

Томский государственный университет

На правах рукописи

Сидоренко Юрий Николаевич

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
СТОХАСТИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ

01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела

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

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Томск — 2004

Работа выполнена в Томском государственном университете.

**Научный руководитель:** кандидат физико-математических наук, доцент  
Масловский Владислав Иванович

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук, ст.н.с.  
Герасимов Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, ст.н.с.  
Зелепугин Сергей Алексеевич

**Ведущая организация:** Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Защита диссертации состоится «7» мая 2004 г. в «\_\_\_\_\_» часов на заседании специализированного совета Д 212.267.13 при Томском государственном университете по адресу 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м. н., ст.н.с.



Христенко Ю. Ф.

### **Общая характеристика работы**

**Актуальность работы.** Широкое использование в современной технике композиционных материалов и совершенствование технологий их получения обуславливают необходимость развития методов прогнозирования их свойств и механического поведения в процессе изготовления и эксплуатации. Характерной особенностью композитов является наличие четко выраженных границ раздела компонентов. В работе рассматриваются композиты, образованные матрицей, непрерывно заполняющей объем материала, и дискретными включениями, выполняющими роль армирующих элементов.

В механике композитов широко применяется теория эффективных свойств. Эти свойства определяются как собственными механическими свойствами компонентов материала, так и особенностями механического взаимодействия этих компонентов (обусловленными характером образованной ими структуры) между собой. Дополнительные сложности при определении эффективных свойств связаны с необходимостью учета возможности протекания в компонентах материала в условиях внешнего нагружения таких процессов, как пластическое деформирование, полиморфные твердофазные превращения мартенситного типа, накопление микрповреждений и т.п. Наличие стохастической структуры армирования материала и ее особая роль в формировании его эффективных свойств обуславливают актуальность и практическую значимость развития методов решения задач механики композиционных материалов.

Таким образом, задача оценки и прогнозирования физико-механических свойств стохастических композиционных материалов имеет важное прикладное значение; актуальной является разработка физико-математических моделей таких материалов, позволяющих получать адекватные оценки их механического поведения и пригодных для использования при проектировании новых композитов и изделий из них.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является разработка метода прогнозирования механического поведения стохастических композиционных материалов с учетом возможности реализации в компонентах материала различных физических механизмов деформирования (пластическое течение, фазовое превращение мартенситного типа) и связанных с ними процессов на основе физико-математической модели структурно-неоднородной среды, построенной с использованием представлений о многоуровневом характере формирования физико-механических свойств материалов.

**Для достижения поставленной цели в работе решаются сле-**

**дующие конкретные задачи:**

1. Построение иерархической трехуровневой физико-математической модели структурно-неоднородного материала.

2. Разработка методики численного моделирования механического поведения стохастического структурно-неоднородного материала с учетом возможности реализации в его компонентах различных физических механизмов деформирования.

3. Разработка критерия оценки размеров представительного объема для стохастического структурно-неоднородного материала;

4. Исследование с применением разработанной методики эффективных упругих свойств композита TiNi-TiC, а также биокompозитов «Ti — костная ткань», «TiNi — костная ткань».

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- предложен метод оценки и прогнозирования эффективных механических свойств структурно-неоднородного материала со стохастической структурой на основе представлений о многоуровневом характере формирования механических свойств.

- разработана численная методика имитационного моделирования механического поведения стохастических композитов при объемном содержании армирующих элементов от 10% до 70%, учитывающая возможность реализации в компонентах полиморфных фазовых превращений мартенситного типа;

- предложен критерий для оценки представительности объема стохастического структурно-неоднородного материала в рамках разработанной методики, учитывающий связь характерных размеров исследуемого объема с масштабом корреляции локальных механических параметров;

- показано, что в объем стохастического структурно-неоднородного материала может рассматриваться в качестве представительного, если его размеры не менее, чем в 2,5–3 раза превышают характерные размеры элементов армирования;

- показано, что локальная морфология объемов композитов со структурно-неустойчивой матрицей оказывает существенное влияние на долю объема матрицы, испытывающей мартенситное превращение при деформации;

- получены оценки эффективных значений упругих модулей биокompозитов «Ti — костная ткань», «TiNi — костная ткань» в диапазоне содержания костной ткани 10%–50%; показано, что эффективные упругие свойства биокompозитов на основе никелида титана в меньшей степени зависят от параметров структуры по сравнению с мате-

риалами на основе титана; показано также, что для рассмотренных биокомпозитов зависимость дисперсии локальных значений модуля упругости от объемного содержания компонентов является немонотонной, при этом максимальное значение дисперсии наблюдается при объемном содержании костной ткани  $\approx 30\%$ .

**Научная и практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:**

- разработана физико-механическая модель стохастического композиционного материала, которая применима для получения оценок модулей упругости композитов (в том числе, биокомпозитов на основе титана и никелида титана) с различными геометрическими параметрами случайной структуры армирующих элементов, необходимых при проектировании новых композиционных материалов и развитии технологий их получения.

- разработанные прикладные программы, реализующие предложенную методику имитационного моделирования механического поведения представительных объемов композитов, для оценки механических характеристик волокнистых композиционных материалов при нагружениях в направлениях, поперечных направлению армирования.

- результаты диссертационной работы, методики и программы используются при подготовке специалистов на физико-техническом факультете в Томском государственном университете по направлениям 55.31.00 «Техническая физика», 55.33.00 «Прикладная механика» и по специальностям 12.10.00 «Конструирование и производство изделий из композиционных материалов», 07.11.00 «Динамика и прочность машин»;

- результаты диссертационной работы и прикладные программы внедрены в ряде научных и производственных организаций: ИФПМ СО РАН (г. Томск), ГНПП «Технология» (г. Комсомольск-на-Амуре), ШГОСНИИХП (г. Шостка, Украина).

**На защиту выносятся следующие положения и результаты:**

- многоуровневая модель стохастического структурно-неоднородного материала;

- численная методика оценки размеров локально-представительного объема стохастического структурно-неоднородного материала;

- результаты моделирования механического поведения композитов (в т. ч., на основе структурно-неустойчивой матрицы), свидетельствующие о реализации существенно разных механизмов деформирования в локальных объемах материала для разных локальных конфигураций структурных элементов;

- результаты исследований влияния объемного соотношения компонентов и характера структуры композитов на их эффективные механические свойства.

**Обоснованность и достоверность** результатов диссертационной работы подтверждается корректностью математических постановок задач; сходимостью численных решений; согласием полученных результатов с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов.

**Апробация работы.** Материалы конференции представлялись на 14 межрегиональных, всероссийских и международных конференциях: I-st International Seminar-Exhibition «Computer-Aided Design of Advanced Materials and Technologies (CADAMT'92)» (Tomsk, 1992); межрегиональная научно-техническая конференция (Пермь, 1993); международное совещание-семинар «Сопряженные задачи физической механики и экология» (Томск, 1994); международная научная конференция «Использование результатов конверсии научных исследований в вузах Сибири для международного сотрудничества» (СИБКОН-ВЕРС'95) (Томск, 1995); международная конференция «Material Instability under Mechanical Loading» (Ст.-Петербург, 1996); международная конференция «Компьютерное конструирование передовых материалов и технологий» CADAMT'97 (Байкальск, 1997); конференция молодых ученых «Физическая мезомеханика материалов» (Томск, 1998); всероссийская научная конференция «Байкальские чтения по математическому моделированию процессов в синергетических системах» (Улан-Удэ, 1999); II всероссийская конференция молодых ученых «Физическая мезомеханика материалов» (Томск, 1999); VI всероссийская научно-техническая конференция «Механика летательных аппаратов и современные материалы» (Томск, 1999); VII всероссийская научно-техническая конференция «Механика летательных аппаратов и современные материалы» (Томск, 2000); II всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2000); II всероссийская научная конференция «Байкальские чтения по математическому моделированию процессов в синергетических системах» (Улан-Удэ, 2002); III Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2002).

**Основные результаты диссертационной работы опубликованы** в 14 печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы:** диссертация состоит из введения,

четырёх глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения. Работа содержит 142 страницы, 35 рисунков. Список цитируемой литературы включает 156 наименований в алфавитном порядке.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели работы, определяются конкретные задачи исследования. Приводятся сведения о положениях, составляющих научную новизну диссертационной работы, о ее научной и практической значимости, формулируются положения, выносимые на защиту. Также во введении приводятся обоснования достоверности результатов диссертационного исследования и сведения об апробации работы. Завершают введение сведения о структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** представлен обзор основных направлений развития механики композитов включая современное состояние исследований в этой области. Отмечается, что развитие механики композитов в основном проходит по двум направлениям: во-первых, разработка физико-математических моделей процессов, сопровождающих деформирование твердого тела (в частности, механизмы упругого и пластического деформирования, процессы полиморфных твердофазных превращений мартенситного типа и др.); во-вторых, развитие представлений о композите как о сложной механической системе, обладающей структурой, образованной элементами армирования, которая оказывает существенное влияние на механические свойства материала.

К числу работ первого типа можно отнести ставшие классическими модели упругого деформирования (Гук) и пластического течения (Рейсс, Мизес); многочисленные более поздние теории пластичности, появление которых было вызвано стремлением отразить эффекты, наблюдающиеся при неупругом деформировании тел при различных путях нагружения (можно отметить работы И. А. Биргера, А. А. Ильюшина, А. Ю. Ишлинского, Ю. И. Кадашевича, Л. М. Качанова, В. В. Москвитина, В. В. Новожилова, Ю. Н. Работнова и др.); активно разрабатывавшиеся в последнее время модели полиморфных твердофазных превращений мартенситного типа, интерес к которым был вызван особенностями поведения под нагрузкой материалов типа AuCd, TiNi, ZrO<sub>2</sub> и им подобным (работы В. Г. Курдюмова, В. И. Левитаса, В. А. Лихачева, В. Н. Хачина и др.).

В последние годы активно развиваются представления о многоуровневом характере формирования механических свойств конструкционных материалов. Работы в этом направлении связаны с именами

В. В. Богачева, В. В. Болотина, В. А. Лихачева, В. Г. Малинина, В. Е. Панина, С. Г. Псахье. Рассматриваются различные варианты выделения уровней развития процессов, сопровождающих деформацию; способы согласования решений, полученных для разных уровней; пути построения прикладных (инженерных) методик прогнозирования механических свойств композитов и методов проектирования материалов с заданными свойствами на основе такого подхода. В работах С. Н. Кулькова, Б. А. Люкшина, П. В. Макарова, В. И. Масловского, В. А. Скрипняка, О. И. Черепанова, выполняемых в рамках этого направления, исследуются вопросы создания перспективных порошковых композитов, компоненты которых, в частности, могут характеризоваться структурной неустойчивостью.

Развитие второго направления в механике композитов характеризуется все большим вниманием исследователей к роли структуры в формировании механических свойств композитных материалов. Различные варианты «сглаживания» деталей структуры композитов можно найти в работах Н. А. Алфутова, С. А. Амбарцумяна, Г. А. Ванина, В. В. Васильева, Р. Кристенсена и др. Понимание необходимости явного учета деталей структуры, сформулированное в работах Б. Е. Победри, Ю. Н. Работнова, Дж. Си, Ю. М. Тарнопольского и др., привело к появлению физико-математических моделей композитов, в которых основное внимание уделяется именно анализу влияния структуры композитов на их механические свойства.

Актуальной проблемой при этом является необходимость учета стохастического характера структуры армирования реальных композитов. Одним из подходов к решению данной проблемы является развитие методов стохастической механики композитов, основные положения которой развиты в работах, В. А. Ломакина, Л. П. Хорошуна, Т. Д. Шермегора и др. Развитие подходов стохастической механики композитов, связанное с введением в рассмотрение принципа локальности формирования механических свойств материалов, нашло свое выражение в работах Ю. В. Соколкина, А. А. Ташкинова, А. А. Чекалкина и др.

Современный подход к решению проблем механики композитов характеризуется широким использованием вычислительной техники. Одной из наиболее актуальных задач при этом становится корректный выбор в рамках численного эксперимента объекта исследования — объема композиционного материала, обладающего свойством представительности. Проведенный анализ современного состояния исследований показал, что данный вопрос может считаться решенным только



для случая, когда справедливо допущение о регулярности структуры армирования композита, например, для слабонаполненных материалов.

Выполненный анализ современного уровня развития механики композиционных материалов подтверждает, что вопросы оценки и прогнозирования эффективных физико-механических свойств композитов представляют собой одну из актуальных задач современного материаловедения. Проблемы, возникающие при проектировании и использовании таких материалов, обуславливают необходимость разработки физико-математических моделей, позволяющих получать адекватные оценки их механического поведения и свойств, а также пригодных для создания новых технологий проектирования и получения таких материалов и изделий из них.

**Во второй главе** с использованием многоуровневого подхода разработана физико-математическая модель структурно-неоднородного материала. Показана возможность выделения на разных уровнях рассмотрения сравнительно простых закономерностей механического поведения объемов материала, которые для данного масштабного уровня играют определяющую роль в формировании его механических свойств. Для композитов предлагается рассматривать три таких уровня (рис. 1): уровень элементарных объемов структурных компонентов среды (микроуровень,  $V_1$ ), на котором материал в пределах элементарного объема рассматривается как однородная изотропная среда; уровень фрагментов структуры армирования материала (мезоуровень,  $V_2$ ), где элементарный объем представляет собой среду с кусочно-однородными характеристиками; уровень эффективных свойств (макроуровень,  $V_3$ ), на котором характеристики среды характеризуют весь материал в целом.

На множестве объемов мезоуровня материал полагается квазиоднородным; его механические характеристики зависят от выбора точки, в которой они определяются, и при этом являются случайными, что обусловлено стохастической природой армирования материала, под влиянием которой формируются локальные значения характеристик. Для оценки эффективных механических характеристик такого материала необходимо знать параметры законов распределения их локальных значений по объему композита. Задача определения эффективных значений механических характеристик гетерогенной среды сводится, таким образом, к задаче нахождения параметров распределений их локальных значений, определенных для представительной выборки случайных точек. Оценки параметров распределения определяются из

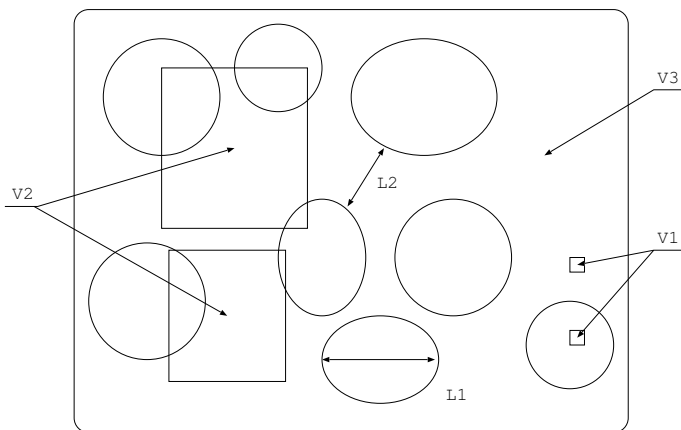


Рис. 1. Структурные уровни композиционного материала ( $L_1, L_2$  — характерные размеры структурных элементов)

условий экстремума функции правдоподобия.

Локальные значения механических характеристик определяются по механической реакции мезообъемов композита на статическое нагружение. Мезообъем представляет собой совокупность элементарных объемов (микрообъемов), принадлежащих компонентам материала. На внутренних границах мезообъема (границах раздела компонентов) задаются условия склейки. Граничные условия на внешних границах мезообъема определяются видом нагружения и задаются либо в виде граничных перемещений, либо в виде интенсивности поверхностных усилий, либо в смешанном виде.

Решение нелинейной задачи расчета деформации мезообъема композита ищется методом пошагового нагружения. Механическое поведение элементарных объемов (микрообъемов) на каждом шаге по нагрузке описывается системой уравнений, которая включает в себя уравнения равновесия, геометрические уравнения (уравнения Коши) и уравнения состояния. В качестве уравнений состояния микрообъемов используются уравнения либо линейной теории упругости, либо теории пластического деформирования, либо модели полиморфных твердофазных превращений мартенситного типа.

**В третьей главе** изложена методика определения механических свойств композиционного материала со стохастической структурой. Для определения механических характеристик применяются методы как механики композиционных материалов, так статистической ме-

ханики. При этом в рамках механики композитов решается задача о моделировании механического поведения фрагмента структурно-неоднородной среды при статическом растяжении, а методы статистической механики применяются при определении параметров распределений локальных характеристик среды и ее эффективных свойств. Поведение среды на микроуровне описывается феноменологическими законами, которые для компонентов гетерогенной среды полагаются известными. Методика позволяет использовать на этом уровне различные физико-математические модели механизмов деформирования фаз среды.

Рассмотрены однонаправленно армированные композиты, для которых наиболее опасным является нагружение в направлении перпендикулярном направлению армирования. Задача о деформировании таких композитов решена в двумерной постановке. В качестве исходных параметров для определения эффективных механических характеристик используются физико-механические характеристики компонентов материала и характеристики образованной ими структуры: соотношение объемов компонентов, характерная геометрическая форма включений, их размеры и характеристики ориентации и взаиморасположения включений в пространстве.

В основе предлагаемого подхода лежит использование имитационной геометрической модели конечного объема стохастически армированного композита. Двумерная имитационная геометрическая модель представляет собой совокупность сведений о плоском сечении материала. Включения имитируются объектами простой формы (круг, эллипс и т.п.), распределения включений по размерам и ориентации в пространстве задаются в виде функций координат. На этапе формирования геометрической модели при размещении включений используются генераторы случайных чисел, что обеспечивает ее стохастический характер. При исследованиях деформации материала построенная модель используется как источник полных и надежных данных о геометрических параметрах структуры. Принципиальное преимущество имитационного моделирования по сравнению с другими подходами заключается в возможности генерации структур с требуемым набором геометрических характеристик.

Для обеспечения высокого качества имитационной модели стохастической структуры композита используются методы генерации псевдослучайных чисел, удовлетворяющие известным статистическим критериям. В работе использованы генераторы, позволяющие получать выборки псевдослучайных чисел как равномерно распределен-

ных, так и имеющих заданное распределение. Результаты генерации геометрических имитационных моделей композиционных материалов со стохастическими структурами с заданным объемным соотношением фаз показали надежность используемой методики и ее программной реализации.

В рамках предложенной многоуровневой модели моделировалось механическое поведение объема композиционного материала при статическом растяжении. Построенные имитационные модели использовались для исследования свойств материала на мезоуровне. Рассматриваемый объем композита представлял собой случайным образом выбираемый фрагмент модельной структуры. Для задания условий нагружения на границе фрагмента, являющейся внутренней границей модельного материала, фрагмент погружался в однородную среду, механические характеристики которой задавались равными их эффективным значениям для фрагмента. Условия на внешней границе однородной («эффективной») среды соответствовали выбранным условиям нагружения материала. Поскольку механические характеристики однородной среды заранее не известны, они уточнялись итерационно в ходе расчета.

Моделирование деформации выделенного фрагмента модельной структуры выполнялось с использованием метода конечных элементов. Используемый алгоритм позволяет решать как физически линейные (упругие) задачи, так и физически нелинейные. При решении физически нелинейных задач использовался метод пошагового нагружения с итерационным уточнением решением на каждом шаге нагружения путем минимизации невязок уравнений равновесия. Система линейных алгебраических уравнений, к которой сводится поставленная задача, решалась методом Гаусса с итерационным уточнением. Полученные в результате решения поля параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние выделенного фрагмента структуры, позволяют вычислить его эффективные механические характеристики.

После достижения в итерационной процедуре заданного уровня точности, эффективные механические характеристики фрагмента модельной структуры, приписываются соответствующей материальной точке эквивалентного квазиоднородного материала (рис. 2).

В работе показано, что при оценке локальных значений эффективных механических характеристик удобным является использование упрощенных (частично регулярных) конечно-элементных сеток. Показано, что погрешность, связанная с регулярным разбиением рас-

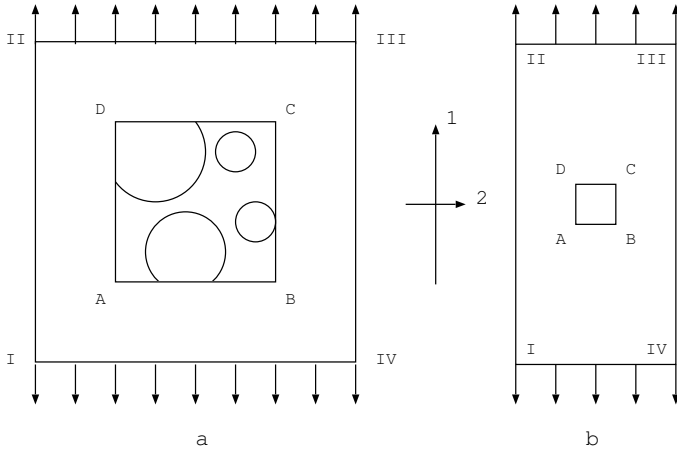


Рис. 2. Схема вычислительного эксперимента: а — фрагмент структурно-неоднородного материала, погруженный в среду с эффективными свойствами, б — эквивалентный квазиоднородный материал

четной области с криволинейными границами раздела компонентов, оказывается несущественной при вычислении эффективных механических характеристик фрагмента модельного материала. Разработан алгоритм автоматизированной подготовки исходных данных для расчетов с использованием таких сеток. Изложенная процедура вычисления механических характеристик композита в сочетании с автоматизированным способом генерации исходных данных позволяет эффективно решать проблему получения представительных выборок локальных значений механических свойств композиционных материалов со стохастической структурой.

В работе показано, что при определении минимальных размеров представительного объема композита со стохастической структурой наиболее эффективным является исследование зависимости степени корреляционной связи локальных значений механических характеристик от размеров моделируемого объема. Для оценки размеров представительного объема, необходимого для определения локальных значений механических характеристик (локально-представительного объема) введена корреляционная функция, стремящаяся к 1 при увеличении размеров исследуемого объема композита. Показано, что анализ поведения данной функции позволяет определять величину масштаба корреляции локальных значений механических характеристик

материала. Результаты выполненного анализа показали, что в качестве локально-представительного объема стохастического композиционного материала может быть выбран фрагмент, характерные размеры которого определяются масштабом корреляции локальных значений механических характеристик.

**В четвертой главе** диссертации приводятся результаты исследований механического поведения ряда композиционных материалов: TiC-TiNi, «Ti—костная ткань», «TiNi—костная ткань».

Исследовано влияние параметров структуры композита носительный объем матрицы, испытывавшей превращение мартенситного типа. Показано, что морфология локальных объемов композита со структурно-неустойчивой матрицей оказывает существенное влияние на долю объема матрицы, испытывающей мартенситное превращение при деформации. Показано хорошее согласие полученных результатов с известными экспериментальными данными.

С использованием предложенной методики выполнена оценка размеров представительных объемов композитов TiC-TiNi с регулярной и стохастической структурой армирования для объемных содержаний армирующих элементов от 10% до 70%. Показано, что для материалов с регулярной структурой подтверждается известное требование выбора размеров представительного объема материала кратными размерам ячейки периодичности структуры  $L_t$  (рис. 3). Для материалов со стохастическим армированием размеры представительного объема определяются характерными размерами армирующих элементов. Показано, что объем стохастического композита при оценке локальных значений механических характеристик может считаться представительным, если его размеры в 2,5–3 раза превышают характерные размеры армирующих элементов  $d$  (рис. 4).

Определены эффективные упругие свойства биокompозитов типа «Ti — костная ткань», «TiNi — костная ткань», получаемых в результате прорастания в пористых металлических имплантатах живой костной ткани. Получены корреляционные функции локальных значений модулей упругости биокompозитов на основе Ti и TiNi для объемных содержаний костной ткани от 10% до 70% и определены размеры представительных объемов этих материалов. Получены зависимости эффективных значений модулей упругости от объемного содержания костной ткани, из которых видно, что наименьшей зависимостью от объемного соотношения компонентов обладает материал на основе никелида титана (TiNi). Показано, что при содержании костной ткани 30% для рассмотренных материалов имеет место максимум дисперсии

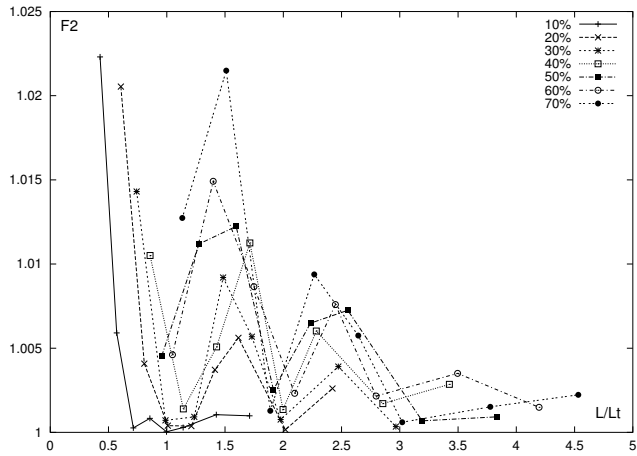


Рис. 3. Корреляционные функции композитов с периодической структурой для объемных содержаний включений 10%–70%

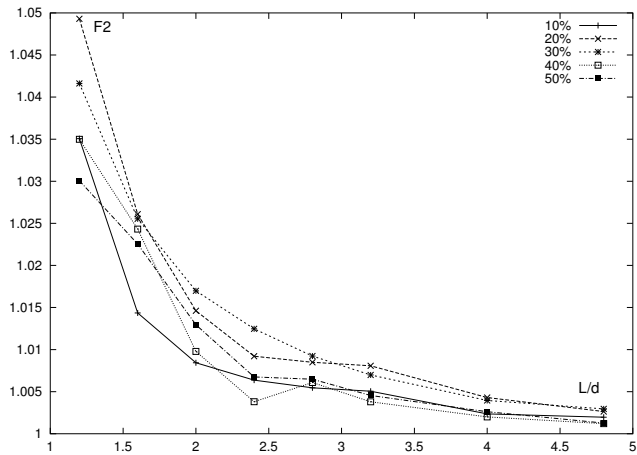


Рис. 4. Корреляционные функции композитов TiC-TiNi со стохастической структурой для объемных содержаний включений 10%–50%

локальных значений модуля упругости. Полученные данные хорошо согласуются с результатами анализа влияния объемного соотношения компонентов на условия накопления микроповреждений в биокompозите на основе титана. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что для материала с 30%-содержанием включений плотность распределения локальных повреждений имеет характер, наиболее близкий к нормальному распределению по сравнению с другими рассмотренными материалами. Данное обстоятельство позволяет считать, что локализованные участки накопления микроповреждений возникают во всем объеме материала практически независимо друг от друга, что позволяет говорить о реализации условий близких к условиям равнопрочности для материала с содержанием включений 30%.

### **Основные результаты и выводы**

1) с использованием представлений о многоуровневом характере формирования механических свойств материалов построена трехуровневая физико-математическая модель композита со стохастической структурой;

2) на основе предложенной модели разработана методика численного моделирования механического поведения стохастических композитов при объемном содержании армирующих элементов от 10% до 70%, учитывающая возможность реализации в компонентах полиморфных фазовых превращений мартенситного типа;

3) предложен критерий для оценки размеров представительного объема стохастического композиционного материала, основанный на анализе связи характерных размеров исследуемых объемов материала с масштабом корреляции локальных значений механических характеристик;

4) показано, что независимо от удельного содержания армирующих элементов, при оценке локальных значений механических характеристик объем стохастического композиционного материала может рассматриваться в качестве представительного, если его характерные размеры не менее, чем в 2,5–3 раза превышают характерные размеры элементов армирования;

5) показано, что в композитах со структурно-неустойчивой матрицей условия протекания твердофазного превращения мартенситного типа в матрице при деформации материала определяются локальной морфологией фрагментов структуры;

6) получены оценки эффективных значений упругих модулей био-



композитов «Ti — костная ткань», «TiNi — костная ткань» в диапазоне содержания костной ткани 10%–50%; показано, что эффективные упругие свойства биокомпозитов на основе никелида титана в меньшей степени зависят от параметров структуры по сравнению с материалами на основе титана; показано также, что для рассмотренных биокомпозитов зависимость дисперсии локальных значений модуля упругости от объемного содержания компонентов является немонотонной, при этом максимальное значение дисперсии наблюдается при объемном содержании костной ткани  $\approx 30\%$ .

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Лейцин В.Н., Масловский В.И., Сидоренко Ю.Н. Оптимизация структуры неоднородных материалов при квазистатическом нагружении. Том. ун-т. Томск, 1992. 8 с. Деп. в ВИНТИ 21.12.92, №3591–В92.

2. Лейцин В.Н., Масловский В.И., Сидоренко Ю.Н. Механическое поведение материалов, испытывающих мартенситные превращения // Математическое моделирование систем и явлений. Тезисы докладов Межрегиональной научно-технической конференции. Пермь, 1993. С. 60.

3. Скрипняк В.А., Лейцин В.Н., Масловский В.И., Каракулов В.В., Немирович-Данченко М.М., Передерин А.В., Сидоренко Ю.Н. Методика описания механического поведения композиционных материалов в условиях динамического нагружения. Том. ун-т, 1994. Деп. в ВИНТИ 01.03.94, №508–В94.

4. Платова Т.М., Масловский В.И., Коняев А.А., Кульков С.Н., Лейцин В.Н., Сидоренко Ю.Н., Скрипняк В.А. Разработка принципов создания перспективных материалов для экстремальных условий эксплуатации // Конверсия. Инф.-аналит. журн., 1996, №8. С. 22–25.

5. Лейцин В.Н., Сидоренко Ю.Н. Выбор объема волокнистого композиционного материала для оценки микромеханических свойств // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Докл. конф. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1998. С. 109–110.

6. Сидоренко Ю.Н., Шевченко Н.А. Прогнозирование механических свойств биометаллического материала на основе многоуровневой математической модели // Физическая мезомеханика, 1999, том 2, №1–2. С. 37–41.

7. Лейцин В.Н., Сидоренко Ю.Н. Оценка механических свойств многокомпонентных материалов стохастической структуры // Письма

в ЖТФ, 1999, том 25, вып. 12. С. 89–94.

8. Сидоренко Ю.Н., Вознюк Ю.П. Исследование напряженно-деформированного состояния пористого титана на мезоуровне // *Механика летательных аппаратов и современные материалы: Сб. избранных докладов VI Всероссийской научно-технической конференции*. Вып. 2. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. С. 145–147.

9. Сидоренко Ю.Н., Шевченко Н.А. Оценка влияния структуры на формирование механических свойств биокompозита «титан — костная ткань» // *Математическое моделирование процессов в синергетических системах: Сборник статей*. Улан-Удэ — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. С. 309–312.

10. Сидоренко Ю.Н., Вознюк Ю.П. Исследование зоны концентрации напряжений в биокompозите «титан — костная ткань» вблизи отдельного включения // *Механика летательных аппаратов и современные материалы: Сб. избранных докладов VII Всероссийской научно-технической конференции*. Вып. 3. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. С. 153–155.

11. Сидоренко Ю.Н., Вознюк Ю.П. Численный статистический подход к оценке эффективных свойств структурно-неоднородных материалов // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады конференции*. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. С. 89–90.

12. Сидоренко Ю.Н., Вознюк Ю.П. Исследование условий накопления микроповреждений в биокompозите на основе пористого титана // *Физическая мезомеханика*, том 4, №2, 2001. С. 35–39.

13. Сидоренко Ю.Н., Вознюк Ю.П. Использование корреляционных характеристик при оценке представительности объема структурно-неоднородной среды // *Моделирование процессов в синергетических системах: Сб. статей*. Улан-Удэ — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. С. 132–134.

14. Сидоренко Ю.Н., Вознюк Ю.П. Оценка представительности объема структурно-неоднородного материала на основе корреляционных характеристик локальных упругих свойств // *Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики: Доклады конференции*. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. С. 187–188.