

На правах рукописи

ГИЛЯРОВ Владимир Леонович

**НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В РЕАКЦИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ НА
МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕРМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург
2006

Работа выполнена в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Даль Юрий Михайлович

доктор физико-математических наук,
профессор Мещеряков Юрий Иванович

доктор физико-математических наук,
профессор Смирнов Борис Иванович

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет

Защита состоится « 17 » мая _____ 2007 г. в 15:00 на заседании
диссертационного совета Д002.205.01 при Физико-
техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН по
адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе
РАН

Автореферат разослан « 12 » апреля _____ 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Петров А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Примерно до середины XX века нелинейным эффектам в физике не придавалось серьезного значения. Предполагалось, что все физические явления описываются линейными дифференциальными уравнениями в пространстве и времени. Если же нелинейные эффекты и проявляются, то лишь как некие поправки, для описания которых можно использовать приближенные методы типа теории возмущений.

Ситуация коренным образом изменилась во второй половине XX века. Исследования по обоснованию эргодической гипотезы вскрыли принципиальную роль нелинейности как основы стохастического поведения динамических систем. Появление компьютеров в это же время привело к развитию перспективной отрасли физики – компьютерному эксперименту, в ходе которого оказалось возможным моделировать нелинейные физические явления, аналитическое описание которых наталкивалось на непреодолимые математические трудности.

Было обнаружено, что динамика даже, казалось бы, самых простых нелинейных систем оказывается весьма сложной. Достаточно иметь в системе всего более двух степеней свободы, чтобы она вела себя стохастично. В таких системах были выявлены странные аттракторы – притягивающие области фазового пространства, попадая внутрь которых, фазовые траектории ведут себя крайне нерегулярно и очень чувствительны к начальным условиям. В отличие от обычных регулярных аттракторов (притягивающая точка, предельный цикл и т.д.) многие странные аттракторы имеют сложную геометрическую структуру и обладают фрактальными свойствами, т.е. являются самоподобными объектами с дробной фрактальной размерностью. Нелинейные явления такого вида

привели к созданию концепции маломерного хаоса, проявляющегося в системах с небольшим числом степеней свободы.

С другой стороны оказалось, что в поведении сложных нелинейных систем можно обнаружить простые черты. Очень часто их эволюция описывается небольшим числом переменных, называемых обычно параметрами порядка. В этих системах появляются временные и пространственные упорядоченные структуры, возникающие из хаотического движения – самоорганизация.

Обнаружение принципиальной роли нелинейных эффектов при возникновении порядка из хаоса и наоборот дало толчок к изучению такого рода явлений в различных областях науки: физики, химии, биологии, социологии и т.д. Был достигнут значительный прогресс в понимании процессов эволюции, в основе которых лежат нелинейные эффекты.

Прогнозирование техногенных катастроф представляется одной из актуальных проблем нашего времени в связи со все более сильным влиянием человеческой деятельности на природные процессы. В то же время наблюдается недостаток фундаментальных исследований по данной проблеме, базирующихся на современных физических принципах самоорганизации сложных систем. Представляется, что настоящая работа помогает выявить природу процессов, происходящих в механических системах перед их разрушением на различных масштабных уровнях.

С другой стороны остаются недостаточно разработанными микроскопические аспекты хорошо известных явлений, в частности термоупругого эффекта в твердых телах, обусловленного нелинейными эффектами различной природы. Детальное изучение такого рода аспектов также представляется имеющим научную актуальность.

Цель работы: Изучить реакции твердых тел на механические и термические воздействия, обусловленные нелинейными эффектами. К таким реакциям, изучаемым в настоящей работе относятся:

1. Разрушение гетерогенных твердых тел при приложении механической нагрузки

2. Трансформация профиля поверхности твердых тел при механическом и термическом воздействии

3. Термоупругий эффект в твердых телах, заключающийся в изменении температуры тела при его адиабатическом нагружении.

Большой класс эффектов, изучаемых в представляемой диссертации, связан с самоорганизацией сложных систем. Исследуемый объект представляет собой механически нагружаемый гетерогенный материал, в котором происходит множественное трещинообразование. Этот сложный статистический процесс имеет тенденцию к самоорганизации в пространстве и времени, и на последних стадиях разрушения формируется самоорганизованное критическое состояние. Пространственные и временные аспекты такого рода самоорганизации и являются предметом изучения в диссертации.

Самоорганизация процесса разрушения происходит не только в объеме материала, но и на его поверхности, которая, как известно, сама часто является инициатором разрушения. Поэтому исследование самоорганизации поверхности при механическом воздействии представляется весьма актуальным. В диссертации изучается мультифрактальная самоорганизация профиля латеральной поверхности аморфных сплавов под действием механической нагрузки.

Говоря о самоорганизации нельзя не отметить, что любая самоорганизация определяется взаимодействиями в физической системе. Любой же тип взаимодействия предполагает нелинейность системы, поскольку линейных взаимодействий в реальности не существует (аддитивность означает суперпозицию и независимость). Поэтому и процессы самоорганизации, рассматриваемые в диссертации, основаны на нелинейности взаимодействия.

Другой класс явлений, рассмотренных в работе связан с нелинейностью (ангармонизмом) межатомного взаимодействия в твердом теле (трансформация поверхности при воздействии температуры и термоупругий эффект в низкомолекулярных твердых телах). Наряду с этим рассматриваются также явления, являющиеся следствием структурного ангармонизма в ориентированных полимерах, такие как термоупругий эффект и тепловое расширение.

Основные положения, выносимые на защиту и их новизна:

1. Проведенные в диссертационной работе исследования по изучению статистических закономерностей процесса трещинообразования впервые позволили установить, что эволюция трещинообразования в гетерогенных материалах (металлах и горных породах) при их механическом нагружении представляет собой направленный процесс к самоорганизованному критическому состоянию, которое является масштабно инвариантным в пространстве и времени и характеризуется наличием пространственного и временного скейлинговых показателей (показателей степени в степенных функциональных зависимостях). Такое состояние материала является его предразрывным состоянием.

2. Проведенные исследования по изучению мультифрактальной трансформации латеральной поверхности материалов (аморфных сплавов и металлов) под воздействием механической нагрузки в нанометровом диапазоне масштабов показали, что на конечной стадии разрушения на поверхности формируется самоафинная фрактальная структура, аналогично тому, как это происходит в объеме материала. Такое поведение системы позволяет заключить, что и в этом случае эволюция материала под нагрузкой приводит к формированию самоорганизованного критического состояния.

3. Построена микроскопическая модель трансформации поверхности кристаллов на атомном уровне при изменении температуры. В основе

модели лежат представления об отличии термодинамических свойств поверхности кристалла от свойств его объема, связанном с отсутствием соседних атомных слоев. Если в направлении перпендикулярном поверхности изменению межплоскостных расстояний ничто не препятствует, то в плоскости самой поверхности избыточное над объемом тепловое расширение затруднено наличием соседних атомов. На поверхности формируется суперструктура термических дислокаций несоответствия, физической причиной, которой является отличие динамических свойств поверхности от объема (средние квадраты амплитуд колебаний, коэффициент теплового расширения), порожденных нелинейностью межатомного взаимодействия.

4. Выявлена микроскопическая причина термоупругого эффекта в низкомолекулярных твердых телах. Показано, что внешнее механическое поле создает деформацию, на которой внутренняя энтропийная сила теплового давления, порожденная колебательным ангармонизмом, совершает работу, которая приводит к изменению тепловой составляющей внутренней энергии.

5. Теоретически описаны наблюдающиеся особенности термоупругого эффекта в ориентированных жесткоцепных полимерах. Показано, что в этом случае определяющими являются поперечные колебания (изгибные или торсионные), которые определяют знак и величину термоупругого эффекта. В основе этого явления лежит структурный ангармонизм, связанный с нелинейной зависимостью модуля вектора от его декартовых координат.

Научная и практическая значимость работы:

Выявление характера самоорганизации сложных систем, является существенным фактором, позволяющим понять закономерности поведения этих систем в неравновесных условиях. Стремление гетерогенных материалов к самоорганизованному критическому состоянию на конечных

стадиях процесса разрушения раскрывает важную закономерность в поведении материалов при механическом нагружении.

Представление об эволюции материалов при воздействии механических нагрузок к самоорганизованному критическому состоянию открывает возможность практических методов контроля работоспособности конструкций в промышленных условиях. Обнаружение в работающих конструкциях пространственного или временного масштабнo-инвариантного характера накопления дефектов означает тот факт, что конструкция приближается к предразрывному состоянию, и ее дальнейшая эксплуатация небезопасна. В то же время существующие и широко применяемые эмпирические методы прогнозирования разрушения (в частности, основанные на использовании различных модификаций коэффициента Херста) получают физическое обоснование.

Исследования закономерностей трансформации поверхности на микроуровне при тепловом и механическом воздействиях позволяют оценить условия формирования и устойчивость поверхностных наноструктур при создании материалов для современной микроэлектроники. Эти результаты являются важными для понимания характера формирования и трансформации поверхностных структур на микроскопическом уровне.

Апробация работы: По результатам диссертации сделаны доклады на Всесоюзном совещании "Физические основы микромеханики разрушения", (Ленинград, 1980) Всесоюзной школе по физике поверхности (Карпаты, 1986), Всесоюзной школе по физике поверхности. (Куйбышев, 1987), Первой Всесоюзной конференции «Сильновозбужденные состояния в кристаллах», (Томск, 1988), I Международном семинаре «Актуальные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева и XXXIII семинаре «Актуальные проблемы прочности», (1997), на международном семинаре «New Approaches to Hi-Tech Materials, (Saint Petersburg, 1997), Международной

конференции «Science for Materials in the Frontier of Centuries: Advantages and Challenges», 4-8 November, (Kyiv 2002), III Международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники, (Санкт-Петербург, 2002), XI международном семинаре «Актуальные проблемы прочности (Великий Новгород, 2002), XIV Петербургских чтениях по проблемам прочности, посв. 300 летию Санкт-Петербурга (2003), Международных междисциплинарных симпозиумах «Фракталы и прикладная синергетика», (Москва, 2003, 2005), VI Международной конференции «Научно-технические прогнозирование надежности и долговечности конструкций и методы их решения RELMAS'2005», (Санкт-Петербург, 2005), VII Международной школе-семинаре «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород», (Борок, 2005).

Публикации: Основное содержание диссертации отражено в 31 статьях, приведенных, в конце автореферата.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 243 наименований. Объем диссертации 231 страница. Диссертация содержит 32 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, формулируются цели и задачи работы, приводятся положения, выносимые на защиту, даются сведения об апробации работы, излагается ее краткое содержание по главам.

Первая глава содержит сведения как обзорного, так и оригинального характера. Она посвящена термодинамической теории твердых тел с нелинейным межатомным взаимодействием. Отмечены характерные трудности построения такой теории, связанные с тем, что нелинейное взаимодействие между атомами затрудняет расчет статистических

интегралов. Кроме этого вида нелинейности в анизотропных системах существует другой вид ангармонизма – структурный, связанный с особенностью вычисления нормы вектора в евклидовом пространстве через проекции этого вектора по формуле

$$\|\vec{r}\| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1)$$

При этом эффекты, зависящие от расстояний, оказываются нелинейно зависящими от евклидовых координат даже при квадратичной зависимости энергии от этих расстояний.

Проведен обзор различных приближенных методов для расчета термодинамических характеристик твердых тел – квазигармоническое, псевдогармоническое, самосогласованное гармоническое приближение. Отмечено, что квазигармоническое приближение Грюнайзена описывает ангармонические эффекты лишь частично, так как ангармонические члены в нем учитываются не явно, а только через зависимость фононных частот от объема. В связи с этим в 70-е годы рядом авторов было разработано несколько самосогласованных приближений, которые позволяли рассчитывать термодинамические характеристики при учете высоких порядков ангармонизма.

Рассмотрены основные применения самосогласованных приближений – динамическая устойчивость и термодинамическая прочность кристаллов, температурные зависимости колебательного спектра дефектов, в частности определения термодинамических характеристик поверхности твердых тел, таких как средние квадраты колебаний (СКА) поверхностных атомов и коэффициент термического расширения поверхности (КТР). Часть этих результатов носит оригинальный характер.

Перечислены основные экспериментальные методики, применяющиеся в настоящее время для изучения структуры поверхности кристаллов, такие как метод дифракции медленных электронов (ДМЭ),

метод спектроскопии характеристических потерь энергии электронов (СХПЭЭ) и методы сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии (СТМ и АСМ).

Описаны термодинамические особенности поведения полимерных кристаллов и макромолекул, связанные с сильной анизотропией межатомного взаимодействия вдоль и поперек полимерных цепей. Высокая продольная жесткость, обусловленная сильными ковалентными связями скелета полимерных молекул, по сравнению с относительно низкой поперечной жесткостью и слабое межмолекулярное взаимодействие приводит к тому, что фоннные спектры таких систем сильно отличаются от спектров низкомолекулярных веществ, что и приводит к особенности их термодинамических свойств. К таким своеобразным эффектам относится, прежде всего, отрицательное продольное термическое расширение, в то время как поперечное расширение остается положительным (как это обычно бывает в низкомолекулярных системах). Температурные зависимости теплоемкости полимерных кристаллов при низких температурах оказываются также отличными от обычных низкомолекулярных кристаллов.

Проведен обзор модели Стокмейера-Хечта и ее модификаций, часто применяющихся для вычисления различных динамических характеристик полимерных кристаллов. Для модели Стокмейера-Хечта известен фоннный спектр, поэтому термодинамические характеристики полимерных кристаллов (КТР, СКА) можно рассчитать через моменты фоннного спектра. Хорошее совпадение этих характеристик с экспериментальными значениями оказалось неожиданным, поскольку реальные полимерные молекулы не являются одномерными цепочками, а представляют собой более сложные конфигурации (например, плоские зигзаги или геликоидальные структуры). Однако учет реальной структуры полимерной молекулы (полиэтилена) показал, что вклад в КТР и СКА за счет

торсионных колебательных мод, которые отсутствуют в модели Стокмейера-Хечта, компенсируется вкладом от дополнительной изгибной моды, присутствующей в модели.

В первой главе обсуждаются также различные виды гамильтониана межатомного взаимодействия, применяющиеся для полимерных кристаллов.

Среди оригинальных результатов, изложенных в главе 1, следует отметить сведения, касающиеся расчета термодинамической границы прочности твердых тел, а также термодинамического расчета их прочностных характеристик, таких как силовые и температурные зависимости энергии активации разрыва межатомных связей.

Результаты, изложенные в главе 1, являются отправными при построении самосогласованных термодинамических моделей в главах 5 и 6.

Вторая глава содержит аналитический обзор основных известных на сегодняшний день способов самоорганизации в нелинейных системах и предлагается их систематика. Нами выделяется четыре способа самоорганизации:

1. Самоорганизация при физических фазовых переходах, когда внешний параметр (как правило температура) достигает своего критического значения $T=T_c$. Ниже критической температуры поведение системы описывается небольшим количеством величин называемых параметрами порядка, которые представляют собой монотонно убывающие функции температуры, стремящиеся к нулю при $T \rightarrow T_c$. Выше температуры T_c параметры порядка тождественно равны нулю.

При приближении к критической температуре термодинамические величины (и параметры порядка) меняются по степенному закону с показателями степени, которые называются критическими показателями (или критическими индексами). По степенному закону меняются также парная пространственная корреляционная функция и радиус корреляций,

который стремится к бесконечности, когда температура приближается к критическому значению.

2. Геометрические фазовые переходы (перколяция). Здесь характерные степенные зависимости параметров появляются, когда достигается критическое значение вероятности заполнения ячейки (порог перколяции).

3. Образование структур в открытых системах вдали от равновесия. Он также носит критический характер, аналогично тому, как происходит самоорганизация при фазовых переходах. При небольших отклонениях от состояния термодинамического равновесия, производство энтропии внутри системы всегда превышает ту часть, которую система может отдавать за счет обмена с окружением. Поэтому для структурообразования необходимо, чтобы отдача энтропии во внешнюю среду превысила некоторое критическое значение, чтобы суммарное изменение энтропии было положительным.

К этому же типу самоорганизации можно отнести и динамические системы с небольшим числом степеней свободы, поведение которых также качественно меняется в критических точках (точках бифуркации).

4. Самоорганизованное критическое состояние (СОКС). В основе модели самоорганизованной критичности положена нелинейная динамика систем с большим числом степеней свободы. Более того, эти системы обладают большим числом метастабильных состояний, число которых экспоненциально растет с размерами системы.

Основное отличие СОКС от трех предыдущих видов самоорганизации заключается в том, что оно реализуется в широком диапазоне внешних управляющих параметров, а не в критических точках, т.е. является притягивающим аттрактором нелинейной динамики независимо от начальных условий и значений внешних параметров. СОКС так же обладает пространственной масштабной инвариантностью,

приводящей к фрактальному пространственному самоподобию и временной масштабной инвариантностью, реализующейся как $1/f$ шум.

Концепция самоорганизованной критичности предполагает образование пространственных масштабно инвариантных фрактальных структур. Одним из основных защищаемых положений диссертации является гипотеза о том, что СОКС может формироваться в процессе разрушения материалов.

Обзор экспериментальных работ по изучению фрактального характера поверхностей разрушения различных материалов также приведен во второй главе. Хорошо известно, что поверхности разрушения твердых тел не являются идеально плоскими и обладают фрактальной размерностью. Эксперименты по исследованию фрактальной размерности поверхностей разрушения были проведены для очень широкого спектра материалов, испытывающих как хрупкое, так и пластическое разрушение. Такое масштабно инвариантное состояние поверхностей разрушения позволяет нам предполагать, что эти поверхности появились в результате действия универсального механизма разрушения, и этим механизмом является эволюция материала к СОКС.

Таким образом, исследование статистических закономерностей в процессе разрушения материалов с целью выявления характера самоорганизации этого процесса является важной и пока нерешенной проблемой в физике разрушения. Одной из задач диссертации является исследование таких закономерностей в широком диапазоне масштабов, начиная с нанометровых.

Третья глава посвящена исследованию статистических свойств процесса трещинообразования материалов при механическом нагружении с целью выявления временных и пространственных масштабно-инвариантных закономерностей процесса. Процесс трещинообразования сопровождается

акустической эмиссией (АЭ) из объема материала, сигналы которой являются индикатором разрушения. В результате регистрации АЭ от образующихся в процессе разрушения трещин составляются банки данных, представляющие собой, как правило, значения амплитуд сигналов АЭ как функции времени на серии пьезоэлектрических датчиков, устанавливаемых на поверхности изучаемого образца или конструкции.

Приводится схема одной из экспериментальных установок, на которой были получены исходные экспериментальные данные по акустической эмиссии. Эксперименты на этой установке, проводились в лаборатории геослужбы США сотрудниками ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН В.С. Куксенко и С.А. Станчицом совместно с сотрудниками ОИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН на образцах из горных пород (граниты) цилиндрической формы с диаметром 76.2 мм и высотой 190.5 мм.

Полученные экспериментальные банки данных по акустической эмиссии содержали следующую информацию: времена рождения трещин, координаты источника каждого принятого сигнала (локация) и сведения об амплитудах сигналов (максимальная амплитуда в волновом пакете). Локация сигналов проводилась по традиционной схеме определения координат гипоцентров на основании времен прихода сигналов на систему акустических датчиков.

Кроме экспериментов по измерению АЭ на образцах из горных пород анализировались эксперименты по измерению АЭ на стальных заводских металлоконструкциях (В.Н. Савельев). В данных экспериментах локация не проводилась, что позволило рассчитать только временные характеристики процесса. Эти эксперименты представляются важными потому, что они выполнены на другом материале (сталь), а во-вторых, на другом масштабном уровне (размеры конструкций составляли несколько метров).

Для исследования временной масштабной инвариантности в процессе разрушения применялся корреляционный анализ в различных его

интерпретациях. Временная автокорреляционная функция является важнейшей характеристикой случайного процесса. Эта функция стандартно определяется выражением:

$$K(t_1, t_2) = \langle x(t_1)x(t_2) \rangle \quad (4)$$

В этом выражении $x(t)$ представляет собой анализируемый случайный сигнал, а усреднение производится по ансамблю.

Процесс разрушения, конечно, не является стационарным на всем своем протяжении, но может быть с хорошей точностью разбит на квазистационарные участки. В этом случае, как известно, автокорреляционная функция (АКФ) зависит лишь от разности аргументов, т.е. $K(t_1, t_2) = K(t_1 - t_2) = K(\Delta t)$. Кроме того, предполагается, что процесс разрушения и сопровождающая его акустическая эмиссия являются процессами эргодическими, для которых средние значения по ансамблю равны средним значениям по времени. Зная корреляционную функцию, можно рассчитать ее Фурье спектр

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} K(\Delta t) \exp(i\omega t) dt \quad (5)$$

Если корреляции в системе отсутствуют, то эта характеристика представляет собой белый шум (прямая параллельная оси частот). Известно, что для системы находящейся в СОКС характерен $1/f$ шум, зависимость которого от частоты имеет вид:

$$S_x(\omega) \propto \omega^{-\beta} \quad (6)$$

с показателем β отличным от нуля. Для определения характера изменения показателя β во времени весь банк экспериментальных данных разбивался на временные интервалы, внутри которых и производился статистический анализ. На рассматриваемых временных интервалах процесс предполагается стационарным. В качестве основной случайной величины выбирались паузы между приходами сигналов на приемники (или эквивалентная этой величина акустической активности – число сигналов, пришедших на приемник за единицу времени). Внутри каждого временного интервала рассчитывался скейлинговый показатель β .

Полученные при помощи такого расчета результаты показали, что на начальной стадии процесса разрушения частотная зависимость спектральной плотности пауз в потоке трещинообразования имеет характер белого шума. По мере развития процесса характер шума меняется: в низкочастотной области наблюдается заметный подъем, становящийся наиболее ярко выраженным к моменту разрушения. Будучи построенной в логарифмических координатах, низкочастотная часть спектральной плотности мощности носит характер $1/f$ шума, как это требует условие самоорганизованной критичности.

В качестве основной характеристики для расчета пространственной масштабной инвариантности (самоподобия) выбиралась корреляционная функция Грассбергера-Прокаччи вида:

$$C(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N H(r - r_{ij}) \quad (7)$$

Здесь r_{ij} - расстояние между парой акустических событий, N – число анализируемых событий, H – функция Хевисайда, равная единице, если ее аргумент неотрицателен, и равная нулю в противоположном случае. Функция (7) равна числу пар событий, расстояние между которыми не превосходит r . Если в системе присутствует масштабная инвариантность, зависимость $C(r) \sim r^d$, т.е. представляет собой степенную функцию с показателем степени равным корреляционной фрактальной размерности (ФР) множества ($d = D_c$). Так же как и в случае с временной масштабной инвариантностью банки экспериментальных данных разбивались на интервалы времени, внутри которых и рассчитывался скейлинговый показатель D_c .

Пример характерного изменения во времени пространственного и временного скейлинговых показателей приведен на рис. 1.

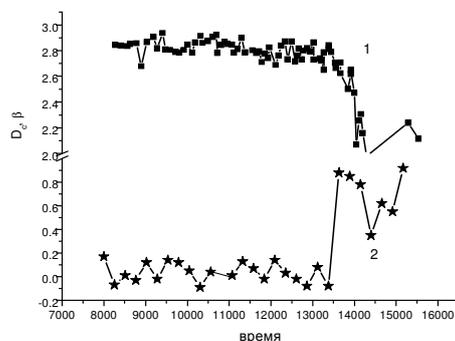


рис. 1 Зависимости корреляционной фрактальной размерности (1) и временного скейлингового показателя (2).

Видно синхронное изменение пространственного и временного скейлинговых показателей на последней стадии разрушения. Такое

поведение пространственного коррелятора объясняется тем, что на этой стадии образуется очаг разрушения, который развивается таким образом, что формирует будущую поверхность разрушения.

Т.о., на конечной стадии процесса разрушения пространственные и временные корреляционные функции носят ярко выраженный масштабно инвариантный характер, проявляющийся в их степенных зависимостях от аргументов, то есть удовлетворяют условиям образования СОКС. Это подтверждается также тем, что аналог распределения дефектов по размерам – закон повторяемости акустических событий также носит на этой стадии масштабно-инвариантный характер. В системе при этом отсутствуют выделенные пространственные и временные масштабы. Так же как и при фазовых переходах в системе могут появляться флуктуации физических величин от самых малых до самых больших, определяемых размерами системы. Т.о. можно заключить, что состояние гетерогенных материалов перед разрушением под действием механической нагрузки является самоорганизованным критическим состоянием. При этом в процессе разрушения в материале происходит эволюция дефектной структуры на все более и более высоких масштабных уровнях, в результате которой материал исчерпывает все имеющиеся у него возможности сопротивления разрушению. Выявление этих закономерностей процесса разрушения является итогом главы 3.

Четвертая глава посвящена исследованию трансформации рельефа боковой поверхности твердых тел под действием механических напряжений на нанометровых масштабах. Эксперименты проводились методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Образцами для эксперимента служили фольги из аморфных сплавов на железо-никелевой основе ($Fe_{77}Ni_1Si_9B_{13}$, $Fe_{58}Ni_{20}B_{13}Si_9$), (В.Е. Корсуков, С.А. Лукьяненко), а также металлические фольги (*Сu*, *Мо*) (В.И. Веттегрень, В.Н. Светлов).

Использование аморфных сплавов в качестве образцов обусловлено тем, что это позволило избежать влияния кристаллической структуры на физические явления. Описаны методика приготовления образцов и схема эксперимента. Характерный пример профиля поверхности, полученного таким методом, приведен на рис. 2.

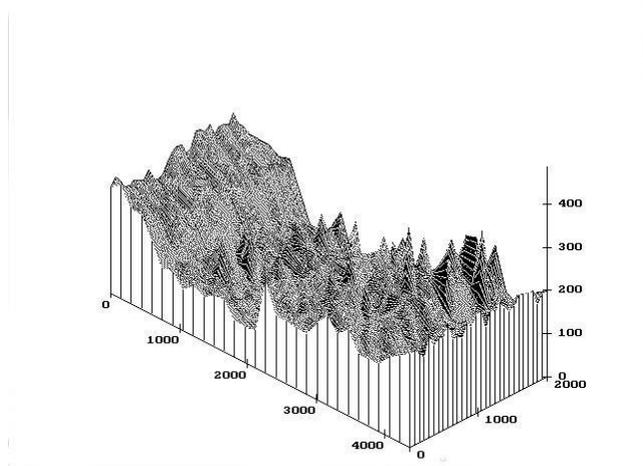


рис. 2. Топограмма поверхности сплава $Fe_{58}Ni_{20}Si_9B_{13}$, полученная методом сканирующей туннельной микроскопии.

Обсуждаются наиболее часто используемые методы для расчета фрактальной размерности поверхностей, такие как «расчет по покрытию» (box counting) и расчет спектральной фрактальной размерности. Выявляются их основные недостатки.

В качестве основного метода анализа трансформации поверхностного профиля при механическом нагружении применялся основанный на фрактальной статистике метод вейвлет преобразований. В отличие от Фурье-преобразования, где в качестве базисных функций преобразования используются функции вида $\exp(ix) = \cos x + i \sin x$, являющиеся

композицией синусоидальных волн с различными частотами и делокализованные в пространстве, для вейвлет преобразования используются существенно локализованные солитонообразные функции, что позволяет точнее исследовать локальные дефекты.

Вейвлет анализ позволяет выявлять различные количественные характеристики мультифрактальных систем, такие как мультифрактальный спектр и другие с ним связанные. Для этой цели был использован аппарат фрактальной термодинамики, развитый в работах Арнеодо с сотрудниками и основанный на принципе максимума модуля вейвлет-преобразования.

Было обнаружено что под действием растягивающего механического напряжения мультифрактальный спектр $f(h)$ (h показатель Гельдера) изменяется. При приложении небольших механических нагрузок к пленкам из аморфного сплава наблюдается разглаживание поверхности этих пленок. Представляется, что разглаживание поверхности при приложении небольших механических напряжениях связано с тем, что исходная поверхность аморфного сплава формировалась в сильно неравновесных условиях (методом спиннингования из расплава). Поэтому она имеет повышенную шероховатость. Действие растягивающего механического напряжения на такую поверхность аналогично разглаживанию смятого листа бумаги при его растяжении за края.

При дальнейшем увеличении механической нагрузки поверхность имеет тенденцию к формированию монофрактальной структуры – ширина и положение спектра смещаются в сторону меньших значений показателей Гельдера. Стремление к формированию этой фрактальной структуры при больших напряжениях отражает начальную стадию разрушения поверхности. Формирование фрактальных структур перед разрушением наблюдалась также на поверхностях металлов. Такое поведение поверхностного профиля позволяет заключить, что и в этом случае перед

разрушением материалов на их поверхности имеется тенденция к формированию СОКС.

Итогом четвертой главы является выявление закономерностей изменения фрактальных характеристик боковой поверхности твердых тел под действием механической нагрузки.

Пятая глава посвящена исследованию трансформации поверхностей кристаллов при изменении температуры среды. Основой рассматриваемого эффекта является отличие термодинамических свойств поверхности кристалла (средние квадраты амплитуд колебаний (СКА), коэффициент термического расширения (КТР) и межплоскостные состояния) от соответствующих объемных значений. Если в направлении перпендикулярном поверхности изменению межплоскостных расстояний ничто не препятствует, то в плоскости самой поверхности избыточное над объемом тепловое расширение затруднено наличием соседних атомов. Возникающая при этом несоизмеримость поверхностных и объемных слоев может быть устранена, если на поверхности образуется суперструктура типа термических дислокаций несоответствия, физической причиной, которой является нелинейность межатомного взаимодействия. Здесь нужно отметить, что сетка дислокация несоответствия возникает исключительно за счет термодинамических свойств поверхности и исчезает при нулевой абсолютной температуре, а потенциал взаимодействия на поверхности предполагается таким же, как и в объеме кристалла. Это отличает рассматриваемую модель от других известных описаний несоизмеримости в кристаллах, когда поверхностные атомы взаимодействуют по закону отличному от взаимодействия в объеме.

В качестве модели оказывается удобным использовать известную модель дислокации Френкеля-Конторовой (ФК), представляющую собой цепочку атомов, упруго взаимодействующих между собой, и находящихся в

синусоидальном потенциальном рельефе подложки. Упругое взаимодействие было модифицировано учетом ангармонических членов между атомами цепочки. Для исследования релаксации поверхности естественным является предположение о том, что каждый атом в статическом пределе находится на дне соответствующей ему потенциальной ямы подложки. Равновесная длина упругих связей равна расстоянию между соседними потенциальными ямами синусоидального рельефа. В отличие от традиционной модели Френкеля-Конторовой предполагается, что связи обладают нелинейной упругостью.

Рассчитываются термодинамически равновесные положения атомов и расстояния между ними. Для построения термодинамической модели используется самосогласованное гармоническое приближение. Полученная система уравнений равновесия имеет ясный физический смысл: представляет собой систему уравнений равновесия атомов в смягченном потенциале подложка+нелинейная упругость; а силовые постоянные определяются по кривизне смягченного потенциала на дне его ямы. Для получения аналитических оценок используется континуальный предел: предполагается, что атомные смещения представляют собой гладкие функции положений атомов, которые можно разложить в ряд Тейлора с точностью до второго порядка. Полученная таким образом система дифференциальных уравнений решается методом теории возмущений для деформаций в плоскости поверхности.

Решение результирующей системы уравнений содержит эллиптическую функцию Якоби, и продольная деформация атомной цепочки, моделирующей поверхностный слой атомов, является периодической функцией координат, причем период этой деформации (поверхностной структуры) зависит от температуры (рис. 3).

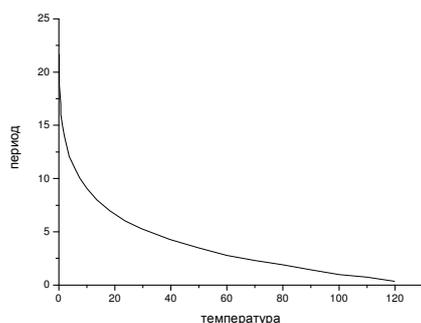


рис. 3. Зависимость периода поверхностной структуры (в единицах межатомного расстояния a) от температуры

В области комнатной температуры и выше зависимость периода поверхностной структуры от температуры слабая (период составляет $13a$ при $T = 300K$ и $10a$ при $T = 1200K$). Это соответствует линейной плотности дислокаций несоответствия примерно $2 \cdot 10^6$ на сантиметр.

В континуальном пределе период поверхностной структуры термических дислокаций несоответствия меняется непрерывно, в то время как в дискретном случае он обязан быть целым числом. Это отвечает физической ситуации, когда при изменении температуры между критическими точками в системе происходит накопление термических напряжений, которые снимаются в критических точках фазовыми переходами с образованием поверхностных суперструктур.

Таким образом, показано, что нелинейные эффекты взаимодействия атомов на поверхности кристаллов оказываются весьма существенными и могут быть ответственны за структурные перестройки поверхности кристаллов.

Шестая глава посвящена микроскопическим аспектам явлений, обусловленных нелинейными эффектами – тепловому расширению и

термоупругому эффекту – изменению температуры твердого тела при его упругом адиабатическом деформировании:

$$\frac{\Delta T}{T} = -\frac{\alpha \sigma}{C} \quad (8)$$

Здесь ΔT - изменение температуры при приложении к материалу одноосного механического напряжения σ ; α - линейный коэффициент термического расширения, C - удельная теплоемкость.

Рассматривается энергетика ангармонического осциллятора, как основного элемента колебательной динамики низкомолекулярных твердых тел, при его адиабатическом механическом нагружении. Ангармонический осциллятор обладает нелинейной упругостью третьего порядка. К нему прикладывается зависящая от времени механическая сила $F(t)$, которая предполагается нарастающей во времени от 0 до некоего конечного значения F_0 много меньшего, чем прочность связи $F_m = f^2/4g$ (чтобы смещения осциллятора оставались малыми). Эта сила прикладывается к осциллятору «адиабатически» в том смысле, что характерное время ее изменения много больше периода колебаний осциллятора. Действие силы можно описать добавкой ее потенциала к собственной энергии осциллятора. Тогда полная энергия осциллятора в поле силы равна:

$$E(t) = E_{kin} + U(x) - F(t) \cdot x \quad (9)$$

В начальном состоянии осциллятор обладает колебательной энергией E_0 . В конечном состоянии энергия осциллятора определяется работой

внешней силы, т.е. $E_2 = E_1 + \int_0^t F(t)\dot{x}(t)dt$. Показано, что среднее по времени значение этой величины, рассчитанное после прихода системы в новое стационарное состояние 2, отличается от начального состояния на величину упругой энергии, инициированной силой $F(t)$. В то же время среднее значение кинетической энергии в состоянии 2 отличается от исходного значения в состоянии 1 и линейно зависит от величины приложенной силы. Это изменение средней кинетической энергией и является микроскопической основой термоупругого эффекта. Такое объяснение сложно обобщить на случай квантовых систем, находящихся при $T = 0K$, поскольку понятие кинетической энергии не является для них хорошо определенным. Для этой цели удобнее использовать понятие колебательной энергии, т.е. полной энергии системы, отсчитанной от дна потенциальной ямы. Изменение этой энергии как функции внешней силы равно изменению амплитудного значения кинетической энергии в конечном состоянии.

Силовые зависимости различных энергетических характеристик осциллятора приведены на рис. 4 (в безразмерных переменных). Начальное значение энергии осциллятора равно $W_0 = 0.2$. Линия 4 представляет собой аналитическую зависимость колебательной энергии, точки отражают численные зависимости, полученные в результате прямого интегрирования уравнений движения.

Аналогичный расчет был произведен и для квантового ангармонического осциллятора в основном состоянии, только вместо уравнений движения использовалось уравнение Шредингера. Как известно, при адиабатическом нагружении осциллятор остается в основном состоянии. Однако значение нулевой энергии (аналога колебательной

энергии классического осциллятора) также как и в классическом случае линейно зависит от приложенной силы.

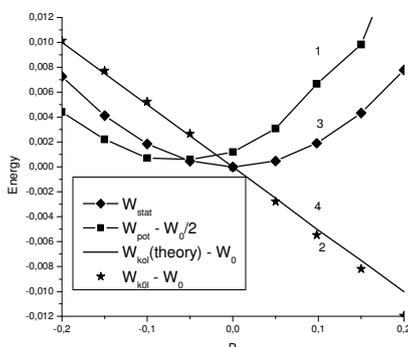


рис. 4 Силовые зависимости энергий: (1) средней потенциальной, (2) – колебательной, (3) – смещение дна потенциальной ямы, (4) – теоретическая зависимость колебательной энергии

Результаты расчета изменения колебательной энергии при адиабатическом нагружении осциллятора обобщены далее на случай ансамбля одномерных кристаллов. Для такого ансамбля построена задача термодинамики необратимых процессов, т.е. сформулированы уравнения эволюции, отражающие основные законы сохранения (массы, импульса и энергии), исходя из гипотезы существования локального равновесия выведены уравнения состояния, связывающие феноменологические полевые параметры с микроскопическими. (линейной и нелинейной константой упругости и межатомным расстоянием). Выведено соотношение для изменения внутренней энергии системы при адиабатическом приложении к ней механического нагружения. Показано, что изменение внутренней энергии в адиабатическом процессе, состоит из тепловой и

потенциальной частей, причем изменение упругой составляющей определяется статической частью работы деформации, а изменение тепловой составляющей – работой энтропийной силы теплового давления.

Цепная молекулярная структура полимеров обуславливает особенности их внутренней динамики и связанных с ней эффектов. Высокая продольная жесткость карбоцепных скелетов макромолекул при сравнительно низкой изгибной жесткости и малой жесткости поперечных связей приводит в полимерных кристаллах к доминированию поперечных колебаний и за счет этого – к отрицательному продольному термическому расширению (мембранный эффект) при положительном термическом расширении в поперечном направлении. Такое поведение решетки кристаллитов характерно как для гибкоцепных, так и для жесткоцепных полимеров. В ориентированных образцах аморфно-кристаллических полимеров при температурах выше температуры стеклования в термическое расширение включается и механизм конформационных переходов в аморфных частях таких полимеров. Ориентированные образцы жесткоцепных полимеров, которые в широкой области температуры (до 500-600 К) остаются застеклованными, должны проявлять температурное поведение, близкое к составляющим их кристаллитам.

Особенности динамики молекул в ориентированных жесткоцепных полимерах (и в кристаллах любых полимеров), связанные с доминирующей ролью поперечных колебательных мод, не могут быть удовлетворительно описаны в модели одиночного осциллятора, рассмотренной выше. Поэтому представляется достаточно адекватным использование в качестве основного элемента динамики полимерных макромолекул линейной трехатомной молекулы с поперечными колебаниями. В такой модели отсутствует торсионная мода, но ее вклад компенсируется дополнительной изгибной колебательной модой. В этой модели была рассчитана силовая зависимость

колебательной энергии системы аналогично той, которая ранее была найдена для ангармонического осциллятора (рис.4).

Эта зависимость противоположна по знаку зависимости, полученной для ангармонического осциллятора, что является следствием того, что здесь играет роль иной вид нелинейности – структурный ангармонизм. Данный вид ангармонизма, как уже было отмечено выше, определяется нелинейной зависимостью модуля вектора от величины его декартовых проекций. Таким образом, объясняется аномальный по отношению к низкомолекулярным веществам знак термоупругого эффекта в полимерных кристаллах. Выведена общая формула для расчета термоупругого эффекта в кристаллах через функции фононного спектра:

$$dT = T \frac{\sigma}{K_T} \frac{\sum_{q\alpha} \gamma_{q\alpha} x_{q\alpha}^2 (\text{cth}^2 x_{q\alpha} - 1)}{\sum_{q\alpha} x_{q\alpha}^2 (\text{cth}^2 x_{q\alpha} - 1)} \quad (10)$$

где σ - внешнее приложенное напряжение, K_T - модуль всестороннего сжатия, $\gamma_{q\alpha} = -\partial \ln \omega_{q\alpha} / \partial \ln V$, - модовые коэффициенты Грюнайзена, $x_{q\alpha} = \hbar \omega_{q\alpha} / kT$ определяется через частоту нормальной моды, а индексы соответствуют волновому вектору и номеру ветви. Поскольку при комнатных температурах в полимерных кристаллах возбуждены лишь поперечные колебания, для которых коэффициенты $\gamma_{q\alpha}$ положительны, из (10) следует, что при приложении внешнего механического напряжения изменение температуры будет также положительно.

Если фононный спектр известен, можно проводить численные расчеты термодинамических характеристик непосредственно на основе общих положений физики твердого тела. Расчет коэффициента термического расширения (КТР) и средних квадратов амплитуд колебаний

атомов (СКА) был проведен для модели полимерного кристалла Стокмейера-Хечта с учетом эффектов квантового вымораживания колебательных мод при низких температурах. Расчетные температурные зависимости КТР и СКА хорошо совпали с экспериментально измеренными для ориентированного полиэтилена, особенно в области низких температур.

Впервые была выявлена значительная роль колебаний сдвигового типа (продольных смещений цепей относительно друг друга) в динамике решетки цепного строения. Именно ими объясняется значительное размытие брэгговских плоскостей (002) при повышении температуры.

В заключении сформулированы основные итоги диссертационной работы:

1. Данные, полученные при анализе акустической эмиссии, сопровождающей процесс разрушения материалов, позволяют сделать вывод о том, что для гетерогенных материалов этот процесс представляет собой направленную эволюцию, в результате которой формируется самоорганизованное критическое состояние, для которого характерны пространственная и временная масштабная инвариантность. Это состояние является результатом эволюции дефектной структуры материалов, как реакции материалов на приложенное к ним механическое напряжение. По мере исчерпания возможностей реакции на нагружение одного масштабного уровня в системе включаются следующие более высокие масштабные уровни. Тогда в материале и формируется СОКС, отражающее отсутствие в материале характерных пространственных и временных масштабов. Формирование СОКС в процессе разрушения представляет собой нелинейный процесс (как и любая самоорганизация вообще). Вид этой нелинейности процесса должен быть учтен при построении конкретных теоретических моделей. Им может быть, например, пороговый характер локализации процесса разрушения (концентрационный критерий).

2. Формирование СОКС в процессе разрушения материалов позволяет выявить физическую причину фрактальности поверхностей разрушения, которая наблюдается при разрушении многих материалов. Эта фрактальность является следствием фрактального характера трещинообразования на конечной стадии разрушения.

3. Масштабно инвариантные состояния формируются не только в объеме материала, но и на его поверхности при приложении к материалу механических нагрузок. На примере трансформации поверхности аморфных сплавов и металлов под действием механических напряжений, исследованной методом сканирующей туннельной микроскопии, показано, что эволюция поверхностного профиля имеет тенденцию к формированию самоафинной фрактальной структуры на конечной стадии этой эволюции. Такая структура характеризуется степенным распределением дефектов по их размерам. Это позволяет заключить, что и в этом случае эволюция системы приводит к формированию СОКС.

4. Обнаружение появления СОКС в работающих конструкциях свидетельствует об их нахождении в предразрывном состоянии, опасности их разрушения, поэтому может служить предвестником техногенных катастроф.

5. Построенная термодинамическая модель позволила изучить трансформацию поверхности под действием температуры. Было показано, что нелинейные эффекты взаимодействия атомов на поверхности кристаллов оказываются весьма существенными и могут быть ответственны за структурные перестройки поверхности кристаллов при изменении температуры. При этом на поверхности образуются суперструктуры термических дислокаций несоответствия, физической причиной которых является ангармонизм межатомного взаимодействия.

6. Показано, что микроскопическая природа термоупругого эффекта – изменение тепловой составляющей внутренней энергии твердого тела

определяется работой внутренней динамической силы (теплового давления) на перемещении, создаваемом внешним полем. В квантовых системах, находящихся в основном состоянии, термоупругий эффект проявляется как снижение уровня нулевой энергии при их механическом нагружении.

Выявлены особенности термоупругого эффекта в ориентированных жесткоцепных полимерах. Показано, что в этом случае определяющую роль играет структурный ангармонизм (нелинейная зависимость модуля вектора от его декартовых проекций) проявляющийся в поперечных колебаниях (изгибных или торсионных), которые определяют знак и величину термоупругого эффекта.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гиляров В.Л., Пахомов А.Б. Анализ механизмов потери устойчивости в модели одномерного кристалла//ФТТ – 1981. – Т. 23. №6. – С. 1569-1572.
2. Петров В.А., Гиляров В.Л. Температурно-силовая неустойчивость атомной цепочки//ФТТ – 1981. – Т. 23. №11. – С. 3372-3375
3. Гиляров В.Л., Петров В.А. Неустойчивость атомной цепочки в температурно-силовом поле//ФТТ – 1983. – Т. 25. № 2. – С. 472-478.
4. Гиляров В.Л. Температурная зависимость теоретической прочности простых кубических решеток//ФТТ – 1983. – Т. 25. №3. – С. 944-946
5. Гиляров В.Л., Петров В.А., Сабиров Р.Х., Лукьяненко А.С. Влияние квантовой статистики на низкотемпературную прочность одномерных кристаллов//ФТТ – 1986. – Т. 28. №5. – С. 1332-1337

6. В.Л. Гиляров. Ангармоническая модель Френкеля-Конторовой для температурной несоизмеримости в кристаллах//ФТТ – 1987. – Т. 29, №4. – С. 1055-1060
7. В.Л. Гиляров. Фликкер-эффект, фрактальные свойства разрушающихся материалов и проблема прогнозирования разрушения//ФТТ – 1994. – Т. 36. №8. – С. 2247-2252.
8. В.Л. Гиляров, А.И. Слуцкер, В.П. Володин, Л.А. Лайус. Энергетика адиабатически нагружаемого возбужденного ангармонического осциллятора//ФТТ – 1997. – Т. 39. №1, – С.153 – 158
9. В.П. Володин, Л.А. Лайус, А.И. Слуцкер, В.Л. Гиляров. Температурные эффекты при адиабатическом деформировании кристаллического и “аморфизированного” полиэтилена//ВМС – 1997. – Т.39. №11. – С.1812-1816.
10. V.L. Hilarov. Self-similar crack generation effects in the fracture process in brittle materials//Modeling Simul. Mater. Sci. Eng. – 1998. –V.6. – P. 337-342
11. В.И. Веттегренъ, В.Л. Гиляров, С.Ш. Рахимов, В.Н. Светлов. Механизм образования нанодфектов на поверхности нагруженных металлов//ФТТ – 1998. – Т. 40. №4. – С. 668- 672.
12. В.Л. Гиляров, А.И. Слуцкер, В.П. Володин, А.И. Лайус. Энергетика термоупругого эффекта в твердых телах//ФТТ – 1998. – Т. 40. №8. – С. 1548-1551
13. Л.А. Лайус, В.П. Володин, А.И. Слуцкер, В.Л. Гиляров. Температурные эффекты при адиабатическом сжатии полиимида//ВМС – 1998. – Т.А40. №8, – С. 1343-1348.
14. Л.А. Лайус, В.П. Володин, А.И. Слуцкер, В.Л. Гиляров. Термодформационные эффекты на начальных стадиях ориентирования полиэтилена//ВМС – 1999 –Т. А41. №2, – С. 1999

15. В.Л. Гиляров, А.И. Слуцкер, Л.А. Лайус. Об адиабатическом инварианте в термодинамике твердых тел//ФТТ – 1999. – Т. 41. №1. – С. 134-136
16. А.И. Слуцкер, Л.А. Лайус, И.В. Гофман, В.Л. Гиляров. Механизм обратимой термической деформации ориентированных полимеров//ФТТ – 2001. – Т. 43. №7 – С. 1327-1332
17. В.И. Бетехтин, П.Н. Бутенко, В.Л. Гиляров, В.Е. Корсуков, А.С. Лукьяненко, Б.А. Обидов, В.Е. Харциев. Влияние одноосного растяжения на геометрические параметры рельефа поверхности аморфного сплава $Fe_{77}Ni_1Si_9B_{13}$ //Письма в ЖТФ – 2002. – Т. 28. №1. – С. 60-66
18. А.И. Слуцкер, Л.А. Лайус, В.Л. Гиляров, И.В. Гофман. Продольное термическое расширение и термоупругий эффект в ориентированных жесткоцепных полимерах//ВМС – 2002. – Т. А44. №9. - С. 1543-1549.
19. А.И. Слуцкер, В.Л. Гиляров, Г. Дадобаев, Л.А. Лайус, И.В. Гофман, Ю.И. Поликарпов. Отрицательное продольное расширение и амплитуда продольных колебаний в кристаллах полиэтилена (эксперимент и теория)//ФТТ – 2002. – Т. 44. №5. – С. 923-929
20. А.И. Слуцкер, В.И. Веттегрень, В.Л. Гиляров, Г. Дадобаев, В.Б.Кулик, Л.С.Титенков. Проявление квантовой статистики в колебательной динамике кристаллов полиэтилена//ФТТ – 2002. – Т. 44. №10. – С. 1897-1854
21. А.И. Слуцкер, В.И. Веттегрень, В.Л. Гиляров, и др. Тепловое расширение кристалла полиэтилена и макромолекул в нем//ВМС – 2002. – Т. 44. №7. –С. 1168-1174
22. В.И.Веттегрень, А.И.Слуцкер, В.Л.Гиляров, В.Б.Кулик, Л.С.Титенков. Термическое расширение скелета цепных молекул в кристаллах полимеров//ФТТ – 2003. – Т. 45. №8. – С. 1528-1534
23. А.И. Слуцкер, Л.А. Лайус, И.В. Гофман, В.Л. Гиляров. Особенности термического расширения слабоориентированного полиэтилена//ВМС, А – 2003. – Т. 45. №5. – С. 750-758

24. А.И. Слуцкер, В.Л. Гиляров, Ю.И. Поликарпов, Д.Д. Каров. Термическое расширение полимеров при циклически меняющейся температуре//ЖТФ – 2003. – Т. 73. №7. – С. 75-81
25. В.Л. Гиляров, В.Е. Корсуков, П.Н. Бутенко, В.Н. Светлов. Применение вейвлет преобразования для изучения изменения фрактальных свойств поверхностей аморфных металлов под воздействием механической нагрузки//ФТТ – 2004. – Т. 46. №10. – С. 1806-1811
26. Л.А. Лайус, А.И. Слуцкер, И.В. Гофман, В.Л. Гиляров. Взаимосвязь характеристик обратимых термических и силовых деформаций в твердых телах различной структуры//ФТТ – 2004. – Т. 46. №6. – С. 1125-1122
27. A.I. Slutsker, L.A. Layus, I.V. Gofman, V.L. Hilarov. The conformational Mechanism of Thermoelastisity of oriented Polyethylene//Int. J. Polymeric Materials – 2004. – V. 53. №2. – С. 173-184
28. Л.А. Лайус, А.И. Слуцкер, И.В. Гофман, В.Л. Гиляров, Ю.И. Поликарпов. Особенности и механизмы термоупругого эффекта в полимерах//Высокомолекулярное соединение А – 2005. – Т. 47. №8. – С. 1394-1407
29. В.Л. Гиляров. Кинетическая концепция прочности и самоорганизованная критичность в процессе разрушения материалов//ФТТ – 2005. – Т. 47. №5. – С. 808-813
30. А.И.Слуцкер, Ю.И.Поликарпов, В.Л.Гиляров. Об элементарных актах в кинетике электрического разрушения полимеров//ЖТФ. – 2006. – Т. 76. №12. – С. 52-56
31. А.И.Слуцкер, В.Л.Гиляров, А.С.Лукьяненко. Особенности энергетики адиабатически нагружаемого ангармонического осциллятора//ФТТ. – 2006. – Т. 48. №10. – С. 1832-1837