Палензоны и Кирафики были определены значения энтальпии образования для 28 интерметаллидов европия и 27 - иттербия.

Установлено, что в большинстве случаев интерметаллиды образуются с весьма большим выделением тепла (например, соединения европия и иттербия с элементами IVB группы ПТ). Они образуют довольно прочные соединения. Можно предположить, что в энтальпию образования соединений европия и иттербия с элементами IVB групп основной вклад вносит энергия ионной связи. Наибольшее значение энтальпии образования соединений наблюдается в тех системах, где второй компонент дальше находится от европия и иттербия в периодической таблице, например, для соединений европия и иттербия с элементами IB группы (медью, серебром и золотом). Такая закономерность обычно характерна при взаимодействии европия и иттербия с неметаллами, которая протекает с высоким тепловыделением. Наименьшие значения энтальпии образования наблюдаются, если два металла расположены близко по

подгруппе, например, для соединений европия и иттербия с цинком: для EuZn_2 и YbZn_2 значения $\Delta H^{\text{обр}}$ равны, соответственно, -6.17 и -6.38 ккал/г-ат.

Сравнение ранее полученных результатов экспериментальных данных других авторов и результатов наших расчётов по энтальпии образования интерметаллических соединений иттербия с алюминием, галлием и таллием, полученных по модели Полинга и Кубашевского, показало наиболее близкие совпадения. Отсюда можно сделать вывод об ионно-ковалентном характере химической связи в соединениях иттербия с элементами подгруппы алюминия с преобладающей долей ковалентности, что применимо и к системам европия с алюминием, галлием, индием и таллием.

Расчёт термодинамической активности компонентов и избыточной свободной энергии Гиббса из диаграмм состояния несмешивающихся систем на основе европия и иттербия. Экспериментальные данные по активности компонентов и избыточной свободной энергии Гиббса сплавов систем европий (иттербий)-РЗМ отсутствуют. В связи с этим нам было интересно получить эти значения методом расчёта с использованием приближения регулярных растворов. Последнее позволяет рассчитать указанные характеристики из экспериментально построенных диаграмм.

Значения химических потенциалов компонентов в несмешивающихся системах выражаются соотношениями:

$$\mu_1 = \mu_1^0 + RT \ln x_1 + x_2^2(Q_1 - Q_2) + 2x_2^3 Q_2, \quad (6)$$

$$\mu_2 = \mu_2^0 + RT \ln x_2 + x_1^2(Q_1 + 2Q_2) - 2x_1^3 Q_2, \quad (7)$$

где x_1 и x_2 – мольные доли; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; Q_1 и Q_2 – константы межчастичного взаимодействия.

Для расчёта значений Q_1 и Q_2 воспользуемся условием равенства $\mu_1' = \mu_2''$ и $\mu_2' = \mu_1''$ в равновесных жидкостях и, подставляя это в выражения (6) и (7), получим:

$$RT \ln x_1'/x_1'' + [(x_2')^2 - (x_2'')^2] (Q_1 - Q_2) + 2Q_2 [(x_2')^3 - (x_2'')^3] = 0, \quad (8)$$

$$RT \ln x_2''/x_2' + [(x_1'')^2 - (x_1')^2] (Q_1 + 2Q_2) - 2Q_2 [(x_1'')^3 - (x_1')^3] = 0, \quad (9)$$

где $x_1' + x_2'' = 1$ и $x_1'' + x_2' = 1$.

В уравнения (8) и (9) входят параметры, которые нетрудно определить, используя данные о фазовых равновесиях в системах $\text{Eu}(\text{Yb})$ -РЗМ при температуре монотектического равновесия.

В качестве примера нами произведены расчёты по диаграмме состояния системы Eu-Sc, из которых вытекает, что $x_2' = 0.01$; $x_2'' = 0.96$ и $T = 1498^\circ\text{C}$, откуда после совместного решения уравнений (8) и (9) получили $Q_1 = 69001$ и $Q_2 = -19623$ Дж/г-ат.

На основании уравнений (6) и (7) для коэффициентов активности компонентов в системе Eu-Sc при температуре монотектики 1498°C имеем:

$$\ln f_{\text{Eu}} = 2.60 (1 - x_{\text{Eu}})^2 - 1.15 (1 - x_{\text{Eu}})^2, \quad (10)$$

$$\ln f_{\text{Sc}} = 0.87 (1 - x_{\text{Sc}})^2 + 1.15 (1 - x_{\text{Sc}})^2. \quad (11)$$

Уравнения (10) и (11) позволили рассчитать кривые активности европия и скандия с учётом $a = f \cdot x$ при температуре монотектического равновесия.

Концентрационную зависимость избыточной свободной энергии Гиббса в рамках модели регулярного раствора для сплавов системы Eu-Sc определяли из выражения:

$$\Delta G^{\text{изб}} = \Delta H^{\text{см}} = 69001 x_{\text{Eu}} \cdot x_{\text{Sc}} - 19623 x_{\text{Eu}} \cdot x_{\text{Sc}}^2. \quad (12)$$

Таким образом, из полученных данных по значениям термодинамической активности и избыточной свободной энергии Гиббса можно заключить, что в системе Eu-Sc наблюдаются большие положительные отклонения от закона Рауля, а в области низких концентраций обоих компонентов эти отклонения являются небольшими. Участки концентрационной зависимости активностей компонентов, где $a_i > 1$, указывают на появление ограниченной растворимости в жидком состоянии и возможности расслоения раствора на две фазы.

Сплавление европия и скандия происходит со значительным поглощением тепла. Эти данные хорошо согласуются с характером фазового равновесия (монотектический тип взаимодействия) системы Eu-Sc. Расчёты по уравнениям (8)-(11) показывают, что координаты кривых распада на диаграмме состояния Eu-Sc соответствуют $T_{\text{кр}} = 3485^\circ\text{C}$ и $x_{\text{кр}} = 0.3928$.

Аналогичные расчёты произвели для остальных систем европия и иттербия с другими редкоземельными металлами, где наблюдается похожий характер взаимодействия. С возрастанием порядкового номера второго компонента в ряду лантаноидов (от лантана до лютеция) значения ΔG возрастают. Характер возрастания значений энергии Гиббса как большой положительной величины связан с уменьшением растворимости компонентов друг в друге в твёрдом и жидком состояниях, который указывает на большой расход тепла при сплавообразовании в исследуемых системах, что соответствует монотектическому типу взаимодействия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМАХ Yb-Sr, SrAl₄-YbAl₂, Al-YbAl₂-SrAl₄ И Al-Yb-Sr И ПОСТРОЕНИЕ ИХ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЯ

Использованные материалы. Для получения сплавов нами были использованы: алюминий марки А995; иттербий металлический марки ИтбМ-I; стронций металлический марки СтМ-I; лигатуры на основе алюминия, содержащие по 6.0% Yb и 10% Sr. Состав полученных сплавов контролировался на современном спектральном квантометре SpectroLab M, а также взвешиванием образцов до и после сплавления. В процессе работы образцы сплавов подвергались микроскопическому, дифференциально-термическому и рентгенофазовому анализу.

Анализ фазовых равновесий сплавов системы Al-Yb-Sr и построение диаграммы состояния системы Yb-Sr. Тройные сплавы алюминия с ЦЗМ и РЗМ относятся к сравнительно малоизученным системам. Для изображения фазовых равновесий в тройных сплавах, например системы Al-Yb-Sr, при разных температурах строится пространственная диаграмма состояния в координатах состав-температура, представляющая собой прямоугольную трёхгранную призму, основанием которой служит концентрационный треугольник Al-Yb-Sr, а гранями – диаграммы состояния двойных систем Al-Yb, Sr-Yb и Al-Sr. Характер этих двойных диаграмм состояния (граней) зачастую определяет строение диаграммы состояния тройной системы, что заметно облегчает её изучение.

Таким образом, на основании анализа двойных диаграмм состояния Al-Yb, Sr-Yb и Al-Sr, составляющих тройную систему, установлено, что:

- диаграмма состояния системы Al-Yb-Sr является относительно простой, ввиду того, что в ней, вероятней всего, исключается образование тройного интерметаллида. Данное предположение обосновывается наличием широких областей твёрдых растворов между кристаллохимическими аналогами иттербием и стронцием, обеспечивающих гладкую поверхность тройной системы;

- наличие устойчивых интерметаллидов в двойных системах Al-Yb и Al-Sr позволяет произвести триангуляцию, т.е. деление тройной диаграммы состояния на более простую квазитройную Al-YbAl₂-SrAl₄ с помощью квазибинарного разреза YbAl₂-SrAl₄ со стороны сплавов, богатых алюминием, которая подлежит дальнейшему исследованию.

– проведение дополнительных политепических разрезов $\text{YbAl}_2\text{-Sr}$ и $\text{SrAl}_4\text{-Yb}$ разделяет основную часть плоскости системы Al-Yb-Sr на области твёрдых растворов $\text{Yb}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Al}_2$ и $\text{Sr}_{1-y}\text{Yb}_y\text{Al}_4$, где не предполагается появления других фазовых равновесий, в связи с чем нецелесообразно затрачивать время на проведение большого числа экспериментов, а лишь ограничиться их малым количеством с использованием метода математического моделирования с целью построения проекции поверхности ликвидуса тройных сплавов системы Al-Yb-Sr .

Для подтверждения результатов расчётов по двойной системе Sr-Yb нами была построена её диаграмма состояния с относительно малым количеством экспериментов. На основании полученных результатов по микроструктурному, рентгенофазовому анализам и измерениям микротвёрдости структурных составляющих установлено, что иттербий и стронций образуют между собой непрерывный ряд твёрдых растворов (тип «сигары», см. рис.3) как в жидком, так и твёрдом состояниях.

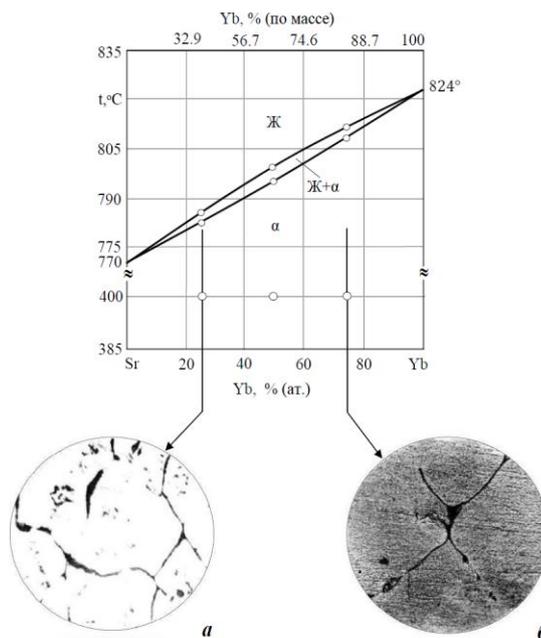


Рисунок 3. Диаграмма состояния двухкомпонентной системы Sr-Yb и характерные микроструктуры (1×270) сплавов:

а – $\text{Sr-75\% ат.} + 25\% \text{ ат. Yb}$; *б* – $\text{Sr-25\% ат.} + 75\% \text{ ат. Yb}$.

Исследование квазибинарного разреза $\text{YbAl}_2\text{-SrAl}_4$. Установлено, что квазибинарный разрез $\text{YbAl}_2\text{-SrAl}_4$ представляет собой диаграмму состояния эвтектического типа с широкими областями ограниченной растворимости компонентов в твёрдом состоянии (см. рис. 4).

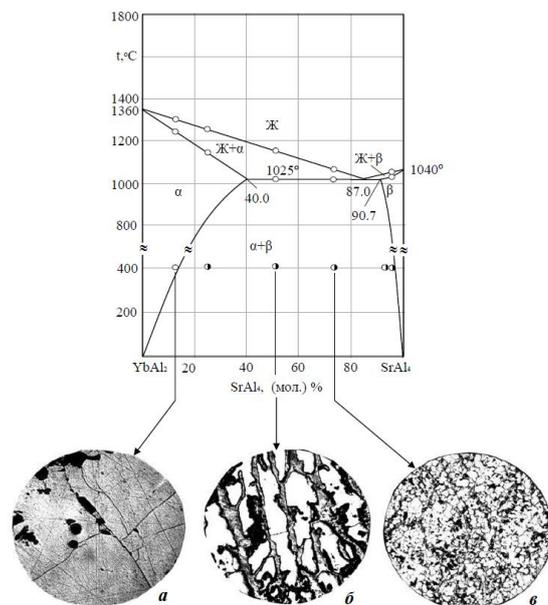


Рисунок 4. Диаграмма состояния квазибинарной системы $\text{YbAl}_2\text{-SrAl}_4$ и характерные микроструктуры (1×270) сплавов:

a - $\text{Sr}_3\text{Yb}_{27}\text{Al}_{70}$; *б* - $\text{Sr}_{10}\text{Yb}_{17}\text{Al}_{73}$; *в* - $\text{Sr}_{17.4}\text{Yb}_{4.3}\text{Al}_{78.3}$.

Эвтектика образуется при концентрации 87.0% мол. SrAl_4 и плавится при температуре 1025°C. Растворимость SrAl_4 в YbAl_2 составляет 15% мол. при температуре 400°C, а растворимость YbAl_2 в SrAl_4 при такой же температуре – 4% мол. Экстраполяцией найдено, что максимальная растворимость SrAl_4 в YbAl_2 при температуре эвтектики составляет 40% мол., а YbAl_2 в SrAl_4 – 9.3% мол.

Построение изотермического сечения квазитройной системы $\text{Al-YbAl}_2\text{-SrAl}_4$ методом симплексных решёток. В исследованной квазитройной системе $\text{Al-YbAl}_2\text{-SrAl}_4$ установлено наличие двух нонвариантных равновесий эвтектического (E) и перитектического (P). Четырёхфазное эвтектическое равновесие протекает при температуре 620°C. Эвтектическая точка E соответствует концентрации (ат.): 95% Al, 3.2% Yb и 1.8% Sr.

Перитектическое четырёхфазное равновесие P имеет место при температуре 800°C и определяется концентрациями (ат.): 84% Al, 4.3% Yb и 11.7% Sr. Таким образом, квазитройная система $\text{Al-YbAl}_2\text{-SrAl}_4$ (см. рис.5) состоит из 4-х поверхностей первичной кристаллизации, т.е. четырёх твёрдых растворов на основе Al ($e_1Ee_2\text{Al}$), YbAl_2 (YbAl_2pPe_3), YbAl_3 (pe_1EP) и SrAl_4 ($\text{SrAl}_4e_3Ee_2$). Большую часть поверхности занимает область первичной кристаллизации интерметаллида YbAl_2 . Образование тройных интерметаллидов в этой системе не обнаружено. Установлено, что кристаллизация тройной эвтектики ($\text{Ж} \leftrightarrow \text{Al} + \alpha\text{YbAl}_2 + \beta\text{SrAl}_4$) происходит в интервале температур 635-

620°C. Это не противоречит правилу фаз, поскольку в данном случае эвтектическая реакция является моновариантной.

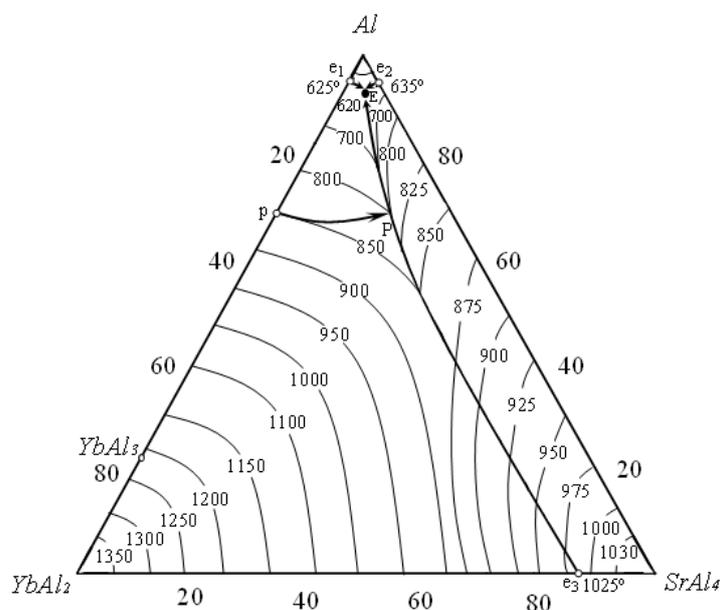


Рисунок 5. Проекция поверхности ликвидуса квазитройной системы Al-YbAl₂-SrAl₄.

Исследование влияния иттербия на механические и акустодемпфирующие свойства сплавов системы Al-Mg-Zn. В работе приведены результаты разработки технологии генной инженерии (ТГИ) с целью улучшения акустодемпфирующих и механических свойств сплавов системы Al-Mg-Zn. Суть технологии состоит в получении однородных мелкокристаллических лигатур, предназначенных для легирования и модифицирования сплавов системы Al-Mg-Zn. В этих целях была разработана вакуумная установка для плавки металлов с использованием устройства многоструйной заливки расплава. Исследования показали, что сплавы системы Al-Mg-Zn, легированные лигатурой (Al + 6% Yb), полученной нетрадиционным путём с применением ТГИ, характеризуются лучшими акустодемпфирующими и механическими свойствами.

ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ взаимодействия европия и иттербия с 93-мя химическими элементами ПТ. Показано, что всего изучено и построено 25 двухкомпонентных диаграмм фазового равновесия на основе европия и 36 - иттербия, что составляет всего 27 и 39 %, соответственно, от их общего количества.
2. Произведен расчет термодинамических величин взаимодействия (Q_{12} , H_{12} и σ_{12}) европия и иттербия с другими элементами ПТ.
3. Впервые построено 40 двойных расчётных диаграмм состояния систем Eu (Yb)-РЗМ (скандий, иттрий, лантан, церий, празеодим, неодим, самарий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, лютеций), Eu-Al (стронций, кобальт, цирконий, ниобий, молибден, тантал, рений), Yb-Sr (ниобий, тантал, вольфрам) с применением уравнений двухзонной модели и теории регулярных растворов.
4. Расчётным путём получены значения теплоёмкости, энтропии, энтальпий плавления и образования двухкомпонентных 52 химических соединений европия и 62 - иттербия.
5. На основании построенных диаграмм состояния несмешивающихся систем европия и иттербия с другими редкоземельными металлами выведены значения Q_1 и Q_2 , а-компонентов и $\Delta G_{изб}$.
6. Экспериментально построены диаграммы состояния двойной Yb-Sr и квазибинарной YbAl₂-SrAl₄ систем и поверхности ликвидуса квазитройной системы Al-YbAl₂-SrAl₄ методом симплексного планирования.
7. Разработана технология получения мелкокристаллических лигатур с участием иттербия с целью получения оптимальных составов алюминиево-магниевого сплава, содержащего цинк, с высокими физико-механическими свойствами.

Основные результаты диссертации отражены в следующих публикациях.

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Рахимов, Ф.К.** Особенности взаимодействия иттербия с элементами периодической системы Д.И.Менделеева / **Ф.К. Рахимов, Э.Р. Газизова, Т.Д. Джураев** // Доклады АН Республики Таджикистан, 2011, т. 54, № 2, с.141-144.
2. Джураев, Т.Д. Прогноз и расчёт диаграмм состояния расслаивающихся систем на основе европия с некоторыми переходными металлами / Т.Д. Джураев, Э.Р. Газизова, **Ф.К. Рахимов** // Доклады АН РТ, 2009, т. 52, №11, с.877-881.

3. **Рахимов, Ф.К.** Систематизация видов взаимодействия европия с s, p, d и f элементами периодической системы Д.И.Менделеева / **Ф.К. Рахимов, Э.Р. Газизова, Т.Д. Джураев** // Известия АН Республики Таджикистан, 2010, № 4 (141), с. 85-88.
4. Джураев, Т.Д. Оценка теплоёмкости, энтропии и энтальпии плавления химических соединений европия и иттербия с элементами I-VIB групп периодической таблицы / Т.Д. Джураев, **Ф.К. Рахимов, Э.Р. Газизова** // Доклады АН Республики Таджикистан, 2011, т. 54, № 4, с. 319-323

Публикации в других изданиях:

5. Рахимов, Ф.К. Устройство для многоструйной заливки расплава алюминия и легированного алюминия / **Ф.К. Рахимов, Э.Р. Газизова, Т.Д. Джураев, М.М. Хакдодов** // Малый патент № TJ 75 от 07.03.2007г.
6. Джураев, Т.Д. Разработка технологии получения мелкокристаллических лигатур на основе алюминия / Т.Д. Джураев, Э.Р. Газизова, **Ф.К. Рахимов, У.С. Жумаев** // Труды VII междунар. науч.-техн. симпозиума «Наследственность в литейных процессах». Самара: СамГТУ, 2008, с.113.
7. Джураев, Т.Д. Вакуумная установка для плавки и многоструйной заливки расплава алюминия и легированного алюминия / Т.Д. Джураев, Э.Р. Газизова, **Ф.К. Рахимов** // Материалы III-ей междунар. науч.-практ. конф. «Перспективы развития науки и образования в XXI веке». Душанбе: ТТУ, 2008, с.198-201.
8. Джураев, Т.Д. Прогноз и расчёт диаграммы состояния системы Eu-Be / Т.Д. Джураев, **Ф.К. Рахимов, Лаба А.М** // Материалы VI Нумановских чтений. Душанбе, 2009, с. 173-175.
9. Джураев, Т.Д. Термодинамическая оценка и расчёт диаграмм состояния европия с переходными металлами / Т.Д. Джураев, **Ф.К. Рахимов, Д.С. Назаров** // Материалы республиканской научно-практической конференции «Современные проблемы химии, химической технологии и металлургии». Душанбе, 2009, с. 146-148.
10. Джураев Т.Д., Статистический прогноз взаимодействия европия с некоторыми переходными металлами по критериям Воздвиженского / Т.Д. Джураев, **Ф.К. Рахимов, О.М. Акрамов** // Материалы научно-практической конференции «Современные проблемы химии, химической технологии и металлургии». Душанбе, 2009, с. 160-162.
11. **Рахимов, Ф.К.** Особенности взаимодействия европия с элементами периодической системы Д.И.Менделеева / **Ф.К. Рахимов, Э.Р. Газизова, Т.Д. Джураев** //

Материалы научно-практической конференции «Горные, геологические, экологические аспекты и развитие горнорудной промышленности в XXI веке», Душанбе, 2010, с. 116-126.

12. Джураев, Т.Д. Систематизация видов взаимодействия в бинарных системах на основе европия и иттербия / Т.Д. Джураев, **Ф.К. Рахимов**, Э.Р. Газизова, А.Ш. Махмудов // Материалы IV-ой международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования». Душанбе: ТТУ им. акад. М.С. Осими, 2010, с.140-142.
13. **Рахимов, Ф.К.** Особенности взаимодействия иттербия с элементами периодической системы Д.И.Менделеева / **Ф.К. Рахимов**, Э.Р. Газизова, Т.Д. Джураев // Материалы научно-практической конференции «Академик М.С.Осими и развитие культуры», посвящённой 90-летию академика М.С.Осими. Душанбе, 2010, 260-263 с.
14. Джураев, Т.Д. Сплав на основе алюминия / Т.Д. Джураев, Э.Р. Газизова, М.М. Хакдодов, **Ф.К. Рахимов** // Малый патент № ТЈ 453, 27.04.2011 г.
15. Джураев, Т.Д. К расчёту взаимной растворимости европия и иттербия с другими редкоземельными металлами в твёрдом состоянии / Т.Д. Джураев, **Ф.К. Рахимов**, Э.Р. Газизова // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Современные проблемы химии, химической технологии и металлургии», посвящённой 75-летию бывшего ректора ТТУ, д.т.н., профессора Вахобова А.В. Душанбе: ТТУ им.М.С. Осими, 2011, с.165-166.
16. Джураев, Т.Д. Прогноз и расчёт диаграмм состояния расслаивающихся систем на основе иттербия с некоторыми переходными металлами / Т.Д. Джураев, **Ф.К. Рахимов**, Э.Р. Газизова // Материалы Республиканской научно-практической конференции «Современные проблемы химии, химической технологии и металлургии», посвящённой 75-летию бывшего ректора ТТУ, д.т.н., профессора Вахобова А.В. Душанбе: ТТУ им.М.С. Осими, 2011, с.139-140.
17. Джураев, Т.Д. Расчёт энтальпии образования химических соединений европия и иттербия с некоторыми элементами периодической таблицы / Т.Д. Джураев, **Ф.К. Рахимов**, Э.Р. Газизова // Материалы V-ой международной научно-практической конференции «Перспективы применения инновационных технологий и усовершенствования технического образования в высших учебных заведениях стран СНГ». Душанбе: ТТУ им.М.С.Осими, 2011, с.370-372.

18. Джураев, Т.Д. Расчёт взаимной растворимости компонентов в жидком и твёрдом состояниях в системах европия с редкоземельными металлами (РЗМ) и построение их диаграмм состояния / Т.Д. Джураев, **Ф.К. Рахимов**, Э.Р. Газизова // Материалы IV Всероссийской с международным участием научной Бергмановской конференции «Физико-химический анализ: состояние, проблемы, перспективы развития». Махачкала: Даггоспедуниверситет НИИ ОНХ, 2012, с.118-123.
19. Джураев, Т.Д. Расчёт двойных диаграмм состояния эвтектического типа с устойчивыми химическими соединениями / Т.Д. Джураев, **Ф.К. Рахимов**, Э.Р. Газизова // Материалы VI-ой международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования», посвящённой 20-летию XVI сессии Верховного совета Республики Таджикистан. Душанбе: ТТУ им.М.С. Осими, 2012.
20. Джураев, Т.Д. Разработка универсальной установки для определения теплофизических свойств веществ / Т.Д. Джураев, М.Б. Акрамов, Ф. Мирзоев, **Ф.К. Рахимов** // Материалы VI-ой международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования». Душанбе: ТТУ им.М.С. Осими, 2012.
21. Джураев, Т.Д. Изучение диаграммы состояния трёхкомпонентной системы иттербий-алюминий-стронций / Т.Д. Джураев, Э.Р. Газизова, **Ф.К. Рахимов**, Ф.С. Шарипов, М.Т. Тошев // Материалы VI-ой международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования». Душанбе: ТТУ им.М.С. Осими, 2012.
22. Джураев, Т.Д. Влияние добавок редкоземельных металлов (Gd и Yb) на механические и акустодемпфирующие свойства сплавов системы Al-Mg-Zn / Т.Д. Джураев, Э.Р. Газизова, **Ф.К. Рахимов**, М.Т. Тошев // Материалы Республиканской конференции «Перспективы развития исследований в области химии и технологии гетеросоединений», посвящённой 20-летию кафедры «Макромолекулярные соединения и химическая технология». Душанбе: НИИ ТНУ, 2012.
23. Джураев, Т.Д. Построение диаграммы фазового равновесия системы бериллий-лантан / Т.Д. Джураев, Э.Р. Газизова, М.И. Халимова, **Ф.К. Рахимов** // Материалы Республиканской конференции «Перспективы развития исследований в области химии и технологии гетеросоединений», посвящённой 20-летию кафедры

«Макромолекулярные соединения и химическая технология». Душанбе: НИИ ТНУ, 2012.

24. Джураев, Т.Д. Инновационные технологии получения и применения акустодемпфирующих алюминиевых сплавов / Т.Д. Джураев, Э.Р. Газизова, М.М. Хакдодов, К.В. Никитин, **Ф.К. Рахимов**, М.Т. Тошев // Материалы 5-го Всероссийского научно-технического совещания «Взаимодействие науки и литейно-металлургического производства». Самара: СамГТУ, 2013.
25. Джураев, Т.Д. Учебное пособие / Т.Д. Джураев, Э.Р. Газизова, **Ф.К. Рахимов**, И.Ш. Муслимов // «Статистические и термодинамические критерии для прогноза и расчёта двойных диаграмм состояния металлических систем» к курсовым и дипломным работам для студентов, бакалавров и магистров, обучающихся по специальностям кафедры «Металлургия цветных металлов». Душанбе: ИО ТТУ, 2013, 63 с.
26. Джураев, Т.Д. Методические указания к лабораторным работам / Т.Д. Джураев, Э.Р. Газизова, **Ф.К. Рахимов**, Р.О. Норкулов // «Построение диаграмм состояния тройных систем методом математического моделирования» Душанбе: ИО ТТУ, 2013, 32 с.

Поступило в печать 18.03.2015. Подписано в печать
«__»__ 20__ . Формат 60x84^{1/16}. Бумага офсетная.
Гарнитура литературная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,5. Тираж ____ экз. Заказ №__

Отпечатано в типографии ООО «Андалеб-Р»
734036, г. Душанбе, ул. Р. Набиев 218.
E-mail: andaleb.r@mail.ru