

*На правах рукописи*

Мулиа Бин Минат

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ  
НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:** Доктор технических наук, профессор,  
**Лурье Сергей Альбертович.**

**Официальные оппоненты:** **Березин Александр Васильевич,**  
доктор физико-математических наук, профессор  
главный научный сотрудник Института проблем  
машиноведения РАН.

**Волков-Богородский Дмитрий Борисович,**  
кандидат физико-математических наук, старший  
научный сотрудник института прикладной  
механики РАН.

**Ведущая организация:** **ФГБУН Институт проблем механики им.  
А.Ю. Ишлинского Российской академии наук  
«ИПмех РАН».**

Защита состоится «12» ноября 2014 г. в «15<sup>30</sup>» часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 в ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте

[http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=50044](http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=50044).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Федотенков Г.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Композиционные материалы широко используются в авиационных и ракетных конструкциях, а также находят широкое применение в различных других областях техники, включая транспорт, медицину и др. Композитные конструкции с различными комбинациями компонентов в структуре имеют много преимуществ по сравнению с традиционными материалами на основе металлических сплавов. Известно, что механические свойства композитов контролируются условиями контакта между волокном и матрицей (характеристиками интерфейса) в композите. Влияние структуры на характер взаимодействия фаз в области контакта фаз оказывается особенно значительным. Разработаны различные методики повышения качества интерфейса, и наиболее распространенными являются: модификация поверхности волокна, улучшение химических взаимодействий, либо добавление третьей фазы (межфазного слоя) между волокном и матрицей. Идеи, лежащие в основе этих методов заключаются в улучшении межфазных адгезионных свойств и в увеличении площади поверхности волокна для более эффективной передачи нагрузок между волокнами и матрицей и дополнительного улучшения свойств композитов.

В настоящее время активно развиваются технологии получения современных волокнистых композитов, в которых для повышения сдвиговых свойств композита на круговой поверхности углеродных волокон выращены специальные микроструктуры, содержащие нановолокна (вискерсы) — нано-проволоки и углеродные нанотрубки («фуззи»-волокна). Проведенные исследования доказали, что для подобных систем существенно повышается прочность межфазной границы (интерфейса) на сдвиг, что особенно важно для многослойного материала, используемого в авиации. Для композиционных материалов с вискеризованными волокнами реализуется более высокая предельная прочность и жесткость на сдвиг по сравнению типовыми композитами, не имеющими дополнительной микроструктуры на поверхности волокон. Кроме того, присутствие этих же микроструктур повышает трансверсальную прочность и жесткость, а также

демпфирующие характеристики и электропроводность композитов. Важно отметить, что улучшение свойств композитов зависит от характеристик вискерсов, выращенных на поверхности волокна, и поэтому можно сказать, что вискеризованная волокнистая система представляет собой *функциональные волокна*. Композиционные материалы на их основе называются современными *мультифункциональными* композиционными материалами так как одновременно могут быть улучшены различные свойства композитов: прочность, жесткость, демпфирование, усталость, электро- и теплопроводность. В связи с этим прогнозирование свойств таких мультифункциональных волокнистых композитов представляет теоретический и практический интерес. Поэтому тема диссертации, посвященная моделированию деформирования волокнистых композитов с функциональными волокнами, имеющими слоистую структуру и дополнительный вискеризованный слой и разработке методов оценки эффективных свойств таких волокнистых композитов, несомненно, является актуальной.

**Цель работы.** Целью работы является обоснование и разработка модели функциональных волокнистых неоднородных композиционных материалов, основанной на аналитическом решении и способной достоверно прогнозировать механические и динамические свойства (упругие и диссипативные) композитов по свойствам и концентрациям фаз с учетом характеристик микро- или наноструктур (вискерсов), выращенных на поверхности базового волокна. Детальный анализ влияния всех параметров структуры (объемной доли волокон и вискерсов, длины, плотности, количества, диаметра и свойств вискерсов) на эффективные свойства композитов, выявление наиболее существенных из них, оказывающих наибольшее влияние на эффективные свойства вискеризованных волокнистых композитов также является целью работы.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Предложена новая модель вискеризованного межфазного слоя на поверхности волокон, как трансверсально-изотропного слоя с цилиндрической изотропией, учитывающая геометрические и механические характеристики микроструктуры.

2. Разработан метод определения эффективных свойств волокнистых композитов с вискеризованными (функциональными) волокнами, основанный на процедуре Эшелби трех фаз, позволяющий в рамках единого подхода найти аналитическое решение проблемы и являющийся наиболее точным и полным по сравнению с другими известными методами оценки эффективных свойств вискеризованных композитов (методом двух фаз и методом комплексных потенциалов).

3. Предложен метод и алгоритм расчета эффективных динамических свойств волокнистых композитов с вискеризованными (функциональными) волокнами, основанный на методе Эшелби и методе комплексных модулей.

4. Подробный анализ возможных типов вискеризованных композитов на основе полученных аналитических решений, прогноз рациональных структур, обеспечивающих получение композитов с наилучшим комплексом эффективных свойств также составляет научную новизну диссертации.

**Практическое значение работы.** Получение аналитического метода расчета и прогноза свойств новых типов композитных материалов, с вискеризованными (функциональными) многослойными волокнами, разработка эффективной методики аналитической оценки спектра осредненных свойств таких материалов с учетом геометрических и механических характеристик микроструктуры вискеризации представляет значительное прикладное значение, так как дает в руки исследователей- механиков и проектировщиков новых материалов научно обоснованный инструмент для адекватного выбора параметров микроструктуры, позволяющий проектировать широкий класс новых композитов с заданными свойствами, что особенно важно при проектировании авиационной техники. Практическая значимость полученных результатов велика.

**Реализация результатов работы.** Результаты, полученные в диссертации, используются в Институте Прикладной механики РАН, Вычислительном центре РАН, МАИ (Государственном техническом университете).

**Достоверность результатов** обосновывается использованием строгих подходов теории упругости, механики композитов и математических методов, а

также совпадением результатов, полученных автором с экспериментальными данными, приведенными в литературе и с результатами других авторов, в том числе с результатами прямого численного моделирования методом асимптотического осреднения.

**Апробация работы и публикации.** Основные результаты были представлены на конференциях: EUROMECH Colloquium 551, ‘Mechanics of Fiber-Reinforced Materials – Theory and Applications’, University of Nottingham, United Kingdom, 2-5 Sept 2013; 2-я Всероссийская научная конференция «Механика наноструктурированных материалов и систем», Москва, 17-19 декабря 2013. Также, результаты обсуждались на заседании кафедры 603 «Строительная механика и прочность», на научной семинаре им. А.Г. Горшкова «Проблем механики деформируемого твердого тела и динамики машин» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) «МАИ», и на научном семинаре по механике сплошной среды (МСС) им. Л.А. Галина, Институте проблем механики (ИПМех) РАН, Москва 6 июня 2014.

Основные результаты диссертационной работе опубликованы в пяти научных печатных работах, в том числе в четырех статьях, три из них в рецензируемых международных журналах с большими импакт-факторами — «Applied Composite Materials», «Composites B», и «Journal of Engineering Mathematics», одна в издании из списка, рекомендуемого ВАК — «Механика композиционных материалов и конструкций», и остальная — в прочим научном издании.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключение, приложения и списка литературы. Она содержит 180 страниц, из них 10 занимает список использованных источников. Список используемой литературы включает 126 наименований (из них 106 на иностранном языке).

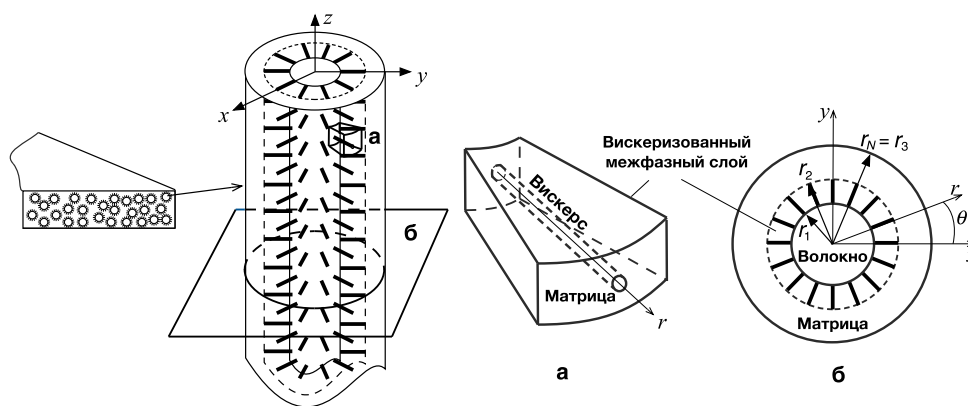
## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность научных исследований, изложенных в диссертации, а также сформулированы цель и задачи, определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.

**В первой главе** приведен аналитический обзор литературы, посвященной экспериментальным исследованиям характеристик вискеризованных волокон и композитов на их основе, методам моделирования механических свойств композитов и вискеризованных волокнистых композитов. Приводятся также основы микромеханики композитов, развитые в рамках классической теории упругости для определения эффективных свойств композиционных материалов. Отмечено, что свойства таких материалов моделировались уже в 70-х годах прошлого века с помощью метода модифицированной матрицы (И.Г. Жигун и В.А. Поляков, 1978 г.) и (Г.Д. Шермергор, 1977 г.). В настоящее время, развиваются новые подходы, в которых вискеризованный волокнистый композит считается ортотропным многофазным композитом, причем одна из фаз является дополнительным вискеризованным слоем, состоящим из вискерсов и матрицы. Такой подход можно найти в работах Гузя и др. (2009 г., 2011 г.), Кундавала и Рей (2011 г.), Чатзигеоргии и др. (2012 г.). По результатам анализа литературы установлено, что до настоящего времени не было предложено обоснованной и достаточно полной модели для одновременного учета различных характеристик вискерсов, например, длины, плотности, диаметра, и свойств вискерсов, которые влияют на свойства таких композитов. В то же время зафиксировано, что почти полностью отсутствуют исследования эффективных диссипативных свойств таких композитов. В данной работе сделана попытка восполнить указанные пробелы в области научных исследований новых композитов с функциональными волокнами. Для решения этой задачи был предложен единый подход к описанию эффективных свойств, основанный на методе Эшелби (метод трех фаз) и методе вязко-упругой аналогии (метод комплексных модулей), позволяющий построить аналитические

решения задачи усреднения с учетом концентраций фаз и геометрических и материальных характеристик этих наноструктур в композите.

**Во второй главе** предложена прикладная модель вискеризованного межфазного слоя (Рис. 1) как трансверсально изотропного образования с цилиндрической изотропией, рассматривается представительный объем для волокнистого материала, формулируется модель однонаправленного вискеризованного волокнистого композита с плоскостью изотропии, перпендикулярной волокнам, у которого есть 3 слоя ( $N=3$ ). Рассматриваемый волокнистый композит со слоистыми включениями в целом является трансверсально-изотропным и характеризуется пятью модулями упругости. Считается, что волокна направлены вдоль оси  $z$ , межфазные слои в композите не пересекаются друг с другом, а вискерсы выращены перпендикулярно на поверхностях волокон. При моделировании вискеризованных слоев принимается, что они являются трансверсально-изотропными с поверхностью изотропии поперек вискерсов, т.е. вискеризованная структура является цилиндрически ортотропной с постоянными свойствами по длине вискерсов.



**Рис. 1.** Ячейки однонаправленного вискеризованного волокнистого композита и вискеризованного межфазного слоя.

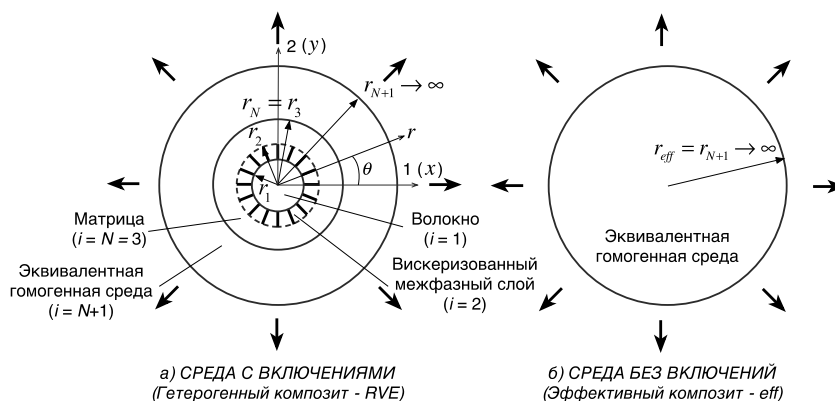
В качестве единого метода оценки эффективных свойств в работе предлагается использовать метод самосогласованных фаз Эшелби. Этот метод, метод Эшелби (1956 г.) основан на идее полидисперсной модели с изолированными включениями, окруженными бесконечной эквивалентной средой с однородным полем деформации, которое реализуется на большом расстоянии от включений. Кристенсен (1979 г.) предложил использовать критерий осреднения,



полагая что энергия для такой среды равна энергии эффективной среды без включений (см. Рис. 2). Это условие гомогенности будучи формализовано сводится к тому, что дополнительная энергия, связанная с наличием включений в эффективной среде, равна нулю. Соответствующее энергетическое соотношение записано в форме интеграла по поверхности слоистого включения:

$$\int_S (\sigma_{pq}^{N+1} u_p^{eff} + \sigma_{pq}^{eff} u_p^{N+1}) n_q dS = 0, \quad (1)$$

где  $S$  — поверхность раздела между матрицы ( $N$ -слой) и эквивалентной средой ( $N+1$ -слой);  $\sigma_{pq}^{N+1}$ ,  $u_p^{N+1}$  — напряжения и перемещения на поверхности контакта среды с включениями; и  $\sigma_{pq}^{eff}$ ,  $u_p^{eff}$  — напряжения и перемещения на поверхности контакта среды без включений.



**Рис. 2.** Схема ячейки в методе Эшелби.

Несмотря на то, что этот метод оперирует с изолированными включениями, оказывается, что он дает хорошие результаты вплоть до предельных значений концентраций включений и является одним из наиболее точных методов для оценок эффективных свойств. Ранее этот подход применялся лишь для оценки эффективных свойств поперечного сдвига вискеризованных волокнистых композитов. В данной работе показано, что метод Эшелби трех фаз может являться единой основой для определения всего спектра модулей упругости и обеспечивает при этом аналитическую форму представления решения. Отметим, что ограничение в использовании этого метода были связаны с тем, что считалось

невозможным получение именно аналитического решения проблемы в рамках процедуры метода трех фаз.

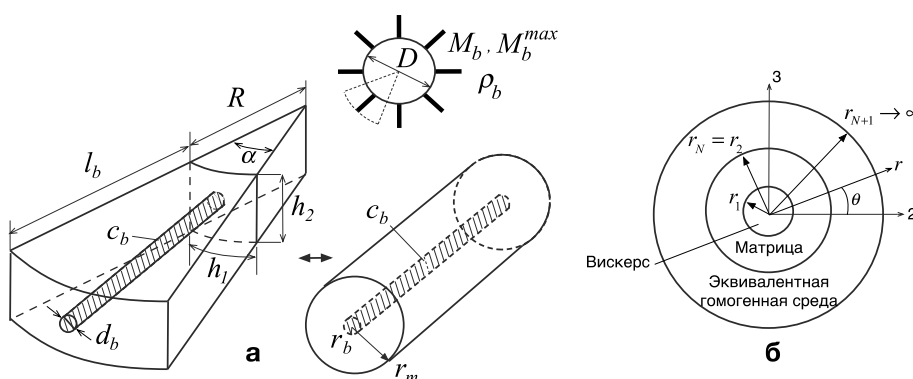
Сначала в работе метод Эшелби трех фаз используются для нахождения свойств вискеризованного межфазного слоя. В связи с этим построена приближенная геометрическая модель (рис. 3), позволяющая определить объемную долю вискерсов в слое и учитывать различные характеристики вискерсов. Показано, что объемное содержание вискерсов  $c_b$  в слое может быть найдено по следующей формуле:

$$c_b = \frac{M_b^2 d_b^2}{4\pi(l_b + D)D}, \quad (2)$$

где  $M_b$  — число вискерсов на поверхности волокна;  $d_b$  — диаметр вискерсов; — длина вискерсов; и  $D$  — диаметр волокна. В расчете принимается, что плотность вискерсов  $\rho_b$  может быть оценена как отношение числа вискерсов, выраженных на волокне к максимальному допустимому числу вискерсов, уместяющихся на поверхности волокон (по длине окружности волокна):

$$\rho_b = \left( M_b / M_b^{\max} \right) 100\%, \quad (3)$$

где  $M_b^{\max}$  — максимально допустимое число вискерсов. Уравнение (2) и (3) учитываются для расчета объемной доли вискерсов в вискеризованном слое.



**Рис. 3.** Приближенная геометрическая модель вискеризованного межфазного слоя.

В главе 2 записываются определяющие соотношения (закон Гука) для ортотропного слоя:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{rr}^{(i)} \\ \sigma_{\theta\theta}^{(i)} \\ \sigma_{zz}^{(i)} \\ \sigma_{\theta z}^{(i)} \\ \sigma_{rz}^{(i)} \\ \sigma_{r\theta}^{(i)} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^{(i)} & C_{12}^{(i)} & C_{13}^{(i)} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12}^{(i)} & C_{22}^{(i)} & C_{23}^{(i)} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13}^{(i)} & C_{23}^{(i)} & C_{33}^{(i)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44}^{(i)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55}^{(i)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66}^{(i)} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{rr}^{(i)} \\ \varepsilon_{\theta\theta}^{(i)} \\ \varepsilon_{zz}^{(i)} \\ 2\varepsilon_{\theta z}^{(i)} \\ 2\varepsilon_{rz}^{(i)} \\ 2\varepsilon_{r\theta}^{(i)} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Здесь для различных компонент промежуточных структур следует принимать следующие коэффициенты в матрице жесткости: а) для фрагмента волокнистого композита со слоистыми волокнами рассматривается трансверсально-изотропный материал с плоскостью изотропии поперек волокон:  $C_{11}^{(1)} = C_{22}^{(1)}, C_{33}^{(1)}, C_{12}^{(1)}, C_{13}^{(1)} = C_{23}^{(1)}, C_{44}^{(1)} = C_{55}^{(1)}, C_{66}^{(1)} = \frac{1}{2}(C_{11}^{(1)} - C_{12}^{(1)})$ ; б) для вискеризованного межфазного слоя имеем трансверсально-изотропный материал с плоскостью изотропии поперек вискерсов:  $C_{11}^{(2)}, C_{22}^{(2)} = C_{33}^{(2)}, C_{12}^{(2)} = C_{13}^{(2)}, C_{23}^{(2)}, C_{44}^{(2)} = \frac{1}{2}(C_{22}^{(2)} - C_{23}^{(2)}), C_{66}^{(2)} = C_{55}^{(2)}$ ; в) для матрицы – изотропный материал:

$$C_{11}^{(3)} = C_{22}^{(3)} = C_{33}^{(3)}, C_{12}^{(3)} = C_{13}^{(3)} = C_{23}^{(3)}, C_{44}^{(3)} = C_{55}^{(3)} = C_{66}^{(3)} = \frac{1}{2}(C_{11}^{(3)} - C_{12}^{(3)}).$$

В предлагаемом методе Эшелби рассматриваются последовательно 4 постановки задач в цилиндрических координатах при определении свойств композитов. Эффективный объемный модуль плоской деформации и модуль поперечного сдвига определяются соответственно из решения задачи всестороннего растяжения-сжатия поперек волокон и задачи сдвига в трансверсальной плоскости. Продольный модуль сдвига получается из решения задачи чистого сдвига вдоль волокон. Модуль Юнга продольного сдвига и коэффициент Пуассона в направлении волокон определяются из решения задачи об одноосном растяжении. Для каждой задачи могут быть приведены основные соотношения классической теории упругости, которые используются в дальнейшем:

- соотношения Коши в цилиндрических координат:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial u_r}{\partial r}, \quad \varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{r} \left( \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + u_r \right), \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z},$$

$$\varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right), \quad \varepsilon_{\theta z} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \right), \quad \varepsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} \right), \quad (5)$$

где  $u_r$ ,  $u_\theta$ ,  $u_z$  — компоненты вектора перемещений;  $\varepsilon_{rr}$ ,  $\varepsilon_{\theta\theta}$ ,  $\varepsilon_{zz}$ ,  $\varepsilon_{\theta z}$ ,  $\varepsilon_{rz}$ ,  $\varepsilon_{r\theta}$  — компоненты тензора деформаций;

- уравнения равновесия:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}^{(i)}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{r\theta}^{(i)}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_{rr}^{(i)} - \sigma_{\theta\theta}^{(i)}}{r} + \frac{\partial \sigma_{rz}^{(i)}}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{r\theta}^{(i)}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}^{(i)}}{\partial \theta} + \frac{2\sigma_{r\theta}^{(i)}}{r} + \frac{\partial \sigma_{\theta z}^{(i)}}{\partial z} &= 0, \quad \frac{\partial \sigma_{rz}^{(i)}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta z}^{(i)}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_{rz}^{(i)}}{r} + \frac{\partial \sigma_{zz}^{(i)}}{\partial z} = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\sigma_{rr}$ ,  $\sigma_{\theta\theta}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\sigma_{\theta z}$ ,  $\sigma_{rz}$ ,  $\sigma_{r\theta}$  — компоненты тензора напряжений. Закон Гука дан уже в соотношении (4).

С помощью соотношений (4)–(6) определяются допустимые поля перемещений, возникающие в каждой задаче для цилиндрических *ортотропных* фаз в композите:

- В задаче чистого сдвига вдоль волокон, поля перемещений фаз имеют вид

$$u_z^{(i)}(r, \theta) = \left( D_1^{(i)} r^{\lambda_{(i)}} + D_2^{(i)} r^{-\lambda_{(i)}} \right) \cos \theta, \quad \text{где } \lambda_{(i)} = \sqrt{C_{44}^{(i)} / C_{55}^{(i)}}, \quad (7)$$

- В задаче всестороннего растяжения поперек волокон:

$$u_r^{(i)}(r) = D_1^{(i)} r^{\lambda_{(i)}} + D_2^{(i)} r^{-\lambda_{(i)}}, \quad \text{где } \lambda_{(i)} = \sqrt{C_{22}^{(i)} / C_{11}^{(i)}}, \quad (8)$$

- В задаче одноосного растяжения вдоль волокон:

$$u_r^{(i)}(r) = D_1^{(i)} r^{\lambda_{(i)}} + D_2^{(i)} r^{-\lambda_{(i)}} + \nu^{(i)} \varepsilon_0 r, \quad u_z^{(i)}(z) = \varepsilon_0 z, \quad (9)$$

где  $\lambda_{(i)} = \sqrt{C_{22}^{(i)} / C_{11}^{(i)}}$  и  $\nu^{(i)} = (C_{13}^{(i)} - C_{23}^{(i)}) / (C_{22}^{(i)} - C_{11}^{(i)})$ ,

- В задаче плоского трансверсального сдвига:

$$u_r^{(i)}(r, \theta) = \left( \sum_{j=1}^4 \phi_j^{(i)} D_j^{(i)} r^{\lambda_j^{(i)}} \right) \sin 2\theta, \quad u_\theta^{(i)}(r, \theta) = \left( \sum_{j=1}^4 D_j^{(i)} r^{\lambda_j^{(i)}} \right) \cos 2\theta, \quad (10)$$

где  $\phi_j^{(i)} = 2 \frac{C_{22}^{(i)} + C_{66}^{(i)} - \lambda_j^{(i)} (C_{12}^{(i)} + C_{66}^{(i)})}{C_{22}^{(i)} + 4C_{66}^{(i)} - (\lambda_j^{(i)})^2 C_{11}^{(i)}}$ , и  $\lambda_{(i)}$  — решения характеристического

уравнения:  $L(\lambda^{(i)})^4 - M(\lambda^{(i)})^2 + N = 0$ , где  $L = C_{11}^{(i)} C_{66}^{(i)}$ ,  $M = (C_{11}^{(i)} + C_{22}^{(i)} - 8C_{12}^{(i)}) C_{66}^{(i)} + 4(C_{11}^{(i)} C_{22}^{(i)} - (C_{12}^{(i)})^2)$ , и  $N = 9C_{22}^{(i)} C_{66}^{(i)}$ .  $D_j^{(i)}$  — неизвестные константы.

С помощью соотношений Коши и закона Гука из (7)–(10) и можно найти компоненты деформаций и напряжений для цилиндрических ортотропных фаз в композите. Примечательно, что для рассматриваемых слоистых структур все решения, необходимые для постановки контактных краевых задач на границах фаз, и для реализации метода трех фаз Эшелби могут быть представлены в виде замкнутых аналитических представлений. Это обеспечивается однородностью полей напряжений на бесконечности (вне изолированных включений) и каноничностью областей, в которых рассматриваются краевые задачи.

В каждой задаче эффективные модули упругости и неизвестные константы в представлении решения найдены из системы алгебраических уравнений, состоящих из условий несингулярности в центре волокна ( $r = 0$ ), внешнего граничного условия на бесконечности ( $r \rightarrow \infty$ ), условий непрерывности перемещения ( $u_j^{(i)}(r_{(i)}) = u_j^{(i+1)}(r_{(i)})$ ) и напряжения ( $\sigma_{jk}^{(i)}(r_{(i)}) = \sigma_{jk}^{(i+1)}(r_{(i)})$ ) на границах контактов фаз ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), и интегральной формулы Эшелби (1).

В результате, эффективные свойства композита могут быть записаны в следующем виде:

$$\mu_{23}^{eff} = \frac{1}{2\varepsilon_0} C_{55}^{(N)} \left[ \lambda_{(N)} D_1^{(N)} r^{\lambda_{(N)}-1} + (-\lambda_{(N)}) D_2^{(N)} r^{-\lambda_{(N)}-1} \right] \cos \theta, \quad (11)$$

$$K_{12}^{eff} = \frac{1}{2\varepsilon_0} \left[ D_1^{(N)} (\lambda_{(N)} C_{11}^{(N)} + C_{12}^{(N)}) r^{\lambda_{(N)}-1} + D_2^{(N)} (-\lambda_{(N)} C_{11}^{(N)} + C_{12}^{(N)}) r^{-\lambda_{(N)}-1} \right], \quad (12)$$

$$\nu_{31}^{eff} = -\frac{1}{\varepsilon_0 r_N} \left( D_1^{(N)} r_N^{\lambda_{(N)}} + D_2^{(N)} r_N^{-\lambda_{(N)}} + \nu^{(N)} \varepsilon_0 r_N \right), \quad (13)$$

$$E_{33}^{eff} = \frac{2}{\varepsilon_0 r_N^2} \sum_{i=1}^N \left( D_1^{(i)} (\lambda_{(i)} C_{13}^{(i)} + C_{23}^{(i)}) \left( \frac{r_{(i)}^{\lambda_{(i)}+1} - r_{(i-1)}^{\lambda_{(i)}+1}}{1 + \lambda_{(i)}} \right) + D_2^{(i)} (-\lambda_{(i)} C_{13}^{(i)} + C_{23}^{(i)}) Z^{(i)} + \right. \\ \left. + \frac{\varepsilon_0}{2} \left( (C_{13}^{(i)} + C_{23}^{(i)}) \nu^{(i)} + C_{33}^{(i)} (r_{(i)}^2 - r_{(i-1)}^2) \right) \right), \quad (14)$$

$$\text{где } Z^{(i)} = \begin{cases} \ln r_{(i)} - \ln r_{(i-1)}, & \lambda_{(i)} = 1, \\ \frac{r_{(i)}^{-\lambda_{(i)}+1} - r_{(i-1)}^{-\lambda_{(i)}+1}}{1 - \lambda_{(i)}}, & \lambda_{(i)} \neq 1. \end{cases}$$

По значениям полученных эффективных свойств можно определить поперечный модуль Юнга и другие коэффициенты Пуассона с помощью известных формул, приведенных в литературе.

Алгоритм определения эффективных динамических характеристик вискеризованного композита также представлен во второй главе. Для этого используется метод комплексных модулей, в соответствии с которым в полученные решения для эффективных упругих модулей композита (11)-(14) подставляются значения комплексных модулей матрицы. Т.е. считается, что диссипативные свойства композита в целом связаны с вязкоупругими свойствами матрицы. Волокна и вискерсы принимаются упругими. Выделяя действительную и мнимую часть, в итоге получаем значения эффективных упругих модулей упругости и модулей потерь композита, определяющих диссипативные свойства.

В работе дается сравнение решения, найденного методом трех фаз с решениями, полученными ранее с использованием метода двух фаз и метода комплексных потенциалов. Поэтому во второй главе построены также соответствующие решения для дальнейшего анализа и сравнения методов.

В методе полидисперсной модели (метод двух фаз) эффективные свойства получаются из соотношения эквивалентности плотности энергии деформации между эффективным композитом и гетерогенным композитом, т.е.  $W^{eff} = W^{RVE}$ . Однако, такой подход не может дать решение для задачи плоского сдвига. Окончательные выражения эффективных свойств, полученных по методу двух фаз имеют вид:

$$\mu_{23}^{eff} = \frac{1}{4\varepsilon_0^2 r_N^2} \sum_{i=1}^N C_{44}^{(i)} \left( \frac{D_1^{(i)}}{\lambda_{(i)}} \left( r_{(i)}^{2\lambda_{(i)}} - r_{(i-1)}^{2\lambda_{(i)}} \right) + \frac{D_2^{(i)}}{-\lambda_{(i)}} \left( r_{(i)}^{-2\lambda_{(i)}} - r_{(i-1)}^{-2\lambda_{(i)}} \right) \right),$$

$$K_{12}^{eff} = \frac{1}{2r_N^2 \varepsilon_0^2} \sum_{i=1}^N \left[ \left( \frac{C_{22}^{(i)}}{\lambda_{(i)}} + C_{12}^{(i)} \right) \left( D_1^{(i)} \right)^2 \left( r_{(i)}^{2\lambda_{(i)}} - r_{(i-1)}^{2\lambda_{(i)}} \right) + \left( \frac{C_{22}^{(i)}}{-\lambda_{(i)}} + C_{12}^{(i)} \right) \left( D_2^{(i)} \right)^2 \left( r_{(i)}^{-2\lambda_{(i)}} - r_{(i-1)}^{-2\lambda_{(i)}} \right) \right].$$

$$v_{31}^{eff} = -\frac{1}{\varepsilon_0 r_N} \left( D_1^{(N)} r_N^{\lambda_{(N)}} + D_2^{(N)} r_N^{-\lambda_{(N)}} + v^{(N)} \varepsilon_0 r_N \right),$$

$$\begin{aligned}
E_{33}^{eff} = & \frac{1}{2\varepsilon_0^2 r_N^2} \sum_{i=1}^N \left[ (D_1^{(i)})^2 \left( C_{12}^{(i)} + \frac{C_{22}^{(i)}}{\lambda_{(i)}} \right) \left( r_{(i)}^{2\lambda_{(i)}} - r_{(i-1)}^{2\lambda_{(i)}} \right) + (D_2^{(i)})^2 \left( C_{12}^{(i)} + \frac{C_{22}^{(i)}}{-\lambda_{(i)}} \right) \left( r_{(i)}^{-2\lambda_{(i)}} - r_{(i-1)}^{-2\lambda_{(i)}} \right) + \right. \\
& + 2D_1^{(i)} \varepsilon_0 \left[ \left( (\lambda_{(i)} C_{11}^{(i)} + C_{12}^{(i)}) + (\lambda_{(i)} C_{12}^{(i)} + C_{22}^{(i)}) \right) \mathcal{G}^{(i)} + (\lambda_{(i)} C_{13}^{(i)} + C_{22}^{(i)}) \right] \left[ \frac{r_{(i)}^{\lambda_{(i)}+1} - r_{(i-1)}^{\lambda_{(i)}+1}}{1 + \lambda_{(i)}} \right] + \\
& + 2D_2^{(i)} \varepsilon_0 \left[ \left( (-\lambda_{(i)} C_{11}^{(i)} + C_{12}^{(i)}) + (-\lambda_{(i)} C_{12}^{(i)} + C_{22}^{(i)}) \right) \mathcal{G}^{(i)} + (-\lambda_{(i)} C_{13}^{(i)} + C_{22}^{(i)}) \right] (Z^{(i)}) + \\
& \left. + \frac{1}{2} \varepsilon_0 \left[ (A_1^{(i)} + A_2^{(i)}) \mathcal{G}^{(i)} + A_3^{(i)} \right] \left( r_{(i)}^2 - r_{(i-1)}^2 \right) \right],
\end{aligned}$$

где  $A_1^{(i)} = (C_{11}^{(i)} + C_{12}^{(i)}) \mathcal{G}^{(i)} \varepsilon_0 + C_{13}^{(i)} \varepsilon_0$ ,  $A_2^{(i)} = (C_{12}^{(i)} + C_{22}^{(i)}) \mathcal{G}^{(i)} \varepsilon_0 + C_{23}^{(i)} \varepsilon_0$ , и

$$A_3^{(i)} = (C_{13}^{(i)} + C_{23}^{(i)}) \mathcal{G}^{(i)} \varepsilon_0 + C_{33}^{(i)} \varepsilon_0.$$

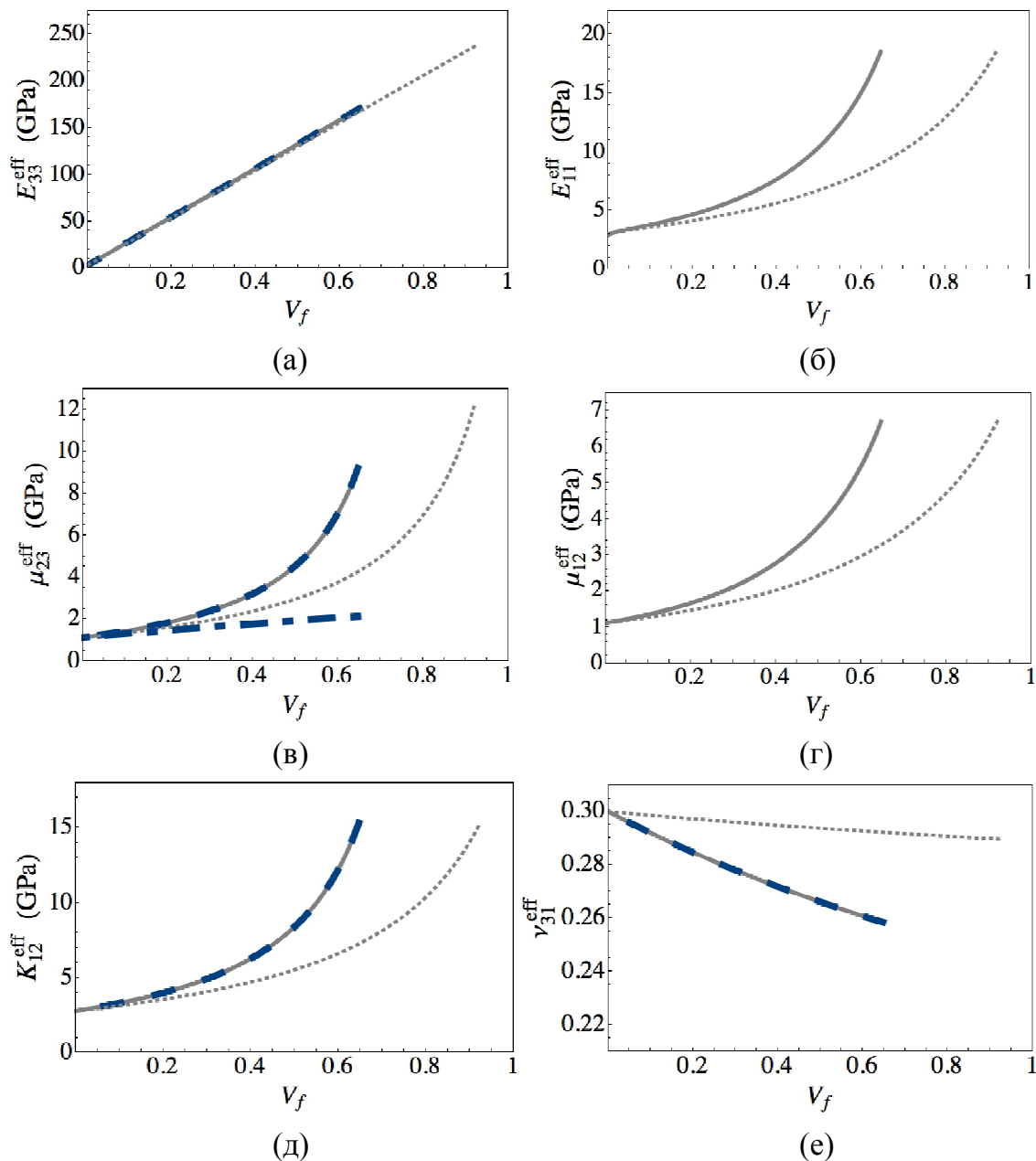
В методе комплексных потенциалов задание элементарной ячейки основывается на предположении, что включение периодически располагается в матрице с квадратичной упаковкой. Ключевой особенностью аналитической процедуры, основанной на упругости комплексной переменной Мусхелишвили, является использование комплексных потенциалов в форме, разложения Тейлора и Лорана для волокна и вискеризованного межфазного слоя. Соответственно, для матрицы используется двоякопериодическая функция Вейерштрасса. Для получения аналитического решения для эффективного модуля сдвига внешний квадратный контур интегрирования при реализации процедуры Мусхелишвили заменяется круговым. Именно в таком предположении аналитическое решение было представлено Гузем И. в 2009 г. (Абердин, Англия). Показано, что метод комплексных потенциалов с использованием закона Гука дает следующее выражение для эффективного модуля продольного сдвига принимает вид:

$$\mu_{31}^{eff} = \mu^{(3)} \frac{c_{(3)} + 2c_{(2)} + c_{(3)} \mu^{(3)} / \mu^{(2)} + 4c_{(1)} / (1 + \mu^{(2)} / \mu^{(3)})}{c_{(3)} + (2 - c_{(3)}) \mu^{(3)} / \mu^{(2)}},$$

где  $\mu^{(j)}$  — модуль продольного сдвига фаз и  $c_{(j)}$  — объемная доли фаз.

Анализ построенных решений также дан в главе 2. Принималось, что рассматриваемый композит состоит из углеродных волокон (марки IM7), вискеризованных нанопроволоками цинка оксида (ZnO) и эпоксидной матрицы. Характеристика композита: диаметр волокна — 5,2 мкм, длина, диаметр,

плотность и концентрация вискерсов — 500 нм, 50 нм, 100% и 71% соответственно. На рис. 4 представлены расчеты эффективных упругих свойств композита, полученные с использованием методов трех фаз, двух фаз и комплексных потенциалов



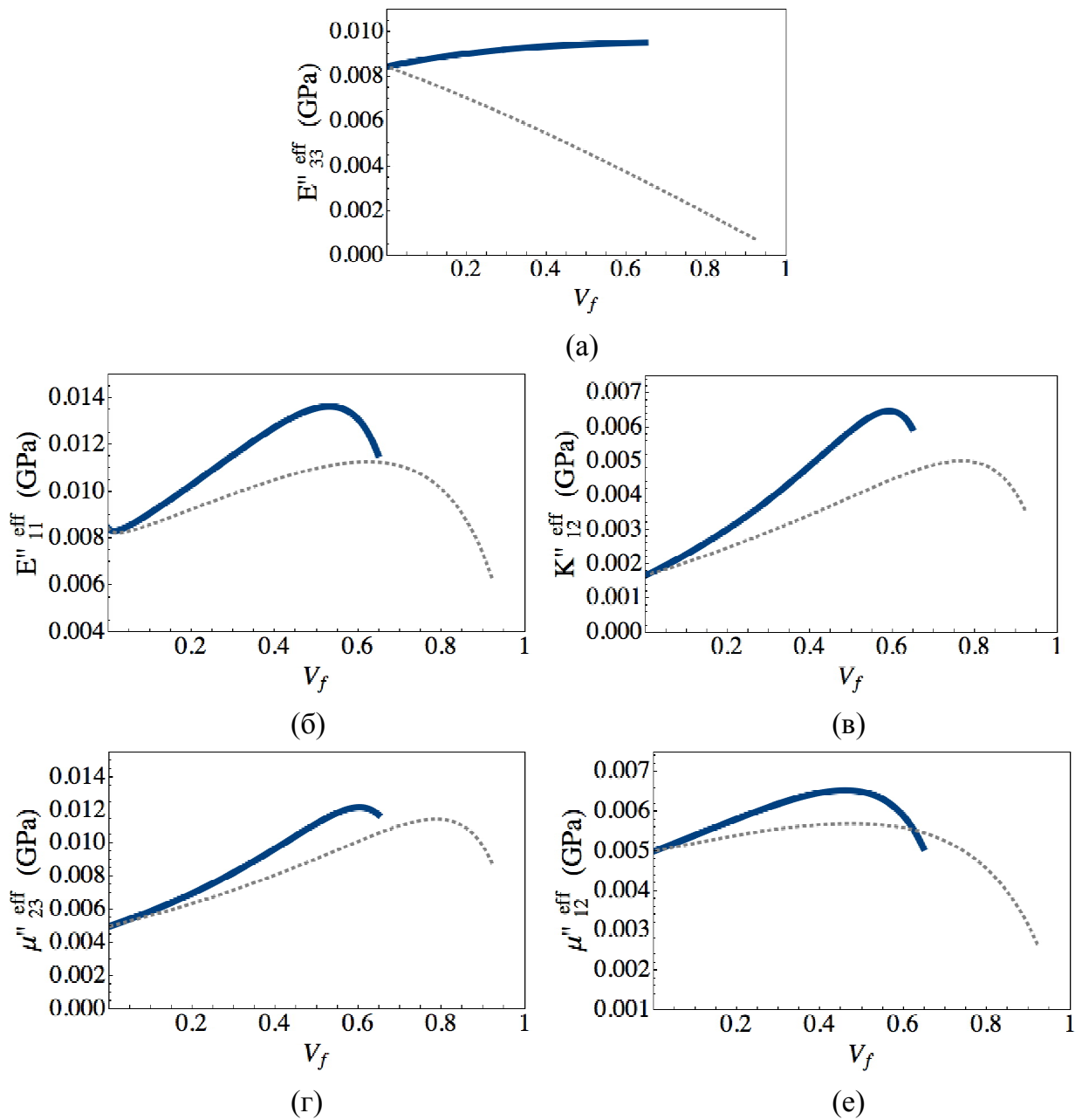
**Рис. 4.** Зависимость эффективных упругих свойств композита от концентраций волокон для: а) продольного модуля Юнга, б) поперечного модуля Юнга, в) модуля продольного сдвига, г) модуля плоского сдвига, д) модуля объемной плоской деформации, и е) коэффициента Пуассона. Прямая линия — метод трех фаз, штриховая — метод двух фаз, пунктирно-штриховая — метод комплексных потенциалов, а пунктирная — без вискерсов.



Установлено, что метод двух фаз дает фактически те же результаты, что и развиваемый нами метод трех фаз для определения следующих характеристик: эффективного продольного модуля Юнга вдоль волокон, модуля продольного сдвига, объемного плоской деформации и коэффициента Пуассона (см. также Кристенсен (1990 г.) и Хашин (1990 г.)). С другой стороны, метод двух фаз дает лишь верхние и нижние пределы для плоского сдвига и неприемлем для получения уточненных оценок этого модуля упругости. Поэтому при решении этой задачи использовался метод трех фаз. Сравнение результатов расчета для продольного сдвига, полученных нами методом трех фаз и найденных ранее с использованием комплексных потенциалов показывает, что результаты сопоставимы только при очень низкой концентрации волокон в композите (меньше чем 0,05%) и, следовательно, применение метода потенциалов ограничено очень малыми концентрациями волокон.

Следует отметить, что максимальная допустимая объемная доля волокон в таком композите всегда меньше максимальной концентрации волокон в обычном композите, т.к. длина вискерсов или толщина межфазного слоя ограничивает максимальную допустимую концентрацию волокон в композите. И наоборот, максимальная длина вискерсов имеет ограничения при заданной концентрации волокон в композите. Если это максимальное значение превышено, то межфазные слои в композите будут пересекаться друг с другом и такое условие нарушает предположение об изолированности включений, использованное в модели трех фаз.

Показано также, что из-за наличия вискерсов, эффективные сдвиговые и поперечные характеристики композита значительно возрастают. При постоянной концентрации волокон 50% эффективные продольный и поперечный модули сдвига, поперечный модуль Юнга и объемный модуль плоской деформации увеличиваются не больше чем 40%. Это повышение может быть объяснено уменьшением концентрации матрицы в ячейке и замещением ее вискеризованным межфазным слоем при постоянной концентрации волокон. Очевидно, что эффекты усиления зависят от концентрации волокон и параметров, связанных с вискерсами в вискеризованном межфазном слое.



**Рис. 5.** Зависимость эффективных модулей потерь композита от концентраций волокон для: а) продольного модуля Юнга, б) поперечного модуля Юнга, в) модуля объемного плоской деформации, г) модуля продольного сдвига, и д) модуля плоского сдвига.

Прямая толстая линия — метод трех фаз, а пунктирная — без вискерсов.

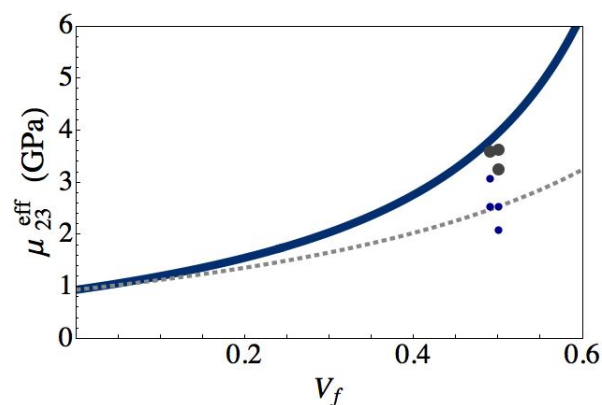
На Рис. 5 представлены эффективные модули потерь композита, полученные из метода трех фаз. Видно, что из-за наличия вискерсов, все модули потерь возрастают существенно, особенно модуль продольного сдвига Юнга. Однако, увеличение модулей потерь в целом меньше увеличения в модулях накопления.

Сравнительный анализ также дан в главе 2.. Результаты, полученные нами сравниваются с результат-ами, полученными методом конечных элементов «асимптотическим методом» (Чатзигеоргии, 2011 г.), в котором учитываются градиентные свойства межфаз-ного слоя (изменение свойств по длине вискерсов) и используются два типа ячей-ки вискеризованного межфазного слоя — квадратная и гексагональная упаковка. Показывается в Табл. 1, что результаты Чатзигеоргии дают хорошее совпадение с аналитическими результатами моделирования, представленными в диссертации.

Сравнение результатов расчета для продольного сдвига, полученные методом трех фаз с экспериментальными данными (Элэрт, 2012 г.) показывает, что в случае композита без вискерсов метод трех фаз дает хороший результат для достаточно высоких концентраций волокон, также для композита с вискерсами наблюдается хорошее соответствие между нашим расчетом и экспериментом.

**Табл. 1** Эффективные свойства композита на основе «фуззи»-волокон, полученные на основе метода конечных элементов и аналитического метода Эшелби (метода трех фаз).

Упаковка вискеризованного межфазного слоя	$E_{33}^{eff}$ (ГПа)	$E_{11}^{eff}$ (ГПа)	$\mu_{23}^{eff}$ (ГПа)	$\mu_{12}^{eff}$ (ГПа)	$K_{12}^{eff}$ (ГПа)
Квадратная	50,10	6,89	2,65	2,38	6,40
Гексагональная	49,45	6,92	2,55	2,39	6,40
Наше аналитическое решение	48,90	7.08	2.43	2,47	6,41

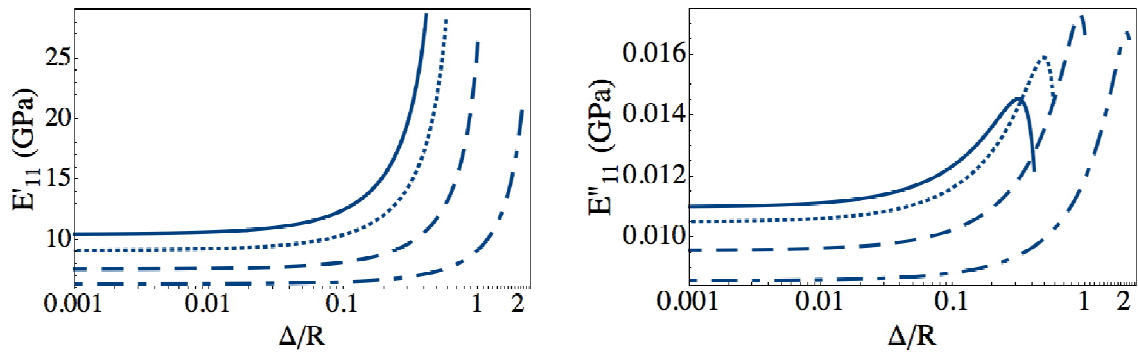


**Рис. 6.** Эффективный модуль продольного сдвига однонаправленного композита, состоящего из углеродных волокон (марки IM7), вискеризованных нанопроволоками

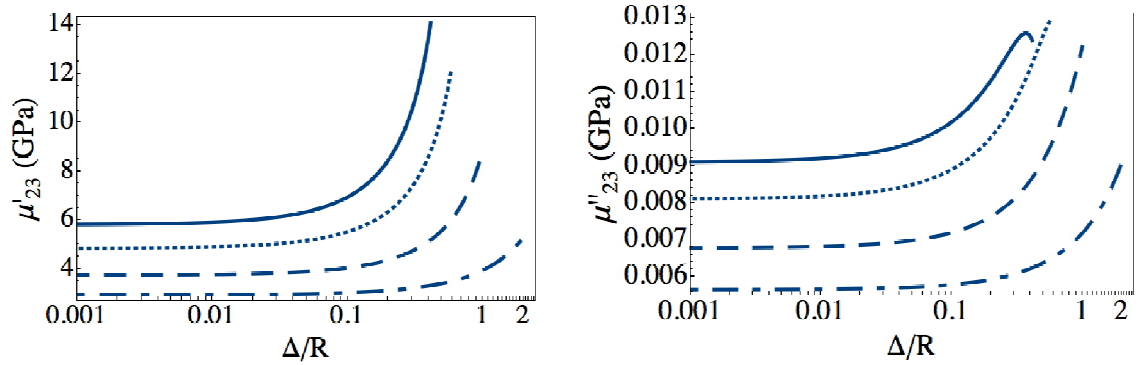
цинка оксида и матрицы (марки Epox 862 + Epikure 9554). Прямая толстая линия — метод Эшелби (трех фаз) для вискеризованного волокнистого композита, а пунктирная — метод Эшелби для композита без вискерсов; большие точки — экспериментальные данные композита с вискерсами, а маленькие точки — экспериментальные данные композита без вискерсов.

**В третьей главе** исследовано влияние различных параметров вискеризованного межфазного слоя: толщины, плотности, диаметра и типа материала вискерсов на эффективные механические и динамические свойства композита. Поскольку присутствие вискерсов существенно влияет на сдвиговые и поперечные свойства композита, в автореферате будет показано влияние параметров вискеризованного слоя только на эффективные модули продольного и поперечного сдвига и поперечный модуль Юнга.

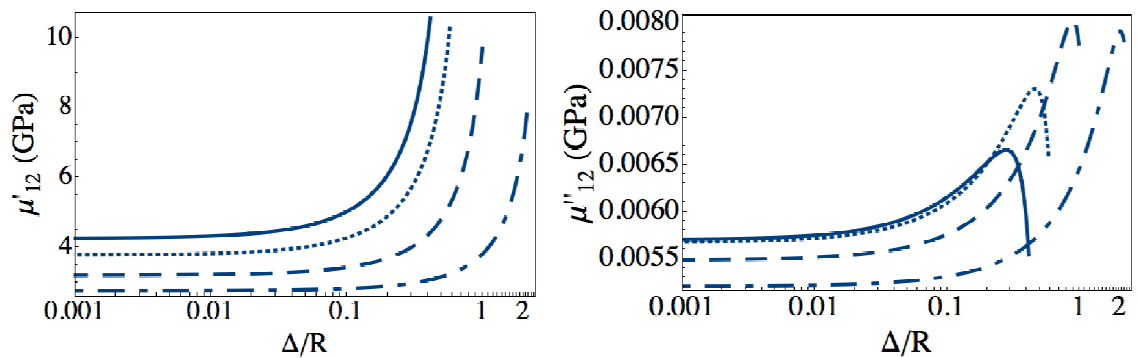
**Влияние длины вискерсов.** Рассматривается композит, который состоит из углеродных волокон, вискеризованных нанопроволоками цинка оксида (ZnO) и эпоксидной матрицы. Характеристики композита: диаметр волокна — 5,2 мкм, и диаметр и плотность вискерсов — 50 нм и 100% соответственно. На Рис. 7 представлены результаты расчета. Зависимость Рис. 7 показывает, что длина вискерсов сильно влияет на эффективные продольный и поперечный модули сдвига и поперечный модуль Юнга именно тогда, когда длина вискерсов достигает значений, близких к предельным, максимально допустимым длинам, особенно при большой объемной доли волокон в композите. Это связано с большой объемной долей вискеризованного межфазного слоя и меньшей объемной долей матрицы в ячейке при постоянной концентрации волокон. Поскольку эффективные свойства вискеризованного межфазного слоя выше свойств матрицы, то, следовательно, и композит, в котором межфазный слой имеет значительную длину вискерсов имеет большие модули, чем композит без вискерсов. Тем не менее, в случае модуля потерь композит с низкой концентрацией волокон может иметь большие значения по сравнению с композитом, имеющим высокую концентрацию волокон.



(а) Модуль накопления и потерь поперечного Юнга



(б) Модуль накопления и потерь продольного сдвига

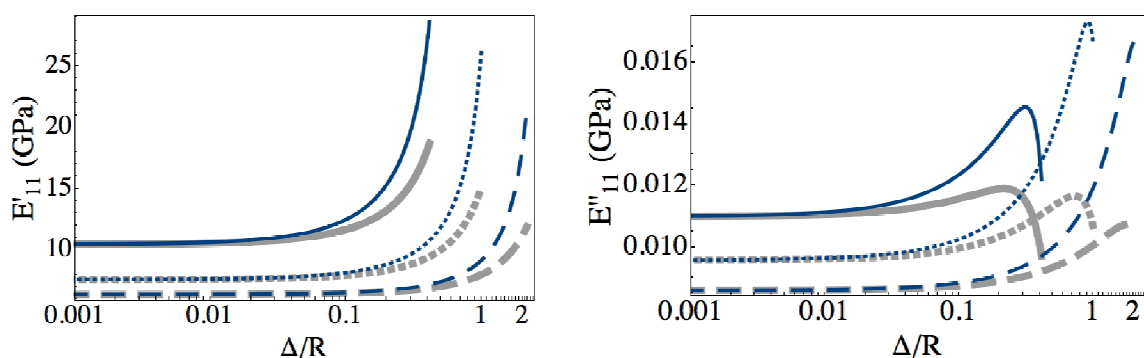


(в) Модуль накопления и потерь поперечного сдвига

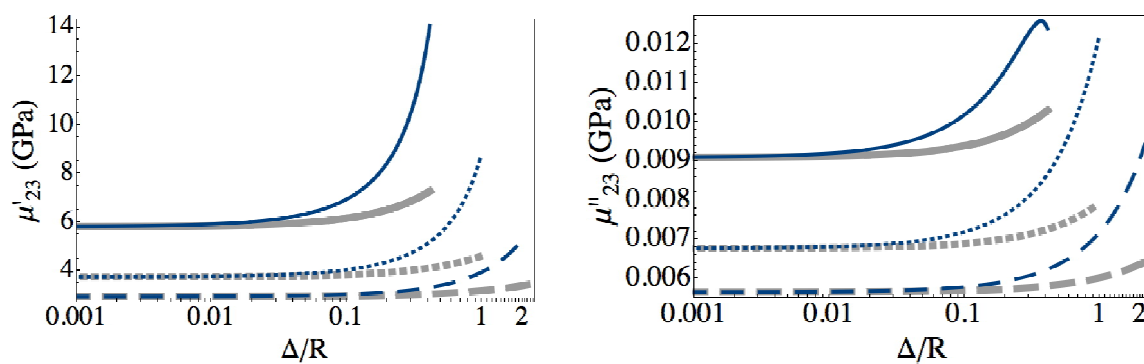
**Рис. 7.** Зависимость эффективных свойств композита от длины вискерсов и концентрации волокон. Отношение длины вискерсов к радиусу волокна  $\Delta/R$ :  $\Delta = r_{(2)} - r_{(1)}$  — длина вискерсов, и  $R$  — радиус волокна ( $R = r_{(1)} = 5,2$  мкм); и объемная доля волокон: прямая линия —  $V_f = 50\%$ , пунктирная —  $V_f = 40\%$ , штриховая —  $V_f = 25\%$ , а пунктирно-штриховая —  $V_f = 10\%$ .

Влияние плотности вискерсов. Рассматривается композит, который состоит из углеродных волокон, вискеризованных нанопроволоками цинка оксида (ZnO) и эпоксидной матрицы. Характеристика композита: диаметр волокна и вискерсов —

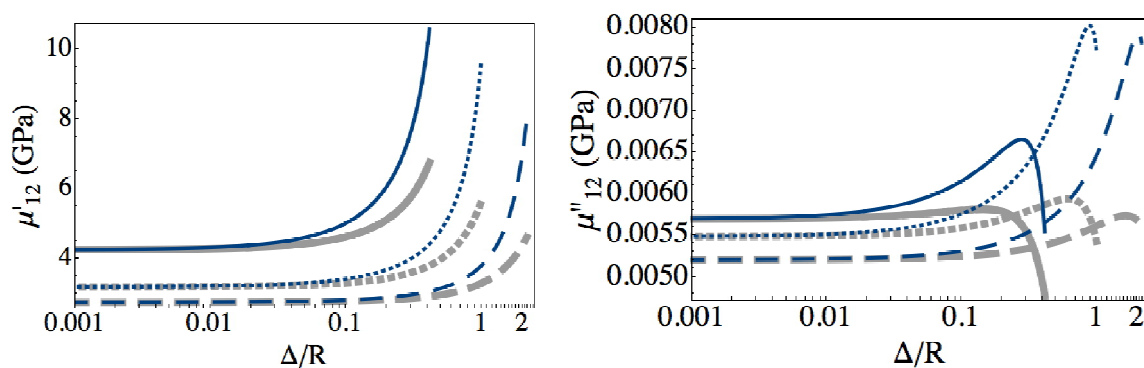
5,2 мкм и 50 нм, соответственно. Результаты расчета для двух плотностей вискерсов ( $\rho_b = 50\%$  и  $100\%$ ) иллюстрированы на Рис. 8.



(а) Модуль накопления и потерь поперечного Юнга



(б) Модуль накопления и потерь продольного сдвига



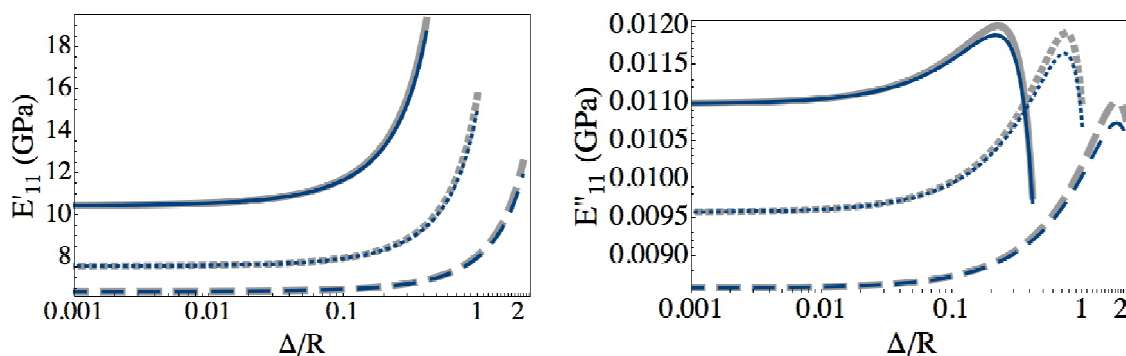
(в) Модуль накопления и потерь поперечного сдвига

**Рис. 8.** Зависимость эффективных свойств композита от плотности, длины вискерсов и концентрации волокон. *Плотность вискерсов: толстая линия —  $\rho_b = 50\%$ , и тонкая линия —  $\rho_b = 100\%$ .* Отношение длины вискерсов к радиусу волокна  $\Delta/R$ :  $\Delta = r_{(2)} - r_{(1)}$  — длина вискерсов, и  $R$  — радиус волокна ( $R = r_{(1)} = 5,2$  мкм); и объемная доля волокон: прямая линия —  $V_f = 50\%$ , пунктирная —  $V_f = 25\%$ , а штриховая —  $V_f = 10\%$ .

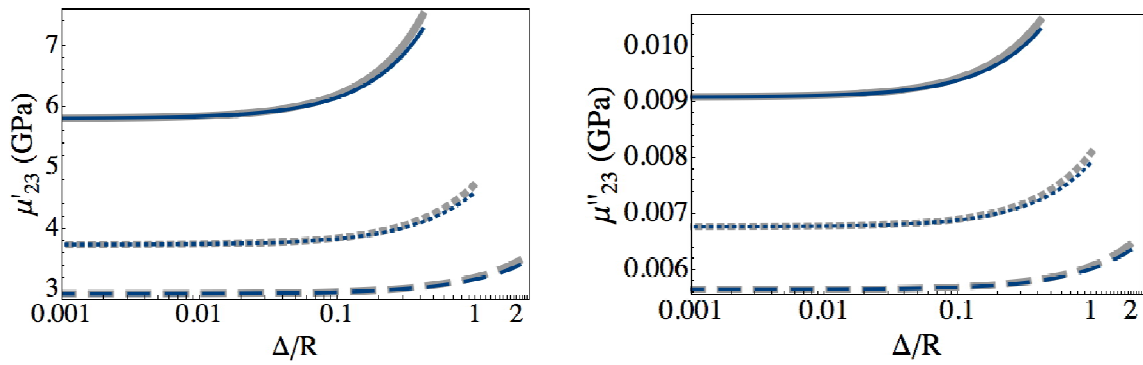
Кривые на Рис. 8 демонстрируют, что эффект плотности вискерсов также может быть существенным для эффективных продольного и поперечного сдвигов и поперечного модуля Юнга. При уменьшении плотности вискерсов с 100% до 50%, величины эффективных модулей накопления и потерь существенно уменьшаются особенно в случаях, когда длина вискерсов и концентрация волокон являются значительными. Согласно уравнениям (2) и (3), уменьшение плотности вискерсов приводит к уменьшению объемной доли вискерсов в вискеризованном межфазном слое и поэтому, эффективные свойства межфазного слоя уменьшаются. Это уменьшение является настолько большим, что оно не может быть скомпенсировано увеличением длины вискерсов.

Влияние диаметра вискерсов. Рассматривается композит, который состоит из углеродных волокон, вискеризованных нанопроволоками цинка оксида (ZnO) и эпоксидной матрицы. Характеристика композита: диаметр волокна — 5,2 мкм, и плотность вискерсов — 50%. Результаты расчета для двух диаметров ( $r_b = 20$  нм и 200 нм) приведены на Рис. 9.

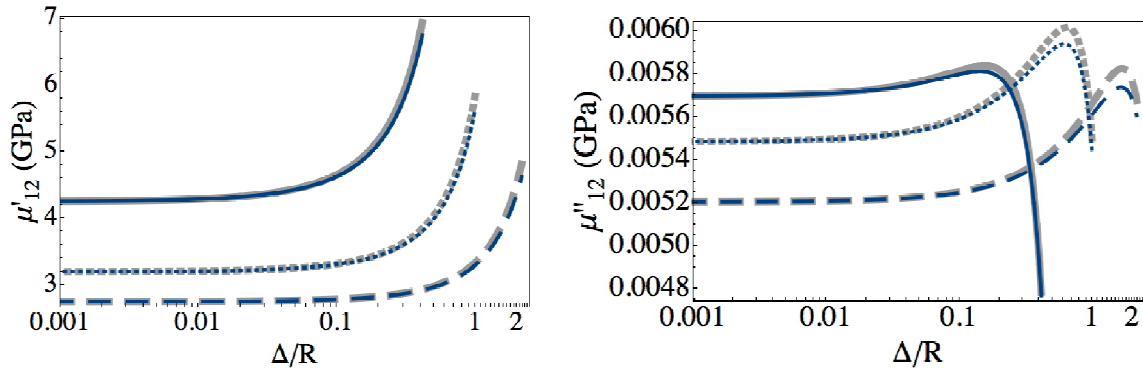
Графики, приведенные на Рис. 9, указывают на незначительность эффекта влияния диаметра вискерсов. Однако, как следует из (2), при увеличении диаметра, концентрация вискерсов в межфазном слое повышается и поэтому, величина эффективных свойств вискеризованного волокнистого композита возрастает, хотя и немного.



(a) Модуль накопления и потерь поперечного Юнга



(б) Модуль накопления и потерь продольного сдвига



(в) Модуль накопления и потерь поперечного сдвига

**Рис. 9.** Зависимость эффективных свойств композита от диаметра, длины вискерсов и концентрации волокон. *Диаметр вискерсов: толстая линия —  $r_b = 200$  нм, и тонкая линия —  $r_b = 20$  нм.* Отношение длины вискерсов к радиусу волокна  $\Delta/R$ :  $\Delta = r_{(2)} - r_{(1)}$  — длина вискерсов, и  $R$  — радиус волокна ( $R = r_{(1)} = 5,2$  мкм); и объемная доля волокон: прямая линия —  $V_f = 50\%$ , пунктирная —  $V_f = 25\%$ , а штриховая —  $V_f = 10\%$ .

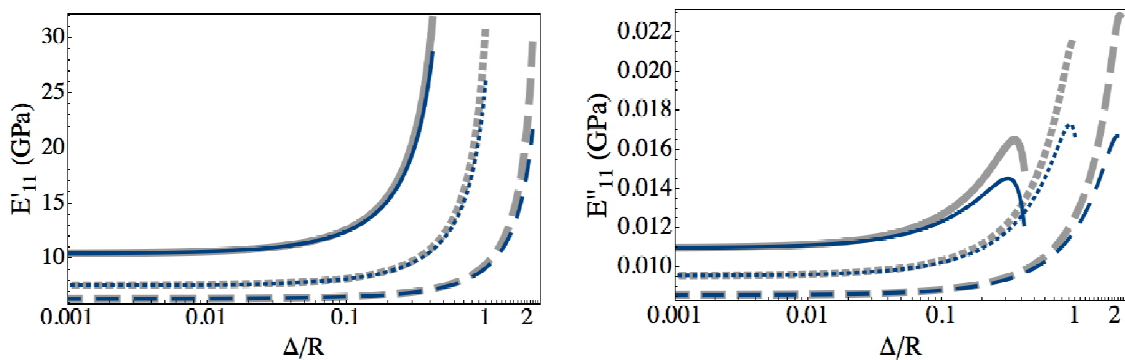
Влияние свойств вискерсов (типа материала). Рассматриваются два композита, один из которых состоит из углеродных волокон, вискеризованных нанопроволоками цинка оксида (ZnO) и матрицы, а другой — из углеродных волокон, вискеризованных углеродными нанотрубками (УНТ). Характеристики композита: диаметр волокна — 5,2 мкм, диаметр и плотность вискерсов — 50 нм и 100%, соответственно. Результаты расчета показаны на Рис. 10.

В связи с оценкой влияния свойств вискерсов в межфазном слое следует отметить, что несмотря на то что свойства углеродных УНТ значительно выше свойств нанопроволок цинка оксида, не следует ожидать значительного увеличения эффективных свойств композита с УНТ в межфазном слое («фуззи»-

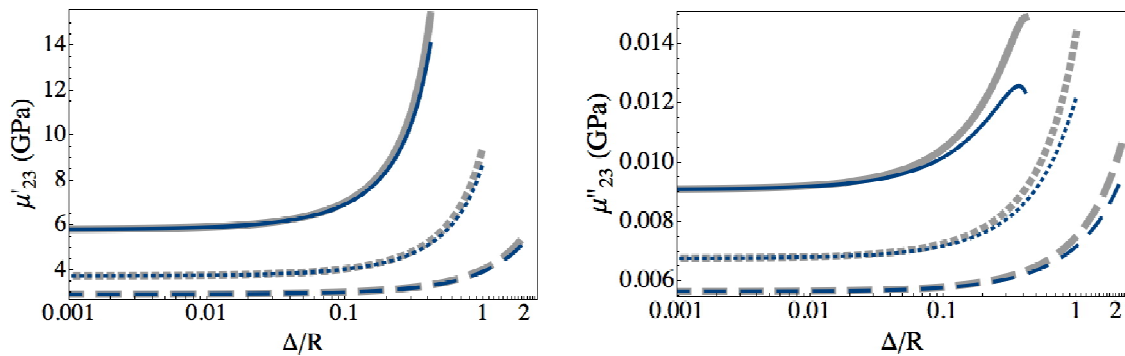


системы) по сравнению с композитом, в котором вискеризация обеспечивается нанопроволоками оксида цинка. Это наблюдение справедливо для композита с большой концентрацией волокон или с низкой концентрацией волокон в композите, у которого длина вискерсов меньше радиуса волокна. В случае композита, который имеет длину много раз больше чем радиус волокна, ожидается, что эффективные свойства композита с УНТ будут повышаться существенно по сравнению с композитом, который имеет нанопроволоки оксида цинка.

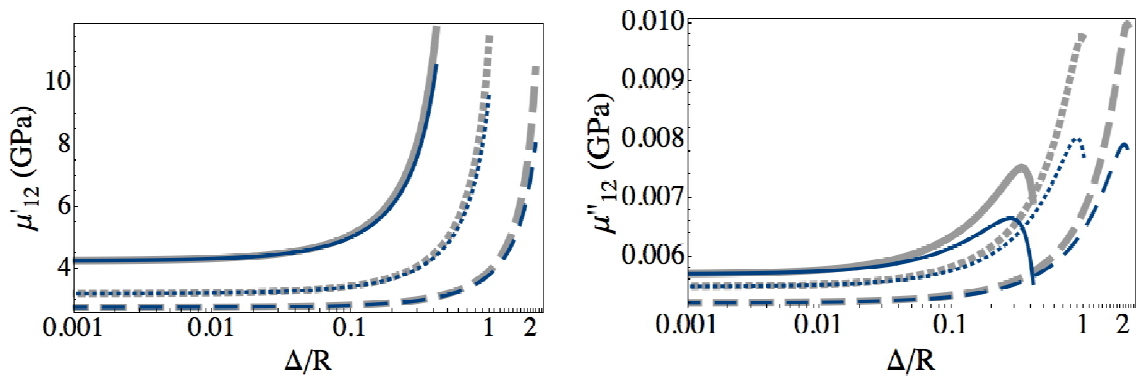
**В четвертой главе** даны выводы и заключение по диссертационной работы.



(а) Модуль накопления и потерь поперечного Юнга



(б) Модуль накопления и потерь продольного сдвига



(в) Модуль накопления и потерь поперечного сдвига

**Рис. 10** Зависимость эффективных свойств композита от свойств, длины вискерсов и концентрации волокон. *Материал вискерсов: толстая линия — УНТ, и тонкая линия — нанопроволоки ZnO.* Отношение длины вискерса к радиусу волокна  $\Delta/R$ :  $\Delta = r_{(2)} - r_{(1)}$  — длина вискерса, и  $R$  — радиус волокна ( $R = r_{(1)} = 5,2$  мкм); и объемная доля волокон: прямая линия —  $V_f = 50\%$ , пунктирная —  $V_f = 25\%$ , а штриховая —  $V_f = 10\%$ .

## **ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

1. На основе континуальной модели и метода самосогласованного поля Эшелби (метод трех фаз) развита прикладная модель деформирования трансверсальных изотропных вискеризованных волокнистых многослойных композитов, учитывающих микро- или наноструктуру вискерсов, выращенных на поверхностях волокон.
2. Предложена модель вискеризованного межфазного слоя на поверхности волокон, как трансверсально-изотропного слоя с цилиндрической изотропией, учитывающая геометрические и механические характеристики микроструктуры.
3. Разработан метод определения эффективных свойств волокнистых композитов с вискеризованными (функциональными) волокнами, основанный на процедуре Эшелби трех фаз, позволяющий в рамках единого подхода найти аналитическое решение проблемы. Показано, что предложенный метод является более точными и полными для всех возможных концентраций волокон по сравнению с другими известными методами оценки эффективных свойств вискеризованных композитов (метод двух фаз и метод комплексных потенциалов).
4. Разработан метод и алгоритм расчета эффективных динамических свойств волокнистых композитов с вискеризованными (функциональными) волокнами, основанный на методе Эшелби трех фаз и методе комплексных модулей.

5. Получена оценка влияния вискерсов на эффективные свойства рассматриваемых композитов. Показано, что присутствие вискерсов, приводит к увеличению эффективных механических и динамических свойств композитов особенно на их сдвиговые и трансверсальные характеристики.

6. Установлены важные прикладные эффекты вискеризованных композитов:

а) присутствие вискерсов, приводит к увеличению эффективных механических и динамических свойств композитов, особенно, их сдвиговых и трансверсальных характеристик (более чем на 103%, 93%, 91%, и 129% для поперечного модуля Юнга, продольного и поперечного модуля сдвига, и объемного модуля плоской деформации соответственно),

б) для всех известных типов вискеризованных композитов длина и плотность вискерсов являются наиболее существенными параметрами структуры, влияющими на эффективные свойства композитов (механические свойства композита могут быть увеличены более чем на 103%, 93%, 91%, и 129% для поперечного модуля Юнга, продольного и поперечного модуля сдвига, и объемного модуля плоской деформации соответственно),

в) модуль потерь может быть также существенно увеличен, до 102%, 93%, 61%, 52%, и 195% для продольного и поперечного модуля Юнга, продольного и поперечного модуля сдвига, и объемного модуля плоской деформации соответственно),

г) проведенный анализ позволяет дать прогноз новых классов композитов, в которых за счет образования вискерсов могут быть реализованы высокие механические свойства и одновременно повышенные свойства демпфирования.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### **В рецензируемых научных изданиях и журналах:**

1. S. Lurie, M. Minhat, N. Tuchkova, J. Soliaev. On remarkable loss amplification mechanism in fiber reinforced laminated composite materials // *Appl. Compos. Mater.* Vol. 21 Issue 1, Feb 2014, pp. 179-196.
2. S. Lurie, M. Minhat. Application of generalized self-consistent method to predict effective elastic properties of bristled fiber composites. // *Composites B* Vol. 61, 2014, pp. 26-40.
3. С.А. Лурье и М. Минат. Метод самосогласованного поля Эшелби в задаче определения эффективных свойств композиционных материалов, армированных вискеризованными волокнами // *Механика композиционных материалов и конструкций*, том 20 №. 2, 2014, с. 248-258.
4. S.A. Lurie, M. Minhat, N. Tuchkova. Estimation of effective dynamic properties of bristled fiber composite materials based on self-consistent Eshelby method // *J. of Eng. Math.* (2014). DOI 10.1007/s10665-014-9719-0.

### **В других научных изданиях и журналах:**

1. С.А. Лурье и М. Минат. Влияние характеристик вискерсов на эффективный продольный модуль сдвига композиционных материалов, армированных вискеризованными волокнами // *Сборник докладов 2-й Всероссийской научной конференции «Механика наноструктурированных материалов и систем-2014»*. 17-19 декабря 2013г., г. Москва, Том 3, с. 82-88.