

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Сами Мохамед Мохамед Абдель-Кадер



АМПЛИТУДНО-ЗАВИСИМЫЕ РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ
УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

01.04.07 - физика твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Харьков - 1994

548
539



Дисертацією являється р... 00330522 (F)

Робота виконана в Харківському державному університеті.

Научні керівники: Д-р фіз.-мат. наук, проф.

СИРЕНКО Анатолій Федотович

К-т фіз.-мат. наук

РОХМАНОВ Ніколай Яковлевич

Офіційні опоненти:

1. Д-р фіз.-мат. наук, проф. АНДРОНОВ Володимир Михайлович
(ХГУ, г. Харків)

2. Д-р фіз.-мат. наук, проф. ПЕТЧЕНКО Александр Матвеевич
(ХИИГХ, г. Харків).

Ведущая організація - Інститут Монокристаллов АН України
(г. Харків).

Захита состоится " 6 " Маг 1994 г. в 16⁰⁰ часов
на засіданні спеціалізованого ради Д 053.06.02 в Харківському державному університеті (310077, г. Харків-77, пл. Свободи, 4, ауд. ім. К. Д. Синельникова).

С дисертацією можна ознайомитися в Центральній науковій бібліотеці ХГУ.

Автореферат розіслан " 24 " Маг 1994 г.

Учений секретар
спеціалізованого ради

В. П. Пойда

16-29, 876

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В области упругой деформации у реальных твердых тел наблюдается ряд отклонений от чисто упругого поведения - проявляется неупругость, то есть неидеальная (неполная) упругость. Вследствие этого при циклической деформации наблюдается необратимый переход энергии упругих колебаний в тепловую энергию тела и ее рассеяние. Различные механизмы превращения упругой энергии в тепловую объединены общим названием - внутреннее трение (ВТ). Затухание колебаний определяется действием многих атомных механизмов, причем конкретный вклад каждого из них определяется составом, структурой материала и внешними условиями (температурой, частотой и амплитудой колебаний). ВТ обладает в силу этого, наряду с высокой чувствительностью, высокой избирательностью по отношению к различным элементам дефектной структуры реальных кристаллов. Изучение этим методом спектров механической релаксации в твердых телах позволяет получать информацию о процессах, протекающих на микроуровне, о которых получить информацию другими методами зачастую невозможно.

Механизмы механической релаксации (ВТ), как правило, делятся на две группы, одну из которых связывают с динамическим гистерезисом (линейной вязкоупругостью), вторую - со статическим гистерезисом, в основе которого лежит нелинейная связь между приложенным напряжением и деформацией тела. Все механизмы, входящие в первую группу, действуют независимо от амплитуды колебаний (релаксационные, резонансные механизмы). Механизмы статического гистерезиса (дислокационный, магнитоупругий и др.), наоборот, обуславливают амплитудно-зависимые эффекты. Механизмы первой группы дают надежный инструмент для получения данных о свойствах дефектов различного вида, времени релаксации и энергии активации процессов. Изучение второй группы амплитудно-зависимых механизмов, кроме получения научной информации, полезно для создания материалов с аномально высокими (сплавы высокого демпфирования) и аномально низкими потерями. В связи с этим исследования, направленные на изучение диссипации энергии в сплавах на основе железа, являющихся наиболее распространенными конструкционными материалами, представляются важными и актуальными.

Цель диссертационной работы. Целью настоящей работы явилось исследование амплитудно-зависимых релаксационных эффектов, сопро-

вождающих фазовые превращения, изменения структурного и магнитного порядка в сплавах Fe-C и Fe-Al.

В связи с указанной целью работы в диссертации были поставлены следующие задачи исследования:

1. Установить закономерности амплитудной зависимости внутреннего трения вблизи точки Кюри карбидов типа Fe_3C в высокоуглеродистых сталях, в которых аномалии ВТ наиболее выражены.

2. Провести электрохимическое выделение карбидных фаз из высокоуглеродистых сплавов Fe-C и Fe-C-Mn, изучение их термического расширения в температурном интервале, включающем точку Кюри; совместный анализ температурной зависимости магнитных свойств структурно-свободного цементита и магнитных свойств высокоуглеродистых сталей.

3. Изучить ранние стадии процессов упорядочения в сплаве Fe_3Al и их взаимосвязь с релаксационным спектром внутреннего трения.

Научная новизна работы. В результате проведенных исследований получены следующие новые научные результаты. Впервые проведены параллельные исследования свойств сплавов Fe-C вблизи точки Кюри цементита и свойств выделенных из этих сталей карбидов типа Fe_3C . Проведены комплексные исследования процессов упорядочения в сплаве Fe_3Al и особенностей его релаксационного спектра внутреннего трения. В сплаве Fe_3Al , находящемся в частично упорядоченном неравновесном состоянии, обнаружен новый амплитудно-зависимый релаксационный эффект (ВТ).

Практическая значимость работы. Полученные в настоящей работе результаты способствуют выяснению механизмов релаксационных эффектов в сплавах на основе железа. Данные о внутреннем трении вблизи точки Кюри карбидов могут найти приложение в разработке сплавов с особыми демпфирующими свойствами и при выборе режимов их термической обработки. Результаты изучения упорядочения в сплавах Fe-Al могут быть использованы для оптимизации свойств магнитострикционных материалов. Изучение теплового расширения выделенных из сталей карбидов железа и релаксационных свойств сталей вблизи точки Кюри карбидов Fe_3C способствует выяснению механизмов аккомодации структурных составляющих сталей в условиях фазового перехода, изменения коэффициентов термического расширения фаз, что имеет не только научную, но и практическую значимость, в частности, при проведении термоциклической обработки сталей вблизи точки Кюри цементита.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Внутреннее трение вблизи точки Кюри карбидных фаз в сплавах железо-углерод при скоростях нагрева, меньше некоторой граничной, определяющей способность материала к релаксации термических напряжений, характеризуется появлением зависящего от амплитуды деформации пика, имеющего не дебаевскую, а λ -форму.

2. Немонотонное изменение высоты обнаруженного пика внутреннего трения в зависимости от скорости деформации свидетельствует о том, что механизм его возникновения обусловлен вязким затуханием вблизи точки фазового перехода 2-го рода, - в данном случае перехода карбидов Fe_3C и $(Fe, Mn)_3C$ из ферромагнитного в парамагнитное состояние.

3. Условием появления амплитудно-зависимого релаксационного эффекта в сплаве Fe_3Al является наличие двухфазного, частично упорядоченного неравновесного состояния.

4. Процесс структурного упорядочения в сплаве Fe_3Al в равновесных условиях обладает признаками фазового перехода 2-го рода. Упорядочение того же сплава в неравновесных условиях, идущее по типу DO_3 , сопровождается значительным объемным эффектом, резким падением электрического сопротивления, появлением амплитудно-зависимого релаксационного эффекта, - т.е. обнаруживает признаки фазового перехода первого рода.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на семинарах кафедры физики твердого тела ХГУ, I-ом Международном семинаре по эволюции дефектных структур в металлах и сплавах (Барнаул, БПИ, 1992 г.), на постоянном семинаре по релаксационным явлениям в твердых телах (Воронеж, ВПИ, 1993 г.), научной конференции по физическим явлениям в твердых телах (Харьков, ХГУ, 1993 г.).

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы, включающего 108 наименований. Она изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены ее цель и задачи, показана научная новизна работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложены и обсуждаются работы отечественных и

зарубежных авторов по механизмам внутреннего рассеяния энергии механических колебаний. Рассмотрено амплитудно-зависимое и амплитудно-независимое ВТ, механизм магнитомеханического затухания, особенности ВТ вблизи точки Кюри. Особое внимание уделено системе Fe-C, которая является объектом исследования. Поскольку цементит в значительной мере определяет свойства сплавов Fe-C, проведен обзор литературы по свойствам карбидов железа. Рассмотрены особенности внутреннего трения и структурное состояние упорядоченных твердых растворов в системе Fe-Al. Отмечается, что при исследовании релаксационных эффектов (ВТ) при упругой деформации сплавов железа не всегда учитываются особенности состояния кристаллической и магнитной структуры составляющих твердое тело фаз. В гетерофазных системах ВТ анализируется, как правило, с позиций, не учитывающих структурное и магнитное сопряжение фаз. Остается не выясненным вопрос влияния амплитуды деформации на внутреннее рассеяние энергии колебаний вблизи точек фазовых переходов одной из фаз. В связи с этим представляются актуальными исследования амплитудной зависимости ВТ (АЗВТ) упорядочивающихся сплавов, в которых переход порядок-беспорядок может протекать за счет поэтапного упорядочения.

Во второй главе описаны исследованные материалы и методики изучения их структурного состояния. В качестве объектов исследования были выбраны поликристаллические сплавы вакуумно-индукционной плавки на основе железа следующих составов (мас. %):

1. С - 1,72%, Mn - 0,5%, Cr < 0,10%, Ni < 0,20%, остальное железо (в дальнейшем У17);

2. С - 1,60%, Mn - 2,26%, Cr < 0,20%, Ni < 0,20%, остальное железо (I60Г2);

3. С - 0,39%, остальное железо (выплавлен из рафинированного железа марки 008ЖР);

4. Двойные сплавы Fe-9,8 ат. % Al и Fe-25,2 ат. % Al, выплавленные из железа 008ЖР и алюминия высокой чистоты (содержание углерода в сплавах не превышало 0,03 мас. %). Для сравнительных исследований использовались промышленные сплавы: стали 20 и 40. Структурные характеристики определялись с помощью оптической и электронной микроскопии. Для исследования структурного состояния, фазового и элементного состава наряду с металлографией использовались рентгеновские методы структурного и спектрального анализа (МАР-2, ДРОН-2,0). Электрохимическое экстрагирование карбидной

фазы из сталей У17 и I60Г2 проводили потенциостатическим методом. Для магнитных измерений порошок Fe_3C помещался в трубку из нейзильбера. Исследование магнитных характеристик проводилось с помощью микроверметра Ф190. Определение точки Кюри карбидной фазы выполнялось путем измерения остаточной намагниченности при охлаждении стержневидных образцов, намагниченных до насыщения при температурах выше точки Кюри карбидов.

Удельное электросопротивление ρ измерялось с помощью четырехточечной методики при токе через образец, не превышающем 0,15 А. Погрешность определения ρ не превышала 0,1%. Измерения ВТ проводились с помощью автоматизированной вакуумной установки, в основу которой положен принцип крутильного маятника, по декременту колебаний δ при частотах 50–100 Гц, амплитудах закручивания $1 \cdot 10^{-5}$ – $1 \cdot 10^{-4}$, температурах 288–973 К, при напряженностях продольного магнитного поля 0–8 $\cdot 10^4$ А/м. Низкочастотные исследования ВТ ($f \approx 2$ Гц) проводились на аналогичном релаксаторе в ручном режиме.

В третьей главе представлены экспериментальные результаты исследований релаксационных эффектов (ВТ) в высокоуглеродистых сплавах Fe–C, содержащих 25 об.% карбидной фазы, а также изучения свойств карбидов, экстрагированных из этих сталей. В качестве конкретных объектов исследования в настоящей главе были выбраны сплавы У17, I60Г2, модельный сплав Fe–0,39 мас.% С, стали 20 и 40, а также изолированные карбиды Fe_3C и $(Fe, Mn)_3C$ в виде порошка.

Образцы сталей предварительно отжигались в течение 2–х ч в вакууме (при остаточном давлении 13 МПа) при температуре 500–720°C и охлаждались до комнатной температуры вместе с печью. Дозавтектоидные сплавы в исходном состоянии имели характерную феррито-перлитную структуру. После отжига она трансформируется в структуру зернистого перлита с глобулярными выделениями Fe_3C в ферритной матрице. Отжиг сплава Fe–0,39% С при температурах 600–720°C не приводит к существенным изменениям в структуре, и она имела феррито-перлитную структуру с пластинчатым перлитом. Высокоуглеродистая сталь У17 имела типичную для заэвтектоидной стали структуру с сеткой структурно-свободного цементита по границам бывшего аустенитного зерна. В сплаве I60Г2 карбидные выделения очень мелкодисперсны.

Измерения T_c карбидов в двойном сплаве Fe–0,39% С и в стали У17 показали, что она лежит в интервале 210–215°C. Это соответст-

вует данным, полученным и для экстрагированного из стали У17 карбида. Для стали I60Г2, содержащей марганец, T_c лежит несколько ниже (примерно I60-I70°C). Использование стали, содержащей марганец, позволяет проводить измерения ВТ вблизи T_c при более низких температурах. Экстрагированный из этой стали карбид более устойчив, что позволяет проводить требующие определенного времени параллельные исследования его структуры и физических свойств.

Поскольку при деформации стали цементит находится в стесненных условиях, его линейное расширение может в существенной мере повлиять на напряженное состояние в сплаве и на релаксационные эффекты вблизи T_c . В связи с этим проведены рентгendifракционные исследования линейного расширения порошков карбидов Fe_3C и $(Fe, Mn)_3C$ при переходе через их точку Кюри. Рентгеновский (элементный) анализ карбидного осадка указывает на наличие в нем примесей Mn , Cr и Cu . Содержание марганца в карбидах, выделенных из сталей I60Г2 и У17, составило 5,6% и 0,5% соответственно. Концентрация хрома в этих карбидах не превышала 0,002%. Рентгеновский фазовый анализ показал наличие в них лишь одной фазы типа Fe_3C . В интервале температур от комнатной до T_c для коэффициента α линейного расширения стали У17 получено рентгенографическими измерениями значение $5,5 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ в направлении $[011]$, при температурах $T_c - 250^\circ C - 11 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Для направления $[210]$ α , по нашим данным, равно $5 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ и $9 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ соответственно. Более низкие значения α исследованных карбидов при $T < T_c$ объясняются магнитным вкладом в тепловое расширение.

При подходе к точке Кюри карбидов, уже в сплавах, где объемная доля Fe_3C составляет 3% наблюдается немонотонный ход температурной зависимости ВТ. Вблизи точки Кюри сплава Fe-0,39% C появляется отчетливо выраженный максимум ВТ ($f \approx 87$ Гц); одновременно наблюдается аномальное изменение динамического модуля сдвига. Наложение магнитного поля показывает, что наблюдаемый максимум не обусловлен тривиальным ΔG -эффектом. Необычным свойством обнаруженного максимума является амплитудная зависимость его высоты (пик выше при большей амплитуде γ_0), т.е. имеет место амплитудно-зависимый релаксационный эффект (АЗРЭ). Повышение содержания углерода в стали до 1,72 мас.% приводит к увеличению высоты максимума. Он приобретает отчетливо выраженные черты пиков, связанных с фазовыми переходами: пик сильно асимметричен, - на половине высоты, как правило, уже дебаевского пика. Асимметрия пика особенно силь-

но выражена в случае измерений в режиме охлаждения. При подходе к T_c карбидов ВТ скачком возрастает почти вдвое (У17). Характерная λ -видная форма пика типична для фазовых переходов 2-го рода.

Измерения температурной зависимости ВТ стали I60Г2 при относительно малых скоростях нагрева, $\dot{T} \approx 0,5-0,75$ град/мин, показывают, что пик становится еще более выраженным ($f \approx 100$ Гц). Замечено, что его появлению способствует структура с глобулярными выделениями карбидов. Для малоуглеродистых сталей с феррито-перлитной структурой, где основная объемная доля карбида железа сосредоточена в пластинчатом перлите такие пики ВТ, насколько известно, не наблюдались. В отличие от пиков ВТ вблизи T_c карбидов в сплавах У17, I60Г2 и стали 40, полученных при повышенных частотах, в области низких частот обнаружена обратная зависимость высоты пика ВТ от χ_0 , а именно при $\chi_0 = 1 \cdot 10^{-4}$ он выше, чем при $\chi_0 = 4,4 \cdot 10^{-5}$ (сталь 40). Наблюдаемое проявление АЗРЭ позволяет сделать более конкретные выводы о механизме рассеяния энергии упругих колебаний вблизи точки Кюри дисперсной карбидной фазы в Fe-C сплавах. Если придерживаться классификации механизмов ВТ по Ван Бюрену, то рассмотренный эффект не является, строго говоря, ни релаксационным, ни резонансным, поскольку последние не зависят от χ_0 . Он не является также гистерезисным, поскольку исчезал бы в насыщающем магнитном поле. Таким образом наблюдаемый эффект, в соответствии с упомянутой классификацией, определяется вязким затуханием.

Действительно, вблизи T_c ферромагнитный материал под действием малых приложенных напряжений B проявляет, оставаясь неупругим, простую вязкую ползучесть (А.Новик, Б.Берри). Это происходит в результате того, что величина релаксации спиновой системы и время релаксации τ при $T \rightarrow T_c$ стремятся к бесконечности. Поскольку за четверть периода колебаний образца текущая деформация γ достигает амплитудного значения χ_0 , в качестве меры средней скорости деформации $\dot{\gamma}$ можно принять величину $\dot{\gamma} = 4 \chi_0 f$. Измерения ВТ при различных f и χ_0 , проведенные на одном и том же образце стали 40 при изменении f путем вариации длины образца и момента инерции подвесной системы, позволили обнаружить, что существует оптимальная скорость деформации, при которой пик ВТ вблизи T_c карбидов имеет наибольшую высоту ($\dot{\gamma}_{max} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$). Немонотонная зависимость высоты пика от $\dot{\gamma}$ находит свое объяснение, если учесть, что карбидные частицы

находятся в условиях стесненной деформации и что происходит как релаксационный процесс в самих частицах, так и взаимодействие выделений с матрицей. В качестве основного элемента при реологическом описании поведения выделений вблизи T_c , по-видимому, может быть взята ячейка Максвелла, для которой скорость деформации

$\dot{\gamma} = \dot{\sigma}/G + \sigma/\mu$, где μ - вязкость. При больших скоростях нагружения $\dot{\sigma}/G \gg \sigma/\mu$, и частицы могут рассматриваться как упругие тела Гука. При достаточно малых $\dot{\sigma}$ поведение карбидных выделений отвечает реологическому поведению ньютоновой жидкости, и ВТ снижается. Таким образом, при $\dot{\gamma} \gg \dot{\gamma}_{max}$ выделения могут рассматриваться как идеально упругие твердые тела, что объясняет уменьшение высоты пика ВТ в этом интервале $\dot{\gamma}$. Снижение $\dot{\gamma}$ в области $\dot{\gamma} < \dot{\gamma}_{max}$ связано с тем, что выделения релаксируют за времена, пренебрежимо малые по сравнению со временем, за которое деформация α -Fe изменяется от нуля до своего амплитудного значения γ_0 . ВТ в этих условиях, естественно, уменьшается. Максимум соответствует некоторому промежуточному вязко-упругому поведению выделений.

Изменение скорости нагрева \dot{T} также оказывает влияние на рассматриваемый пик ВТ: с увеличением \dot{T} от 0,2 град/мин до 3-5 град/мин он вблизи T_c сужается и несколько смещается в область пониженных температур. Это особенно выражено в случае сплава I60Г2. Для объяснения этих экспериментальных результатов привлекаются данные по термическому расширению цементита, анализ которых показывает, что выделения карбидов в условиях стесненной деформации при нагреве испытывают действие напряжений термического происхождения σ_t . (Коэффициент термического расширения цементита в области $T < T_c$ почти в 2 раза ниже, чем КТР для α -Fe). Показано (Сиренко А.Ф., Рохманов Н.Я.), что эти напряжения частично релаксируют путем растворения-подрастания выделений. Однако при скоростях нагрева выше некоторой критической, составляющей 0,25-0,5 град/мин, они не успевают релаксировать и карбидные выделения должны испытывать действие растягивающих напряжений. Кроме σ_t , при переходе через T_c возникает спонтанная деформация магнито-стрикционного происхождения и связанные с ней напряжения σ_m . Смещение пика ВТ при вариации \dot{T} может найти объяснение, если предположить, что положение точки Кюри цементита зависят от суммарного напряжения ($\sigma_t + \sigma_m$).

В четвертой главе приводятся результаты исследования ранних

стадий процессов упорядочения в сплаве Fe-25,2 ат.% Al и их влияния на релаксационный спектр ВТ. В третьей главе рассмотрены особенности ВТ при изменении магнитного порядка одной из фаз гетерофазного ферромагнетика при переходе через точку Кюри этой фазы. Представилось целесообразным расширить круг вопросов, связанных с влиянием упорядочения на характер рассеяния энергии упругих колебаний, включив в рассмотрение явление структурного упорядочения. Чтобы оставаться в рамках единого термодинамического и симметричного подхода к анализу наблюдаемых эффектов естественно выбрать для исследований систему, в которой переход типа порядок-беспорядок происходит по механизму фазового перехода 2-го рода. Конкретный анализ процессов упорядочения показывает, что упорядочение может развиваться как переход 2-го рода в кристаллах с ОЦК решеткой. Одной из систем, где возможен фазовый переход такого типа является система Fe-Al.

После выплавки и изготовления образцы сплавов Fe-25,2 ат.% Al и Fe-9,8 ат.% Al отжигали в течение 1 ч в вакууме при температурах 900-1000°C, а затем закаливали в воду. Упорядоченное состояние получали путем отжигов закаленных образцов в области температур существования упорядоченного состояния (согласно равновесной диаграмме состояния Fe-Al). Измерения выполнены по двум схемам - при упорядочении (разупорядочении) в равновесных условиях (медленный нагрев либо охлаждение), а также при изотермической выдержке, либо при медленном нагреве закаленных (разупорядоченных) образцов по так называемой "схеме старения". Проводились фратографические исследования изломов образцов сплава Fe-25,2 ат.% Al. Образцы сплава представляли собой поликристаллы со средним размером зерна примерно 0,7 мм. Поверхность разрыва имеет геометрически правильную структуру, характерную для разрушения с преимущественным участием двойникования.

Исследование объемных эффектов, связанных с процессами упорядочения в сплаве Fe₃Al, позволило Я.П.Селискому сделать вывод о возможности фазового перехода 2-го рода в данном сплаве. Действительно, в соответствии с равновесной диаграммой Fe-Al при повышении температуры до 540-545°C наблюдается процесс разупорядочения сплава Fe₃Al, имеющего структуру типа DO_3 , который сопровождается характерным изменением температурной зависимости коэффициента термического расширения, - в области $T = 540^\circ\text{C}$ наблюдается острый λ -видный скачок КТР. Переход не сопровождается заметными объемными

изменениями. Представилось целесообразным провести подробные исследования процесса упорядочения (переход неупорядоченной α -фазы в упорядоченную по типу DO_3 (Fe_3Al) α_1 -фазу) и ВТ при нагреве и изотермических выдержках. При медленном нагреве разупорядоченных образцов вблизи $T \approx 250^\circ C$ наблюдается значительный (примерно 0,2%), - объемный эффект, что соответствует данным, полученным рентгеновской методикой. Измерения температурной зависимости удельного электрического сопротивления ρ при нагреве до температуры $350^\circ C$ с последующим охлаждением показали, что ρ уменьшилось в 1,5 раза, что в точности соответствует отношению ρ для разупорядоченного и полностью упорядоченного состояния. Это позволяет считать, что наблюдаемый в области температур $200-250^\circ C$ аномальный ход кривых линейного расширения и $\rho(T)$ обусловлен развитием процессов упорядочения. После отжига закаленных образцов при температуре $350^\circ C$ в рентгеновском спектре появляются сверхструктурные линии (III) и (3II), указывающие на появление упорядоченной фазы Fe_3Al .

Отличия, наблюдаемые при упорядочении в равновесных условиях при медленном охлаждении ниже $540^\circ C$ и при отжиге закаленных (неупорядоченных) образцов, по-видимому, можно объяснить чисто кинетическими причинами, а именно, слишком медленным протеканием диффузионных процессов при низких температурах отжига. Точка $540^\circ C$ на равновесной диаграмме состояния отвечает началу упорядочения, а отсутствие характерных признаков фазового перехода I-го рода, по-видимому, может быть объяснено неполным упорядочением. Этим, на наш взгляд, объясняется обилие различных вариантов "равновесной" диаграммы состояния сплавов Fe-Al. Значительный объемный эффект при упорядочении закаленного сплава связан с ускоренной кинетикой упорядочения в присутствии избыточных вакансий, образующихся при закалке.

Исследования зависимости декремента колебаний δ от напряженности магнитного поля H показали, что сплавы Fe-25,2 ат. % Al и Fe-9,8 ат. % Al имеют небольшую магнитную составляющую ВТ. В разупорядоченном состоянии (закалка от $1000^\circ C$) при температурах $50^\circ C$ и $230^\circ C$ наблюдаются структурно-чувствительные максимумы ВТ ($f \approx 86$ Гц). После циклически повторяющихся нагревов до температур $350-450^\circ C$ 50-градусный пик увеличивается по высоте и смещается в сторону более высоких температур, а 230-градусный - уменьшается по высоте, но сохраняет свое температурное положение.

Измерения на разных частотах и сравнение с известными экспериментальными данными позволяет сделать заключение о релаксационной природе широкого максимума при $T \approx 230^\circ\text{C}$. Расчет его энергии активации дает значения 96 ± 100 кДж/моль, что соответствует энергии активации известного пика Снука в Fe-Al сплаве, содержащем примерно 25 ат.% Al. Смещение пика Снука при использованных частотах (100Гц) в область более высоких температур показывает на существование неизвестного ранее релаксационного эффекта $T \approx 50-125^\circ\text{C}$ (температура его проявления зависит от предьстории образца). Этот пик не исчезает при наложении магнитного поля вплоть до $H \approx 32 \cdot 10^3$ А/м, напротив, он даже несколько повышается, в то время как эффекты магнитомеханической природы при наложении насыщающего поля, как правило, пропадают.

Наиболее необычным свойством обнаруженного пика ВТ является амплитудная зависимость его высоты. В тех случаях, когда пик наблюдается при повышенных температурах, отчетливо видна его асимметрия. Эксперименты, проведенные при различных частотах, не позволили обнаружить частотную зависимость температурного положения пика. Таким образом АЗВТ на пике, его асимметрия, отсутствие частотной зависимости температурного положения пика свидетельствуют о том, что наблюдаемый релаксационный эффект нельзя описать в рамках обычной релаксации, обусловленной динамическим гистерезисом и характеризующейся одним ϵ (или спектром не связанных релаксаций). По литературным данным, после закалки как из жидкой фазы, так и от температур, отвечающих области существования α -твердого раствора, полностью разупорядоченное состояние в сплавах Fe-Al, содержащих 20-30 ат.% Al, получить не удается даже в случае высокой скорости охлаждения. Таким образом, появление АЗРЭ отвечает двухфазному, частично упорядоченному состоянию, которое возникает после закалки. Непродолжительный отжиг при температуре 250°C приводит к образованию в сплаве упорядоченной по типу DO_3 фазы. В этом структурном состоянии обсуждаемый пик ВТ не наблюдается. В то же время он сохраняется после нагрева до температур в интервале $350^\circ\text{C} < T < 540^\circ\text{C}$, в котором происходит частичное разупорядочение.

Анализ известных вариантов диаграмм фазового равновесия в системе Fe-Al показывает, что критическая температура существования упорядоченной фазы Fe_3Al составляет 550°C и соответствует содержанию алюминия 26,8 ат.%, т.е. не строго стехиометрическому составу. Реально в температурном интервале $540-550^\circ\text{C}$ превращение

идет по схеме $\alpha_2 + \alpha \rightarrow \alpha_1 + \alpha$ (α_2 -фаза FeAl). Поэтому можно предположить, что появление на начальных этапах упорядочения изолированных мелкодисперсных выделений когерентной α_1 -фазы в α -матрице приводит к скачку параметра порядка, в то время как упругая деформация матрицы за счет изменения (сжатия при упорядочении) объема частиц α_1 -фазы не вызывает заметного объемного эффекта во всей $\alpha_1 + \alpha_2$ системе. Это обстоятельство дает основание рассматривать указанное превращение при 540-550°C как фазовый переход 2-го рода.

При нагреве закаленных образцов трудно предположить, каким образом идет упорядочение: по обычному типу (в соответствии с равновесной диаграммой состояния) или минуя α_2 состояние. Измерения температурной зависимости намагниченности закаленных образцов не обнаруживают каких-либо особенностей в области температур существования АЗРЭ, в то время как распад метастабильной парамагнитной α_2 фазы сказался бы на намагниченности.

АЗРЭ наблюдается и в сплаве Fe-9,8 ат. % Al, где может существовать только ближний порядок. При изменении степени ближнего порядка изменяется энергетический спектр валентных электронов, в результате чего происходит изменение величины, и, частично, характера взаимодействия между атомами сплава. Это вызывает объемные изменения. Следовательно, изменение ближнего порядка должно сопровождаться локальной упругой деформацией сплава. С другой стороны, можно полагать, что упругой деформации частично упорядоченного состояния при измерениях ВТ будут соответствовать изменения ближнего порядка, релаксация по параметру порядка (появление пика ВТ). Таким образом, если в случае магнитного фазового перехода в карбидных частицах за АЗРЭ ответственны процессы релаксации магнитного порядка, то в рассматриваемом случае имеет место релаксация по параметру структурного порядка. Усматривается некоторая аналогия структурного состояния сплавов Fe-C и Fe-Al, обуславливающая реально наблюдаемое подобие условий появления пика ВТ вблизи T_c карбидов и АЗРЭ в Fe-Al сплавах. Как в том, так и в другом случае существует двухфазное состояние. Причем одна из фаз такого двухфазного состояния является промежуточной, метастабильной. После закалки и отжига в сплаве Fe_3Al формируются упорядоченные частицы путем зародышеобразования, которое протекает негетогенно, и роста. Неупорядоченная же фаза в низкотемпературной области является метастабильной. Как в случае дисперсной карбидной фазы в

феррите Fe-C сплавов, так и в случае упорядоченных частиц Fe₃Al (либо частиц неупорядоченной фазы в упорядоченной матрице) в сплаве Fe-Al релаксация по параметру порядка идет в части объема материала. Уменьшение высоты обнаруженного в сплаве Fe₃Al пика ВТ, также может быть объяснено тем, что неупругое поведение частиц по мере повышения скорости деформации постепенно исчезает и они все в большей мере проявляют упругие свойства.

В заключении приведены основные результаты и выводы работы.

1. Низкочастотное внутреннее трение вблизи точки Кюри дисперсных карбидных фаз в сплавах Fe-C при небольших скоростях нагрева \dot{T} , меньше некоторой граничной, определяющей способность материала к релаксации термических напряжений, характеризуется появлением зависящего от амплитуды деформации пика, имеющего не дебаевскую, а λ -форму: резкий спад в сторону более высоких температур и более пологий в сторону низких. Высота обнаруженного пика ВТ δ_n слабо зависит от скорости нагрева \dot{T} , в то время как его полуширина и асимметрия зависят от \dot{T} , что объясняется суперпозицией термических и магнотриксционных напряжений.

2. Немонотонная зависимость высоты пика ВТ от средней скорости деформации свидетельствует о том, что его происхождение обусловлено вязким затуханием вблизи точки перехода карбидов Fe₃C и (Fe, Mn)₃C из ферромагнитного в парамагнитное состояние (фазовый переход 2-го рода).

3. Проведены параллельные исследования свойств экстрагированных из сталей карбидов железа вблизи их точки Кюри и свойств сталей при подходе к точке Кюри карбидных выделений. Особенности магнитных и релаксационных свойств карбидов в стали обусловлены условиями их стесненной деформации.

4. Коэффициенты термического расширения α карбидов Fe₃C и (Fe, Mn)₃C при температурах выше точки Кюри превышают значения α в области температур ниже T_C. Наблюдаемые отличия объясняются магнотриксционным вкладом в термическое расширение.

5. Процесс упорядочения сплава Fe-25,2 ат.% Al при нагреве закаленных от температур, отвечающих области существования неупорядоченного твердого раствора, образцов, в отличие от упорядочения в равновесных условиях, сопровождается значительным объемным эффектом (сжатием примерно на 0,2%), резким падением электрического сопротивления, снижением уширенного пика Снуека, появлением АЗРЭ. Это свидетельствует о том, что процесс упорядочения по ти-

пу DO_3 не является нормальным фазовым переходом 2-го рода.

6. Асимметрия, отсутствие частотной зависимости АЗРЭ, его отсутствие в полностью упорядоченном состоянии свидетельствует о связи этого эффекта с процессами фазовых превращений (упорядочения). Условием появления АЗРЭ является наличие двухфазного состояния сплава (частично упорядоченного неравновесного состояния).

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Рохманов Н.Я., Сиренко А.Ф., Кадер С.М. Скоростная зависимость деформационного поведения железоуглеродистых сплавов вблизи точки Кюри карбидов // Эволюция дефектных структур в металлах и сплавах: Тез. докл. I-го Междунар. семинара, 8-12 сент. 1992 г. - Барнаул: БПИ. - 1992. - С.146-147.

2. Рохманов Н.Я., Сиренко А.Ф., Абдель-Кадер С.М. Энергия упругих колебаний ферромагнетика и магнитомеханическое затухание // Материалы конф. "Физические явления в твердых телах", Харьков: ХГУ, 2-4 февраля 1993 г. - С.38.

3. Абдель-Кадер С.М., Бахарев С.А., Рохманов Н.Я., Сиренко А.Ф. Релаксационные эффекты при раздвоении точки Кюри цементита в сплавах железо-углерод // Релаксационные явления в твердых телах: Тез. докл. школы-семинара, 23-26 февр. 1993 г. - Воронеж: ВПИ. - 1993. - С.11.

4. Рохманов Н.Я., Сиренко А.Ф., Абдель-Кадер С.М. Влияние поверхностей раздела на релаксационные эффекты в сплавах на основе железа и никеля // Там же. - С.63.

5. Абдель-Кадер С.М., Рохманов Н.Я., Сиренко А.Ф., Бахарев С.А., Спирина С.В. Объемная магнитострикция и ее влияние на положение точки Кюри карбида $(Fe, Mn)_3C$ в сплаве I60Г2 / Харьк. гос. ун-т. - Харьков, 1993. - 20 с. Деп. в УкрГНТБ 28.06.93. - № I244-Ук93.

6. Рохманов Н.Я., Сиренко А.Ф., Капуткин Д.В., Бахарев С.А., Абдель-Кадер С.М. Смещение точки Кюри карбида железа в сплавах железо-углерод и релаксационные эффекты // Изв. РАН. Сер. Физическая. - 1993, - Т.57, № II. - С.40-44.

Ответственный за выпуск К.Ф.-М.Н. Бахарев С.А.

Подп. к печ. 144394 Формат 60×84¹/₁₆. Бумага тип. Печать офсетная. Усл. печ. л. 40
Уч.-изд. л. 66 Тираж 25 экз. Зак. № 530 Бесплатно.

276583

AS 21.00

276583

AB 29.876

AB 29.876