

УДК 536.73

СВЯЗЬ АНОМАЛИЙ ПОВЕДЕНИЯ ПЛУТОНИЯ С ИЗМЕНЕНИЕМ КОНФИГУРАЦИОННОЙ ЭНТРОПИИ

А.М. Савченко, А.В. Лаушкин, Ю.В. Коновалов

*АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт
неорганических материалов имен академика А.А. Бочвара (АО ВНИИНМ),
Москва*

E-mail: sav-alex111@mail.ru

Рассмотрены некоторые «аномальные» свойства плутония.

Для объяснения этих свойств применен термодинамический подход, основанный на энергетическом влиянии конфигурационной энтропии на межатомную связь и электронное состояние плутония, включающий рассмотрение его как многокомпонентного сплава, где компонентами служит тот же плутоний в различном электронном и фононном состояниях. В результате возрастает вклад энтропии смешения в процессы фазовых превращений и свойств плутония, что приводит к усилению межатомных связей и, следовательно, с уменьшением величины среднеквадратичных смещений атомов (СКСА) при увеличении температуры. Рассмотрены вопросы сжатия решетки дельта- фазы плутония при нагреве, стабильности ее при малом легировании и наличии двойной С-кривой распада ее на время-температура-превращение (ТТТ) диаграмме.

Ключевые слова: плутоний, термодинамика, свободная энергия, энтропия, энтропия смешения, конфигурационная энтропия.

RELATIONSHIP BETWEEN ANOMALIES IN THE BEHAVIOR OF PLUTONIUM AND CHANGES IN CONFIGURATIONAL ENTROPY

A.M. Savchenko, A.V. Laushkin, Y.V. Konovalov

JSC «A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials», Moscow

Some «anomalous» properties of plutonium are considered. To explain these properties, a thermodynamic approach is used based on the energy influence of configurational entropy on the interatomic bond and the electronic state of plutonium, including its consideration as a multicomponent alloy, where the components are the same plutonium in different electronic and phonon states. As a result, the contribution of the entropy of mixing to the processes of phase transformations and the properties of plutonium increases, which leads to an increase in interatomic bonds and, consequently, to a decrease in the value of the root-mean-square displacements of atoms with increasing temperature. The issues of lattice compression of the delta phase of plutonium during heating, its stability with low alloying and the presence of a double C-curve of its decay on the time-temperature-transformation (TTT) diagram are considered

Keywords: plutonium, thermodynamics, free energy, entropy, mixing entropy, configuration entropy.

Введение

Группа актинидов (Th, U, Pu, Np, Am и др.) относится к наиболее трудным для исследования металлам, в том числе из-за сложного электронного строения, и в то же время их использование необходимо для успешного развития ядерной энергетики при использовании в качестве ядерного топлива и замыкания топливного цикла [1].

Вот лишь небольшой перечень необычных свойств одного из актинидов – плутония:

1. Очень низкая температура плавления.
2. Уменьшение объема при плавлении.
3. Большие коэффициенты анизотропного термического расширения.
4. Шесть фазовых переходов в твердом состоянии.
5. Наименьшая плотность наиболее плотноупакованной фазы.
6. Аномально высокая теплоемкость плутония при температурах, близких к абсолютному нулю и т. д. [1].

Эти и другие необычные свойства плутония частично представлены на рис. 1, взятом из обзора З. Хеккера [1].

Наибольший интерес, как с прикладной точки зрения, так и по своим свойствам, представляет собой дельта-фаза плутония с кубической ГЦК решеткой. Рассмотрим лишь некоторые «странности» поведения дельта-фазы плутония:

- стабилизация кристаллической решетки лишь небольшим количеством легирующих элементов (1-3 % ат) как с меньшим, так и с большим атомным объемом;
- аномально низкая плотность;
- увеличение плотности дельта-фазы с повышением температуры (рис. 1) и т.д. [2].

Важность понимания этих необычных свойств плутония для использования его, прежде всего как ядерного топлива, заставляет разрабатывать новые подходы, затрагивающие фундаментальные основы материаловедения. В данной статье мы предлагаем рассмотреть природу его необычных свойств с использованием термодинамических методов.

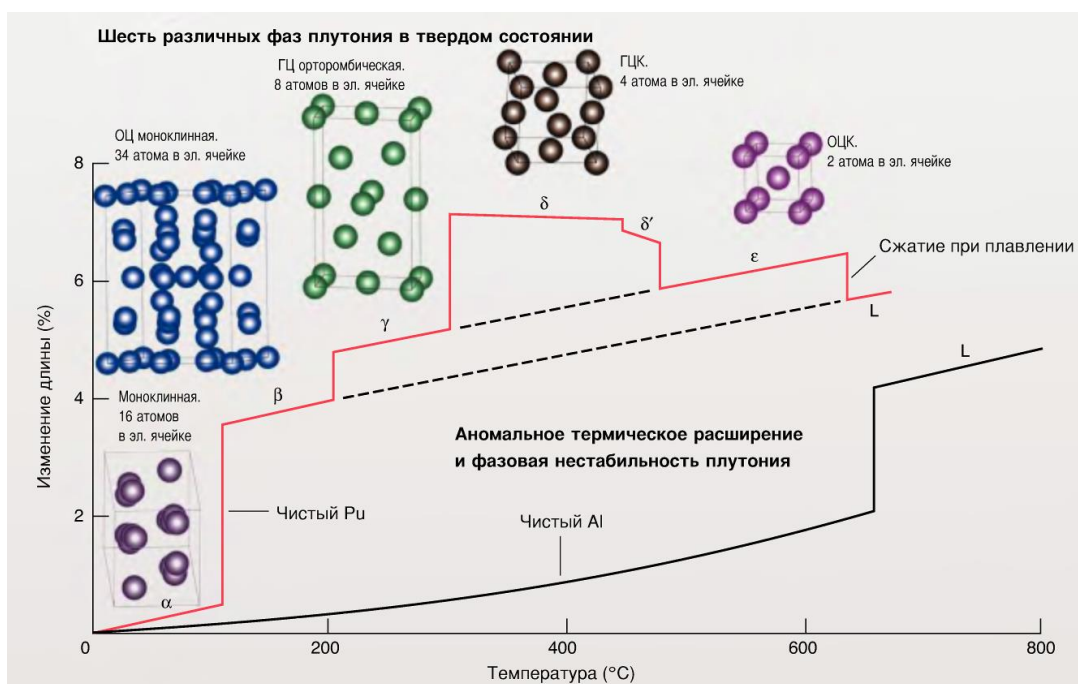


Рис. 1. Физические свойства плутония

Краткий обзор известных подходов к описанию аномалий в поведении плутония

Долгое время странное поведение как самого плутония, так и дельта-фазы плутония оставалось научно необъяснимым. Позднее был найден подход к пониманию необычных свойств плутония, связанный с его электронной структурой.

Сложная электронная структура плутония проявляется, прежде всего, в шести полиморфных превращениях в интервале температур 300-950 К. Одной из причин этого является ничтожно малая разность энергий между структурами. Из-за сложной электронной структуры и сильной зависимости от малых изменений энергии наличие небольшого количества легирующих элементов, примесей или дефектов кристаллической структуры может оказывать существенное влияние на фазовую стабильность, а также на термодинамические и механические свойства.

Атомы плутония легко изменяют свои электронные конфигурации и размер при изменении окружения в решетке. Например, энергетические уровни 6d и 5f орбиталей близки и электронные конфигурации $5f^6 7s^2$ и $5f^5 6d 7s^2$ являются конкурирующими. Поэтому многие фундаментальные свойства плутония зависят от свойств 5f электронов, в частности, от того, являются ли эти электроны локализованными или нет, и необычные свойства плутония связаны, прежде всего, с переходом 5f электронов от блуждания к локализации.

Однако почему это происходит, что является причиной этих переходов, пока не совсем ясно.

Существует много разных полуэмпирических подходов, пытающихся найти общую закономерность в поведении плутония и прогнозировать его свойства.

По нашему мнению, наиболее правильное направление нащупал Купер [3], интуитивно почувствовав, что все разнообразие физических свойств плутония можно привязать к энтропии смешения. Хотя свой подход он в большей степени связывал не с термодинамикой, а с особенностями электронного строения плутония. Этот подход он применил к исследованию стабильности дельта-фазы плутония.

В трактовке Купера процесса локализации используется неупорядоченная система двух видов атомов плутония в узлах ГЦК решетки, в связи с чем нарушается трансляционная симметрия кристалла. Узлы, которые занимает плутоний, двух видов - флуктуирующие пара-узлы и локализованные орто-узлы. Именно энтропия смешивания этих двух типов узлов определяет постепенный термический переход от α -фазы к δ -фазе.

Так как в плутонии в зависимости от внешних условий происходят переходы локализация – делокализация, то плутоний и его сплавы крайне чувствительны к возмущениям, особенно беспорядку. Поэтому степень беспорядка в сплавах плутония влияет на свойства $5f$ электронов. Хотя Купер все-таки поместил на первое место влияние на фазовые превращения плутония переход от локализации к делокализации, тем не менее, он также отметил, что и энтропия смешения имеет прямое отношение к стабильности дельта-фазы плутония.

К сожалению, Купер далее не стал расширять термодинамический подход, основанный на влиянии энтропийного фактора смешения двух электронных состояний плутония.

Со времени обнаружения изоструктурного перехода в церии считается, по предположению Э. Ферми, что различия в свойствах фаз возникают в результате различной электронной структуры атомов твердого тела при сохранении кристаллической структуры, то есть к разнице в параметрах кристаллической решетки приводит то, что они состоят из атомов двух типов, то есть атомов, занимающих различный удельный объем.

Существует несколько моделей, объясняющих аномальные свойства дельта-фазных сплавов на основе того, что кристаллическая решетка сплавов состоит из атомов двух видов. Это, прежде всего, модель Аптекаря-Понятовского [4], рассматривающая систему разнородных атомов как твердый раствор замещения, соотношение компонентов которого меняется в зависимости от температуры и давления. Предельные концентрации компонентов соответствуют состоянию вещества в соседних полиморфных модификациях.

В работах [5-7] на основе анализа собственных и литературных экспериментальных данных по величинам тепловых атомных смещений показано, что полиморфизм актинидов с образованием многочисленных фаз, так же как и плавление, оказывается тесно связанным с величиной и необычной температурной зависимостью температуры Дебая для этих систем. Существование такой температурной зависимости может быть обусловлено ангармонизмом и (или), возможно, недебаевским характером спектра.

Фласс [1] также заметил чувствительность плутония к возмущениям, особенно к беспорядку, который мы напрямую можем связать с увеличением энтропии смешения. Это проявлялось в появлении магнитных моментов при самоповреждении от α -распада плутония. Самое интересное, что они пропадали при термическом отжиге [8]. По нашему мнению, это указывает не только на залечивание повреждений при отжиге, но и на разную степень беспорядка при разных температурах в конкретной фазе, то есть на возможность изменения энтропии смешения при изменении температуры. Эта особенность практически никогда не встречается в других материалах.

Применение термодинамических методов к рассмотрению аномальных свойств плутония

Постараемся теперь объяснить особенности поведения плутония, взяв за основу термодинамический подход, изложенный [1], расширив его трактовку энергетическим смыслом конфигурационной энтропии [9-12].

Фазовая устойчивость любого сплава зависит от свободной энергии, которая есть сумма внутренней энергии и энтропийного члена. Прежде всего, вернемся к классическому определению Больцмана «энтропии» как вероятности состояний системы, независимо от того, чем определяются эти состояния: разноименными атомами, как обычно рассматривается традиционной термодинамикой, или другими факторами. Например, Котрелл рассматривал энтропию электронных состояний как вид конфигурационной энтропии [13]. Поэтому наш подход к пониманию аномальных свойств плутония можно постулировать как следующий:

1. Плутоний следует рассматривать не как отдельный элемент, а как многокомпонентный сплав, где компонентами служит тот же плутоний в различном электронном и фононном состояниях. В результате возрастает вклад энтропии смешения в процессы фазовых превращений и свойств плутония. И здесь, в отличие от модели Аптекаря-Понятовского, мы рассмотрим связь энтропии смешения с усилением межатомных связей и, следовательно, с уменьшением величины среднеквадратичных смещений атомов (СКСА).

2. В отличие от обычных сплавов, в плутонии энтропийный фактор (энтропия смешения) изменяется с температурой, как и коррелирующая с ним температура Дебая, что приводит, например, к сжатию кристаллической решетки дельта-фазы при нагреве. Это происходит за счет увеличения энергии энтропии смешения, что вызывает усиление межатомных связей [10-12].

Рассмотрим по порядку эти два определяющих термодинамических фактора.

Плутоний как псевдо-компонентный сплав

Рассмотрим совокупность всех факторов, микроструктурных, электронных конфигураций, температурных, давления, энергетических состояний атомов и электронов, т. е. атомов с разными свойствами, которые могут привести плутоний в состояние псевдо - многокомпонентной смеси, устойчивость фазового состояния которой будет определяться во многом большим энтропийным членом уравнения свободной энергии.

1. Орто- и пара- узлы плутония в различном соотношении, рассмотренные Купером [3].

2. Множественность электронных состояний с близкой энергией – дополнительное расширение уровней валентных электронов.

3. Колебательная энтропия. У плутония преобладают низкочастотные колебания, которые подразумевают наличие большого числа фононов на одну моду и, следовательно, большую энтропию [14].

4. Расщепление вырожденных уровней валентных электронов, в результате энергия у некоторых из них понижается, а у некоторых повышается, что изменяет силу связи между атомами и вносит дополнительный вклад в степень беспорядка и энтропию.

5. Разные (гармоничные и ангармоничные) колебания моды.

6. Гибридизация связей и прочие флуктуации.

Таким образом, у атомов плутония наблюдается большое количество возможных состояний, влияющих на энтропию. В какой-то степени его можно даже условно отнести к высокоэнтропийным сплавам [15], в которых вклад энтропийного члена велик.

Дополнительным доказательством высокоэнтропийного состояния плутония является его очень большая электронная теплоемкость [14, 16], причем у дельта-фазы она значительно больше.

В работах [9-11] мы подробно рассматривали энергетические процессы, происходящие при смешении. Если кратко: энтропия смешения может потенциально совершать работу и, следовательно, иметь также энергетическую сущность, а не только статистическую, что, в частности, подтверждается осмическими процессами и возникновением осмического давления, которое может производить работу.

Для примера рассмотрим образование идеального раствора, в котором связи А-В, В-В и А-А неразличимы, и поэтому мы не наблюдаем тепловых эффектов при смешении. Однако реально 2 скрытых (латентных) процесса протекают одновременно и компенсируют друг друга:

1. Увеличение средней теплоемкости, что требует поглощения энергии для обеспечения постоянной температуры (На графике зависимости удельной теплоемкости от температуры кривая теплоемкости смещается влево за счет

уменьшения температуры Дебая – рис 3, а площадь под ней как раз и характеризует величину теплосодержания – внутренней энергии.).

2. И одновременно, скрытое выделение тепла, $Q = \Delta \hat{C}T$, другими словами, скрытое увеличение энтальпии и внутренней энергии за счет усиления межатомных связей.

Второй процесс необходим, прежде всего, для соблюдения первого закона термодинамики или закона сохранения энергии. Производится работа, идущая на увеличение средней теплоемкости, т.е. энергии колебаний атомов, а внутренняя энергия не меняется, и нет никаких видимых тепловых эффектов.

Этим как раз и объясняется высокие механические свойства высокоэнтропийных сплавов за счет усиления межатомных связей в процессе смешения и образования твердого раствора.

Конфигурационная энтропия в разной степени присутствует во всех модификациях плутония и через межатомную связь влияет на его фазовые превращения и физические свойства. Мало того, она может меняться при нагреве даже в пределах одной фазы, как в случае дельта-фазы, что приводит к аномальным с обычной точки зрения свойствам плутония.

Однако здесь мы имеем не смесь атомов в чистом виде, а псевдосмесь разнородных элементов, к которым можно применять энтропийный критерий беспорядка Больцмана $S = k \ln W$ и определять его энергетический вклад с использованием второго закона термодинамики. Правда, следует учитывать, что меру беспорядка нельзя брать напрямую, как в формуле энтропии смешения для нескольких атомов $S = R \sum_i X_i \ln X_i$. Это нельзя делать, так как до сих пор экспериментально

неизвестно, насколько энергетически отличается известный беспорядок, созданный легированными атомами, и новый, не учитываемый ранее беспорядок, внесенный остальными факторами, в частности электронным строением. К тому же в последнем случае не все места узлов с разным электронным состоянием плутония будут равноценны. Плюс возможна некоторая кластерность. В результате величина конфигурационной энтропии будет значительно меньше. Поэтому в формулу нужно вводить какой-то поправочный коэффициент ν , который зависит от энергетического вклада каждой составляющей и всегда будет меньше единицы.

$$S = \nu k \ln W = \nu R \sum_i X_i \ln X_i,$$

где S – энтропия смешения;

W – вероятность состояний;

k – постоянная Больцмана;

R – универсальная газовая постоянная;

X_i – доля смешиваемого компонента;

ν – поправочный коэффициент.

**Изменение конфигурационной энтропии в плутонии
в зависимости от температуры**

Конфигурационная энтропия как составляющая общей энтропии [9-12, 17] также может быть выражена через энергию колебаний атомов, и, следовательно, теплоемкость. Обычный график изменения теплоемкости от температуры приведен на рис. 2. Как видно, в пределах одной фазы нет разрывов значений теплоемкости, но, главное, температура Дебая для данной фазы постоянна и не меняется от температуры.

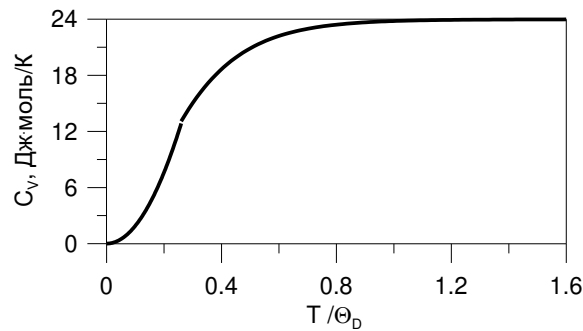


Рис. 2. Зависимость теплоемкости $C_v(T)$, рассчитанная в рамках модели Дебая

По оси абсцисс отложена приведенная температура $\frac{T}{\Theta_D}$

Однако если у нас происходит смешение компонентов, то температура Дебая смещается влево (рис. 3) [9-12, 17], и она уменьшается в зависимости от изменения энтропии смешения, то есть степени беспорядка.

При любом смешении, в том числе и в случае с плутонием, как видно из рис. 3, возрастает средняя теплоемкость, теплосодержание или внутренняя энергия. Изменение ее величины выделено заштрихованной областью и коррелирует с изменением температуры Дебая. И эта область может как возрастать, так и уменьшаться при увеличении температуры.

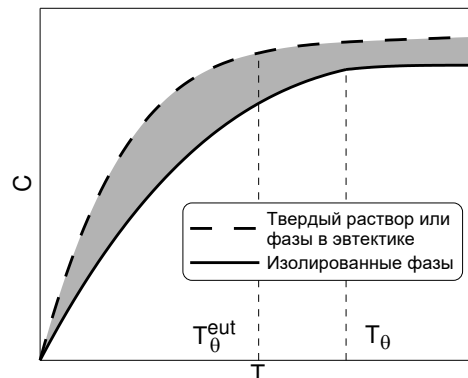


Рис. 3. Изменение удельной теплоемкости при идеальном смешении, сплошная кривая – исходные изолированные фазы (средние приведенные величины), пунктирная кривая – твердый раствор

Подобный процесс и происходит у плутония как в альфа фазе, так, что особенно важно, в дельта-фазе. Происходит уменьшение температуры Дебая при нагреве [18], что установлено по смягчению упругой моды колебаний.

Это можно объяснить только единственным образом, что при нагреве, несмотря на присутствие в структуре только атомов плутония, изменяется энтропия смешения, и, как следствие, его физические свойства. То есть появляется как бы псевдо - смесь атомов плутония, точнее, множественность его состояний, описанных выше, приводящая к увеличению конфигурационной энтропии в процессе нагрева. Это может привести к аномальному изменению свойств дельта фазы при нагреве, что и будет рассмотрено ниже.

Теперь рассмотрим, как с этих позиций можно объяснить некоторые необычные свойства, присущие наиболее технологичной в использовании дельта-фазе плутония.

1. Сжатие решетки дельта фазы при нагреве.

2. Долговременная стабильность этой фазы, которая может быть сохранена при комнатной температуре введением в плутоний всего лишь нескольких атомных процентов галлия или алюминия.

3. Наличие двойной С-кривой распада дельта фазы плутония на ТТТ диаграмме.

1. У всех сплавов тепловое расширение всегда коррелирует с увеличением удельной теплоемкости. Причина этого проста. При нагревании всегда увеличивается энергия, а с ней и амплитуда колебаний атомов. А это, в свою очередь, увеличивает удельную теплоемкость, а также раздвигает кристаллическую решетку и таким образом увеличивается коэффициент термического расширения. У плутония же в дельта-фазе все не так. При нагреве, естественно, увеличивается удельная теплоемкость, но кристаллическая решетка при этом сжимается, что подробно исследовалось во многих работах, в частности также и методом СКСА [5-7]. То есть энергия колебаний увеличивается, а коэффициент линейного расширения уменьшается. Налицо эффект не ослабления межатомной связи, как следует ожидать при увеличении температуры, а, наоборот, усиление.

Усиление межатомных связей происходит, как и в случае высокоэнтропийных сплавов, при увеличении энтропии смешения. Происходит ли у нас увеличение энтропии смешения в данном случае?

Критерием увеличения энтропии смешения служит уменьшение температуры Дебая. Как раз это и происходит с дельта-фазой, что экспериментально установлено. То есть фактически, увеличение средней теплоемкости и, как следствие, усиление межатомной связи. В результате параметр решетки дельта-фазы уменьшается и увеличивается ее плотность при нагреве.

2. Пока нет полной ясности в понимании гранцентрированной кубической (гцк) δ -фазы плутония. Поэтому остаются вопросы по долговременной стабильности этой фазы, которая может быть сохранена при комнатной температуре введением в плутоний всего лишь нескольких атомных процентов (ат. %) галлия или алюминия. [1].

Предполагается, что случайным образом расположенные атомы галлия обеспечивают достаточно сильное рассеяние (а, следовательно, и уменьшение гибридизации), чтобы температура перехода была ниже комнатной [19].

Однако, как нами уже было показано, атомы плутония надо рассматривать не как однородные атомы, а как псевдосмесь разнородных элементов, к которым можно применять энтропийный критерий беспорядка Больцмана $S=k\ln W$ и определять его энергетический вклад с использованием второго закона термодинамики. Тогда даже небольшой энтропийный вклад легирующих элементов, независимо от их атомного радиуса, может значительно увеличить беспорядок в электронных структурах, и энтропия смешения повышается. Переход к дельта фазе происходит за счет дополнительной энтропии смешивания орто- и пара- узлов f электронов.

3. Изотермическое фазовое превращение $\delta \rightarrow \alpha'$, в отличие от обычного типа превращений, может иметь кинетику, описываемую «двойной с-кривой» на диаграмме время-температура-превращение (ТТТ), как показано на рис. 4 [19]. Это означает, что $\delta \rightarrow \alpha$ превращение имеет две температуры, при которых скорость превращения максимальна, в то время как для большинства мартенситных превращений имеется только одна такая температура.

Однако, как мы уже отмечали, дельта- фазу плутония можно рассматривать как твердый раствор из смеси нескольких «псевдо» компонентов с разной электронной структурой, которая еще меняется в зависимости от температуры. Тогда распад твердого раствора одного состава можно рассматривать как смесь двух твердых растворов с разной энтропией смешения и, следовательно, с разной стабильностью. Естественно, они будут распадаться при разных температурах.

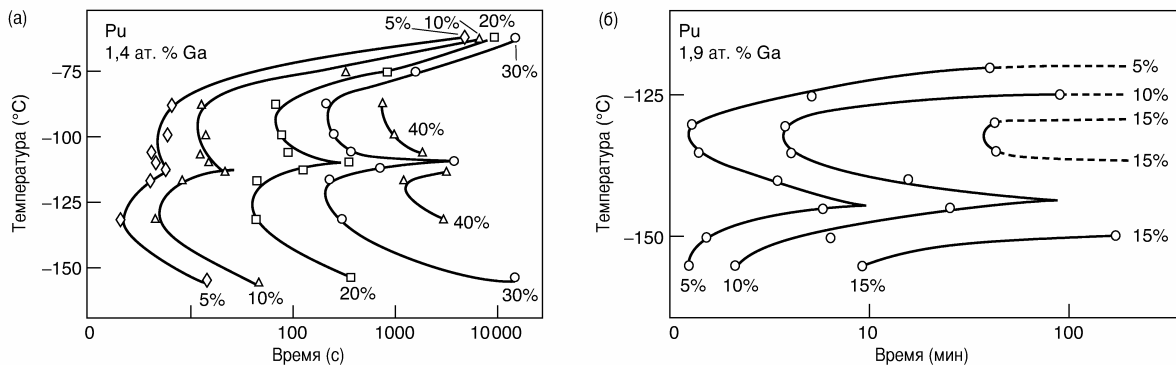


Рис. 4. ТТТ графики $\delta \rightarrow \alpha$ превращения в сплавах плутония с 1,4 и 1,9 ат. % Ga.

Эта диаграмма показывает необычную кинетику, описываемую двойной С-кривой, с двумя температурами (-132 °C и -155 °C) с максимальной скоростью превращения

Выводы

Рассмотрены некоторые аномальные свойства плутония.

Для объяснения этих свойств применен термодинамический подход, основанный на энергетическом влиянии конфигурационной энтропии на межатомную связь и электронное состояние плутония.

Постулируется следующий подход к пониманию аномальных свойств плутония:

1. Плутоний следует рассматривать не как отдельный элемент, а как многокомпонентный сплав, где компонентами является тот же плутоний в различном электронном и фононном состояниях. В результате возрастает вклад энтропии смешения в процессы фазовых превращений и свойств плутония. И здесь, согласно проведенным исследованиям наличия у энтропии смешения энергетической составляющей, прослеживается связь энтропии смешения с усилением межатомных связей и, следовательно, с уменьшением величины среднеквадратичных смещений атомов (СКСА)

2. В отличие от обычных сплавов, в плутонии энтропийный фактор (энтропия смешения) изменяется с температурой, как и коррелирующая с ним температура Дебая, что приводит, например, к сжатию кристаллической решетки дельта-фазы при нагреве.

С этих позиций сделана попытка объяснения некоторых аномальных свойств дельта-фазы плутония:

1. Сжатие решетки дельта-фазы при нагреве.

2. Долговременная стабильность этой фазы, которая может быть сохранена при комнатной температуре введением в плутоний всего лишь нескольких атомных процентов галлия или алюминия.

3. Наличие двойной С-кривой распада дельта фазы плутония на ТТТ диаграмме.

Список литературы

1. *Плутоний. Фундаментальные проблемы. под ред. Хеккер З. Т. 1. ВНИИЭФ, Саров, 2003, 291 с.*
2. *Soderlind P.O., Wills M., Johansson B., Eriksson O. Structural properties of plutonium from first-principles theory. Physical Review, B., 1997, Vol. 5, №4, P. 1997-2004.*
3. *Cooper B.R., Lin Y.L., Sheng Q.G. Magnetic ordering in strongly correlated-electron uranium systems: Consequences of two kinds of f-electron-band-electron states. Journal of Applied Physics. 1999, Vol. 85, №8, P. 5338-5340.*
4. *Елькин В.М., Михайлов В.Н., Михайлова Т.Ю. Описание аномалий теплового расширения в сплавах на основе f-металлов в модели Аптекаря-Понятовского. VII Международный семинар «Фундаментальные свойства плутония». Саров, 2007, С. 85.*
5. *Орлов В.К., Лаушкин А.В., Мамонов И.Б. Зависимость температуры изоструктурного перехода в d-фазных сплавах от состава. X Международный семинар «Фундаментальные свойства плутония». Москва, 2010, С. 72.*

6. Блантер М.С., Глазков В.П., Соменков В.А., Орлов В.К., Коновалов Л.В., Лаушкин А.В., Петров Д.Д., Сергеев В.М. Атомные колебания и полиморфизм актинидов. V Международный Уральский семинар «Радиационная физика металлов и сплавов». Снежинск, 2003, С. 69.
7. Блантер М.С., Глазков В.П., Соменков В.А., Орлов В.К., Лаушкин А.В. .Изменение тепловых смещений в сплавах урана и плутония и механизм стабилизации высокотемпературных фаз легированием. Физика металлов и металловедение, 2006, Т. 101, №2, С. 171-176.
8. Fisk Z., Hess D.W., Pethick C.J., Pines D., Smith J.L., Thomson J.D., Willis J.O. Heavy-Electron Metals: New Highly Correlated States of Matter . Science, 1988, Vol. 239, P. 33-41.
9. Савченко А.М., Коновалов Ю.В. Сопоставление традиционного и классического подходов ко второму закону термодинамики и фазовым равновесиям. Вопросы материаловедения, 2019, №3 (99), С. 29-37.
10. Савченко А.М., Коновалов Ю.В., Лаушкин А.В. Первый и второй законы термодинамики: взаимосвязь, «несогласованность», скрытые эффекты. Вопросы материаловедения, 2020, №1 (101), С. 63-73.
11. Савченко А.М., Коновалов Ю.В., Лаушкин А.В. Изменение характера межатомной связи при образовании твёрдых и жидких растворов. Взаимосвязь колебательной и конфигурационной энтропии и их физическая интерпретация. Вопросы материаловедения, 2021, №1, С. 28-40.
12. Савченко А.М. «Скрытая термодинамика» – трезвый взгляд на известные вещи. Твёрдые и жидкие растворы. Атомная стратегия, С-Петербург, 2015, Вып. 109, С. 17-23.
13. Котрелл А.Х. Строение металлов и сплавов. М.: Металлургиздат, 1961, с. 196-201
14. Smith J.L., Kmetko E.A. Magnetism or bonding: A nearly periodic table of transition elements. Journal of the Less-Common Metals, 1983, Vol. 90, P. 83-88.
15. Chen J., Zhou X., Wang W., Liu B., Liu Y. A review on fundamental of high entropy alloys with promising high-temperature properties. Journal of Alloys and Compounds, 2018, Vol. 760, P. 15-30.
16. P. Soderlind. Theory of the crystal structures of cerium and the light actinides. Advances in Physics, 1998, Vol. 47, P. 959-998.
17. Савченко А.М. Энергетическая природа конфигурационной энтропии. Генерация энтропийных и антиэнтропийных потоков. Изд. LAP LAMBERT Academic Publishing, Германия, Saarbrücken, 2015, 51 с.
18. Lawson A.C., Martinez B., Roberts J.A., Rennet B.I., Richardson J.W. J. Phil. Mag, B80, 2000, 53.
19. Orme J.T., Faiers M.E., Ward B.J. In proc. of 5th Int. Conf. on Plutonium and Other Actinides, 1976.