

*На правах рукописи*



Маковский Сергей Владимирович

**ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ  
ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С ВИСКЕРИЗОВАННЫМИ  
ВОЛОКНАМИ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учения степени

кандидата технических наук

Москва 2020

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

**Научный руководитель:** **Дудченко Александр Александрович,**  
Доктор технических наук, профессор.

**Официальные оппоненты:** **Никабадзе Михаил Ушангиевич,**  
Доктор физико-математических наук, доцент,  
Заместитель заведующего кафедры механики композитов отделения механики Механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва.

**Радченко Валерий Петрович,**  
Кандидат технических наук, Заместитель  
Генерального директора – главный конструктор  
направления, ПАО «Радиофизика», г. Москва.

**Ведущая организация:** **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук» (ИМАШ РАН), г. Москва.**

Защита состоится «30» декабря 2020 г. в «16<sup>30</sup>» часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 в ФГБОУ ВО «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 ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на сайте

[https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=118616](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=118616).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Федотенков Г.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Композиционные материалы и конструкции уже достаточно давно находят широкое применение в различных областях техники. Композитные конструкции с различными комбинациями компонентов в структуре имеют много преимуществ по сравнению монолитными однородными материалами. Известно, что механические свойства композитов контролируются условиями контакта между волокном и матрицей (характеристиками интерфейса) в композите. Влияние структуры в области контакта фаз оказывает значительное влияние на сдвиговые характеристики композитов. Разработаны различные методики чтобы повышать качество интерфейса, наиболее распространенными из которых являются такие как: модификация поверхности волокна, улучшение химических взаимодействий, либо добавление третьей фазы (межфазного слоя) между волокном и матрицей. Основа идеи, лежащей в этих методах, заключается в улучшении межфазных адгезионных свойств, и в увеличении площади поверхности волокна для более эффективной передачи нагрузок между волокнами и матрицей, так что поведение композитов может быть дополнительно улучшено.

В настоящее время активно развиваются технологии получения современных волокнистых композитов, в которых для и повышения сдвиговых свойств композита на круговой поверхности углеродных волокон выращены специальные микроструктуры, содержащие нановолокна (вискерсы) — нано-проволоки и углеродные нанотрубки (волокна «fuzzy»). Проведенные исследования доказали, что для подобных систем существенно повышается сдвиговая прочность межфазной границы (интерфейса). Т.е. для композиционных материалов с вискеризованными волокнами реализуются более высокие характеристики прочности и жесткости при сдвиге по сравнению типовыми композитами, не имеющими дополнительной микроструктуры на поверхности волокон. Кроме того, присутствие этих же микроструктур на границах фаз повышает трансверсальную прочность и жесткость, а также демпфирующие характеристики и электропроводность композитов. Важно отметить, что улучшение свойств композитов зависит от характеристик вискерсов и матрицы межфазного слоя, выращенных на поверхности волокна. Композиционные материалы на их основе являются современными мультифункциональными композиционными материалами потому, что различные свойства композитов на прочность, жесткость, демпфирование, усталость, и электро- и теплопроводность могут быть улучшены одновременно. В связи с этим прогнозирование свойств модифицированных подобным образом будущих мультифункциональных волокнистых композитов представляет теоритические и практические интересы. Поэтому тема диссертации, посвященная

моделированию диссипативных характеристик волокнистых композитов с модифицированными волокнами, имеющими дополнительный вискеризованный слой, и разработке методов аналитической оценки эффективных свойств межфазного слоя и композита в целом, несомненно является актуальной.

**Степень разработанности темы исследования.** В настоящее время имеется немало количество работ, посвященных определению упругих и динамических характеристик модифицированных композитов. В то же время практически нет работ, посвященных анализу поведения динамических характеристик модифицированных композитов с межфазным слоем, учитывающие динамические характеристики межфазного слоя и, в частности, характеристики образующих этот слой вискерсов и матрицы. Не проводились исследования влияния параметров микроструктуры на поверхности волокна (вискерс, матрица, концентрация) на характер поведения и степень влияния на величины искомых эффективных характеристик, как отдельно для межфазного слоя, так и на показатели для композита в целом.

**Цель работы.** Целью работы является разработка методики моделирования эффективных свойств модифицированных волокнистых неоднородных композиционных материалов, основанной на аналитическом решении серии тестовых задач в рамках метода трех фаз и способной достоверно прогнозировать механические и динамические свойства с определением модулей потерь и динамических модулей на основе вязкоупругой аналогии и метода комплексных модулей упругости. Получение зависимостей динамических характеристик (упругих и диссипативных), с учетом характеристик микро- или наноструктур (вискерсов), выращенных на поверхности базового волокна, их концентрации в слое и характеристик вязкоупругой матрицы.

Одной из основных целей является моделирование динамических характеристик (модулей потерь и динамических модулей) вискеризованного слоя на поверхности волокон, как отдельной неоднородной структуры, а также уточнение демпфирующих характеристик всего модифицированного композита с учетом полученных эффективных динамических характеристик вискеризованного слоя.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Впервые предложен подход для оценки демпфирующих свойств модифицированного композита с вискеризованным слоем, основанный на рассмотрении межфазного слоя как отдельной волокнистой структуры, учитывающий, геометрические и механические характеристики компонент межфазного слоя на поверхности волокон, позволяющий определить эффективные демпфирующие свойства вискеризованного слоя методом трех фаз Эшелби-Кристенсена, как одной из фаз модифицированного волокнистого композита.

2. Предложена методика и алгоритм расчета эффективных динамических свойств волокнистых композитов с вискеризованными (функциональными) волокнами в целом, основанная на методе самосогласования Эшелби и методе комплексных модулей, позволяющая давать обоснованные оценки эффективных характеристик с учетом реальной микро- и наноструктуры вискеризованного слоя с возможностью использования в качестве матрицы межфазного слоя вязкоупругого полимера, обеспечивающего повышение свойств демпфирования.

3. Доказана возможность использования упрощенных предельных соотношений типа Рейса для проведения экспресс оценок эффективных диссипативных характеристик вискеризованного слоя и модифицированного композита в целом, что обеспечивает эффективность проектировочных оценок.

4. Представлена уточненная методика оценки диссипативных и динамических свойств, двух этапное моделирование, сначала для определения эффективных свойств вискеризованного слоя, а затем эффективных свойств композита в целом по эффективным свойствам вискеризованного слоя и базового волокна.

#### **Практическое значение работы.**

1. Получен аналитический метод расчета и прогноза свойств демпфирующих свойств, обнаружена возможность получения материалов нового поколения с высокими демпфирующими свойствами и сохранением их механических показателей в процессе эксплуатации конструкций на базе модифицированных волокнистых композитов.

2. Разработана методика оценки эффективных динамических характеристик новых типов композитов и методы экспресс оценки динамических характеристик межфазного слоя с учетом разного типа вискерсов и матрицы, включая вязкоупругий полимер.

3. Предложенная методика дает возможность проводить проектировочные расчеты и широкую оптимизацию такого типа композитных материалов, т.к. учитываются все параметры неоднородного модифицированного волокнистого композита, включая базовое волокно, характеристики вискерсов и матрицы микро- и наноструктуры межфазного слоя, объемное содержание волокон с учетом параметров вискеризованного слоя.

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

**Достоверность результатов** обосновывается использованием строгих подходов теории упругости, механики композитов и апробированных математических методов осреднения, совпадением результатов с экспериментальными данными, приведенными в литературе другими авторами, и с результатами решения аналогичных задач для

дисперсных и волокнистых композитов, в том числе с результатами прямого численного моделирования методом асимптотического осреднения.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Определение эффективных характеристик вискеризованного межфазного слоя как отдельной волокнистой структуры с использованием двух методов осреднения и оценка полученных результатов.

2. Определение характерных особенностей изменения эффективных свойств межфазного слоя от параметров исходных материалов, их концентраций в слое с учетом геометрических параметров и особенностей структуры слоя.

3. Определение характерных особенностей изменения эффективных свойств модифицированного композита с вискеризованным межфазным слоем от параметров межфазной структуры. Оценка выявленных эффектов.

4. Оценка применения упрощенной процедуры осреднения по методу Рейсса, сравнение результатов с методом трех фаз, рекомендации к использованию для экспресс оценок новых структур при проектировании и оптимизации.

**Апробация работы и публикации.** Основные результаты диссертационной работы доложены на международных научных конференциях:

- Международная конференция «Advance in Composite Science and Technologies», Москва, декабрь, 2018.
- Международная конференция «Современные проблемы математики и механики» посвященная 80-летию академика В.А.Садовниченко, Москва, май, 2019.

Основные положения диссертационного исследования достаточно полно отражены в 3 научных работах, из них 1 научная работа в издании, включенном в список рекомендованных Перечнем ВАК, 1 работа в издании, входящем в мировую базу данных научного цитирования Scopus, еще 1 – в прочих изданиях.

**Объем и структура работы.** Результаты исследований изложены на 129 страницах машинописного текста, иллюстрированного 38 рисунками и 1 таблицей. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, 7 приложений и списка литературы. Список используемой литературы включает 104 наименования (из них 86 на иностранном языке).

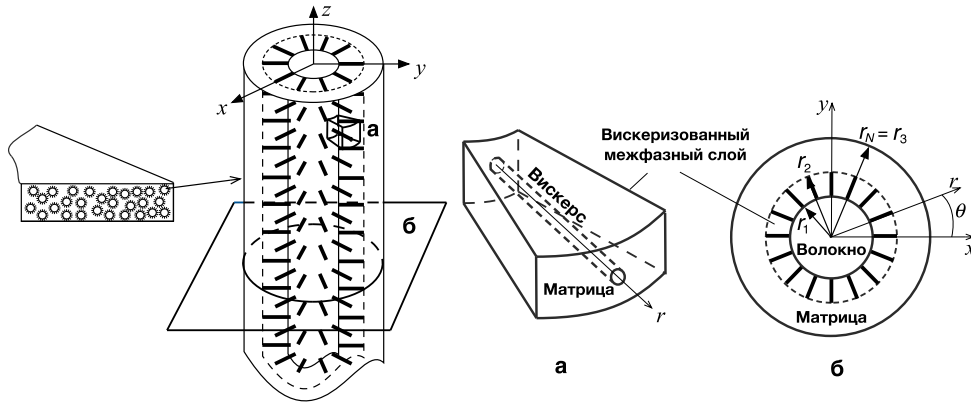
## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** приведен аналитический обзор литературы, посвященной экспериментальным исследованиям характеристик вискеризованных волокон и композитов на их основе, методов моделирования механических свойств композитов и вискеризованных волокнистых композитов. Так же приводятся основы микромеханики композитов в рамках классической теории упругости для определения эффективных свойств композиционных материалов. Отмечено, что свойства таких материалов были моделированы 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 и одна из его фаз является дополнительным вискеризованным слоем, состоящим из вискерсов и матрицы. Такой подход можно найти в работах Гузя и др. (2009г., 2011 г.), Кундавала и Рей (2011 г.) и Чатзигеоргии и др. (2012 г.). По результатам анализа литературы установлено, что до настоящего времени не было предложено обоснованной 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 и методе вязкоупругой аналогии (комплексных модулей), позволяющий построить аналитические решения задачи усреднения с учетом концентраций фаз, геометрических и материальных характеристик этих наноструктур в композите.

**Во второй главе** предложена прикладная модель вискеризованного межфазного слоя (Рис. 1) как трансверсально-изотропной структуры с цилиндрической изотропией, рассматривается представительный объем для волокнистого композита с плоскостью изотропии нормальной базовым волокнам, у которой есть 3 фазы ( $N=3$ ). Рассматриваемый композит с межфазным слоем является трансверсально-изотропным и характеризуется пятью

модулями упругости. Считается, что ось  $z$  совпадает с направлением волокна, межфазные слои в композите не пересекаются друг с другом, а вискерсы выращены нормально поверхности базового волокна. При моделировании вискеризованных слоев принимается, что они являются трансверсально-изотропными с поверхностью изотропии поперек вискерсов, т.е. структура считается цилиндрически ортотропной с постоянными свойствами по длине вискерсов.



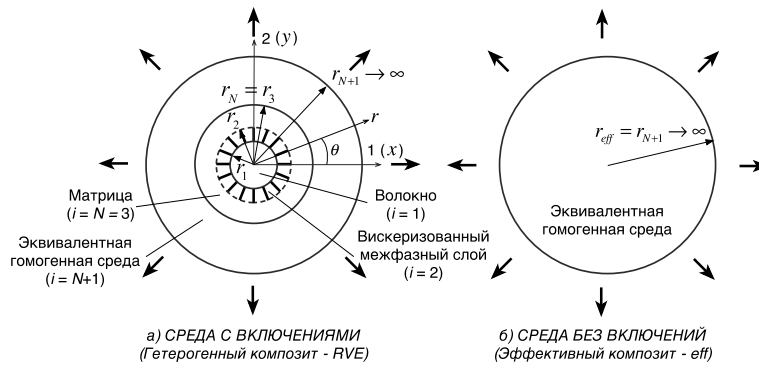
**Рис. 1.** Ячейки однонаправленного вискеризованного волокнистого композита и вискеризованного межфазного слоя.

В качестве единого метода оценки эффективных свойств в работе предлагается использовать метод самосогласованных фаз Эшелби (1956 г.), основанный 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:

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

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;  $\sigma_{pq}^{eff}$ ,  $u_p^{eff}$  — напряжения и перемещения на поверхности контакта среды без включений.

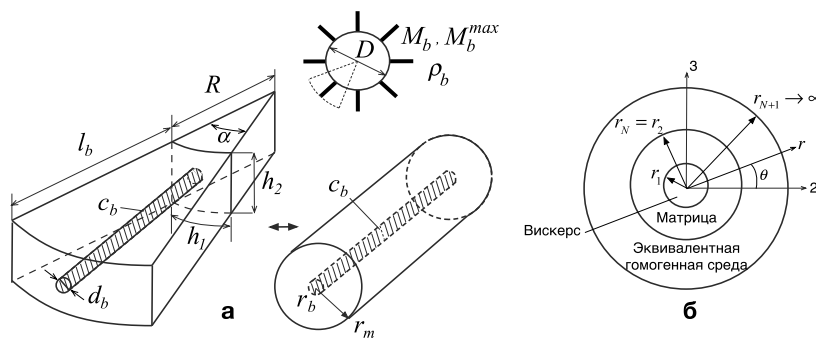




**Рис 2.** Схема ячейки в методе Эшелби.

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 используется для нахождения свойств вискеризованного межфазного слоя. В связи с этим построена приближенная геометрическая модель (Рис. 3), позволяющая определить объемную долю вискеров в слое и учитывать различные характеристики вискерсов.



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

Объемное содержание вискеров  $c_b$  в вискеризованном слое, которое 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  $\rho_b$  представляет собой отношение числа вискерсов, выраженных на волокне, к максимально возможному числу вискерсов, уместяющихся 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 при расчете объемной доли вискерсов в вискеризованном слое.

Теперь запишем определяющие соотношения (закон Гука) для ортотропного слоя, где для различных компонент промежуточных структур следует принимать следующие коэффициенты в матрице жесткости:

а) для базовых волокон рассматривается случай трансверсальной 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 поверхностью изотропии, расположенной перпендикулярно вискерсам:

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

в) для матрицы — материал является изотропным, следовательно можем записать:

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

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

В предлагаемом методе Эшелби рассматриваются последовательно 4 постановки задач в цилиндрических координатах при определении свойств композитов. Эффективные объемный модуль плоской деформации и модуль поперечного сдвига определяются соответственно из решения задач всестороннего растяжения поперек волокон и в трансверсальной плоскости. Продольный модуль сдвига решается 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 будут использоваться в дальнейшем:

- Соотношения Коши в цилиндрических координат:

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

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;

- Уравнение 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 в законе Гука (4)

С помощью соотношений (4–6) определяем общие 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:

$$L(\lambda^{(i)})^4 - M(\lambda^{(i)})^2 + N = 0, \quad \text{где: } M = (C_{11}^{(i)} + C_{22}^{(i)} - 8C_{12}^{(i)})C_{66}^{(i)} + 4(C_{11}^{(i)}C_{22}^{(i)} - (C_{12}^{(i)})^2),$$

$$L = C_{11}^{(i)}C_{66}^{(i)}, \quad N = 9C_{22}^{(i)}C_{66}^{(i)}. \quad D_j^{(i)} \text{ — неизвестные константы.}$$

С помощью соотношений Коши и закона Гука из (7–10) можно найти компоненты деформаций и напряжений 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 ( $r \rightarrow \infty$ ); условия непрерывности перемещений ( $u_j^{(i)}(r_{(i)}) = u_j^{(i+1)}(r_{(i)})$ ) и напряжений ( $\sigma_{jk}^{(i)}(r_{(i)}) = \sigma_{jk}^{(i+1)}(r_{(i)})$ ) 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:

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

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

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

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

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

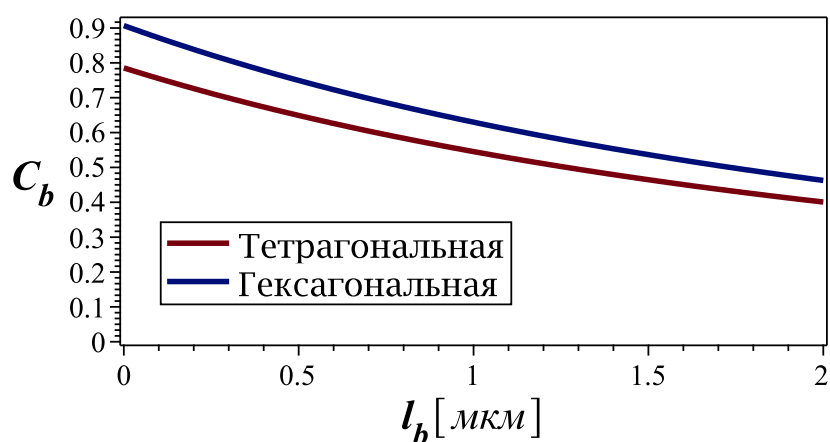
По значениям полученных эффективных свойств можно определить поперечный модуль Юнга и другие коэффициенты Пуассона с помощью известных формул, приведенных в литературе.

Эффективные динамические характеристики определим при помощи метода комплексных модулей, в соответствии с которым полученные решения для эффективных модулей композита (11-14) выражаются в комплексном виде  $E = E' + iE''$ . Выделяя действительную и мнимую часть получим значения эффективного модуля упругости и модуля потерь соответственно.

**В третьей главе** произведена оценка эффективных диссипативных свойств вискеризованного межфазного слоя модифицированного композита с учетом различных образующих его материалов вискерсов и матрицы, и учетом геометрических особенностей формирования слоя.

Рассмотрим изменение концентрации вискерсов по их длине и определим предельную верхнюю границу концентрации вискерсов в слое и построим зависимости эффективных диссипативных характеристик межфазного слоя от объемной доли включений  $c_b$ .

На (Рис.4.) можем видеть построенные с помощью формулы (2) верхние границы возможных концентраций вискерсов  $c_b$  в межфазном слое в зависимости от типа их расположения на поверхности базового волокна и изменение предельной концентрации на внешней границе межфазного слоя в зависимости от длины вискерсов  $l_b$ . На построенном графике можем видеть характерную для радиальной структуры картину изменения концентрации включений межфазного слоя. Отметим большое, почти вдвое, при  $l_b \rightarrow R$  падение концентрации включений по длине вискерса, так же отметим максимально возможную концентрацию вискерсов  $c_b^{\max}=0,907$  для гексагонального расположения вискерсов и которая возможна только в корневой зоне вискерса на поверхности базового волокна при  $\rho_b = 1$ .



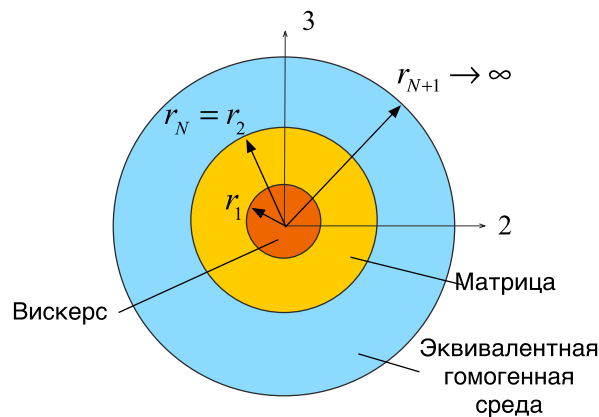
**Рис. 4.** Распределение вискерсов межфазного слоя по радиусу  $r$ .

Определив максимальную технологически возможную концентрацию вискерсов в межфазном слое, выявив характер и уровень изменения концентрации включений в межфазном слое, рассмотрим в полученном диапазоне характерное поведение демпфирующих свойств вискеризованного слоя в зависимости от комбинации, образующих его пары материалов. После анализа полученных зависимостей, мы сможем прогнозировать величин ожидаемых демпфирующих свойств межфазного слоя с учетом зависимости от концентрации включений.

Поскольку изменение концентрации по длине включений известно, и оно охватывает весьма широкий диапазон концентраций, рассмотрим изменение диссипативных характеристик вискеризованного межфазного слоя от объемной доли связующего в слое, расчет межфазного слоя выполним как для двухфазного волокнистого композита (Рис. 5).

Сравним результаты следующих методов усреднения:

- Метода трех фаз, изложенного во 2й главе.
- Метода Рейсса, являющегося более простым, но менее точным, определим уровень погрешности и сделаем вывод о его возможности применения при расчетах и их области.



**Рис. 5.** Ячейка вискеризованного межфазного слоя по методу трех фаз.

Расчет произведем для всех модулей лежащих в трансверсально-изотропной плоскости: продольного  $\mu_{23}''$  и поперечного  $\mu_{12}''$  модуля сдвига потерь и для поперечного модуля потерь  $E_{22}''$ .

Согласно методу Рейсса эффективные модули можно записать в виде:

$$1/\mu_{eff}^* = (1-V)/\mu_1^* + V/\mu_2^*, \quad (15)$$

$$1/E_{eff}^* = (1-V)/E_1^* + V/E_2^*, \quad (16)$$

где  $V$  – объемное содержание связующего,  $\mu_1^*$ ,  $\mu_2^*$ ,  $E_1^*$  и  $E_2^*$  – модули сдвига и упругости вискерса и матрицы соответственно,  $k_1$  – объемный модуль вискерса,  $k_2$  – объемный модуль матрицы. Для вискерсов принимаем, как для жесткого материала  $\mu_1^* = b$ , для матрицы как для вязкоупругого материала принимаем  $\mu_2^* = a(1+i\eta) = \mu_2' + i\mu_2''$ .

Рассмотрены 2 варианта вискерсов:

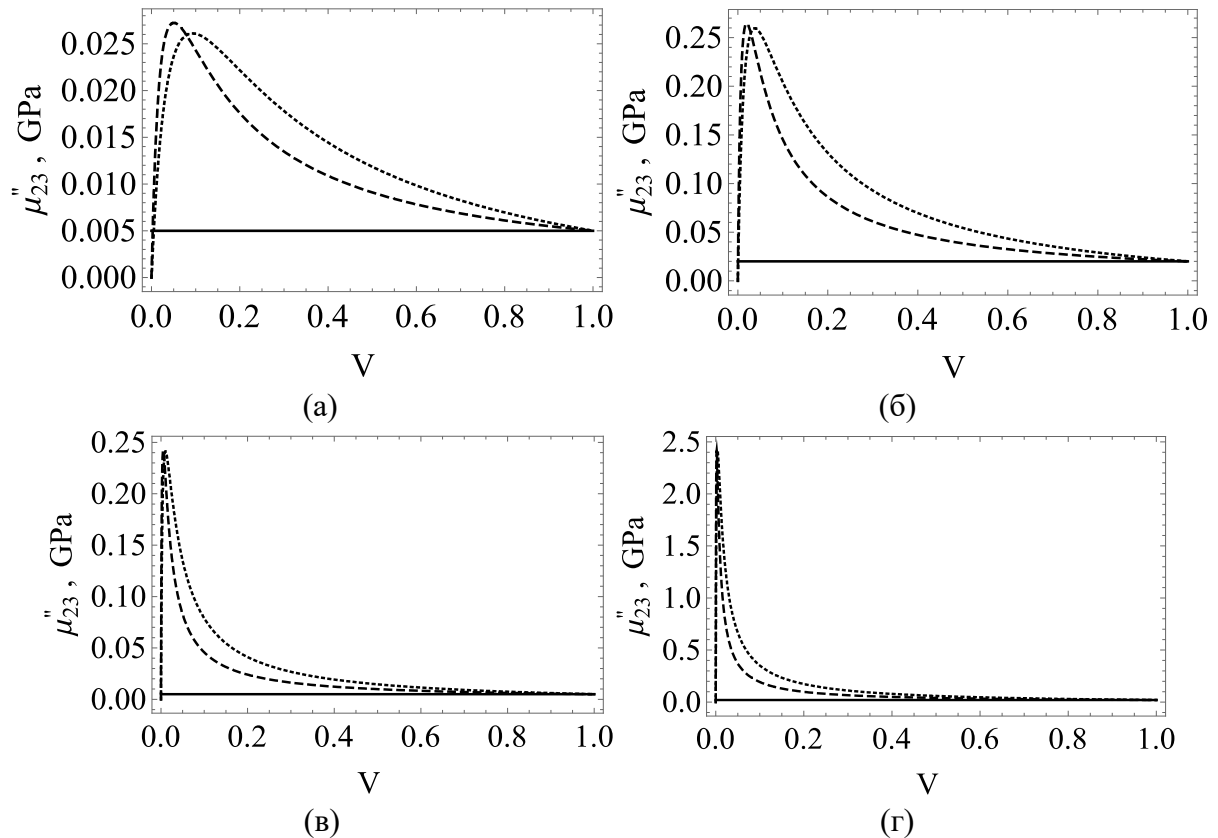
- Углеродные нанотрубки (УНТ),  $E_{CNT}=1100$  [ГПа]
- Нанопроволоки из оксида цинка (ZnO),  $E_{ZnO}=140$  [ГПа].

Определены уровень и характер влияния жесткости вискерсов на демпфирующие свойства межфазного слоя в зависимости от объемной доли связующего.

Рассмотрены 2 варианта матрицы межфазного слоя:

- Эпоксидная, с малым демпфированием,  $E_{Ep}=2,5+0,005i$  [ГПа]
- Вязкоупругий полимер при температуре ниже температуры стеклования ( $T < T_g$ ),  $E_{BT}=1+0,02i$  [ГПа].

Определены уровень и характер влияния модуля потерь матрицы на демпфирующие свойства межфазного слоя в зависимости от объемной доли связующего в межфазном слое.

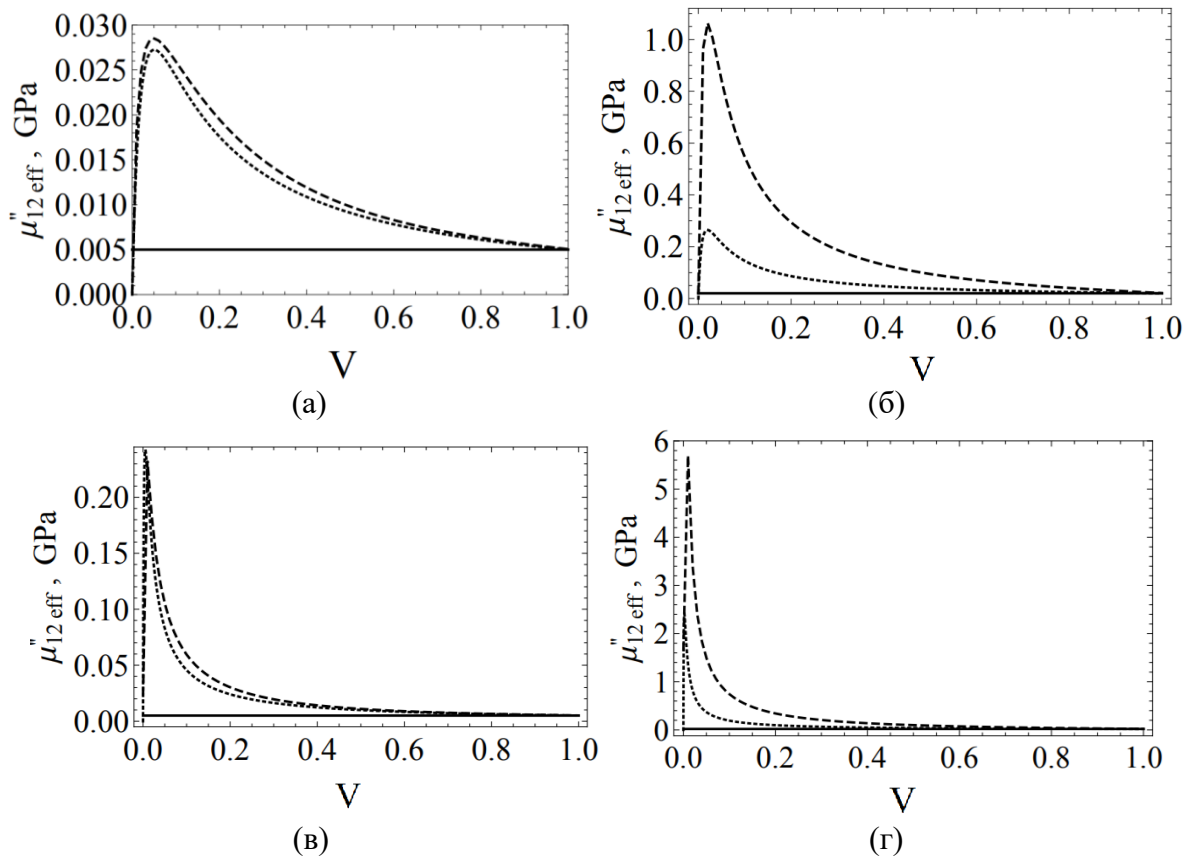


**Рис. 6.** *Модуль потерь продольного сдвига  $\mu_{23}$  вискеризованного слоя.*  
 метод трех фаз (....), метод Рейсса (- - -), исходная матрица (\_\_\_\_),  
 (а)- ZnO + эпоксидная матрица; (б)- ZnO + вязкоупругий полимер ( $T < T_g$ ),  
 (в)- УНТ + эпоксидная матрица; (г)- УНТ + вязкоупругий полимер ( $T < T_g$ ).

Эффекты для модуля потерь продольного сдвига:

1. Метод Рейсса показывает стабильно более низкие результаты относительно метода трех фаз во всем диапазоне концентраций.
2. Межфазный слой на основе вязкоупругого полимера при  $T < T_g$  показывает для случаев с тем же армированием, что вариант для эпоксидной матрицы на порядок большие характеристики в пиковых значениях, нас же интересует диапазон, когда  $V > 0,1$ , в котором наблюдаем характерный ускоряющийся рост свойств, при увеличении доли включений.
3. Слой, армированный вискерсами из УНТ, за счет значительно большей жесткости, обеспечивает стабильно большие эффективные характеристики, относительно слоя с

вискерсами ZnO. Так, например, в рассматриваемом модуле потерь продольного сдвига, при доле связующего  $V=0,5, 0,3, 0,1$ , рост эффективного модуля составит, по отношению к модулю потерь исходной матрицы 2-3, 3.5-6 и 12-22 раз соответственно для слоя, армированного УНТ, и 2-2.5, 3-5 и 8-11 раз для слоя вискеризованного ZnO. Как видно, характеристики модуля потерь слоя, армированного УНТ, ускоряясь растут как по отношению к исходному модулю матрицы, так и относительно значений слоя армированного ZnO при  $V=0,1$  достигая двукратного преимущества, и далее увеличиваясь до десятикратного.



**Рис. 7.** *Модуль потерь поперечного сдвига  $\mu''_{12}$  вискеризованного слоя.*  
метод трех фаз (.....), метод Рейсса (- - - -), исходная матрица (\_\_\_\_),  
(а)- ZnO + эпоксидная матрица; (б)- ZnO + вязкоупругий полимер ( $T < T_g$ ),  
(в)- УНТ + эпоксидная матрица; (г)- УНТ + вязкоупругий полимер ( $T < T_g$ ).

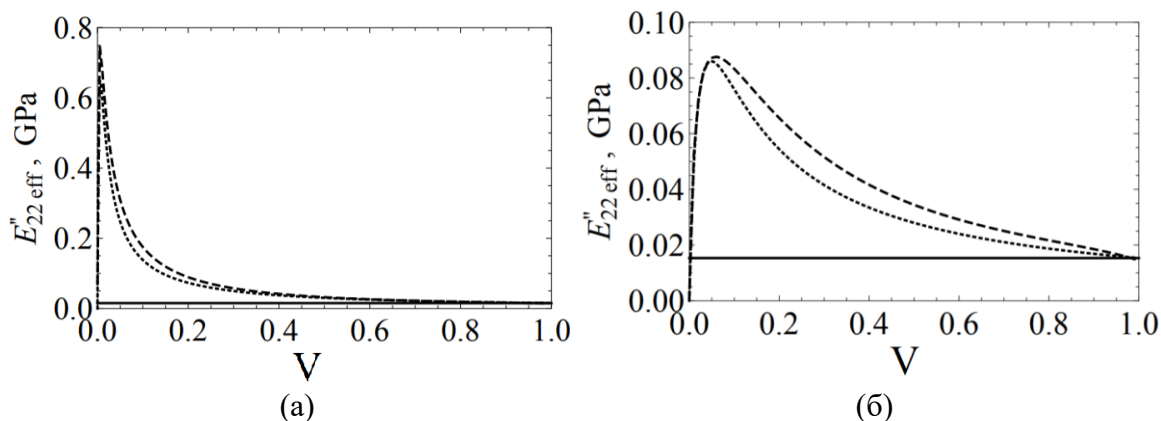
Эффекты для модуля потерь поперечного сдвига:

4. Характерная зависимость роста модуля потерь поперечного сдвига в межфазном слое от применяемых материалов аналогична зависимости модуля потерь продольного сдвига.

5. Наблюдается значительный рост результатов применяемого метода трех фаз над методом Рейсса для больших отношений жесткости вискерса к модулю потерь матрицы, достигая 4 раз для случая УНТ и эпоксидной матрицы и более 2 раз для УНТ и



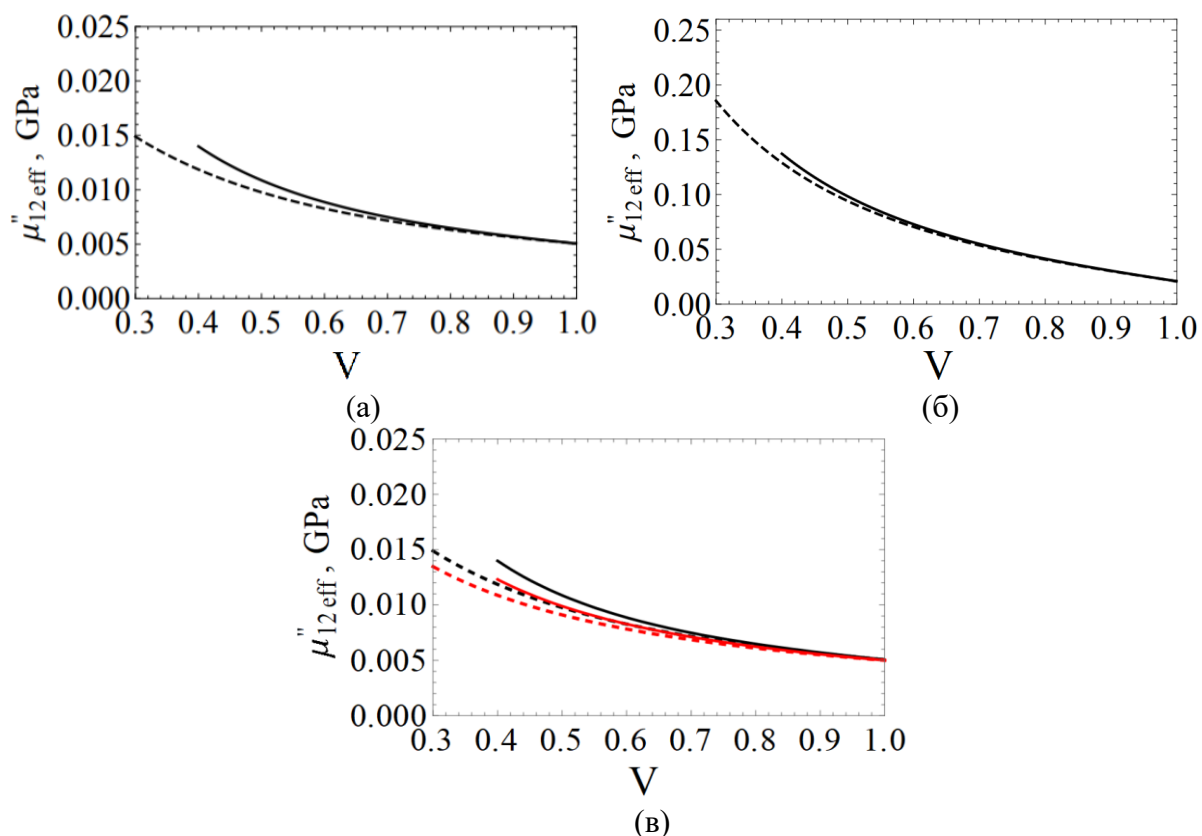
вязкоупругого полимера при  $T < T_g$ . Стоит учесть, что результаты для модуля потерь продольного и поперечного сдвига, полученные по методу Рейсса идентичны друг другу.



**Рис. 8.** Поперечный модуль потерь  $E''_{22}$  вискеризованного слоя.

метод трех фаз (....), метод Рейсса (- - -), исходная матрица (\_\_\_),

(а)-УНТ+вязкоупругий полимер( $T < T_g$ ); (б)-ZnO+вязкоупругий полимер( $T < T_g$ )



**Рис. 9.** Модули потерь поперечного сдвига  $\mu''_{12}$  при различных случаях сравнения:

(а)- УНТ (\_\_\_), ZnO (- - -) + эпоксидная матрица, (б)- УНТ (\_\_\_), ZnO (- - -) +

вязкоупругий полимер ( $T < T_g$ ), (в)- Сравнение методов осреднения и материала вискерсов в

случае применения эпоксидной матрицы в межфазном слое: УНТ по методу трех

фаз(\_\_\_\_),УНТ по Рейссу (\_\_\_\_),ZnO по методу трех фаз (- - - -),ZnO по Рейссу (- - - -).

Эффекты для поперечного модуля потерь:

6. Характер распределения поперечного модуля потерь аналогичен модулям потерь сдвига, однако имеет меньшие абсолютные значения, что дает более равномерное распределение характеристик по объемным концентрациям и дает более выраженный рост с меньших объемных концентраций вискерсов в слое.

На Рис. 9 более наглядно показаны описанные эффекты:

- О преимуществе применения вязкоупругого полимера в качестве матрицы межфазного слоя (на примере сравнения Рис.9(а) и 9(б)).
- О преимуществе вискерсов из УНТ над вискерсами из ZnO (сплошные линии на всех графиках выше пунктирных).
- О больших величинах искомых модулей потерь при применении метода трех фаз (Рис.9(в), красные графики определенные по методу Рейсса ниже черных метода трех фаз).

**В четвертой главе** даны оценки эффективных демпфирующих свойств композитов, связанных с трансверсальными деформациями, которые строятся с учетом демпфирующих свойств вискеризованных слоев. Рассмотрены варианты применения трех различных связующих в межфазном слое:

- эпоксидная матрица,  $E_{Ep} = 2,5 + 0,005i$  [ГПа]
- вязкоупругий полимер при ( $T = T_g$ ),  $E_{BT} = 1 + 0,02i$  [ГПа]
- вязкоупругий полимер при ( $T < T_g$ ),  $E_{HT} = 0,01(1+i)$  [ГПа]

При определении характеристик межфазного слоя для расчета можно использовать уже известные методы осреднения: метод трех фаз, изложенный в главе 2, данной диссертации, либо метод Рейсса, обобщенный для трехфазной структуры.

Для приближенной оценки эффективных динамических свойств композита в целом, характера изменения полученных свойств от параметров микроструктуры (матрица, вискерс, концентрация), использовался метод осреднения Рейсса, обобщенный на трехфазную систему. Так же рассмотрен вязкоупругий полимер при температуре стеклования  $T_g$  в качестве третьего варианта матрицы межфазного слоя, определен характер его влияния на поведение композита в целом.

Эффективный продольный модуль сдвига вдоль волокна  $\mu_{23}^{eff}$  по методу осреднения Рейсса, обобщенный на трехфазную систему имеет следующий вид:

$$1/\mu_{23}^{eff} = V_1(1/\mu_{23}^{(1)}) + V_1(2\Delta/d)(1/\mu_{23}^{(2)}) + V_3(1/\mu_{23}^{(3)}) \quad (17)$$

$$V_1 = (1 - V_3)/(1 + 2\Delta/d) \quad (18)$$

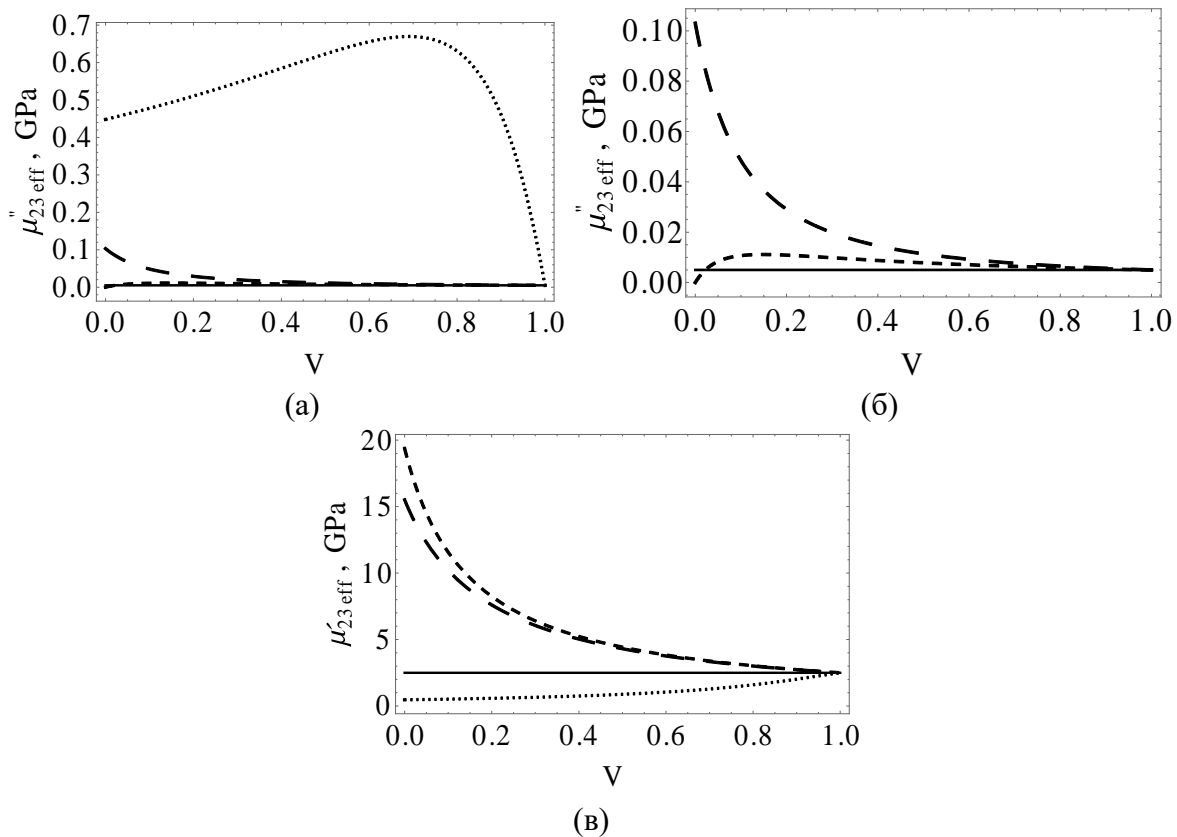
Где  $V_3$  - общая объемная доля связующего,  $\Delta$  - толщина вискеризованного слоя (длина вискера),  $d$  - диаметр базового волокна,  $\mu_{23}^{(1)}$  - продольный модуль сдвига волокна,  $\mu_{23}^{(2)}$  - поперечный модуль сдвига межфазного слоя,  $\mu_{23}^{(3)}$  - модуль сдвига эпоксидной матрицы.

Поперечный модуль по методу осреднения Рейсса, обобщенный на четырехфазную систему имеет следующий вид:

$$1/E_{22}^{eff} = V_1(1/E_{22}^{(1)}) + V_1(2\Delta/d)(1/E_{22}^{(2)}) + V_3(1/E_{22}^{(3)}) \quad (19)$$

Где  $E_{22}^{(1)}$  - модуль упругости поперек волокон,  $E_{22}^{(2)}$  - модуль Юнга вдоль волокон вискеризованного слоя,  $E_{22}^{(3)}$  - модуль упругости эпоксидной матрицы.

Далее приводятся результаты для модуля продольного сдвига вискеризованного слоя с наноструктурой на основе ZnO.



**Рис. 10.** Эффективный модуль потерь продольного сдвига  $\mu''_{23,eff}$  и действительный модуль продольного сдвига  $\mu'_{23,eff}$  модифицированного композита, на основе эпоксидной матрицы и углеродного волокна IM7, межфазный слой на базе вискерсов из ZnO и одной из матриц: вязкоупругий полимер при ( $T=T_g$ ) (.....), эпоксидная матрица (- - -), вязкоупругий полимер при ( $T < T_g$ ) ( \_ \_ \_ ), базовая эпоксидная матрица (\_\_\_\_), (а) модули потерь, (б) модуль потерь эпоксидной матрицы в межфазном слое (- - -) и вязкоупругого полимера при ( $T < T_g$ ) ( \_ \_ \_ ), (в) механические характеристики (действительный модуль).

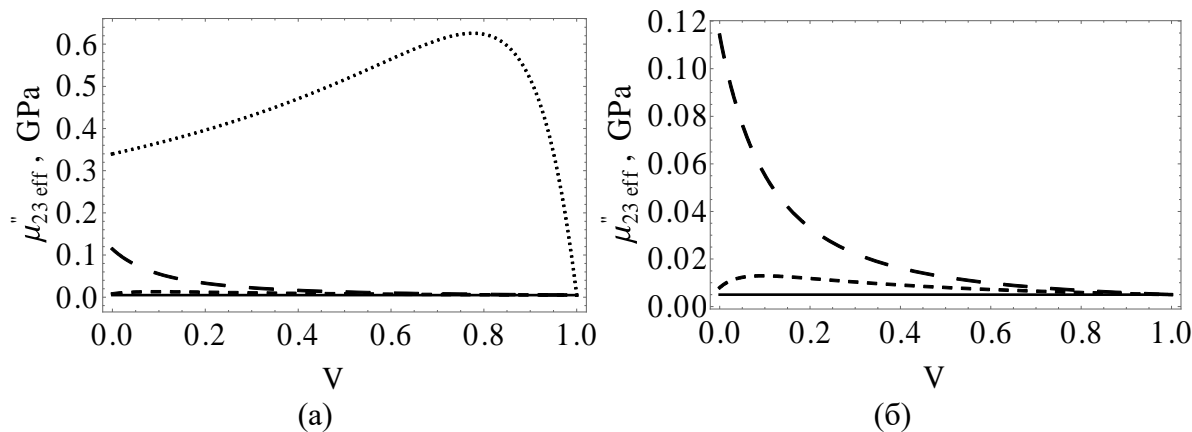
Для определения эффективных характеристик вискеризованного композита использованы полученные в Главе 3 значения модулей. Так же, в качестве примера, рассмотрим поведение композита с вязкоупругой матрицей межфазного слоя при температуре стеклования  $T_g$ , чей модуль обладает малой величиной, по сравнению с двумя другими рассматриваемыми матрицами, величиной упругой составляющей, но большой, по отношению к ней демпфирующей составляющей

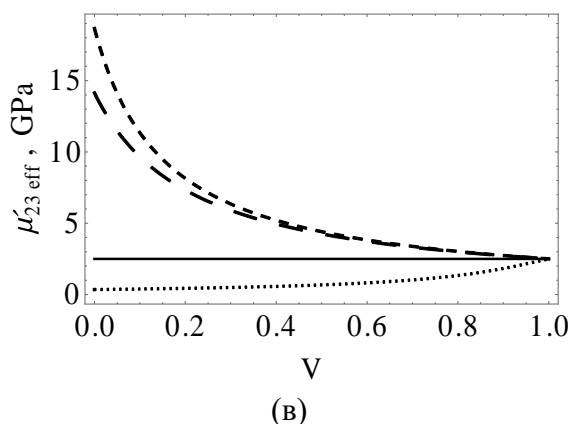
Увеличение масштаба по вертикальной оси на Рис.10(б) указывает важный эффект, что даже при температуре ниже стеклования почти везде модуль потерь превышает модуль матрицы (0.005) а при высоких концентрациях волокон почти в 5-10 раз.

При повышении содержания волокон с вискерсами, значения модуля сдвига системы может быть существенно выше, чем матрицы, за счет высоких свойств межфазного слоя.

Если использовать в вискеризованном слое матрицу (с вязкоупругими свойствами) или полимер при ( $T < T_g$ ), то растет динамический модуль, при падении модуля потерь. При этом высокими остаются демпфирующие свойства. Если же использовать полимер на ( $T = T_g$ ), то можно получить композит с очень высоким демпфирующими характеристиками (более чем в 100 раз по отношению к базовой эпоксидной), но с потерей механических свойств примерно в 1.5, 2 раза в зависимости от содержания волокон. Оптимизация не проводилась.

Использование углеродных нанотрубок в качестве основы для вискеризации приводит к некоторому повышению демпфирующих свойств вискеризованного слоя, как это было показано в главе 3. Однако это увеличение оказывается незначительным. Тем не менее использование вискеризованных слоев с УНТ является предпочтительным, так как следуя публикациям, при этом не теряется прочность базовых волокон. Результаты, приведенные на (Рис. 11) подтверждают тот же вывод для продольного модуля сдвига вискеризованного слоя с углеродными нанотрубками.





**Рис. 11.** Эффективный модуль потерь продольного сдвига  $\mu''_{23eff}$  и действительный модуль продольного сдвига  $\mu'_{23eff}$  модифицированного композита, на основе эпоксидной матрицы и углеволокна ИМ7, межфазный слой на базе вискерсов из УНТ и одной из матриц: вязкоупругий полимер при ( $T=T_g$ ) (.....), эпоксидная матрица (- - -), вязкоупругий полимер при ( $T<T_g$ ) ( \_ \_ \_), базовая эпоксидная матрица (\_\_\_\_), (а) модули потерь, (б) модуль потерь эпоксидной матрицы в межфазном слое (- - -) и вязкоупругого полимера при ( $T<T_g$ ) ( \_ \_ \_), (в) механические характеристики (действительный модуль).

#### **Приведем некоторые промежуточные выводы:**

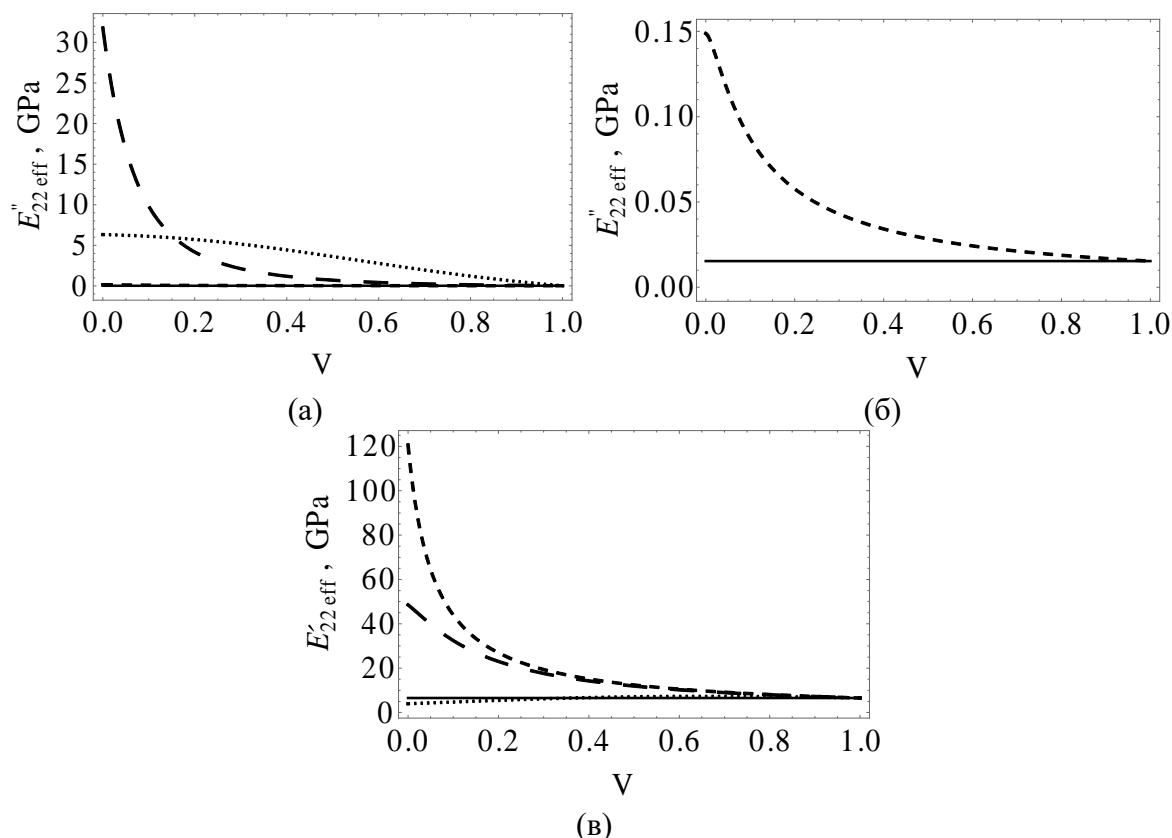
- Продольный модуль фактически не имеет диссипативных свойств, что и ожидалось.
- Для трансверсальных модулей сдвига реализуются высокие демпфирующие свойства особенно при использовании вязкоупругого полимера на температуре стеклования, хотя соответствующие механические свойства падают. Этот факт не должен особенно пугать, так как высокие механические свойства таких композитов реализуются за счет волокон. Именно такие структуры и считаются предпочтительными.

- В качестве матрицы вискеризованного межфазного слоя предпочтительнее использовать вязкоупругий полимер с характеристиками на температуре стеклования для получения сверхвысоких демпфирующих свойств, и полимера при температуре ниже температуры стеклования, несмотря на меньшее значение демпфирующего модуля, но большего динамического модуля упругости относительно варианта, когда используется общая эпоксидная матрица. Поскольку нас интересует характер поведения демпфирующих свойств, рассматриваемого межфазного слоя, лежащие в плоскости трансверсальной изотропии материала, расположенной перпендикулярно оси базовых волокон, скорее отвечают за скрепляющую и формообразующую роль волокнистого композита.

Эффективные характеристики поперечного модуля Ниже приводятся оценки поперечного модуля, даются зависимость изменения модуля потерь и динамического

модуля. То что ранее было для модулей продольного и поперечного сдвига- здесь для поперечных характеристик.

Приведенные характеристики показывают, что в данном случае, хотя характерные зависимости и остаются такими же, как и в случае модуля сдвигов, имеет место увеличение модуля потерь и в случае использования полимера при температуре ниже температуры стеклования, при этом большим остается важная трансверсальная характеристика- динамический модуль. Демпфирующие свойства могут вырасти на порядки.



**Рис. 12.** Эффективный поперечный модуль потерь  $E''_{22eff}$  и упругости  $E'_{22eff}$  модифицированного композита на базе эпоксидной матрицы и углеродного волокна IM7, межфазный слой на базе вискерсов из ZnO и одной из матриц: вязкоупругий полимер при ( $T=T_g$ ) (.....), эпоксидная матрица (- - -), вязкоупругий полимер при ( $T<T_g$ ) (- \_ -), базовая эпоксидная матрица (\_\_\_), (а) модули потерь, (б) модуль потерь в случае эпоксидной матрицы в межфазном слое, (в) механические характеристики (действительный модуль)

Можно заключить следующее:

- Предпочтительно использование вязкоупругого полимера в слое вискеризации, особенно при температурах  $T_g$
- Использование полимера на температурах ниже температур стеклования приводит к некоторому увеличению демпфирующих свойств композита по сравнению с

невискеризованными композитами (примерно в 1.5 раза) одновременно с ростом механических свойств.

- Для поперечного модуля имеется существенное увеличение модуля потерь, что следует учитывать при проведении проектировочных расчетах слоистых композитов.

- Использование УНТ в качестве системы для вискеризации повышает одновременно и демпфирующий модуль и динамический модуль. Уточняющие расчеты по методу трех фаз показывают, что трансверсальные характеристики демпфирования с вискерсами из УНТ в таких уточнениях увеличиваются более существенно, чем для вискерсов из ZnO.

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

**1.** Предложенная новая процедура модификации волокнистого композита за счет вискеризованного слоя приводит к существенному повышению эффективного модуля потерь. Эффективный модуль потерь может быть существенно увеличен по сравнению с модифицированными композитами, полученными на основе эпоксидной матрицы и по сравнению с модулем потерь самой эпоксидной матрицы (более чем в 100 раз по сравнению с модулем потерь эпоксидной матрицей (Рис.10а, Рис.11а)). Эффективные свойства меняются в таком случае незначительно, и все полезные характеристики и особенности модифицированных волокнистых композитов остаются неизменно высокими.

**2.** Показано, что для оценки диссипативных характеристик возможно использование приближенной процедуры оценки модулей потерь и динамических характеристик, основанной на обобщении соотношений Рейса на трехфазный композит. Более точная процедура вычисления эффективных свойств, основанная на методе трех фаз дает несколько большие значения для эффективных характеристик модуля потерь, однако не меняет принципиально зависимость для модуля потерь.

**3.** Показано, что на базе модифицированных композитов можно получать новые типы конструкционных волокнистых композитов с повышенными демпфирующими свойствами и с минимальной потерей механических свойств за счет использования вязкоупругих полимеров в качестве связующего в вискеризованном слое. Разработана методика оценки свойств вискеризации и композита в целом.

**4.** Показано, что с точки зрения повышения эффективных свойств диссипации предпочтительным является полимер при  $T_g$  в вискеризованном слое. При этом трансверсальные свойства демпфирования повышаются более чем на порядок.

**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ****В рецензируемых научных изданиях и журналах:**

1. A.A. Dudchenko, S.A. Lurie, S.V. Makovskij and K.K. Shramko.: *Stress-strain state of the interfacial layer in a visco-composite composite with longitudinal shear* // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Vol. 683, 2019.

DOI: 10.1088/1757-899X/683/1/012036

2. Кривень Г.И., Маковский С.В.: *О демпфирующих свойствах вискеризованного слоя в модифицированных волокнистых композитах т. Влияние характеристик вискерсов на эффективный продольный модуль сдвига композиционных материалов, армированных вискеризованными волокнами* // Труды МАИ, №114, 2020, DOI: 10.34759/trd-2020-114-03

**В других научных изданиях и журналах:**

3. С.А. Лурье, Е.Д. Лыкосова, Маковский С.В. *Об аномальных демпфирующих свойствах композитов с вязкоупругими покрытиями* // Современные проблемы математики и механики. Материалы международной конференции, посвященной 80-летию академика В.А. Садовниченко, МАКС Пресс (Москва), 2019, стр. 758,

DOI: 10.29003/m978-5-317-06111-1