

На правах рукописи

УДК 537.621.3

537.624.9

537.611.3

ЮМАГУЗИН АЗАТ РАИСОВИЧ.

**ОСОБЕННОСТИ СТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В ПЛАСТИНАХ (111)
С КОМБИНИРОВАННОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ**

Специальность 01.04.07 - физика твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Уфа - 2000

Работа выполнена совместно в лаборатории теоретической физики ИФМК УНЦ РАН и на кафедре теор. физики Башгосуниверситета

Научные руководители: доктор физико-математических наук, профессор **Пономарев О.А.**
кандидат физико-математических наук, доц. **Вахитов Р.М.**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, Назаров А.А.
кандидат физико-математических наук, Владимир И.В.

Ведущая организация: Институт радиотехники и электроники РАН,
г. Москва

Защита состоится **26.12.2000** в **16.00** часов на заседании диссертационного Совета Д 200.71.01 по присуждению ученой степени кандидата физико-математических наук в Институте физики молекул и кристаллов Уфимского научного центра РАН по адресу 450075, г. Уфа, проспект Октября, 151.

Отзывы направлять по адресу 450075, г. Уфа, проспект Октября, 151, ИФМК, специализированный Совет Д 200.71.01

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИФМК УНЦ РАН

Автореферат разослан **24.11.2000г.**

Ученый секретарь
специализированного Совета Д 200.71.01
кандидат физико-математических наук

 Ломакин Г.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Более 30 лет ведутся интенсивные исследования физических свойств магнитоупорядоченных кристаллов типа ферритов-гранатов. Такой постоянный интерес к ним обусловлен многими причинами и, прежде всего, развитой технологией их синтеза, которая позволяет получать феррит-гранатовые соединения с требуемыми магнитными характеристиками, наличием ряда уникальных магнитных свойств, проявляющимися при различных условиях. Они уже нашли применение во многих технических устройствах, в том числе в магнитооптических приборах, СВЧ-технике, в устройствах для визуализации неоднородных магнитных полей и т.д.

Характерной особенностью кристаллов ферритов-гранатов является сочетание в них двух типов анизотропий различной природы: естественной кубической и навденной одноосной, причем соотношение между ними может меняться в широких пределах. Такая комбинированная анизотропия существенно влияет на многие свойства ферритов-гранатов и, в особенности, на доменную структуру в них. Топология доменной структуры и ее поведение в магнитном поле в значительной мере определяется ориентацией развитой поверхности этих пленок. Среди различных типов пленок наиболее привлекательными для применения и широко исследуемыми экспериментально оказались пленки с ориентацией (111). В пленках (111) достаточно подробно были изучены фазовые переходы типа спиновой переориентации, доменная структура и ее перестройка, процессы перемангничивания и т.д. В случае идеальных кристаллов эти явления хорошо описываются в рамках феноменологической модели, учитывающей наличие комбинированной анизотропии. Однако, в реальных кристаллах, как правило, имеют место различного рода дефекты (дислокации, поры, трещины, неоднородности химического состава и т.д.), которые существенно влияют на процессы спиновой переориентации в этих магнетиках. Экспериментальные исследования спин-переориентационных фазовых переходов в кристаллах ферритов-гранатов показывают [1,2], что кинетика данного процесса является необычной и не может быть объяснена без учета в теоретических мо-

делях влияния размеров образца. В то же время такой учет приводит к необходимости учета вклада размагничивающих полей от неоднородно распределенных магнитных зарядов (полюсов), возникающих на поверхности и в объеме образца. Однако расчеты в подобной постановке задачи сопряжены со значительными математическими трудностями как аналитического, так и численного характера. Поэтому представляет интерес построение теории спин-переориентационных фазовых переходов в магнитоупорядоченных кристаллах-пластинах конечных размеров, содержащих дефекты, которая является одной из актуальнейших проблем теоретической физики [3].

Из сказанного выше следует актуальность исследования условий возникновения и изучения устойчивых состояний магнитных неоднородностей типа «статических солитонов» в (111)-пластине с комбинированной анизотропией.

При разработке модели был учтен термодинамический анализ спин-переориентационного фазового перехода, рассмотренный для пластины (111) в идеализированной модели [4]. В частности, из расчетов следует, что в области сосуществования магнитных фаз существуют решения, которые описывают магнитные неоднородности типа ноль-градусных доменных границ (0-градусные ДГ) или «статических солитонов» (СС). Они по своей структуре и условиям возникновения соответствуют зародышам новой фазы. Поэтому в основу рассматриваемой модели было положено исследование взаимодействия 0-градусных ДГ с дефектами различной природы (структурные неоднородности кристалла, неоднородные магнитные поля) в рамках вариационной задачи.

Целью диссертационной работы является теоретическое моделирование процесса зародышеобразования на дефектах различного вида и изучение дальнейшей его кинетики при фазовых переходах типа спиновой переориентации в образцах конечных размеров, представляющих (111)-ориентированную пластину с комбинированной анизотропией.

Научная ценность работы состоит в том, что впервые проведено численное исследование устойчивых состояний магнитных неоднородностей

типа 0-градусной ДГ в кристаллах ферритов-гранатов с комбинированной анизотропией с учетом размагничивающих полей пластины и наличия дефектов в ней; детально рассмотрено влияние параметров пластины как на область устойчивости 0-градусной ДГ, так и на их характеристики. Показано, что магнитные неоднородности типа 0-градусных ДГ являются зародышами новой фазы и играют существенную роль в процессах перехода магнетика от одного состояния к другому.

Практическая ценность работы определяется тем, что параметры пластины могут быть изменены в весьма значительных пределах при вполне достижимых в экспериментальных условиях значениях толщины пластины, констант НОА и КА, фактора качества материала Q. Это может быть использовано при конструировании устройств с легкоуправляемыми параметрами. Такими устройствами могут быть магнитооптический визуализатор микроскопических магнитных полей [5], линии задержки [6] и т.д.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) в реальных кристаллах ферритов-гранатов конечных размеров могут существовать как устойчивые образования локализованные на дефектах различного рода магнитные неоднородности типа 0-градусных ДГ («статические солитоны»);
- 2) область устойчивости 0-градусных ДГ ограничена двумя критическими значениями материальных параметров: при одних 0-градусная ДГ коллапсирует, а при других она расплывается;
- 3) магнитные неоднородности типа 0-градусных ДГ могут существовать в исследуемых кристаллах в широком интервале изменений материальных параметров, в том числе и в отсутствие кубической анизотропии;
- 4) построена примерная картина квазистационарной кинетики спин-переориентационного фазового перехода в реальных магнетиках ограниченных размеров, в которой 0-градусные ДГ, как зародыши новой фазы, являются промежуточным звеном при спиновой переориентации кристалла;

5) 0-градусные ДГ в изучаемых кристаллах могут существовать и в области действия локальных магнитных полей.

6) наличие дефектов в магнетиках приводит к смещению точки спин-переориентационного фазового перехода идеализированной модели.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения, приложения и списка литературы.

Апробация работы. Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на Всероссийских школах-семинарах "Новые магнитные материалы микроэлектроники" (Москва, 1996, 1998), на международных конференциях «Moscow International Symposium on Magnetism» (Москва, 1999), «Soft Magnetic Materials – XIV» (Balatonfured, Hungary, 1999), на региональной конференции «Резонансные и нелинейные явления в конденсированных средах» (Уфа, 1999), а также докладывались на семинарах кафедры теоретической физики БашГУ и ИФМК УНЦ РАН (г.Уфа).

Публикации. Результаты опубликованы в 9 печатных работах.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, приложения, насчитывает 111 страниц, включая 23 рисунка и 129 библиографических ссылок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приводится обзор литературы по теме диссертации. Здесь кратко изложены необходимые сведения о природе возникновения комбинированной анизотропии в ферритах-гранатах, об имеющих место в них спонтанных и индуцированных спин-переориентационных фазовых переходах. Так, из приведенных исследований следует [7], что в магнитоупорядоченных кристаллах существует множество ситуаций, когда в них индуцируется магнитная анизотропия, параметры которой зависят как от природы самого вещества, так и от условий наведения. В частности, было выяснено, что в эпитаксиально выращенных монокристаллах ферритов-гранатов, как правило, одновременно присутствует два типа анизотропий различной природы: наведенная одноосная анизотропия (НОА) и естественная кристаллографическая (кубическая) (КА). Было показано, что такое

сочетание анизотропий различной симметрии сказывается на магнитных свойствах этих материалов [8].

Приводится обзор экспериментальных и теоретических работ, в которых исследуются однородные магнитные состояния кубических кристаллов с наведенной одноосностью [9]. В частности, приведены ориентационные фазовые диаграммы пластины (111) для случаев: а) $K_u > 0$, б) $K_u < 0$ (K_u - константа НОА). Также представлены результаты исследования влияния магнитного поля на основное состояние пластины (111) с комбинированной анизотропией [10]. Рассмотрены структура и свойства магнитных неоднородностей возможных в пластине (111). Обращено внимание на характер влияния дефектов на процесс перемагничивания кристаллов.

Во второй главе исследованы условия зарождения и устойчивость 0° -ДГ в (111)-пластине ферритов-гранатов с комбинированной анизотропией с неоднородными параметрами образца. Рассматривается ферромагнитная пластина (111) толщины D , в которой имеет место сочетание НОА и КА. В основу модели спиновой переориентации был положен вариационный метод исследования взаимодействия 0-градусной ДГ с дефектом, который позволяет учесть и размагничивающие поля пластины. Используется система координат, в которой ось OZ || [111] и совпадает с легкой осью НОА. Ось OY лежит в плоскости (111), составляя угол φ_0 с осью $[\bar{1}10]$, и совпадает с направлением, вдоль которого магнетик неоднороден. Соответственно, энергия магнитных неоднородностей в пластине (111) с учетом обменного взаимодействия, энергии КА, НОА и размагничивающих полей объемных зарядов в винтеровском приближении бралась в виде:

$$E = \int dV \left\{ A \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 + \sin^2 \theta \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] + K_u \sin^2 \theta + K_1 \left[\frac{\sin^4 \theta}{4} + \frac{\cos^4 \theta}{3} + \frac{\sqrt{2}}{3} \sin^3 \theta \cos \theta \cos 3(\varphi - \varphi_0) \right] + 2\pi M_s^2 (\sin \theta \sin \varphi - \sin \theta_\infty \sin \varphi_\infty)^2 \right\}, (1)$$

где A – обменный параметр; K_u, K_1 – соответственно, константы НОА и КА; M_s – намагниченность насыщения; θ, φ – полярный и азимутальный углы вектора \mathbf{M} ; θ_x, φ_x – характеризуют направление \mathbf{M} в доменах; V – объем пластины. Предполагается (идеализированная модель), что пластина является достаточно толстой и пренебрегается вкладом размагничивающих полей поверхностных зарядов в энергию (1). Распределение намагниченности в переходном слое, описывающие возможные магнитные неоднородности, находятся из уравнений Эйлера, минимизирующие энергию (1) по переменным $\theta, \varphi, \varphi_0$:

$$\frac{\delta E}{\delta \theta} = 0, \quad \frac{\delta E}{\delta \varphi} = 0, \quad \frac{\delta E}{\delta \varphi_0} = 0 \quad (2)$$

при выполнении условия

$$\delta^2 E > 0 \quad (3)$$

Система уравнений Эйлера имеет первый интеграл, анализ которого на фазовой плоскости позволяет определить как спектр магнитных фаз, так и структуру магнитных неоднородностей, возможных в пластине (111) с комбинированной анизотропией. В частности, было показано [11], что в них в области $4/3 < \alpha < 3/2$ ($\alpha = K_1/K_u$) наряду со 180° -ой ДЦ, на фазовом портрете уравнений (2) существует траектория вектора \mathbf{M} в виде замкнутых петель, которым соответствует решения:

$$\operatorname{tg} \theta(y) = \frac{1}{a \cdot \operatorname{ch}(b \cdot y/\Delta_0) - c}; \quad \varphi = 0, \pi; \quad \varphi_0 = \pi k/3, k \in Z \quad (4)$$

$$a = \frac{\sqrt{3\alpha - 4}}{2(1 - 2\alpha/3)}; \quad b = \sqrt{1 - 2\alpha/3}; \quad c = \frac{\sqrt{2\alpha} \cos 3(\varphi - \varphi_0)}{6(1 - 2\alpha/3)}$$

Данным решениям отвечают магнитные неоднородности типа 0° -ДГ или «статических солитонов» (СС), в которых $\mathbf{M} \parallel [111]$ в доменах. Как следует из (4), СС в пластине (111) бывает двух типов: большеамплитудный (БАС) и малоамплитудный (МАС), различающихся энергией E , шириной Δ_s и

максимальным углом θ_s отклонения вектора намагниченности \mathbf{M} от однородного состояния (амплитудой).

Анализ условия (3) для решения (4), показывает, что СС, как одномерное образование, не является устойчивым в рамках идеализированной модели, что объясняется пренебрежением факторами, обуславливающих возникновение в образце доменной структуры. В качестве одного из таких факторов рассматривается учет конечности образца. Это приводит к учету размагничивающих полей пластины, вклад которых в энергию (1) для блоховских ДГ записывают в виде:

$$E_{ms} = M_s^2 L_x \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\cos \theta(y) \cos \theta(y') - 1) \ln \left(1 + \frac{D^2}{(y - y')^2} \right) dy dy', \quad (5)$$

где L_x – размер пластины вдоль оси ОХ.

Подробно рассматривается термодинамика зародышеобразования новой фазы и показывается необходимость учета дефектов для «конденсации» новой фазы.

В качестве дефекта, стабилизирующего СС, берется пластинчатое магнитное включение [12], в котором параметры A, K_u и K_1 имеют значения, отличные от таковых в матрице, т.е. зависят от y в виде:

$$K_u(y) = \begin{cases} K_u + \Delta K_u, & |y| \leq L/2 \\ K_u, & |y| > L/2 \end{cases} \quad K_1(y) = \begin{cases} K_1 + \Delta K_1, & |y| \leq L/2 \\ K_1, & |y| > L/2 \end{cases} \quad (6)$$

$$A(y) = \begin{cases} A + \Delta A, & |y| \leq L/2 \\ A, & |y| > L/2 \end{cases}$$

где L – размер дефекта.

Для количественного описания процесса зародышеобразования на дефекте, рассматривается вариационный метод, в котором в качестве пробной функции берется закон изменения намагниченности в переходном слое в виде (4), где a, b, c считаются вариационными параметрами задачи. Их

значение определяется из минимума энергии (1) с учетом (5) и (6), т.е. из энергии СС E_s вида:

$$E_s = E + E_d + E_{ms} \quad (7)$$

где E_d — определяется выражением:

$$E_d = L_x D \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ \Delta A \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 + \Delta K_u \sin^2 \theta + \Delta K_1 \left[\frac{\sin^4 \theta}{4} + \frac{\cos^4 \theta}{3} + \frac{\sqrt{2}}{3} \sin^3 \theta \cos \theta \right] \right\} dy \quad (8)$$

Такой подход основан на предположении, что учитываемые факторы практически не влияют на структуру магнитных неоднородностей уединенного типа, а лишь изменяют ее параметры.

Для определения устойчивых состояний СС в кристалле, содержащей дефекты вида (6), решается соответствующая вариационная задача методом численной минимизации приведенной энергии $\epsilon_s = E_s / M_s^2 L_x D \Delta_0$. При этом в модели учитывается и то, что центры СС и дефекта могут не совпадать и отличаться на величину ξ , а все величины, имеющие размерность длины, приводятся к $\Delta_0 = \sqrt{A / K_u}$.

Результаты численной минимизации показывают, что ход зависимостей параметров СС от смещения ξ имеют определенные особенности (рис.1), связанные с поведением различных сил при взаимодействии СС с дефектом. Было отмечено, что положение равновесия СС определяется центром дефекта, на котором удерживается квазиупругими силами. Показано, что наибольший вклад в эти силы вносит взаимодействие СС с дефектом, определяемое выражением (8). При увеличении ξ часть спинов в СС оказывается «вне дефекта», что приводит к возрастанию E_d . В то же время новые участки СС, которые перемещаются в область дефекта, из-за короткодействующего характера этих сил, вовлекаются во взаимодействие с дефектом; и ослабляют данный эффект. В результате ширина и амплитуда СС (из-за действия обменных сил) увеличиваются.

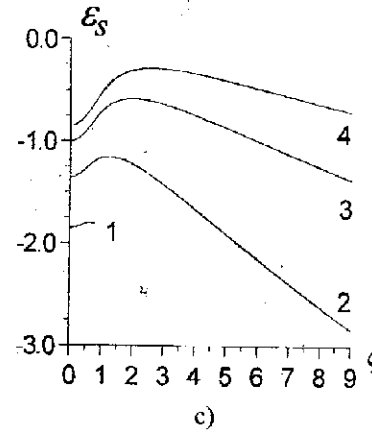
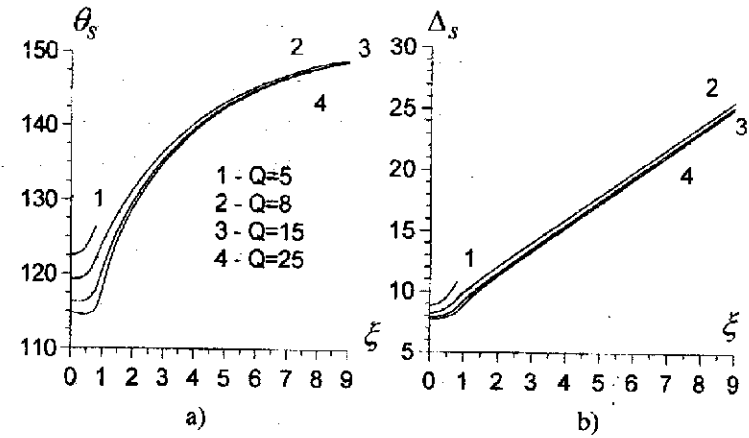


Рис.1 Графики зависимостей параметров СС θ_s (а), Δ_s (б), ϵ_s (с) от смещения ξ для значений $\alpha = 1.42$, $\Delta A = 0$, $\Delta K_1 = 0.5$, $\Delta K_u = -1.5$, $L = 5$, $D = 35$. Кривая 1 соответствует значению $Q = 5$, кривая 2 — $Q = 8$, кривая 3 — $Q = 15$, кривая 4 — $Q = 25$

При увеличении ξ характер зависимости результирующей силы от ξ становится нелинейным (рис.1) и достигает максимума в точке $\xi = \xi_P$, соответствующей точке перегиба функции $\epsilon_s = \epsilon_s(\xi)$. В дальнейшем, с возрастанием смещения, величина этой силы убывает по абсолютной величине вплоть до нуля, что соответствует максимуму энергии $\epsilon(\xi)$. В этой точке (ξ_m) характер сил взаимодействия меняется на обратный, и при $\xi > \xi_m$ СС будут выталкиваться из дефекта. Квазистатическое рассмотрение данного процесса показало, что магнетик при этом становится одно-

родно намагниченным с $\mathbf{M} \parallel [111]$, т.к. при неограниченном возрастании параметра ξ : $\epsilon_s \rightarrow -\infty$, $\Delta_s \rightarrow \infty$, $\theta_s \rightarrow \theta_m$. Таким образом, стабилизация структуры СС, определяемая балансом учитываемых сил, достигается в некоторой области изменения материальных параметров, ограниченной их предельными значениями. Так при уменьшении Q , т.е. при увеличении вклада E_{ms} в энергию (7), при некотором критическом значении ξ магнитостатические поля нарушают условие равновесия сил и СС в результате расплывается (рис.1, кривая 1): $\epsilon_s \rightarrow -\infty$, $\Delta_s \rightarrow \infty$, $\theta_s \rightarrow \pi$. Следует отметить, что в отсутствие полей рассеяния ($Q \rightarrow \infty$) область устойчивости СС по материальным параметрам значительно шире, чем при их наличии. Причем всегда существует критическое (нижнее) значение Q , при котором СС становится неустойчивым.

Из расчетов следует, что устойчивые состояния СС, в основном, определяются наличием дефекта в структуре кристалла. Так, например, из рис.2 видно, что ширина СС пропорциональна ширине дефекта и с возрастанием последней ширина СС увеличивается, а θ_s асимптотически стремится к некоторому предельному значению, которое совпадает со значением полярного угла вектора \mathbf{M} в однородно намагниченной пластине. Очевидно, такая ситуация будет иметь место при $L \rightarrow \infty$, т.е. в случае, когда пластина становится однородной. Также было установлено, что СС стремится подстроится под профиль дефекта, причем при возрастании L эта тенденция становится доминирующей. В то же время, из рис.2 следует, что процесс зародышеобразования на дефекте носит пороговый характер, т.к. существует минимальный размер дефекта, при котором СС становится неустойчивым относительно его коллапса. Это вполне согласуется с общим положением термодинамики «конденсации» новой фазы и коррелирует с аналогичными зависимостями параметров СС от ΔA , ΔK_1 и ΔK_u . Расчеты показали, что существует минимальная энергия дефекта, необходимая для возникновения СС с устойчивой структурой, причем она зависит как от размеров дефекта, так и от других его параметров (ΔA , ΔK_1 , ΔK_u).

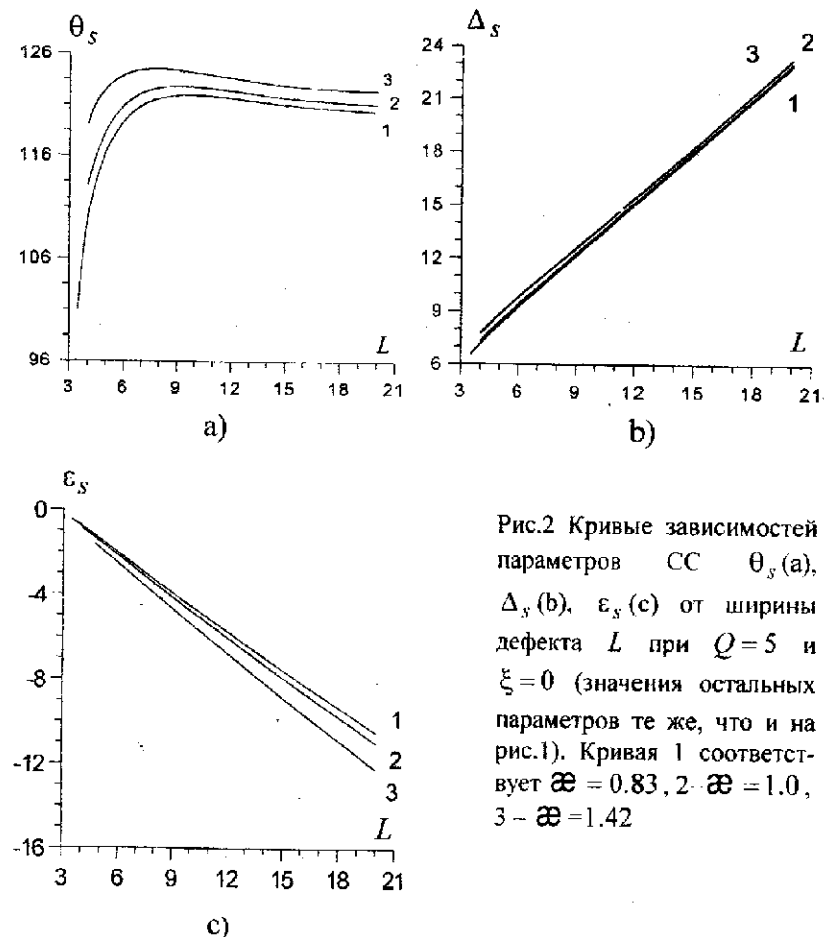


Рис.2 Кривые зависимостей параметров СС θ_s (а), Δ_s (б), ϵ_s (в) от ширины дефекта L при $Q=5$ и $\xi=0$ (значения остальных параметров те же, что и на рис.1). Кривая 1 соответствует $\xi = 0.83$, 2 - $\xi = 1.0$, 3 - $\xi = 1.42$

Численный анализ показал (рис.3), что с возрастанием ξ размеры СС увеличиваются. При этом было выявлено область значений по параметрам дефекта, где возможен переход (скачкообразный или непрерывный) от МАС к БАС и наоборот, что говорит о возможной перестройке доменных образований на дефекте. При дальнейшем уменьшении ξ МАС в размерах сокращается и при некотором предельном значении ξ он коллапсирует. Анализ показал, что в результате коллапса СС магнетик становится однородно намагниченным с $\mathbf{M} \parallel [111]$. Однако такое состояние может насту-

пять раньше, при больших значениях \mathfrak{A} , т.к. в этом случае $\epsilon_s > 0$ и состояние СС является уже метастабильным. В то же время на другом конце области устойчивости по \mathfrak{A} СС расплывается, т.к. $\Delta_s \rightarrow \infty$, $\theta \rightarrow \theta_m$. Магнетик в этом случае также будет представлять однородно намагниченную пластину с $\mathbf{M} \parallel [uiv]$. Это означает, что образец перемагнитился, т.е. произошел фазовый переход: $[111] \leftrightarrow [uiv]$. Очевидно, точка спин-переориентационного фазового перехода будет соответствовать верхней границе устойчивости СС по \mathfrak{A} , при которой происходит расплывание.

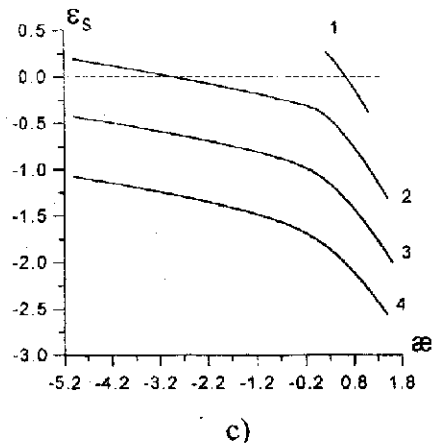
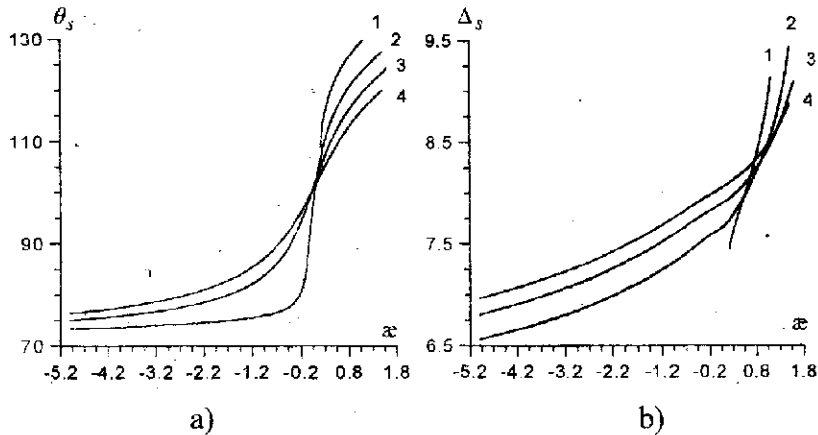


Рис.3 Графики зависимостей параметров СС θ_s (а), Δ_s (б), ϵ_s (с) от величины \mathfrak{A} при различных значениях ΔK_u для $L = 5$. Здесь кривая 1 соответствует $\Delta K_u = -0.9$, 2 - $\Delta K_u = 1.2$, 3 - $\Delta K_u = -1.5$, 4 - $\Delta K_u = -1.8$. Остальные параметры принимают те же значения, что и на рис.2.

Приведенные результаты показали, что область устойчивости СС по \mathfrak{A} достаточно широкая и превышает таковую, предсказанную в идеализированной модели. Причем, СС существует и при $\mathfrak{A} = 0$, т.е. в отсутствии КА. Это нетривиальный результат, т.к. именно наличие кубической анизотропии в кристалле является условием возникновения решений типа СС в идеализированной модели. В то же время, анализ подобных исследований, проведенных в работах [13,14] показал, что характер влияния дефектов на структуру ДГ таков, что он равносильен учету анизотропных взаимодействий более высоких порядков. Последнее в результате и приводит к эффекту комбинированной анизотропии.

В третьей главе содержатся результаты исследования статических свойств 0^0 -ДГ, зарождающихся в области локальных неоднородных магнитных полей. Показано, что локально действующие магнитные поля также могут порождать в пластине (111) с комбинированной анизотропией магнитные неоднородности типа 0 -градусных ДГ.

В качестве другого «дефекта» было рассмотрено неоднородное магнитное поле, напряженность \mathbf{H} которого лежит в плоскости $(\bar{1}10)$ и образует угол ψ с осью $[111]$. Зависимость величины \mathbf{H} от координат бралась в виде

$$H(y) = \begin{cases} H, & |y| \leq \frac{L}{2} \\ 0, & |y| > \frac{L}{2} \end{cases}, \quad (9)$$

где L - участок пластины, на которое действует локальное поле вида (9), т.е. представляет размер неоднородности поля. Соответственно, энергия взаимодействия «дефекта» с 0^0 -ДГ определялось выражением вида:

$$E_d = - \int_V (\mathbf{M} \cdot \mathbf{H}) dV = -M_s H L_x D \int_{-L/2}^{L/2} \cos(\theta(y) - \psi) dy. \quad (10)$$

Из выражения для E_d видно, что взаимодействие 0^0 -ДГ с полем дает отрицательный вклад в (1), причем этот вклад будет наибольшим (по абсолют-

ной величине) в случае, когда $\theta(y) = \psi$. Таким образом, природа взаимодействия (10) такова, что 0^0 -ДГ стремится подстроиться под профиль неоднородности поля.

Полученные результаты представлены на рис.4-6. Из них следует, что 0^0 -ДГ, как устойчивое образование, существует в определенных промежутках изменения параметров образца и неоднородного поля.

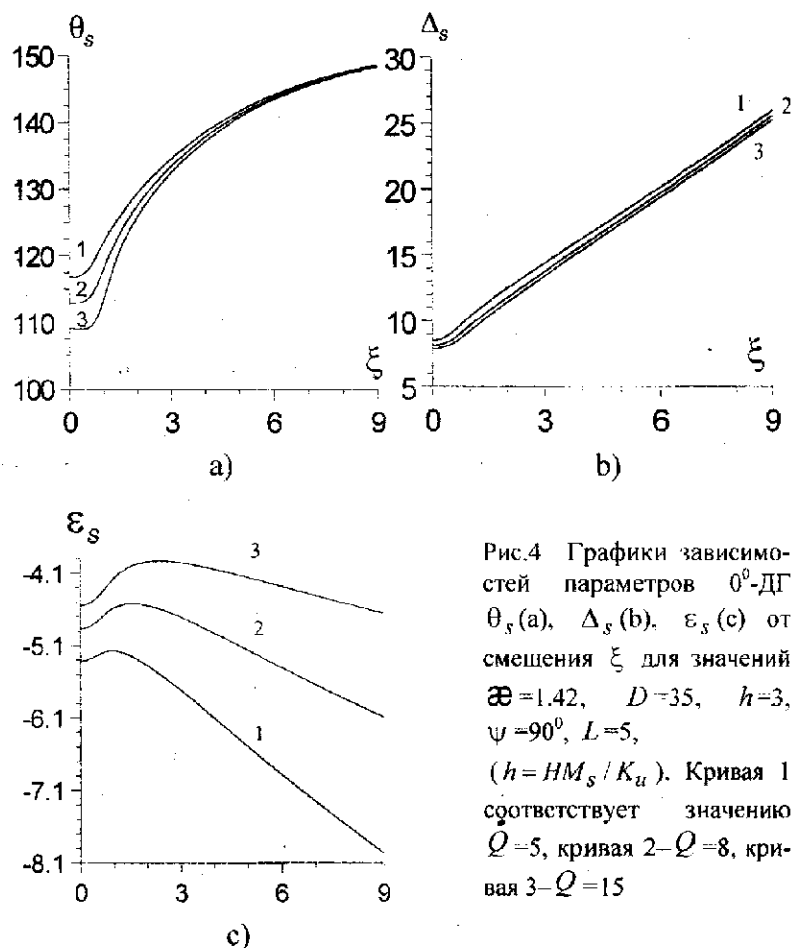


Рис.4 Графики зависимостей параметров 0^0 -ДГ θ_s (a), Δ_s (b), ϵ_s (c) от смещения ξ для значений $\mathfrak{A}=1.42$, $D=35$, $h=3$, $\psi=90^\circ$, $L=5$, ($h=HM_s/K_u$). Кривая 1 соответствует значению $Q=5$, кривая 2— $Q=8$, кривая 3— $Q=15$

Расчеты показывают (рис.4), что положение равновесия 0^0 -ДГ определя-

ется центром «дефекта». Его смещение относительно центра вызывает появление квазиупругих сил, для которых при малых ξ справедливо приближение закона Гука. Это означает, во-первых, что возможны гармонические колебания 0^0 -ДГ относительно положения равновесия, во-вторых, силы взаимодействия в области локализации 0^0 -ДГ на «дефекте» оказывают стабилизирующее влияние на его структуру и определяют, в основном, его параметры. Действительно, из рис.5 видно, что ширина 0^0 -ДГ пропорциональна ширине «дефекта»; с возрастанием последней ширина 0^0 -ДГ увеличивается, а θ_s асимптотически стремится к некоторому предельному значению, которое совпадает со значением полярного угла вектора M в однородно намагниченной пластине. Очевидно, такая ситуация будет иметь место при $L \rightarrow \infty$. В этом случае магнитное поле H становится однородным и равновесная ориентация вектора M будет определяться конкурирующим влиянием НОА, КА и магнитного поля. С другой стороны, из рис.5 следует, что процесс зарождения 0^0 -ДГ в центре неоднородного поля также носит пороговый характер, т.е. существует минимальный размер области неоднородного поля при котором 0^0 -ДГ становится неустойчивым относительно его коллапса. Это согласуется с аналогичными зависимостями параметров 0^0 -ДГ от h и ψ ($h=HK_u/M_s$). Из исследований этих зависимостей был сделан вывод, что существует минимальная энергия взаимодействия 0^0 -ДГ с локальным полем, необходимая для возникновения 0^0 -ДГ с устойчивой структурой, причем она зависит как от размеров «дефекта», так и от других его параметров. Из полученных зависимостей также следует, что 0^0 -ДГ стремится подстроиться под профиль «дефекта», причем при возрастании L эта тенденция становится доминирующей, т.е. подтверждает ранее сделанное утверждение.

Исследования показали, что область устойчивости 0^0 -ДГ по \mathfrak{A} (рис.5) достаточно широкая и превышает таковую, предсказанную в идеализированной модели. Причем, 0^0 -ДГ существует и при $\mathfrak{A}=0$, т.е. в отсутствии КА.

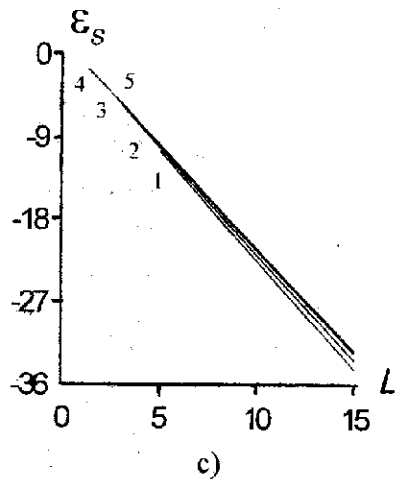
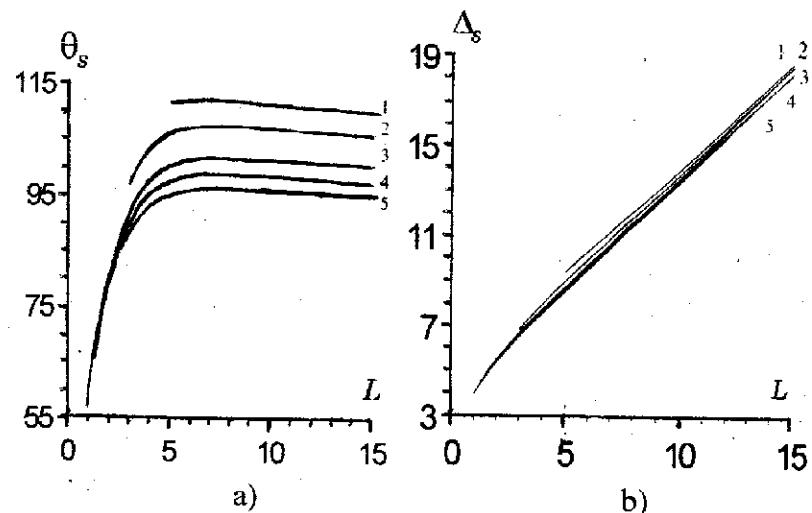


Рис.5 Графики зависимостей параметров 0^0 -ДГ от ширины «дефекта» L при $Q=3.5$, $D=35$, $h=5$, $\psi=90^0$ и для разных значений α : кривая 1 соответствует $\alpha=1.42$, 2- $\alpha=0.83$, 3- $\alpha=0.25$, 4- $\alpha=0$, 5- $\alpha=-0.25$

С другой стороны, область устойчивости 0^0 -ДГ по α , как видно из рис.6, ограничена, как сверху, так и снизу: на верхней границе 0^0 -ДГ расплывается ($\Delta_s \rightarrow \infty$, $\theta_s \rightarrow \theta_m$), на нижней границе он коллапсирует. В обоих случаях пластина становится однородно намагниченной, однако в первом случае его состояние будет соответствовать угловой фазе с

$M \parallel [uvw]$, а во втором - высокосимметричной с $M \parallel [111]$. Аналогичным образом ведет себя 0^0 -ДГ и при изменении других параметров образца и дефекта. Это лишний раз подтверждает, сделанный вывод о том, что возникновение 0^0 -ДГ в кристалле является как бы промежуточным звеном при фазовом переходе магнетика из одного однородного состояния в другое, и что 0^0 -ДГ представляет зародыш новой фазы, локализованный на «дефекте», т.е. в области действия локального поля.

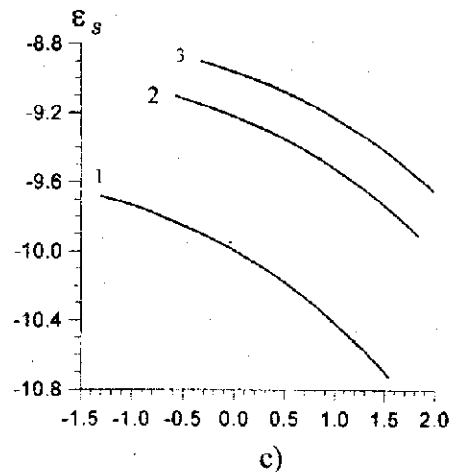
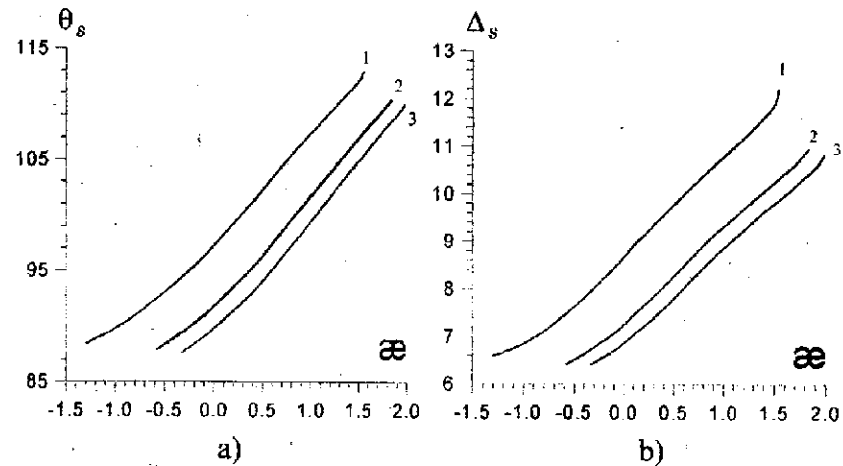


Рис.6 Кривые зависимостей параметров θ_s (а), Δ_s (б), ϵ_s (с) от величины α для $h=5$, $D=35$, $\psi=90^0$, $L=5$. Кривая 1 соответствует значению $Q=3.5$, кривая 2 - $Q=8$, кривая 3 - $Q=15$

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

- 1) Впервые показано, что в реальных кристаллах ферритов-гранатов с комбинированной анизотропией, т.е. с учетом размагничивающих полей пластины, обусловленных конечностью ее толщины, и наличия дефектов в ней, могут существовать как устойчивые образования магнитные неоднородности типа 0^0 -ДГ или «статических солитонов». Определены статические свойства (максимальный угол отклонения вектора намагниченности от однородного состояния, ширина, энергия) таких магнитных неоднородностей в зависимости от параметров пластины и дефекта.
- 2) Установлено, что положение равновесия СС определяется центром дефекта. Его смещение относительно центра дефекта вызывает появление сил притяжения, зависимость которых от смещения носит нелинейный характер: при малых смещениях эти силы могут привести к колебательным движениям СС относительно центра дефекта, при смещениях превышающих некоторое критическое – к перемагничиванию кристалла.
- 3) Найдено, что область устойчивости 0^0 -ДГ ограничена двумя предельными значениями материальных параметров образца: при одних значениях 0^0 -ДГ коллапсирует, при других – расплывается. В обоих случаях магнетик становится однородным, но в разных магнитных состояниях. В этом случае 0^0 -ДГ являются зародышами новой фазы, которые возникают на дефектах, как локализованные состояния, и являются промежуточным звеном при фазовых переходах типа спиновой переориентации
- 4) Установлено, что область устойчивости магнитных неоднородностей типа 0^0 -ДГ по параметру α значительно шире теоретически предсказанной. В частности, они могут быть устойчивыми и при $\alpha = 0$, т.е. в отсутствие кубической анизотропии. Это представляет собой нетривиальный результат, так как причиной возникновения решений типа 0^0 -ДГ в идеализированной модели является сочетание в кристаллах ферритов-гранатов обоих типов анизотропий

- 5) Показано, что процесс зародышеобразования на дефекте носит пороговый характер, т.е. существует минимальная энергия дефекта, необходимая для возникновения СС с устойчивой структурой, причем она зависит как от размеров дефекта, так и от других его параметров.
- 6) Установлено, что магнитные неоднородности типа 0^0 -ДГ могут возникать и образовывать устойчивые состояния в области локального действия магнитного поля. В этом случае размеры 0^0 -ДГ коррелируют с размерами неоднородности поля, причем 0^0 -ДГ стремится подстроиться под его профиль.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1) Власко-Власов В.К., Дедух Л.М., Инденбом М.В., Никитенко В.И. Магнитный ориентационный фазовый переход в реальном кристалле // ЖЭТФ, 1983, т.84, в.1, с.277-288
- 2) Власко-Власов В.К., Инденбом М.В. Диаграмма магнитных ориентационных фазовых переходов в монокристаллах гадолиниевого феррита-граната с внутренними напряжениями // ЖЭТФ, 1984, т.86, в.3, с.1084-1091
- 3) Гинзбург В.Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными // УФН, 1981, т.134, в.3, с.469-517
- 4) Сабитов Р.М., Вахитов Р.М. К теории магнитных неоднородностей в ферритах-гранатах с комбинированной анизотропией // Изв.ВУЗов. Физика., 1988, т.31, в.8, с.51-56.
- 5) Ветошко П.М., Кононов Р.И., Топоров А.Ю. Магнитооптический визуализатор микроскопических магнитных полей // Приборы и техн.эксп-та, 1993, т.5, с.151-156
- 6) Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я. Прикладная магнитооптика. Энергоатомиздат. М. (1990), 320 с.
- 7) Тикадзуми С. Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практические применения. Мир. М. (1987), 419 с.
- 8) Беляева А.И., Антонов А.В., Егиазарян Г.С., Юрьев В.П. Спин-переориентационные фазовые переходы в магнитном поле для эпитаксиальных пленок $(BiTm)_3(FeGa)_5O_{12}$ со смешанной анизотропией // ФТТ, 1982, т.24, в.7, с.2191-2197
- 9) Vakhitov R.M., Sabitov R.M., Gabbasova Z.V. Magnetic phases and spin-reorientation transitions in a (111)-oriented plate with combined anisotropy // Phys.Stat.Sol.(b), 1991, v.165, p.K87-K90

- 10) Грипевич В.В., Вахитов Р.М. Магнитные фазы и спин-переориентационные фазовые переходы (СПФП) в кубическом ферромагнетике при действии внешних напряжений и магнитных полей. // ФТТ, 1996, т.38, в.11, с.3409-3419
- 11) Вахитов Р.М., Сабитов Р.М., Фарзтдинов М.М. Доменные границы в ферритах-гранатах с наведенной одноосной анизотропией. // ФТТ, 1985, т.27, в.6, с.1852-1856.
- 12) Sakuma A., Tanigawa S., Tokunaga M. Micromagnetic studies of inhomogeneous nucleation in hard magnets // JMMM., 1990, v.84, p.52-58
- 13) Силицын Е.В., Бострем И.Г. Ориентационные переходы в магнетиках с флуктуациями анизотропных взаимодействий // ЖЭТФ, 1983, т.85, в.2, с.661-669
- 14) Шамсутдинов М.А., Веселаго В.Г., Фарзтдинов М.М., Екомасов Е.Г. Структура и динамические характеристики доменных границ в магнетиках с неоднородной магнитной анизотропией // ФТТ, 1990, т.32, в.2, с.497-502

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

- 1*. Вахитов Р.М., Юмагузин А.Р. Структура и устойчивость 0-градусных доменных границ в пластине (111) с комбинированной анизотропией при наличии неоднородного поля //Нов. магн.матер. микроэлек.: Тезисы докладов XV Всеросс.школы-семинара, Москва, УРСС, 1996, с.521
- 2*. Вахитов Р.М., Юмагузин А.Р. Устойчивые состояния 0-градусных доменных границ в пластине (111) с комбинированной анизотропией // «Структурные, магнитоупругие и динамические эффекты в упорядоченных средах»: Межвузов. сб. научных статей, Уфа, изд-во БашГУ, 1997, 214 с.
- 3*. Вахитов Р.М., Юмагузин А.Р. Устойчивость «замороженного солитона» в пластине (111) ферритов-гранатов с комбинированной анизотропией // Нов. магн. матер. микроэлек.: Тезисы докладов XVI Междуна-род. школы-семинара, ч.II, Москва, 1998, 673 с.
- 4*. Vakhitov R.M., Yumaguzin A.R. 0⁰-domain walls as the nuclei of a new phase in (111) plate with a combined anisotropy // Book of Abstracts. Mos-cow International Symposium on Magnetism. Moscow, 1999, p.302

- 5*. Vakhitov R.M., Yumaguzin A.R. 0-degree domain walls as the nuclei of a new phase in a (111) combined - anisotropy plate. // Proceedings of Mos-cow International Symposium on Magnetism. Part II, Moscow, 1999, p.396
- 6*. Vakhitov R.M., Yumaguzin A.R. On magnetic inhomogeneities originating in the defect area in a cubic ferromagnet // Conference Abstracts. Soft Mag-netic Materials – XIV. Sept. 8-10, 1999. Balatonfured, Hungary,1999, p.370.
- 7*. Вахитов Р.М., Юмагузин А.Р. Механизм зародышеобразования новой фазы в реальных кристаллах типа ферритов-гранатов // Сб.науч. тр-в. Региональная конференция «Резонансные и нелинейные явления в конденсированных средах», т.1, Уфа, 1999, изд.БашГУ, 200 с.
- 8*. Vakhitov R.M., Yumaguzin A.R. On magnetic inhomogeneties originating in the defect area in a cubic ferromagnet // JMMM, 2000, v.215, p.52-55
- 9*. Юмагузин А.Р., Вахитов Р.М. Особенности процесса спиновой пере-ориентации в магнетиках типа ферритов-гранатов в неоднородном магнитном поле // Электронный журнал «Исследовано в России», 2000, 82, с.1146-1152

<http://zhurnal.ape.relam.ru/articles/2000/082.pdf>

Юмагузин Азат Раисович

**ОСОБЕННОСТИ СТАТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ В ПЛАСТИНАХ (111)
С КОМБИНИРОВАННОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

*Лицензия на издательскую деятельность
ЛР № 021319 от 05.01.99 г.*

Подписано в печать 21.11.2000 г. Формат 60x84/16.
Бумага офсетная. Компьютерный набор.
Отпечатано на ризографе. Усл.печ.л. 1,34.
Уч.-изд.л. 1,38. Тираж 100 экз. Заказ 723.

*Редакционно-издательский центр Башкирского университета.
Отпечатано на множительном участке Башкирского университета.
450074. Уфа, ул.Фрунзе, 32. Тел.: (3472)236-710*