

КЛАССИФИКАЦИЯ ДИАГРАММ ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ СПЛАВОВ С НЕСМЕШИВАЕМОСТЬЮ КОМПОНЕНТОВ И ПЕРСПЕКТИВА ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

¹Т.Д. Джураев, ²К.Б. Нуров, ¹Э.Р. Газизова, ¹М.Т. Тошев

¹Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

²Таджикский государственный педагогический университет имени С. Айни, Душанбе, Таджикистан

В представленной работе рассмотрены особенности бинарных систем с несмешивающимися компонентами и пути решения задач по их изучению. Показано, что существуют традиционные и новые способы производства сплавов на их основе. Вкратце приведен исторический экскурс по этапам изучения указанных систем. Раскрыта перспективность и актуальность изучения и применения сплавов, полученных из компонентов, частично смешивающихся в жидком и твердом состояниях. С применением термодинамического критерия на основании оценки поведения двух произвольно взятых компонентов впервые предложена классификация диаграмм фазового равновесия расслаивающихся систем. Эти данные позволили разделить системы на предельные (с монотектическим типом взаимодействия, закрытым куполом распада и практически отсутствием взаимодействия компонентов) и промежуточные (с монотектическими типами взаимодействия с открытыми куполами распада).

Ключевые слова: несмешивающиеся компоненты, диаграммы фазового равновесия, расслоение в жидком состоянии, энергия обмена, степень ближнего порядка.

ТАСНИФИ ДИАГРАММАҶОИ МУВОЗИНАТИ ФАЗАВИИ ХҶЛАҶО БО КОМПОНЕНТҶОИ ОМЕХТАНАШАВАНДА ВА ДУРНАМОИ ТАТБИҚИ ОНҶО

¹Т.Д. Ҷӯраев, ²К.Б. Нуров, ¹Э.Р. Газизова, ¹М.Т. Тошев

¹Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ, ш. Душанбе, Ҷумҳурии Тоҷикистон

²Донишгоҳи давлатии омӯзгории Тоҷикистон ба номи Садриддин Айни

Дар ин мақола хусусиятҳои системаҳои бинарӣ бо компонентҳои омехтанашаванда ва роҳҳои ҳалли масъалаҳои барои омӯхтани онҳо баррасӣ мешаванд. Мавҷудияти усулҳои анъанавӣ ва нави истифодаи ҳулаҳоро дар асоси ин компонентҳо нишон дода шудааст. Шарҳи мухтасари таърихӣ марҳилаҳои омӯзиши ин системаҳо пешниҳод карда мешавад. Имконият ва аҳамияти омӯзиш ва татбиқи ҳулаҳое, ки аз компонентҳои қисман омехтанашаванда дар ҳолатҳои моеъ ва сахт ба даст оварда шудаанд, муайян карда шудааст. Бо истифода аз меъёри термодинамикӣ ва дар асоси арзёбии рафтори ду компоненти худсарона интихобшуда, таснифи диаграммаҳои мувозинати фазавӣ системаҳои ба қабатҳо ҷудошаванда бори аввал пешниҳод карда мешавад. Ин маълумот ба мо имкон дод, ки системаҳоро ба маҳдудкунанда (бо таъсири мутақобилаи монотектикӣ, гунбази таҷзияи пӯшида ва қариб ки таъсири мутақобилаи байни компонентҳо) ва мобайнӣ (бо намудҳои таъсири мутақобилаи монотектикӣ ва гунбазҳои таҷзияи кушода) тақсим кунем.

Калидвожаҳо: компонентҳои омехтанашаванда, диаграммаҳои мувозинати фазавӣ, ба қабатҳо ҷудошавӣ дар ҳолати моеъ, энергияи боҳаммубодила, дараҷаи тартиби наздик.

CLASSIFICATION OF PHASE EQUILIBRIUM DIAGRAMS OF ALLOYS WITH IMMISCIBLE COMPONENTS AND THEIR APPLICATION PROSPECTS

¹T.D. Juraev, ²K.B. Nurov, ¹E.R. Gazizova, ²M.T. Toshev

¹Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, Dushanbe, Republic of Tajikistan

²Tajik State Pedagogical University named after S. Aini, Dushanbe, Tajikistan

This paper examines the characteristics of binary systems with immiscible components and approaches to studying them. It demonstrates the existence of traditional and new methods for producing alloys based on these components. A brief historical overview of the stages of studying these systems is provided. The potential and relevance of studying and applying alloys obtained from components partially miscible in the liquid and solid states is revealed. Using a thermodynamic criterion and based on an assessment of the behavior of two arbitrarily selected components, a classification of phase equilibrium diagrams for stratified systems is proposed for the first time. These data allowed us to divide the systems into limiting (with monotectic interaction, a closed decomposition dome, and virtually no interaction between the components) and intermediate (with monotectic interaction types and open decomposition domes).

Keywords: immiscible components, phase equilibrium diagrams, liquid-state stratification, exchange energy, degree of short-range order.

Введение

До недавнего времени [1] большое число металлических систем, проявляющих склонность к расслоению в жидком состоянии, было фактически вне практического рассмотрения. Системы с несмешивающимися компонентами (НК) обладают следующими особенностями, которые мешают специалистам широко использовать их:

- значительное различие показателей удельного веса и температуры кристаллизации участвующих компонентов;

- их склонность к неполной смешиваемости в расплавленном состоянии.

Поэтому для получения сплавов с участием НК необходимо изучить порядок формирования структурных составляющих системы для разработки технологических основ синтеза особо чистых материалов и высокоточных сплавов. Для реализации основной цели исследования нужно последовательно решить ряд вспомогательных задач, среди которых можно выделить следующие:

- анализ традиционных методов производства сплавов с НК на основе диаграмм состояния (ДС) различного типа;

- изучение поведения систем с НК с закрытым куполом расслоения при ускоренном охлаждении из состояния однородного жидкого раствора с последующим отжигом в интервале температур равновесия твердой и жидкой фаз;

- изучение особенностей твердо-жидкофазного равновесия в двойных системах с НК и, в частности, структурных и кинетических особенностей монотектического превращения (МП);

- изучение различных аспектов влияния легирующих элементов, добавляемых к твердому и жидкому реагентам на структурные и кинетические закономерности твердо-жидкофазного взаимодействия (ТЖВ);

- изучение тонких морфологических особенностей при контактном легировании;

- применение изученных закономерностей для получения новых сплавов на основе НК и изучение их структуры и свойств.

К основным традиционным и новым способам производства сплавов с НК относятся следующие [1-10]:

- спекание в порошковой металлургии;

- снижение ликвационного дефекта по плотности;

- получение из перегретого расплава гранул, подвергающихся спеканию;

- ускоренное охлаждение с отжигом высокотемпературного расплава между температурами при твердо-жидкофазном равновесии;

- литьё и кристаллизация с использованием давления;

- снижение ликвации легированием;

- принудительное перемешивание;

- ультразвуковое перемешивание;

- направленная кристаллизация;

- напыление сплавов;

- комбинированные способы производства.

Одной из попыток решения поставленных задач является классификация диаграмм фазового равновесия с точки зрения особенностей формирования в них структурообразования [(механической смеси (МС), твердого раствора (ТР), химического соединения (ХС) и промежуточных фаз (ПФ)], так как они являются достаточно информативными и позволяют исследователю прогнозировать в данной системе:

- о структурных эвтектических (ЭП) и перитектических превращениях (ПП), происходящих для любого состава при нагреве и охлаждении;

- температуры начала и конца кристаллизации расплава, которые имеют большое практическое значение;

- технологические и механические свойства сплавов;

- необходимые составы, удовлетворяющие практическим требованиям;

- технологию производства промышленных металлических материалов.

Учитывая вышеуказанные особенности бинарных систем (плотность, температуру плавления и склонность к расслаиванию) мы ДС разделили на 5 классов, которые приведены ниже и показаны на рисунке 1. При этом основывались на классическом представлении Н.С Курнакова о ДС [11] как диаграмме растворимости, позволяющем свободно понимать суть следующих происходящих в системе процессов.

Первый класс. ДС, где оба компонента неограниченно растворимы (НР) в жидком состоянии, нерастворимы в твердом и не образуют ПФ (рис. 1, а).

Второй класс. ДС, где оба компонента НР как в жидком, так и в твердом состояниях, и не образуют ПФ (рис. 1, б).

Третий класс. ДС, где оба компонента НР в жидком состоянии, ограниченно растворимы (ОР) в твердом с образованием ЭП (рис. 1, в), ПП (рис. 1, г) и не образуют ПФ.

Четвертый класс. ДС, где оба компонента НР в жидком состоянии и нерастворимы в твердом, а при затвердевании образуют ХС с сингулярной точкой с ЭП (рис. 1, д) и ХС, разлагающиеся с ПП (рис. 1, е).

Пятый класс. ДС, где оба компонента ОР как в жидком, так и в твердом состояниях (рис. 1, ж), и наблюдается НК в обоих состояниях (рис. 1, з) из-за их расслаивания в жидкости.

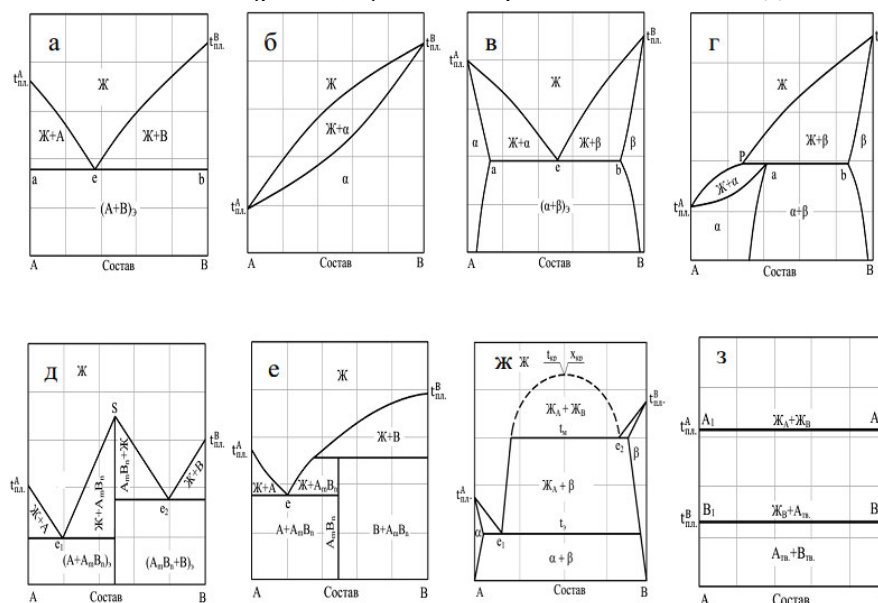


Рисунок 1 – Классификация диаграмм состояния бинарных систем
Figure 1 – Classification of binary phase diagrams

Согласно представленной классификации «удобными» являются ДС, относящиеся к классам с первого по четвертый (рис. 1, а-в, д). По ним удобно определить кристаллизацию, узкий интервал затвердевания и хорошие литейные свойства сплава. Они характеризуют технологичность сплавов. Эвтектические точки и области с самой низкой температурой плавления показывают на хорошую жидкотекучесть расплава и минимальную усадку при затвердевании. При НР компонентов в твердом состоянии образуются однородные твердые растворы, которые указывают на возможность улучшить однородность сплава термической обработкой.

«Неудобными» являются ДС, подразделяющиеся на третий (рис. 1, г) и четвертый (рис. 1, е) классы. Они характеризуются наличием в системе ПП, которые по времени протекают медленно и часто не успевают завершиться, что приводит к возможности ликвации по удельному весу и появлению неоднородностей в сплавах. Широкий интервал кристаллизации в системе при охлаждении повышает склонность сплава к пористости и появлению горячих трещин. Образование ПФ порой придаёт сплавам хрупкость, способствующую трудностям при обработке давлением.

Перечисленные «удобные» и «неудобные» характеристики ДС позволяют установить закономерности и разработать технологии литейных процессов, термической обработки, получения и глубокой очистки металлов и их сплавов, что является основополагающим при их практическом применении.

Для более подробного рассмотрения ДС пятого класса из выше представленной классификации необходимо провести некоторый исторический экскурс по попыткам изучения таких систем.

Достигнуть значительных успехов в разработке методик и создании универсальных методов изучения удалось к завершению сороковых годов прошлого века. Это было связано с активным

усовершенствованием акустических исследований молекулярных жидкостей. Основным объектом изучения являлись оптически прозрачные органические жидкости [12-15]. Анализ, выполненный специалистами Национального управления по авиации и исследованию космического пространства США в конце пятидесятых годов, показал [16], что существует особый тип систем компонентов наиболее перспективных с этой точки зрения. Тип систем, описание которых впервые встречается ещё в 1881 году, был назван «системами, проявляющими склонность к расслоению в жидком состоянии» или «системами несмешивающихся компонентов». В силу характерных трудностей изучения этих систем и синтеза материалов на их основе [17, 18] они практически были не использованы в технологических нуждах.

Однако исследования продолжались, и из всех опубликованных данных наиболее надежными надо признать результаты работ М.Б. Гитиса (1975 г.) и Л.Н. Соколова (1977 г.) по изучению распространения звука в расплавах расслаивающихся систем при высоких температурах [19, 20], обладающих минимальной погрешностью по чистоте изучаемого материала. Позднее В.М. Глазов со своими учениками (1985 г.) предложили методологию исследования акустических свойств в несмешивающихся системах с целью определения координат распада на кривой бинодали с помощью импульсно-фазового метода, применяя переменную акустическую базу с 2-мя пьезопреобразователями [21, 22]. Им первыми удалось применить высококачественный акустический контакт, при котором использовался высокочистый жидкий борный ангидрид, что позволило получать наиболее точные результаты исследования систем с НК.

ДС пятого класса с эффектом НК и их расслоения не имели физико-химическую интерпретацию, поэтому на протяжении многих десятилетий им не уделялось достаточного внимания. В работе [23] методами геометрической термодинамики прослежен переход ДС от первого по четвертый классы, так как эти ДС имеют общие свойства НР в жидком состоянии и переход к ДС 5-го класса (рис. 1, з) с расслоением как в жидком, так и в твердом состояниях, то есть имеется НК. Многочисленные попытки систематизации и анализа ДС с НК были далеки от завершения, не имели однозначной оценки и не раскрывали сути взаимодействия. Согласно выводам [23] «причина НК ... еще далека от выяснения». Авторы [23-25] сводят анализ эффекта расслоения к силам взаимодействия компонентов А и В над разноименными связями типа А-В. Для выяснения причин НК при сплавлении и точной оценки поведения двух произвольно взятых компонентов при этом не существовало, что сподвигло исследователей к применению статистических критериев [26-28]. Однако, этот анализ показал, что существующие критерии не позволяют провести четкое разделение ДС пятого класса с расслаиванием на системы с монотектическим типом взаимодействия (рис. 1, ж) и на системы, где НК кристаллизуются из собственных расплавов (рис. 1, з).

Большой вклад для решения данного вопроса оказали работы [29, 30], где с помощью термодинамических представлений был предложен критерий на основании оценки поведения двух произвольно взятых компонентов. Оценку производили через энергию взаимообмена (Q_{12}), которая представляет собой среднее увеличение энергии одной молекулы того или иного сорта при замене всех её соседей молекулами другого сорта. Эта величина определяется по уравнению в приближении Гильдебранда-Мотта с использованием электроотрицательностей (E), мольных объемов (V) и параметров растворимости (δ) [31]:

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

и является одной из лучших мерил в термодинамике, применяемых для жидкого состояния [32]. Она, аналогично многим другим характеристикам [33], является периодическим свойством от положения элемента в ПТ Д.И. Менделеева. Для установления этой периодичности используется график, представляющий собой зависимость энергии взаимообмена одного из компонентов с другими элементами от их порядкового номера.

Анализ значений Q_{12} показал, что в соответствии с квазихимической теорией при $Q_{12} < 0$ сплав между компонентами 1-2 может существовать. К виду таких систем, согласно нашей классификации (рис. 1), относятся ДС с первого по четвертый классы, которые характеризуются одним общим свойством – НР в жидком состоянии. При затвердевании образуются: МС и области ОР; ХС и ПФ из жидкости, что хорошо согласуется с нашими выводами [33, 34] и опытными данными [35].

В случае $Q_{12} > 0$ компоненты в системе не смешиваются в жидком состоянии. Вид ДС таких систем относится к пятому классу (рис. 1, ж и з). Одни из них характеризуются расслоением компонентов в жидком состоянии и наличием областей ОР в твердом, что соответствует монотектическому типу взаимодействия с закрытым куполом распада (рис. 1, ж). Системы, где наблюдается НК, кристаллизующихся из собственных расплавов, приобретают другой вид ДС (рис. 1, з) с полным отсутствием взаимодействия.

Однако, характерное $Q_{12} > 0$ при этом не позволяет между собой разделить эти два вида ДС. Для дополнения этого критерия используется квазихимическое определение степени ближнего порядка в сплавах [29, 30], которое вычисляется по формуле (2):

$$(1 - \sigma_{12}) / (1 + \sigma_{12}) = \exp(-\Delta H / kT), \quad (2)$$

где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, а $\Delta H = [0.5(N_{11} + N_{22})]$ и N_{11} , N_{22} – энтальпии связи различных сочетаний пар атомов.

Рассчитанные значения совместных двух критериев Q_{12} и σ_{12} анализировались для ряда двойных систем, имеющих $Q_{12} > 0$, что позволило ДС пятого класса (рис. 1, ж и з) разделить на подклассы (рис. 2, 5.1-5.4), с соответствующими значениями: $Q_{12} > 0$, $\sigma_{12} \approx 1$ и $Q_{12} > 0$, $\sigma_{12} \approx -1$.

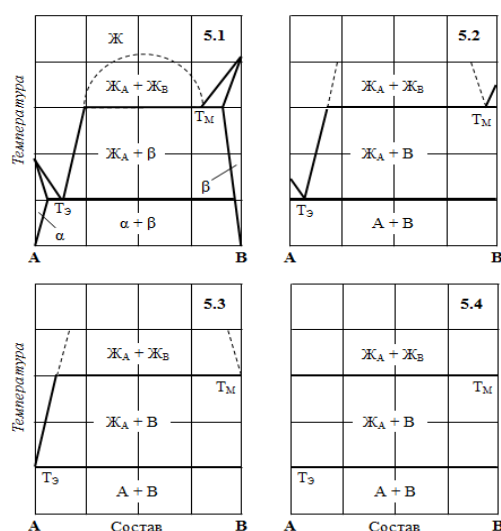


Рисунок 2 – Общий вид ДС пятого класса с подклассами 5.1-5.4
Figure 2 – General view of Class V phase diagrams with subclasses 5.1–5.4

Можно видеть (рис. 2, 5.1-5.4), что два подкласса 5.1 и 5.4 относятся к предельным видам ДС, где намечается тенденция к монотектическому типу взаимодействия. Здесь значения основных критериев примут вид: 5.1 - $Q_{12} > 0$, $\sigma_{12} \approx 1$ и 5.4 - $Q_{12} > 0$, $\sigma_{12} \approx -1$. Два других подкласса 5.2 и 5.3 относятся к промежуточным видам расслаивания с открытым куполом распада (рис. 2, 5.2, 5.3) и отвечают следующим значениям критериев: 5.2 - $Q_{12} > 0$, $\sigma_{12} \geq 0$ и 5.3 - $Q_{12} > 0$, $\sigma_{12} \leq 0$.

С точки зрения удобства применимости сплавов монотектического состава (подкласса 5.1) можно указать на отсутствие сложностей при получении достаточно однородных по составу отливок из-за того, что при изотермической кристаллизации такого сплава происходит монотектическая реакция. Здесь твёрдая фаза является ведущей, вокруг которой в виде капель, запутываясь между её дендритами, затвердевает легкоплавкий компонент.

По ДС подклассов 5.2, 5.3 и 5.4. значительно сложнее определить протекание технологического процесса получения сплавов. На ДС подклассов 5.2 и 5.3 (рис. 2) купол расслоения открыт. Точка монотектики таких систем обычно располагается несколько ближе к высокотемпературному компоненту, в результате чего она будет содержать в составе большую часть этого компонента. Системы типа подкласса 5.2 используются для получения сплавов традиционными в литейном деле способами с ускоренной кристаллизацией. На диаграммах состояния подкласса 5.3 область несмешиваемости в жидком состоянии имеет значительный промежуток, поэтому

однородный жидкий раствор зачастую просто не изображается. Монотектический состав в подобных системах различается от основного компонента на 0.01 или 0.001 доли, а температура монотектической реакции всего лишь на пару единиц ниже температуры его кристаллизации. В этом и заключается сложность получения однородных композиций на основе таких систем, где тугоплавкий компонент может содержать незначительное количество легкоплавкого элемента. Системы подкласса 5.4 имеют два элемента, которые плавятся независимо друг от друга, не взаимодействуя между собой ни при какой температуре и ни при каком содержании, а при кристаллизации затвердевают из собственного расплава на своём уровне.

Системы с НК как перспективная основа для материалов специального назначения

ДС систем подклассов 5.2-5.4, фактически невовлеченных в техническое применение из-за трудностей производства сплавов на их основе, уже определяет перспективность и актуальность их изучения. Кроме того, даже поверхностное знакомство с физико-химическими свойствами компонентов и их сплавов показывает, что при выполнении определенных требований к их структуре можно получать самые разнообразные нетрадиционные материалы. Основные предпосылки возможностей реализации высокого уровня физико-химических свойств сплавов из НК сводятся к следующему:

- при условии равномерного распределения компонентов по объему расплава с заданной дисперсностью структурных составляющих является одной из перспектив работы получения безпористого композиционного материала, сочетающего в себе фактически исходные свойства сплавляемых компонентов, поскольку их взаимная растворимость в твердом состоянии почти отсутствует. Набор возможных сочетаний указанных свойств достаточно велик. Соответственно велики и возможности создания самых разнообразных композиций с заданными свойствами;

- структурная особенность композиционных материалов из НК заключается в том, что составляющие их фазы фактически не взаимодействуют друг с другом.

Примером может быть разработанный способ цементации Fe-Cu сплавов [35]. Введение хотя бы небольших добавок углерода в систему Fe-Cu для ее упрочнения обычным металлургическим путем невозможно из-за полного расслоения системы в его присутствии. Метод [35] фактически использует возможность избирательного легирования сплавов НК – углерод растворяется в Fe при температурах цементации и почти не взаимодействует с Cu. Благодаря этому удается сохранить равномерное распределение Fe-ной и Cu-ной фаз и сильно упрочнить первую (с поверхности).

Продолжая перечень примеров, следует отметить, что, не смотря на свою непопулярность, сплавы с НК нашли распространенное применение, которое обосновано уникальностью их свойств.

1. В силу особенностей процесса кристаллизации в системах НК в ряде случаев возможно создание сильно анизотропных направленных волокнистых структур, что предоставляет дополнительные преимущества по некоторым свойствам.

2. Для эффективного использования принципа Шарпи с целью создания антифрикционных сплавов, работающих в режиме трения скольжения, представляют интерес именно сплавы на основе легкоплавких, пластичных элементов с прочной основой, имеющих высокую теплопроводность.

3. Подтверждением сделанных заранее прогнозов могут быть примеры применения материалов на основе систем Fe-Cu-Pb, Al-Pb, Cu-Pb, Al-Sn, а сложности, сопровождающие синтез этих сплавов, подчёркивают актуальность исследования закономерностей образования в них структурных составляющих их фаз.

4. Развитие представления о механизме диссипации энергии может стать перспективной основой для создания высокодемпфирующих сплавов, сочетающих это свойство с антифрикционными характеристиками композиций на основе систем Cu-Mo, Cu-V, Cu-Nb, Cu-Fe, Cu-W, Ag-Fe, Ag-Mn, Ag-Nb.

5. Отсутствие взаимной растворимости в твердом состоянии в существующих около 70 двойных системах с НК, содержащих такие элементы как Ag, Cu, In, Al, являющиеся основой для создания полупроводниковых, токопроводящих и теплопроводящих приборов, не наблюдается резкого снижения свойств указанных элементов при их сплавообразовании.

6. Проанализировав возможности структурных формирований фаз в сплавах систем с НК таких как Cu-Pb, Ag-S, Ag-Se, Ag-Te, Cu-S, Cu-Se, Cu-Te, In-S, In-Se и In-Te, можно произвести синтез новых сплавов со сверхпроводящими и особыми электропроводящими свойствами.

7. На основе систем с НК возможно создание магнитномягких и магнитно-жестких материалов, обладающих комплексом высоких эксплуатационных качеств. Так, сплавление чистого Fe, Co, Ni или их сплавов с определенным количеством Cu и Pb может при соблюдении известных требований значительно повысить износостойкость материала при неизменной величине намагниченности насыщения и без заметного снижения его магнитной проницаемости.

8. Прогноз некоторых других возможных областей применения систем с НК из анализа физико-химических свойств компонентов включает в себя:

- разработку конструкционных материалов от радиационной защиты путем равномерного распределения по их объему или в поверхностном слое Ag, Cu и In включений Pb и других легкоплавких элементов, таких как Sn, Bi и Sb.
- разработку конструкций, работающих при повышенных температурах с помощью «выпотевающих» материалов, из таких систем как Cu-W, Cu-Nb, Cu-W-Sn, Cu-Nb-Sn и др.;
- топливные элементы ядерных реакторов;
- материалы с повышенной плотностью типа Cu-W, Cu-Nb, Cu-Mo.

Заключение

На основании вышеизложенного следует отметить, что проведенный анализ двойных ДС позволил произвести их новую классификацию с точки зрения «удобности» и «неудобности» их применения специалистами, а также впервые обосновать предложенный критерий для систем с несмешиваемостью компонентов, служащий разграничением ДС на предельные и промежуточные типы взаимодействия. К предельным относятся системы с монотектическим типом взаимодействия с закрытым куполом распада и практически отсутствием взаимодействия компонентов. К промежуточным типам взаимодействия относятся системы с монотектическими типами взаимодействия с открытыми куполами распада. Данная информация может служить ценным материалом при разработке технологий получения сплавов с несмешивающимися компонентами.

Рецензент: Самихов Ш.Р.-д.т.н., профессор кафедры "Технология химических производств" Таджикского национального университета.

Литература

1. Авраамов, Ю.С. Сплавы на основе систем с ограниченной растворимостью в жидком состоянии (теория, технология, структура и свойства) / Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин. - М.: Интерконтакт Наука, 2002. – 371 с.
2. Портной, Д.И. Структура и свойства композиционных материалов / Д.И. Портной, С.Е. Салибеков, И.А. Светлов, В.М. Чубаров. - М.: Машиностроение, 1979. – 255 с.
3. Федорченко, И.М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы / И.М. Федорченко, Л.И. Пугина. - Киев: Наукова думка, 1980. – 403 с.
4. Салли, И.В. Кристаллизация при сверхбольших скоростях охлаждения / И.В. Салли. - Киев: Наукова думка, 1972. – 134с.
5. Мирошниченко, И.О. Закалка из жидкого состояния / И.О. Мирошниченко. - М.: Металлургия, 1982. – 168 с.
6. Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин. - М.: Металлургия. 1981. – 416 с.
7. Добаткин, В.И. Гранулируемые алюминиевые сплавы / В.И. Добаткин, В.И. Елагин. - М.: Металлургия, 1981. – 174 с.
8. Буше, Н.А. Композиционные материалы с мягкой металлической составляющей / Н.А. Буше, Г.А. Мудренко, Т.Ф. Маркова // Трение и износ. - 1982. - Т.3. - № 3. – С.396-400.
9. Авторское свидетельство СССР № 890750. Способ получения сплавов на основе систем, расслаивающихся в жидком состоянии / Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин, У.Ш. Алиев. – 1981.
10. Авторское свидетельство СССР № 1001574. Способ получения композиционных материалов / Ю.С. Авраамов, А.Д. Шляпин, А.И. Кирнос, С.В. Попова, А.В. Цвященко, А.Н. Лищук. – 1982.

11. Курнаков, Н.С. Введение в физико-химический анализ / Н.С. Курнаков. – М.: АН СССР, 1940. – 562 с.
12. Ноздрев, В.Ф. Молекулярная акустика / В.Ф. Ноздрев, Н.В. Федорищенко. – М.: Высшая школа, 1974. – 288 с.
13. Михайлов, И.Г. Распространение ультразвуковых волн в жидкостях / И.Г. Михайлов. – Л.-М.: ГИТТЛ, 1949. – 152 с.
14. Кудрявцев, Б.Б. Применение ультразвуковых методов в практике физико-химических исследований / Б.Б. Кудрявцев. – Л.-М.: ГИТТЛ, 1952. – 323 с.
15. Михайлов, И.Г. Основы молекулярной акустики / И.Г. Михайлов, В.А. Соловьев, Ю.П. Сырников. – М.: Наука, 1964. – 514 с.
16. Markworth, A.J. Immiscible materials and alloys / A.J. Markworth, S.H. Gelles, J.J. Duga and W. Oldfield // Proceedings of the 3-rd Space Processing Symposium, NASA Report. – 1974. – № 74-5 – P.1003.
17. Axon, H.J. Systematization of certain binary metallic equilibrium diagrams / H.J. Axon // J. Nature. – 1948. – V.162. – P. 397.
18. Mott, B.W. Liquid immiscibility in metal systems / B.W. Mott // J. Phil. Mag. – 1957. – V.2. – P.259.
19. Гитис, М.Б. Распространение звука в металлах и полупроводниках при высоких температурах. Автореф. дисс. ... д-ра физ.-мат. наук / М.Б. Гитис. – Л.: ЛГУ, 1975. – 33 с.
20. Соколов, Л.Н. Исследование расплавов никель-кремний ультразвуковым методом / Л.Н. Соколов, Я.Л. Кац, Г.Н. Окорочков // Изв. АН СССР. Металлы. – 1977. – №4. – С.62-68.
21. Глазов, В.М. Аппаратура и методика для исследований акустических свойств электронных расплавов / В.М. Глазов, В.И. Тимошенко, С.Г. Ким // Заводская лаборатория. – 1985. – Т.51. – №3. – С.22-26.
22. Авторское свидетельство СССР № 1146591. Ультразвуковой преобразователь для контроля расплавов металлов и полупроводников / В.М. Глазов, В.И. Тимошенко, С.Г. Ким. – 1985.
23. Жуков, А.А. Геометрическая термодинамика сплавов железа / А.А. Жуков. – М.: Металлургия, 1979. – 232 с.
24. Зауэрвальд, Ф. Исследование жидких металлических расплавов / Ф. Зауэрвальд // Известия АН СССР. Отделение технических наук: Металлургия и топливо. – 1961. – № 3. – С.115-116.
25. Sauerwald, F. Uber die jetzigen Stand der systematischen Betrachtung schmelzflussiger Legierungen (Zur Systematik VII) / F.Sauerwald, P.Brand, W.Menz // Z. Metallkunde. – 1966. – Bd.57. – H.2. – S. 103-107.
26. Воздвиженский, В.М. Статистический метод прогноза взаимодействия компонентов (прогноз по критериям) / В.М. Воздвиженский // В сб.: Общие закономерности в строении диаграмм состояния металлических систем. – М.: Наука, 1973. – С. 103-108.
27. Вигдорович, В.Н. Систематизация видов взаимодействий в двойных системах на основе кальция, стронция и бария / В.Н. Вигдорович, А.В. Вахобов, Т.Д. Джураев // В сб.: Общие закономерности в строении диаграмм состояния металлических систем. – М.: Наука, 1973. – С. 121-123.
28. Воздвиженский, В.М. Прогноз двойных диаграмм состояния / В.М. Воздвиженский. – М.: Металлургия, 1975. – 224 с.
29. Джураев, Т.Д. Степень ближнего порядка – критерий для определения разновидностей расслаивающихся систем / Т.Д. Джураев, А.В. Вахобов // Доклады АН ТаджССР, 1986. – Т. 29. – № 1. – С. 32-35.
30. Джураев, Т.Д. Степень ближнего порядка и разновидности диаграмм состояния расслаивающихся систем / Т.Д. Джураев // Материалы V Всес. науч. совещания. – М.: 1989. – С. 9.
31. Hildebrand, I.H. The solubility of nonelectrolytes / I.H. Hildebrand, R.I. Scott. – N.-Y.: Reinhold publ, 1950. – 488 p.
32. Клеппа, О.Дж. Термодинамика и свойства жидких металлов / О.Дж. Клеппа // В кн.: Жидкие металлы и их затвердевание. – М.: ГосНТИ литературы по черной и цветной металлургии, 1962. – С. 67-73.
33. Джураев, Т.Д. Закономерности изменения энергии взаимообмена иония с элементами периодической таблицы (ПТ) от их порядкового номера / Т.Д. Джураев, А.С. Джафаров, К.Б. Нурув, М.Т. Тошев // Чебышевский сборник, 2023. – Т. 24. – № 5. – С. 266-273.
34. Джураев, Т.Д. Закономерности изменения энергии смешения цинка с другими элементами в зависимости от их порядкового номера / Т.Д. Джураев, С.С. Содыкова // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования, 2019. – №1(45). – С. 103-105.
35. Шляпин, А.Д. Сплавы на основе систем несмешивающихся компонентов: немного истории и современное состояние проблемы. Ч. 1 / А. Д. Шляпин, В. В. Овчинников, И. А. Курбатова, Н. В. Учеваткина // Технология металлов. – 2025. – № 4. – С. 2-14. – DOI 10.31044/1684-2499-2025-0-4-2-14.

References

1. Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D. Alloys Based on Systems with Limited Liquid-State Solubility (Theory, Technology, Structure and Properties). Moscow: Interkontakt Nauka Publ., 2002. 371 p.
2. Portnoi D.I., Salibekov S.E., Svetlov I.A., Chubarov V.M. Structure and Properties of Composite Materials. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979. 255 p.
3. Fedorchenko I.M., Pugina L.I. Composite Sintered Antifriction Materials. Kyiv: Naukova Dumka Publ., 1980. 403 p.
4. Salli I.V. Crystallization at Ultra-High Cooling Rates. Kyiv: Naukova Dumka Publ., 1972. 134 p.
5. Miroshnichenko I.O. Quenching from the Liquid State. Moscow: Metallurgiya Publ., 1982. 168 p.
6. Kolachev B.A., Livanov V.A., Elagin V.I. Physical Metallurgy and Heat Treatment of Non-Ferrous Metals and Alloys. Moscow: Metallurgiya Publ., 1981. 416 p.
7. Dobatkin V.I., Elagin V.I. Granulated Aluminum Alloys. Moscow: Metallurgiya Publ., 1981. 174 p.
8. Bushe N.A., Mudrenko G.A., Markova T.F. Composite Materials with a Soft Metallic Matrix. Friction and Wear. 1982;3(3):396–400.
9. USSR Author's Certificate No. 890750. Method for Producing Alloys Based on Systems Exhibiting Liquid-State Immiscibility. Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D., Aliev U.Sh. 1981.
10. USSR Author's Certificate No. 1001574. Method for Producing Composite Materials. Avraamov Yu.S., Shlyapin A.D., Kirnos A.I., Popova S.V., Tsvyashchenko A.V., Lishchuk A.N. 1982.
11. Kurnakov N.S. Introduction to Physicochemical Analysis. Moscow: USSR Academy of Sciences Publ., 1940. 562 p.
12. Nozdrev V.F., Fedorishenko N.V. Molecular Acoustics. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1974. 288 p.
13. Mikhailov I.G. Propagation of Ultrasonic Waves in Liquids. Leningrad–Moscow: State Publishing House for Technical and Theoretical Literature (GITTL), 1949. 152 p.
14. Kudryavtsev B.B. Application of Ultra-Acoustic Methods in Physicochemical Research. Leningrad–Moscow: State Publishing House for Technical and Theoretical Literature (GITTL), 1952. 323 p.
15. Mikhailov I.G., Solovyev V.A., Syrnikov Yu.P. Fundamentals of Molecular Acoustics. Moscow: Nauka Publ., 1964. 514 p.
16. Markworth A.J., Gelles S.H., Duga J.J., Oldfield W. Immiscible Materials and Alloys. In: Proceedings of the 3rd Space Processing Symposium. NASA Report. 1974;(74-5):1003.
17. Axon H.J. Systematization of Certain Binary Metallic Equilibrium Diagrams. Nature. 1948;162:397.
18. Mott B.W. Liquid Immiscibility in Metal Systems. Philosophical Magazine. 1957;2:259.
19. Gitis M.B. Propagation of Sound in Metals and Semiconductors at High Temperatures. Extended Abstract of Dr. Sci. (Physics and Mathematics) Dissertation. Leningrad: Leningrad State University, 1975. 33 p.
20. Sokolov L.N., Kats Ya.L., Okorokov G.N. Investigation of Nickel–Silicon Melts by the Ultra-Acoustic Method. Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Metally (Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Metals). 1977;(4):62–68.
21. Glazov V.M., Timoshenko V.I., Kim S.G. Equipment and Technique for Investigating the Acoustic Properties of Electronic Melts. Zavodskaya Laboratoriya. 1985;51(3):22–26.
22. USSR Author's Certificate No. 1146591. Ultrasonic Transducer for Monitoring Melts of Metals and Semiconductors. Glazov V.M., Timoshenko V.I., Kim S.G. 1985.
23. Zhukov A.A. Geometric Thermodynamics of Iron Alloys. Moscow: Metallurgiya Publ., 1979. 232 p.
24. Sauerwald F. Investigation of Liquid Metallic Melts. Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Otdelenie Tekhnicheskikh Nauk. Metallurgiya i Toplivo. 1961;(3):115–116.
25. Sauerwald F., Brand P., Menz W. Über den jetzigen Stand der systematischen Betrachtung schmelzflüssiger Legierungen (Zur Systematik VII). Zeitschrift für Metallkunde. 1966;57(2):103–107.
26. Vozdvizhensky V.M. Statistical Method for Predicting Component Interaction (Prediction Based on Criteria). In: General Regularities in the Structure of Phase Diagrams of Metallic Systems. Moscow: Nauka Publ.; 1973. pp. 103–108.
27. Vigdorovich V.N., Vakhobov A.V., Dzhuraev T.D. Systematization of Interaction Types in Binary Systems Based on Calcium, Strontium and Barium. In: General Regularities in the Structure of Phase Diagrams of Metallic Systems. Moscow: Nauka Publ.; 1973. pp. 121–123.
28. Vozdvizhensky V.M. Prediction of Binary Phase Diagrams. Moscow: Metallurgiya Publ., 1975. 224 p.
29. Dzhuraev T.D., Vakhobov A.V. Degree of Short-Range Order as a Criterion for Determining the Types of Immiscible Systems. Doklady Akademii Nauk Tadzhikskoi SSR. 1986;29(1):32–35.

30. Dzhuraev T.D. Degree of Short-Range Order and Types of Phase Diagrams of Immiscible Systems. In: Proceedings of the 5th All-Union Scientific Conference. Moscow; 1989. p. 9.
31. Hildebrand J.H., Scott R.L. The Solubility of Nonelectrolytes. New York: Reinhold Publishing Corporation; 1950. 488 p.
32. Kleppa O.J. Thermodynamics and Properties of Liquid Metals. In: Liquid Metals and Their Solidification. Moscow: State Scientific and Technical Publishing House of Ferrous and Non-Ferrous Metallurgy Literature; 1962. pp. 67–73.
33. Dzhuraev T.D., Dzhaifarov A.S., Nurov K.B., Toshev M.T. Regularities in the Variation of the Exchange Energy of Indium with the Elements of the Periodic Table Depending on Their Atomic Number. *Chebyshevskii Sbornik (Chebyshev Collection)*. 2023;24(5):266–273.
34. Dzhuraev T.D., Sodykova S.S. Regularities in the Variation of the Mixing Energy of Zinc with Other Elements Depending on Their Atomic Number. *Polytechnical Bulletin. Series: Engineering Research*. 2019;(1):103–105.
35. Shlyapin A.D., Ovchinnikov V.V., Kurbatova I.A., Uchevatkina N.V. Alloys Based on Systems of Immiscible Components: A Brief History and the Current State of the Problem. Part 1. *Tekhnologiya Metallov (Metal Technology)*. 2025;(4):2–14. DOI: 10.31044/1684-2499-2025-0-4-2-14

МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН - СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ - AINFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Чураев Тухтасун Чураевич доктори илмҳои химия, профессор	Джураев Тухтасун Джураевич доктор химических наук, профессор	Juraev Tukhtasun Juraevich doctor of chemical sciences, professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: mcm45@mail.ru		
TJ	RU	EN
Нуров Курбонали Бозорович номзади илмҳои химия, дотсент	Нуров Курбонали Бозорович кандидат химических наук, доцент	Nurov Kurbonali Bozorovich candidate of chemical sciences, assistant professor
Донишгоҳи давлатии омӯзгории Тоҷикистон ба номи С. Айни	Таджикский государственный педагогический университет имени С. Айни	Tajik State Pedagogical University named after S. Ayni
E-mail: nurov-58@mail.ru		
TJ	RU	EN
Газизова Эльвира Рашитовна номзади илмҳои техникаӣ, дотсент	Газизова Эльвира Рашитовна кандидат технических наук, доцент	Gazizova Elvira Rashitovna candidate of technical sciences, associate professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: mcm45@mail.ru		
TJ	RU	EN
Тошев Мансур Толибҷонович номзади илмҳои техникаӣ, дотсент	Тошев Мансур Толибҷонович кандидат технических наук, доцент	Toshev Mansur Tolibjonovich candidate of technical sciences, associate professor
Донишгоҳи техникии Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ	Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими	Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi
E-mail: toshev1102@mail.ru		