

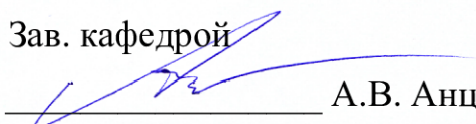
МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

Политехнический институт

Кафедра «Машиностроение и материаловедение»

Утверждено на заседании кафедры
«Машиностроение и материаловедение»
«30» января 2023 г., протокол № 6

Зав. кафедрой

 А.В. Анцев

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по проведению практических (семинарских) занятий
по дисциплине (модулю)
«Термодинамика фазовых превращений»

основной профессиональной образовательной программы
высшего образования – программы магистратуры

по направлению подготовки
22.04.02 Металлургия

с направленностью (профилем)
Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Форма обучения: *очная*

Идентификационный номер образовательной программы: 220402-01-22

Тула 2023 год

Разработчик методических указаний

Разработчик:

Касимцев Анатолий Владимирович, проф. каф. МиМ, д.т.н.

(ФИО, должность, ученая степень, ученое звание)


(подпись)

Семинарское занятие 1

Современные гипотезы о механизмах фазовых превращений

(6 час)

1. Цель работы: Получение навыков публичных выступлений. Ознакомление с современными подходами к анализу механизмов фазовых превращений

2. План семинарского занятия

2.1. Контроль готовности студентов путем выборочного опроса.

2.2. Выступление магистранта.

2.3. Дискуссия по схеме «вопрос-ответ».

2.4. Подведение итогов занятия.

3. Методические указания к проведению занятия (сведения из теории).

За последние 50 лет выполненные экспериментальные и теоретические работы, ставят под сомнение обоснованность применения флуктуационной теории зарождения новой фазы для фазовых превращений в твёрдом состоянии. По мнению Я. С. Уманского: «В наших представлениях о фазовых превращениях образование зародышей новой фазы является до сих пор менее ясным. Экспериментальные исследования затруднены из-за высокой дисперсности этих частиц, которые должны рассматриваться как «критические зародыши» или из-за большой скорости их роста в первые моменты после образования». Есть и еще одно явное противоречие. Как показано в предыдущем разделе, фазовый переход при температуре фазового равновесия не происходит по следующим обстоятельствам. При $\Delta T=0$ (в точке T_0) движущая сила превращения равна нулю, а размер критического зародыша стремится к бесконечности, поэтому при температуре T_0 с.з.у. равна 0. Вместе с тем, согласно термодинамическому признаку классификации фазовых превращений скачок разных свойств при фазовом переходе должен наблюдаться в точке фазового равновесия T_0 . Совершенно неясно, что

обеспечивает такое резкое изменение свойств в системе, в момент, когда в материнской фазе даже зародыши новой фазы отсутствуют.

В литературе большое внимание в последнее время уделяется аномалиям поведения системы в состоянии предпревращения. Одной из наиболее интересных в этом плане является статья А. П. Гуляева . В ней отмечается, что обычно области, характеризующие подготовку старой фазы к превращению (области «предпревращения»), на диаграммах состояния расположены вдоль линий изменения фазового состава. Для сплавов системы Fe-C на рисунке 1 заштрихованные области представляют собой области предпревращения.

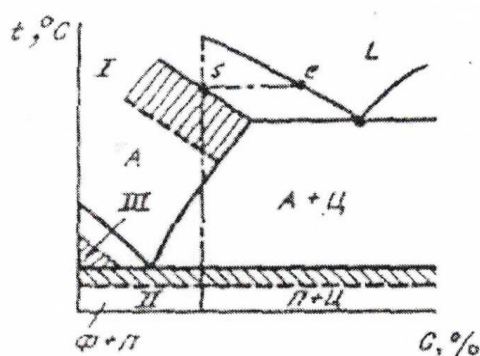


Рисунок 1 – Области предпревращения на диаграмме Fe-C.

В металлургическом словаре приводится следующее определение: «Предпревращение (pretransformation) в металлах и сплавах – условное название явления, имеющего место при температурах вблизи (несколько ниже) температур фазового превращения и проявляющегося в аномальном изменении свойств (например, снижение модуля нормальной упругости в 2...3 раза, проявление эффекта сверхпластичности и так далее) без видимого изменения структуры».

Гипотезы нефлуктационного развития фазовых превращений, которые существуют на данный момент, можно условно разделить на несколько групп. Гипотезы первой группы относятся к объяснению механизма мартенситного превращения. Основная их идея состоит в концепции прафазы (фазы - прототипа), согласно которой превращение между решётками разных типов сводится к преобразованию их координационных полиэдров через

промежуточную кристаллическую структуру. Прафазой при этом является реальная или гипотетическая высокосимметричная структура, субструктурам которой в трёхмерном пространстве соответствуют структуры реальных фаз, являющихся партнёрами в данном фазовом превращении.

Учёные, которые изучают мартенситные превращения, отмечают, что в сплавах при температуре, превышающей температуру мартенситного превращения, наблюдается предмартенситная неустойчивость. В работе были проведены исследования по изучению искажения межплоскостных расстояний в зависимости от температуры. В результате исследований было замечено, что при приближении к температуре начала мартенситного превращения происходит ослабление сил межатомного взаимодействия. По полученным данным мы можем сделать вывод о том, что в предмартенситном состоянии происходят высокообратимые и непрерывные изменения устойчивости и тонкой структуры исходной фазы или, по терминологии Тяпкина Ю. Д., внутрифазовые превращения. Эти изменения, заключающиеся в постепенном формировании особых предпереходных микроструктур - «предвестников» (precursors), можно рассматривать как постепенную подготовку исходной фазы к предстоящему мартенситному переходу.

Структурное состояние решётки в предмартенситной области характеризуется ближним порядком смещений атомов или длиннопериодными структурами сдвига по типу промежуточных метастабильных фаз. Это связано с тем, что при достаточно больших смещениях атомов, которые необходимы для превращения исходной решётки в мартенситную фазу, системе выгоднее пройти часть пути фазового превращения через промежуточные метастабильные структурные состояния (адаптивный мартенсит), играющие роль своеобразных докритических зародышей, уменьшающих барьер зарождения мартенсита. О существовании промежуточных фаз говорит и тот факт, что структура метастабильного субкритического зародыша не должна совпадать со структурой конечной фазы и может быть некой промежуточной.

Подтверждение наличия промежуточной фазы приводятся и в работе.

Авторы показали, что во многих случаях вблизи точки структурного фазового перехода первого рода возникают предпереходные аномалии динамического поведения решётки, которые заключаются в увеличении амплитуды смещения атомов из положения равновесия.

На рисунке 2 приведена температурная зависимость фактора Дебая - Валлера $f(T)$ для системы Fe - Mn. Эта зависимость характеризует среднеквадратичное смещение атомов; при увеличении среднеквадратичного смещения величина f уменьшается. Из рисунка 2 видно, что до температуры начала превращения после 50 °С наблюдается уменьшение f , достигающее максимума в точке превращения.

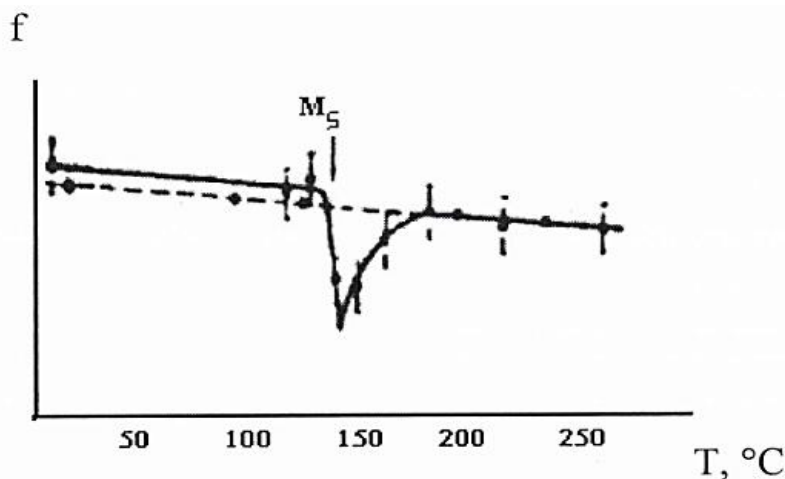


Рисунок 2 – Температурная зависимость фактора Дебая – Валлера для системы Fe – Mn

Итак, в некоторых случаях вблизи температуры структурного фазового перехода первого рода амплитуда атомных смещений начинает возрастать, рост максимальный в точке фазового превращения. Предложена гипотеза, согласно которой вблизи температуры перехода атом с малыми колебаниями может совершать скачки из положений, соответствующих решётке исходной фазы, в положения другой фазы, метастабильной в данных условиях, и обратно. Отметим, что «переход» атома в положение метастабильной фазы означает возникновение некоторой области решётки со структурой новой фазы (то есть появление метастабильной фазы).

Авторы работы, которые разработали геометрическую модель

преобразования объёмно - центрированной кристаллической решётки β -фазы в гексагональную плотноупакованную решётку α -фазы для объяснения кристаллографических особенностей образования мартенситной фазы в титане и цирконии и сплавах на их основе, также подтверждают существование промежуточной фазы. Авторы описывают превращение как взаимную реконструкцию координационных полиэдров кубической и гексагональной решёток через промежуточную конфигурацию кристаллической структуры - фазы. Особенности кристаллического строения ω -фазы приведены на рисунке 3. Предполагается, что характерные атомные конфигурации играют особую роль в полиморфных превращениях из ОЦК в ГП структуру и мартенситное превращение $\alpha \rightarrow \beta$ происходит в последовательности $\beta \rightarrow \omega \rightarrow \alpha$.

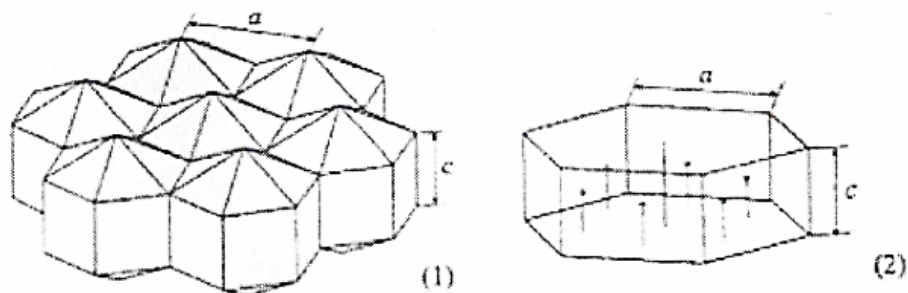


Рисунок 3 – Кристаллическая структура ω -фазы как объединение по боковым граням гексагональных призм (1) и обычное изображение элементарной ячейки ω -фазы (2)]

Основная идея гипотезы второй группы заключается в том, что фазовый переход затрагивает сразу всю систему, приводя к временной ее неустойчивости, т.е. фактически развивается по сценарию: «порядок - беспорядок – новый порядок». Отличие гипотез этой группы состоит в природе промежуточного состояния («беспорядка»).

При изучении дифракции нейтронов в реальном масштабе времени сотрудниками Института физики твёрдого тела АН СССР были исследованы превращения закалённой фазы льда высокого давления при его нагреве от 94 до 290 К. В результате была установлена следующая последовательность переходов: лёд VIII, аморфные фазы с низкой и высокой плотностями, кубический и гексагональный лёд. На рисунке 4 приведена последовательность

дифракционных спектров, измеренных в процессе нагрева закалённой фазы льда высокого давления. Область существования аморфной фазы соответствует области, где отсутствуют пики. Образование аморфного льда высокой плотности из фазы VIII обнаружено впервые .

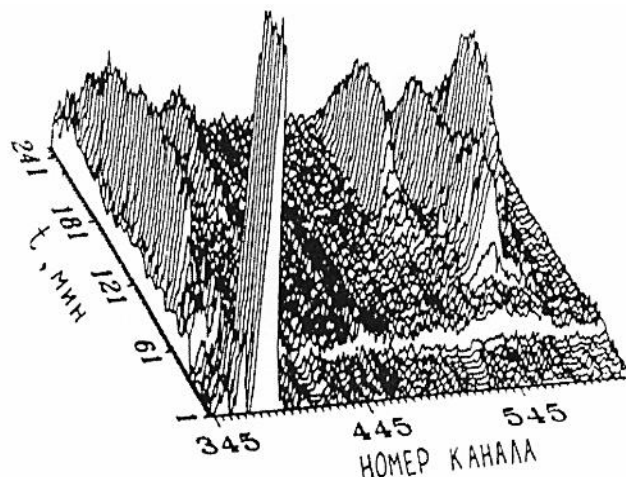


Рисунок 4 – Нейтронограммы льда в интервале температур 94 - 290 К

Факт существования аморфного переходного (между двумя кристаллическими) состояния, который был обнаружен экспериментально, подтверждает точку зрения о том, что сценарий эволюции структуры проходит по типу «порядок - хаос - порядок». Параметр порядка, представляющий собой количественную характеристику изменения структуры, то есть степень порядка в расположении атомов или симметрию кристалла является одной из важнейших характеристик кристаллического тела. Многие неудачи в понимании механизма фазового превращения связаны с отсутствием в большинстве случаев (за исключением степени дальнего порядка в упорядоченных твёрдых растворах и параметра порядка в виде магнитного момента единицы объёма в магнитных телах) достаточно установившегося определения параметра порядка, особенно по отношению к однородному кристаллу, как указано в работе .

В работе известны попытки учёта роли ближнего порядка при полиморфных превращениях чистых металлов. Ю. А. Базин отметил, что плавление и полиморфное превращение металлов, прежде всего, происходят

на уровне ближнего порядка. Эти превращения сопровождаются уменьшением координационного числа и обусловлены увеличением межатомного расстояния в процессе теплового расширения. Системе выгоднее «разрушить» исходную кристаллическую решётку и «построить» новую, чем перестраивать одну в другую. Отметим, что значительные изменения свойств в состоянии предпревращения перед фазовым переходом не могут быть вызваны появлением критических зародышей - для таких аномалий нужна «глобальная» перестройка кристаллической решётки.

Вывод о «смягчении» решётки вблизи точек фазового перехода в основном базируется на аномальном изменении модулей упругости вблизи критических точек и дополняет модель прафазы. Поведение модулей упругости как характеристики межатомного взаимодействия представляет научный интерес для исследователей.

Перед плавлением кристаллическая решётка находится в предельном состоянии, характеризующимся её неустойчивостью. Этому экстремальному состоянию соответствует значение модуля ($E_{пл}$), составляющего около 0,7 от значения модуля упругости металла при комнатной температуре (E_0): $E_{пл} \approx 0,7 \cdot E_0$.

На рисунке 5 приведены температурная и временная зависимости модуля сдвига в чистом железе при фазовом превращении $\alpha \rightarrow \gamma$. Модуль сдвига - G при переходе через температуру превращения - испытывает скачок. Следствием ослабления сил межатомного взаимодействия является то, что во время фазового превращения модуль сдвига имеет наименьшее значение.

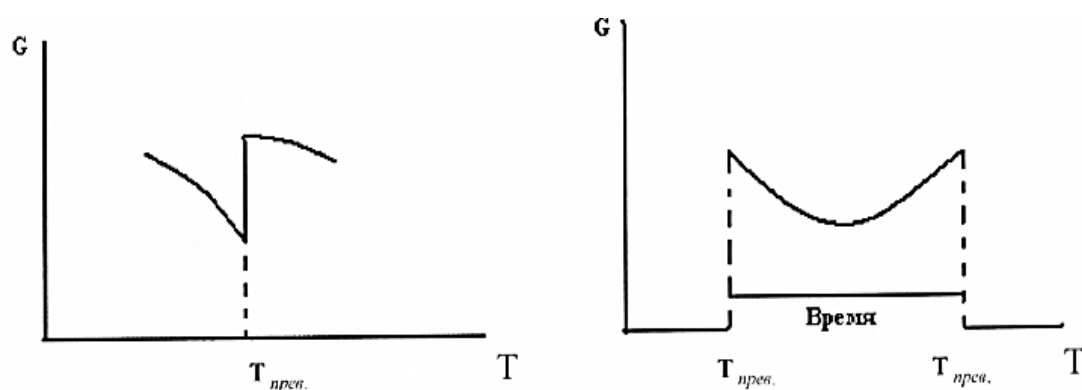


Рисунок 5 – Температурно - временная зависимость модуля сдвига в чистом железе при превращении $\alpha \rightarrow \gamma$ (схема)

Авторы исследовали поведение скорости звука во время фазового превращения в ряде сплавов. Изменение скорости звука носит аномальный характер: по мере приближения к точке фазового превращения величина скорости звука уменьшается, а после прохождения фазового перехода увеличивается. Это поведение авторы объясняют тем, что при приближении к точке фазового перехода увеличивается число вакансий, а это означает уменьшение числа ионных островов в узлах кристаллической решётки, что в итоге приводит к уменьшению действующих в кристалле сил связи, характеристикой которых являются упругие модули.

Изучая системы, в которых отмечены фазовые переходы первого рода (Fe - Ni, Fe - Co, Fe - Mn): в момент превращения отмечено аномальное поведение упругих констант: в системе Fe – Mn, отклонение начинается приблизительно за 50 °С до точки фазового перехода, само падение модуля составляет около 20 %; в сплаве Co - 7 %Fe данный эффект достигает 45 %, авторы работы также обнаружили аналогичное явление.

Как отмечено Новиковым И. И., в в случае фазовых переходов второго рода возможно уменьшение модуля упругости теоретически до нуля. В результате кристалл теряет свою устойчивость и наиболее подвержен внешним воздействиям. При циклировании никеля вблизи точки Кюри экспериментально обнаружен факт дробления крупных зёрен.

В работах были отмечены аномалии не только модулей упругости, но и внутреннего трения в однофазных ферромагнетиках вблизи точки Кюри. Аномальное поведение упругих констант сплавов вблизи точки фазового превращения обнаружили благодаря исследованию температурных зависимостей модулей упругости железоуглеродистых сплавов в широком интервале концентраций по углероду. Так же обнаружен пик внутреннего трения, соответствующий магнитному превращению в цементите.

Из теоретических представлений, согласно которым вблизи точек фазового перехода второго рода должно наблюдаться аномальное поглощение энергии упругих колебаний решётки твердого тела, которая в случае ферро-парапереходов связывается с релаксацией во внутридоменной спинной системе, находят своё объяснение аномалии внутреннего трения вблизи точки Кюри. Например, на рисунке 6 приведена температурная зависимость внутреннего трения для стали 40 и Fe — 1,3 %C, отожженных при 793 и 1023 К в течение двух часов.

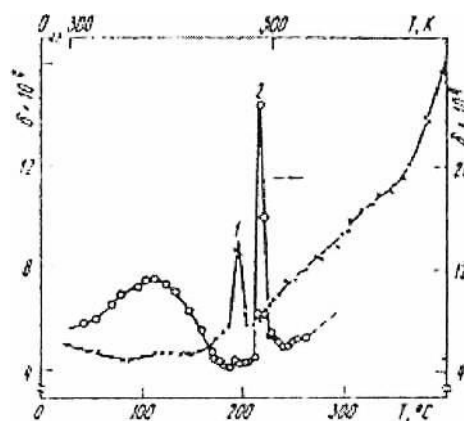


Рисунок 6 – Зависимости внутреннего трения от температуры для стали 40 (1) и Fe - 1,3 %C (2), отожжённых при 793 (1) и 1023 К (2) в течение двух часов

Авторы работы изучили характеристики сил связи карбидов, в частности, цементита в зависимости от температуры. Было установлено, что модуль Юнга карбида железа с температурой меняется неоднозначно: сначала растёт, а затем снижается. Это объясняется тем, что цементит обладает ферромагнитными свойствами. Точка Кюри цементита составляет 200...210 °С. На рисунке 7 приведена температурная зависимость модуля Юнга цементита, которая имеет максимум в районе 200 °С.

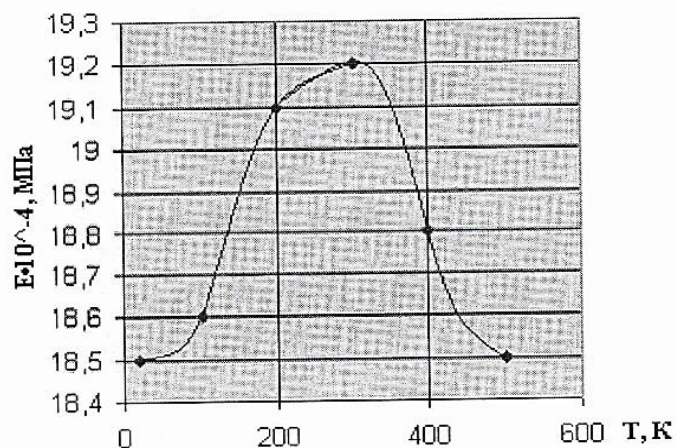


Рисунок 7– Температурная зависимость модуля Юнга цементита

Идея о существовании квазичастиц выдвинутая Новиковым И. И., хорошо дополняет точку зрения о том, что при температуре, при которой меняется тип решётки, решётка делается «неустойчивой», а все аномалии свойств вблизи температуры фазового превращения обусловлены изменениями свойств самой решётки. Даже в случае, когда решётка устойчива по отношению к бесконечно малым смещениям (упругие постоянные отличны от нуля), она может оказаться неустойчивой по отношению к конечным смещениям.

Для распространения параметра порядка на однородный кристалл, состоящий из одинаковых атомов, Новиков И. И. предлагает использовать следующий приём: считать атомами сорта А собственные атомы металла, а атомами сорта В - вакансии, то есть пустые узлы кристаллической решётки и рассматривать кристалл как псевдодвойной.

Роль вакансий в фазовых переходах первого и второго рода объяснена при помощи представления однородного кристалла как двойной системы, состоящей из атомов и вакансий.

В случае фазового перехода первого рода изменяются как внутренняя энергия, так и энтальпия, при фазовом переходе второго рода - их производные; то есть во всех случаях фазовый переход сопровождается возбуждением энергетической структуры вещества. Это подтверждается утверждением Ландау о том, что состояние и свойства любой

конденсированной системы могут быть описаны с помощью представления о квазичастицах, которые есть ни что иное, как элементарные возбуждения.

При подходе к точке превращения в исходной фазе возникают условия, благоприятствующие возникновению достаточно большого числа некоторых квазичастиц, результатом чего, в конечном счёте, и является само фазовое превращение; после осуществления перехода число этих квазичастиц резко падает из-за увеличения энергии их образования. Это применительно к полиморфным превращениям.

Способ описания сложных взаимодействий, состоящих из множества частиц в конденсированных системах является самым удобным в концепции квазичастиц, а также в применении к фазовым превращениям, потому что фактически заранее известна важная термодинамическая особенность квазичастиц, ответственных за фазовый переход, т.е. равенство нулю их химического потенциала; в противном случае квазичастицы не могли бы свободно образовываться или исчезать.

Квазичастицы можно рассматривать как некую растворённую в твёрдом теле субстанцию, а само твёрдое тело - как растворитель. Новиков И. И. в качестве квазичастиц рассматривает вакансии и считает, что за фазовые превращения в кристаллических телах ответственны, именно они.

О том, что в предпереходный период в кристалле образуется значительное число квазичастиц свидетельствуют экспериментальные факты. Идея об особых квазичастицах, за счет которых осуществляется фазовый переход, постоянно обсуждается в литературе. В работе Кузьменко П. П. выяснил, что коэффициент самодиффузии α -Fe при переходе из ферромагнитной в парамагнитную область изменяется аномально (рисунок 8). Экспериментально показано, что энергия активации диффузии для ОЦК решётки соответствует энергии образования вакансий. Следствием увеличения энергии образования вакансий является увеличение теплоты при подходе к T_c .

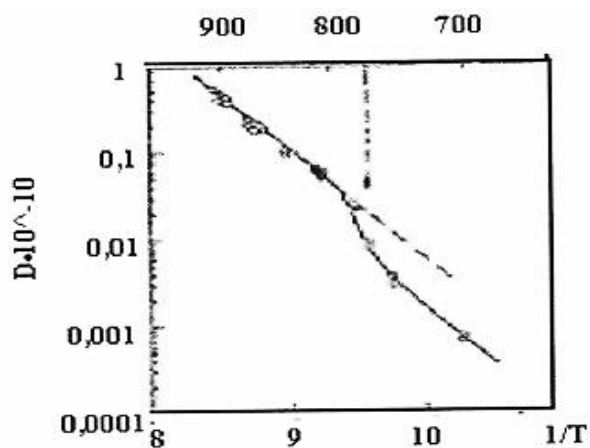


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента самодиффузии железа в области магнитного превращения

Существует представление о том, что вероятнее всего, фазовые переходы первого и второго рода должны осуществляться одинаковым путём через образование вакансий. Вблизи температур фазовых превращений первого и второго рода качественно одинаков и характер изменения упругих модулей, но степень уменьшения упругих констант различная. При фазовых переходах первого рода максимальная величина падения упругих констант в точке фазового превращения в разных металлах достигает 45 %; в точке фазового перехода второго рода модуль Юнга обращается в ноль. Это является следствием того, что в точке фазового перехода второго рода запасённая в кристаллическом теле упругая энергия, равная по удельному значению (то есть на единицу объёма) модулю Юнга, на сравнительном удалении от точки перехода спонтанно выделяется в точке превращения, приводя к интенсивному образованию дефектов кристаллической решётки, в том числе дислокаций, а также к дроблению зёрен.

Полученные факты позволяют сделать вывод о том, что принципиальной разницы в механизмах фазовых переходов первого и второго рода, вероятно, не существует, а отличаются величины параметров порядка, характеризующих происходящие при превращениях эволюции кристаллической, магнитной или электронной структуры металла. Это объясняет скачкообразный характер изменения свойств, которые являются второй производной свободной энергии

по температуре и давлению (теплоёмкость при постоянном давлении, коэффициенты объёмного и линейного расширения, сжимаемость) не только при фазовых переходах второго рода, но и при фазовых переходах первого рода.

Мирзаев Д. А. в работе причины полиморфизма железа связывает именно с изменением магнитной энергии α , γ и δ - модификаций. При температуре Кюри энергия не обращается в ноль. Слабая связь магнитных моментов сохраняется и в парамагнитной области, но теперь она имеет характер ближнего взаимодействия. Главная причина существования α -железа при низких температурах - это ферромагнитное взаимодействие спиновых атомных моментов, сильное при низких температурах и исчезающее выше точки Кюри. При повышенных температурах термодинамической причиной появления α -железа является магнитная энтропия парамагнитного ОЦК α -железа или дальнее и ближнее разупорядочение магнитных моментов выше температуры Кюри.

При рентгенографическом исследовании полиморфизма железа высказано мнение о том, что изменения в атомной структуре сплава сопровождаются изменениями в электронной структуре атомов его компонентов. Например, изменение перераспределения внутри атома $sp-d$ сопровождается уплотнением электронной периферии при $\alpha \rightarrow \gamma$ -переходе.

В заключение отметим, что все представленные гипотезы имеют право на существование, так как в той или иной степени способны объяснить аномалии в поведении свойств в период предпревращения, в гораздо большей степени, чем классическая термофлуктуационная теория зарождения центров новой фазы.

4. Допуск к экзамену производится только после выполнения всех предусмотренных рабочей программой семинарских занятий.

Семинарское занятие 2

Определение критической температуры A_{c1} в эвтектоидной стали

(6 часов)

1. Цель работы: Получение навыков публичных выступлений. Приобретение навыков использования графического метода для определения критических температур превращений.

2. План семинарского занятия

2.1. Контроль готовности студентов путем выборочного опроса.

2.2. Выступление студента.

2.3. Дискуссия по схеме «вопрос-ответ».

2.4. Подведение итогов занятия.

3. Методические указания к проведению занятия (сведения из теории).

Сущность графического метода заключается в построении температурных зависимостей свободных энергий фаз, принимающих участие в фазовом превращении. Точка пересечения указанных зависимостей позволяет определить положение искомой температуры.

4. Допуск к экзамену производится только после выполнения всех предусмотренных рабочей программой семинарских занятий.

Семинарское занятие 3

Влияние степени переохлаждения на размер критического зародыша и работу его образования при полиморфном превращении

(6 часов)

1. Цель работы: Получение навыков публичных выступлений. Установление влияния степени переохлаждения на размер критического зародыша и работу его образования при полиморфном превращении.

2. План семинарского занятия

2.1. Контроль готовности студентов путем выборочного опроса.

2.2. Выступление магистранта.

2.3. Дискуссия по схеме «вопрос-ответ».

2.4. Подведение итогов занятия.

3. Методические указания к проведению занятия (сведения из теории).

При образовании частицы новой фазы внутри материнской свободная энергия системы, с одной стороны, должна уменьшиться вследствие перехода некоторого объема β -фазы в более устойчивую α -фазу, а с другой – увеличиться вследствие образования поверхностей раздела с избыточной поверхностной энергией. В итоге действительное изменение свободной энергии при образовании одного кристаллика выразится алгебраической суммой:

$$\Delta F = - \Delta F_{об} + \Delta F_{пов} ,$$

$$\Delta F = - V \cdot \Delta f + S \cdot \gamma .$$

Если принять, что форма кристалла кубическая, то тогда

$$\Delta F = - a^3 \cdot \Delta f + 6a^2 \cdot \gamma ,$$

где a – длина ребра куба, S – площадь поверхности кристалла, γ – свободная энергия единицы поверхности (поверхностное натяжение), V – объем кристаллика, Δf – разность удельных свободных энергий двух фаз при температуре T_1 .

4. Допуск к экзамену производится только после выполнения всех предусмотренных рабочей программой семинарских занятий.

Семинарское занятие 4

Термодинамический анализ высокотемпературного расслоения твердых растворов внедрения и замещения

(6 часов)

1. Цель работы: Получение навыков публичных выступлений. Приобретение навыков термодинамического анализа процессов высокотемпературного расслоения на примере систем Fe - C и Fe-Cr.

2. План семинарского занятия

2.1. Контроль готовности студентов путем выборочного опроса.

2.2. Выступление магистранта.

2.3. Дискуссия по схеме «вопрос-ответ».

2.4. Подведение итогов занятия.

3. Методические указания к проведению занятия (сведения из теории).

3.1. Освоение методики термодинамического анализа процессов расслоения.

3.2. Анализ особенностей превращений в системах Fe - C и Fe-Cr.

3.3. Определение концентрационных диапазонов расслоения.

3.4. Определение температурных диапазонов расслоения.

Проанализировать существующие литературные данные об особенностях высокотемпературного расслоения твердых растворов замещения на основе переходных металлов (*Fe-Cr*, *Fe-Mo*, *Fe-Mn*, *Fe-Co*, *Fe-Ti*). В публикациях последних лет отмечена возможность высокотемпературного расслоения в сплавах системы *Fe-C* и предложен новый подход к интерпретации фазовой диаграммы (отсутствует линия *ES*, вводится новая температура упорядочения при переходе от кластеров углерода к *Fe₃C*, исчезает фаза “аустенит”).

Рассчитать изменения свободной энергии ΔG заэвтектоидных сталей (1,0 – 2,1 %C) для разных комбинаций размеров кластеров углерода ($1 \leq V \leq 10^{11}$), их мольных долей ($n_3 = 17 \cdot 10^{-15}$, $n_3 = 17 \cdot 10^{-10}$, $n_3 = 17 \cdot 10^{-5}$) в температурном диапазоне 900 – 1250 °С. Показано, что высокотемпературное расслоение железа по углероду в указанном концентрационном диапазоне отсутствует, поэтому нет оснований “убирать” линию ES и вводить новую температуру упорядочения на диаграмме состояния системы $Fe-C$.

Рассчитать изменения свободной энергии ΔG доэвтектических чугунов (2,2 – 3,0 %C) для разных комбинаций размеров кластеров углерода ($1 \leq V \leq 10^{11}$), их мольных долей ($n_3 = 17 \cdot 10^{-15}$, $n_3 = 17 \cdot 10^{-10}$, $n_3 = 17 \cdot 10^{-5}$) в температурном диапазоне 900 – 1100 °С. Полученные отрицательные значения ΔG при всех комбинациях варьируемых параметров свидетельствуют о возможности высокотемпературного расслоения по углероду в указанном концентрационном диапазоне.

Полученные в работе результаты для заэвтектоидных сталей противоречат выводам профессора Устиновщикова Ю.И., так как в его работе не проведены высокотемпературные исследования структурно-чувствительными методами и не учтена возможность перераспределения углерода в процессе охлаждения сплавов после высокотемпературного нагрева.

4. Допуск к экзамену производится только после выполнения всех предусмотренных рабочей программой семинарских занятий.

Список литературы

Основная литература

1. Физическое материаловедение: учебник для вузов: в 7 т./НИЯУ МИФИ; под общ.ред. Б.А.Капина - 2-е изд. перераб. - Москва, 2012 - ISBN 978-5-7262-1793-2. Т.1. Физика твердого тела / Г.Н.Елманов [и др.].- 2012.- 763 с. - ISBN 978-5-7262-1794-9 (Т.1).- 4 экз.

2. Волков Г.М. Материаловедение: учебник для вузов/Г.М.Волков,, В.М.Зуев. – 2-е изд.перераб. – М.:Академия, 2012. – 447 с. (Высшее профессиональное образование. Техника и технические науки). – ISBN 978-5-7695-8087-1.- 50 экз.

3. Давыдова И.С. Материаловедение: учебное пособие/ И.С.Давыдова, Е.Л.Максина. – М.: Риор, 2006. – 240 с. – ISBN 5-9557-0357-8:34.68.- 11 экз.

Дополнительная литература

1. Материаловедение: учебник для вузов/Б.Н.Арзамасов [и др.]; под общ.ред.: Б.Н. Арзамасов, Г.Г.Мухина.- 7-е изд., перераб. – М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – 648 с. – ISBN 5-7038-1860-5. – 4 экз.

2. Гуляев А.П. Металловедение: учебник для вузов/ А.П.Гуляев, А.А.Гуляев. – 7-е изд.перераб. и доп. – М.:Альянс, 2011. – 644 с. – ISBN 978-5-903034-98-7. – 5 экз.

3. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов/Б.А.Колачев, В.И.Елагин, В.А.Ливанов. – 4-е изд. перераб и доп. – М.:МИСИС, 2005. – 432 с. – ISBN 5-87623-123-2. – 10 экз.

4. Ливанов Д.В. Физика металлов: учебник для вузов./Д.В.Ливанов. – М.:МИСИС, 2006. – 280 с. – (Металлургия и материаловедение XXI века) – ISBN 5-87623-168-1. – 12 экз.

5. Материаловедение в машиностроении и промышленных технологиях: учеб.-справ. руководство/В.А.Струк [и др.]. – Долгопрудный: Интеллект, 2010. – 536 с. - ISBN 978-5-91559-068-6. – 54 экз.

Периодические издания

Печатная версия периодического издания

1. Металловедение и термическая обработка металлов, - М: Машиностроение. – На рус.яз. Выходит 12 раз в год. – Россия. – ежемесячно. – ISSN 0026-0819.

2. Материаловедение: научно-технический и производственный журнал. – М.: ООО «Наука и технология». - На рус.яз. Выходит 12 раз в год. – Россия. – ежемесячно. –ISSN 1684-579 X.

3.Заводская лаборатория, Диагностика материалов. – М.: ТЕСТ-ЗЛ. - На рус.яз. Выходит 12 раз в год. – Россия. – ежемесячно. – ISSN 1028-6861.

4.Физика металлов и металловедение /РАН. – М.: Наука. - На рус.яз. Выходит 12 раз в год. – Россия. – ежемесячно. – ISSN 0015-3230.

Интернет-ресурсы

1.Электронный читальный зал “БИБЛИОТЕХ” : учебники авторов ТулГУ по всем дисциплинам.- Режим доступа: <https://tsutula.bibliotech.ru/>, по паролю.- Загл. с экрана

1. ЭБС IPRBooks универсальная базовая коллекция изданий.-Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/>, по паролю.- - Загл. с экрана
2. Научная Электронная Библиотека eLibrary – библиотека электронной периодики, режим доступа: <http://elibrary.ru/> , по паролю.- Загл. с экрана.
3. НЭБ КиберЛенинка научная электронная библиотека открытого доступа, режим доступа <http://cyberleninka.ru/> ,свободный.- Загл. с экрана.
4. Единое окно доступа к образовательным ресурсам: портал [Электронный ресурс]. - Режим доступа : <http://window.edu.ru.> - Загл. с экрана.