

На правах рукописи



Кривень Галина Ивановна

**ПРОЧНОСТЬ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ
КОМПОЗИТОВ С ВИСКЕРИЗОВАННЫМИ ВОЛОКНАМИ**

Специальность: 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2019 г.

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Рабинский Лев Наумович

Официальные оппоненты: **Белов Петр Анатольевич**
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ФГБУН
«Институт прикладной механики
Российской академии наук»;

Ченцов Александр Викторович
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
лаборатории механики технологических
процессов, института проблем механики
им. А.Ю. Ишлинского РАН.

Ведущая организация: МГУ имени М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится 11 декабря 2019 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 при ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»
https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=107756

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.05

Федотенков Г.В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. Волокнистые композиционные материалы и слоистые композиты на их основе, определяют широкий класс конструкционных материалов, широко используемых последние десятилетия в авиационной, космической, химической, автомобильной и других отраслях промышленности, благодаря высокой удельной весовой прочности, жесткости, химической стойкости, уникальным комплексам физических свойств и пр. Однако эффективность использования конструкционных композиционных материалов в реальных приложениях существенно снижается из-за того, что для таких материалов, созданных на основе волокнистых композитов, характерна низкая трансверсальная прочность и также связанные с этим эффекты накопления рассеянных напряжений и деградации эффективных механических свойств в процессе эксплуатации.

С целью улучшения трансверсальных свойств конструкционных композитов во всем мире ведутся интенсивные поисковые работы новых видов волокнистых композитов таких как, гибридные композиты, модифицированные композиты с вискеризованными волокнами. Например, согласно экспериментальным результатам, при выращивании на поверхности вискеризованного слоя из углеродных нановолокон «Фуззи», межфазная сдвиговая прочность модифицированного композита увеличивается на 206 % по сравнению с классическим волокнистым композитом. В связи с этим, несомненно, являются актуальными исследования в области механики композитов, направленные на создание, проектирование, моделирование свойств и оценку прочности нового класса композитов, в которых хотя бы частично решается проблема повышения трансверсальной и межслойной прочностей.

В данной работе рассматриваются модифицированные волокнистые композиты с вискеризованными волокнами, в которых наличие

дополнительной микро- наноструктуры на поверхности волокон - межфазного вискеризованного слоя на волокнах улучшает трансверсальные прочностные характеристики. Поэтому диссертационная работа, в которой на основе многомасштабного анализа исследуются эффективные характеристики и оценивается прочность таких модифицированных композитов, является актуальной.

На прочностные свойства модифицированных композитов оказывают влияние объемное содержание волокна, объемное содержание вискерсов в межфазном слое, длина вискерсов, диаметр вискерсов, материалы, из которых изготовлены элементы структуры модифицированного композита и другие характеристики, поэтому оценка прочности таких композитов с учетом параметров структуры представляется важной актуальной проблемой. В связи с этим, разработка математических методов оценки прочности модифицированных волокнистых композитов с вискеризованными волокнами, учитывающих физические и геометрические характеристики элементов структуры и выявление рациональных распределений элементов структур при конкретном виде нагружения представляет собой актуальную проблему, имеющую важное прикладное и теоретическое значение.

Целью работы является определение напряженно-деформированного состояния в элементах структуры модифицированного композита с вискеризованными волокнами при статическом нагружении. Целью работы также является разработка метода оценки прочности модифицированного композита с вискеризованными волокнами и оценка влияния объемного содержания волокна и длины вискерсов на прочностные характеристики модифицированного композита с последующим прочностным анализом структур модифицированного композита при воздействии определенного вида нагружения. Для реализации методики расчета прочности необходимо использовать методы расчета жесткостных свойств модифицированных композитов на разных

масштабных уровнях, поэтому разработка эффективных методов также является целью работы.

Объектом исследований являются модифицированные композиты с вискеризованными волокнами, особенно новые типы таких композитов, вискеризованный слой которых образован углеродными нановолокнами.

Методы исследования. Для определения напряженно-деформированного состояния в элементах структуры модифицированного композита с вискеризованными волокнами разрабатывалась и реализовывалась многомасштабная микро модель. На первом микроуровне рассматривалась модель межфазного слоя вокруг базового волокна. Следующий масштабный уровень связан с изучением неоднородной композитной структуры, состоящей из трех фаз: базового волокна, вискеризованного межфазного слоя и матрицы. Расчет эффективных свойств вискеризованного межфазного слоя, ячейки композита в целом и напряженно-деформированного состояния в элементах структуры проводился с использованием теории упругости ортотропного тела и процедуры, основанной на самосогласованном методе «трех фаз», реализованном в цилиндрических координатах для четырех фаз. Аналитические представления решений ортотропной теории упругости, полученные на промежуточном этапе в процедуре определения эффективных свойств, используются в работе для анализа влияния геометрических и физических характеристик структуры (объемного содержания базового волокна и длины вискерсов в межфазном слое) на напряженно-деформированное состояние в элементах структуры модифицированного композита.

Научная новизна работы определяется следующими полученными результатами:

- предложен метод построения и реализации замыкающего соотношения в системе уравнений определяющих эффективные

характеристики модифицированных композитов с использованием новой процедуры определения эффективного модуля поперечного сдвига;

- определены локальные поля напряжений во всех компонентах модифицированного композита для следующих видов нагружения: одноосное растяжение, сдвиг в направлении вдоль волокна, чистый сдвиг в направлении поперек волокна, всесторонняя нагрузка в направлении поперек волокна;

- предложен метод оценки несущей способности модифицированного композита, согласно которому прочность композита определяется слабой фазой;

- оценено влияние параметров структуры на прочность, выявлены параметры, оказывающие основное влияние на прочность композита и, в зависимости от вида нагружения, предложена рациональная структура таких композитов.

Практическая ценность работы заключается:

- в разработке методики оценки прочности модифицированных композитов с вискеризованными волокнами, учитывающей структурные особенности таких композитов;

- результатах, полученных с использованием предложенной методики, которая качественно согласуется с результатами испытаний проведенными другими авторами.

Достоверность результатов обосновывается использованием строгих подходов теории упругости, механики композитов и математических приемов, а также совпадением результатов, полученных автором, с экспериментальными данными, приведенными в литературе и результатами других авторов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- аналитические и численно-аналитические решения задач определения эффективных свойств модифицированного композита и напряженно-деформированного состояния в элементах структуры

модифицированного композита с вискеризованными волокнами при различных видах нагружения. В частности, предложен новый способ определения эффективного модуля поперечного сдвига в случае нагружения композита чистым сдвигом в плоскости перпендикулярной волокнам, который позволяет обойти, возникающую в общем случае, нелинейную алгебраическую проблему;

- метод оценки несущей способности модифицированного композита с вискеризованными волокнами, позволяющий оценить прочностную эффективность модифицированного волокнистого композита по сравнению с классическим волокнистым композитом при том же самом объемном содержании волокна;

- численные результаты по оценке несущей способности модифицированных композитов с учетом геометрических и жесткостных параметров - различных объемных содержаний волокон и длин микро-наноразмерных вискерсов для различных видов нагружения.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

1 На XII Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Уфа, август 2019 г.;

2 Научном семинаре им. А. Г. Горшкова «Проблем механики деформируемого твердого тела и динамики машин», Московского авиационного института (Национального исследовательского университета) «МАИ», Москва, сентябрь 2019 г.;

3 V международном научном семинаре «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы»;

4 Научно-исследовательском семинаре факультета «Современные проблемы математики и механики» под руководством В.И. Горбачева МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, сентябрь 2019 г.;

5 Междисциплинарном семинаре с международным участием «Методы многомасштабного моделирования и их приложения» под руководством академика РАН Е.И. Моисеева, д.ф.-м.н. проф. С.А. Лурье, д.ф.-м.н. проф. С.Я. Степанова, ВЦ РАН ФИЦ ИУ РАН, Москва, сентябрь 2018 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ, включая 2 научные статьи в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ и 2 научные статьи в международных журналах, входящих в базу данных Scopus и Wbs.

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и одного приложения, содержит 145 страниц основного текста, 6 страниц списка литературы и 4 страниц приложений.

Основное содержание работы

Во введении проводится анализ состояния прикладных проблем механики композитов, связанных с модифицированными волокнистыми композитами, определяется цель диссертационной работы и задачи исследований, новизна полученных результатов и их практическая ценность, формулируются основные положения, выносимые на защиту, кратко излагаются результаты диссертации.

В первой главе рассматривается современное состояние разработок модифицированных композитов с вискеризованными волокнами и степень изученности их эффективных и прочностных свойств, влияние геометрических и физических характеристик элементов структуры на конечные свойства. Приводятся основные сведения по прочности композитных материалов и анализируются существующие критерии прочности и возможность их применения к оценке прочности модифицированных композитов с вискеризованными волокнами.

Во второй главе приводятся основные кинематические и физические соотношения для композитного материала в цилиндрической системе координат при различных видах нагружения (чистый сдвиг вдоль волокон, всестороннее нагружение поперек волокон, чистый сдвиг поперек волокон и одноосное растяжение в направлении вдоль волокон). Для каждого вида нагружения приведены определяющие соотношения, уравнения равновесия, краевые условия для определения напряженно-деформированного состояния в элементах структуры однонаправленного модифицированного композита с вискеризованными волокнами (Рисунок 1), и аналитические выражения для определения эффективных свойств модифицированного композита.

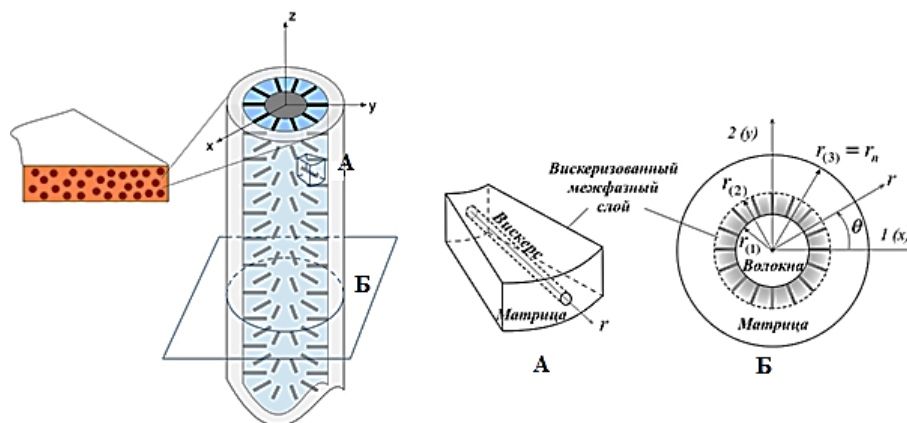


Рисунок 1 – Однонаправленный вискеризованный волокнистый КОМПОЗИТ

А – ячейка вискеризованного межфазного слоя, Б – ячейка вискеризованного волокнистого композита

В рассмотренных задачах для различных видов нагружений полагалось, что вне ячейки задано однородное поле деформаций с амплитудой ε_0 . При этом вводятся следующие кинематические соотношения для различных видов нагружения: в случае сдвига вдоль волокон перемещения вдали от включения имеют вид $u_z(r, \theta) = 2\varepsilon_0 r \cos \theta$, в случае всестороннего нагружения поперек волокон - $u_r = \varepsilon_0 r$, в случае

чистого сдвига поперек волокон - $u_{rr}(r, \theta) = \varepsilon_0 r \cos(2\theta)$,
 $u_{r\theta}(r, \theta) = -\varepsilon_0 r \sin(2\theta)$ и в случае одноосного растяжения вдоль волокон -
 $u_z(z) = \varepsilon_0 z$.

Однонаправленный вискеризованный волокнистый композит рассматривался как неоднородный волокнистый композит, включающий в себя следующие элементы структуры: волокно, вискеризованный межфазный слой, состоящий из матрицы и вискерсов, и матрицу. Волокна являются трансверсально-изотропными с плоскостью изотропии поперек волокна. Матрица и вискерсы считаются изотропными. Вискерсы имеют высокое отношение площади поверхности к объему, выращены перпендикулярно волокну, а также вискеризованные межфазные слои не пересекаются. Очевидно, что межфазный слой имеет переменные свойства в направлении длины вискерсов, однако, согласно оценкам, проведенным в главе 4, рассматриваемая длина вискерсов (от 1 до 2 мкм) не оказывает значительного влияния на эффективные свойства межфазного слоя. В связи с этим полагалось, что свойства межфазного слоя являются постоянными в радиальном направлении, т.е. по длине вискерсов. Кроме этого, вискеризованный межфазный слой считался материалом с трансверсально изотропными свойствами с плоскостью изотропии поперек вискерсов.

Для моделирования модифицированных композитов предлагается использовать многомасштабную модель, в которой для определения напряженно-деформированного состояния, эффективных характеристик в межфазном слое и композите в целом использовалась двухэтапная гомогенизация.

На первом этапе определялись эффективные свойства вискеризованного межфазного слоя с помощью алгоритма метода трех фаз. При этом учитывался тот факт, что эффективные свойства вискеризованного межфазного слоя существенно зависят от

геометрических и механических характеристик компонент вискеризованного слоя. Поэтому объемная доля включений в межфазном слое определялась по формуле:

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

где M_b — число вискерсов, выращенных на поверхности волокна; d_b — диаметр вискерса; l_b — длина вискерса; D — диаметр базового волокна.

На втором этапе, также с использованием метода трех фаз, но расширенного на многофазную модель и адаптированного для микромоделей модифицированного композита с вискеризованными волокнами, определялись эффективные свойства ячейки вискеризованного композита и определялись напряженно-деформированные состояния в элементах структуры. Для определения эффективных свойств ячейки вискеризованного композита и напряженно-деформированных состояний в элементах структуры, исходя из условий непрерывности перемещений и напряжений на границе фаз, условия на бесконечности (внешнего граничного условия) и уравнения Эшелби, формируется система алгебраических уравнений. В число неизвестных полученной системы уравнений входят константы из уравнений напряжений и деформаций в элементах структуры, а также эффективные модули.

При решении задачи чистого сдвига поперек волокон возникает нелинейная система уравнений, решение которой является непростой задачей. Поэтому в работе был предложен метод определения эффективного модуля поперечного сдвига, позволяющий обойти решение нелинейной системы уравнений, и сводящийся к решению квадратного уравнения. Такой метод подходит как для решения задач с классическими волокнистыми композитами, так и с многофазными волокнистыми композитами и включает в себя следующие этапы:

1) Подбор трех приближенных значений эффективного поперечного модуля сдвига,

2) Расчет трех значений детерминантов системы уравнений, с учетом того, что вместо неизвестного эффективного поперечного модуля сдвига подставляются соответствующие подобранные значения x_1, x_2, x_3 ,

3) На основе найденных значений детерминантов формируется система из трех квадратных уравнение вида:

$$\begin{cases} Lx_1^2 + Mx_1 + N = D_1, \\ Lx_2^2 + Mx_2 + N = D_2, \\ Lx_3^2 + Mx_3 + N = D_3, \end{cases} \quad (1)$$

где D_1, D_2, D_3 - найденные значения детерминантов, L, M, N – искомые постоянные.

Решением системы (1) являются константы L, M, N , необходимые для формирования квадратного уравнения

$$Lx^2 + Mx + N = 0, \quad (2)$$

где x – искомое значение эффективного поперечного модуля сдвига μ_{12}^{N+1} .

4) На заключительной стадии эффективный модуль сдвига находится аналитически как положительный корень уравнения (2).

Реализованная новая процедура оказалась эффективной.

В третьей главе анализируется напряженно-деформированное состояние в элементах структуры модифицированного композита в зависимости от объемного содержания включения – волокна и длины вискерсов (Таблица 1). Для этого были найдены численные значения упругих констант в элементах структуры, физические характеристики которых представлены в таблице 2 и построены графики распределения напряжений и деформаций в элементах структуры, иллюстрирующие напряженно-деформированное состояние в элементах структуры модифицированных композитов с различным объемным содержанием волокон и длиной вискерсов (Таблица 2), при различных видах нагружения.

Таблица 1

Наименование Композита	Объемное содержание включения, %	Длина вискерсов, мкм
Модифицированный композит 1	24	
Модификация 1.1	24	1
Модификация 1.2	24	2
Классический композит 1	24	0
Модифицированный композит 2	17	
Модификация 2.1	17	1
Модификация 2.2	17	2
Классический композит 2	17	0
Модифицированный композит 3	10	
Модификация 3.1	10	1
Модификация 3.2	10	2
Классический композит 3	10	0
Модифицированный композит 4	30	1,5
Классический композит 4	30	0
Модифицированный композит 5	40	1
Классический композит 5	40	0
Классический композит 6 (Традиционный композит)	60	0

Таблица 2

	ФАЗА		
	Волокно	Вискерс	Матрица
Материалы	Т-650	УНТ	Эпоксидная
Размеры			
- Диаметр (мкм)	5 мкм	0,00051 – 0,00085	—
- Длина (мкм)	—	1 – 2	—
Свойства			
- Продольный модуль Юнга, E_L (ГПа)	241	1100	3
- Поперечный модуль Юнга, E_T (ГПа)	14,5	—	—
- Модуль продольного сдвига, μ_L (ГПа)	22,8	—	—
- Модуль поперечного сдвига, μ_T (ГПа)	4,8	—	—
- Коэффициент Пуассона, ν_{LT}	0,27	0,14	0,3

В четвертой главе оценивается несущая способность модифицированных композитов в зависимости от объемного содержания волокна и длины нановолокон вискеризованного слоя. Проводится сравнительный анализ несущей способности вискеризованных композитов по сравнению с классическими волокнистыми композитами с тем же объемным содержанием и традиционными волокнистыми композитами с объемным включением волокна 60 %.

Рассматриваются четыре вида нагружения: нагружение композита чистым сдвигом в направлении вдоль волокон, всестороннее нагружение поперек волокон, чистый сдвиг поперек волокон и одноосное растяжение в направлении вдоль волокон. Для определенности считается, что во всех случаях нагружения задается единичная амплитуда нагрузки вне ячейки $P=1$. Далее, согласно алгоритму расчета эффективных свойств и полей напряжений и деформаций, проводится пересчет, ибо композит с эффективными свойствами, т.е. вдали от включений подвергается воздействию однородной деформацией ε_0 . Для сохранения эквивалентности условий силового нагружения для различных композитов с различной эффективной жесткостью предлагается после определения эффективных жесткостей пересчитывать однородные деформации по формуле

$$\varepsilon_0 = P/E,$$

где P – нагрузка действующая на ячейку композита ($P=1$), под величиной E в зависимости от вида нагрузки понимается соответственно эффективный модуль Юнга E_{33}^{N+1} , эффективный модуль продольного сдвига μ_{23}^{N+1} , эффективный объемный модуль плоской деформации K_{12}^{N+1} или эффективный поперечный модуль сдвига μ_{12}^{N+1} . При этом для определения полей деформаций и напряжений предлагается использовать соотношения, приведенные в главе 2.

Для оценки прочности сначала определяются напряжения и деформации для каждого вида нагружения в слабых фазах вискеризованного волокнистого композита, классического и традиционного волокнистых композитов и используется структурный критерий прочности. В случаях сдвига в направлении вдоль волокон, чистого сдвига в направлении поперек волокон и всесторонней нагрузки в направлении поперек волокон прочность композита определяется прочностью матрицы, а в случае одноосного растяжения вдоль волокон – прочностью волокна. При оценке несущей способности композита используется деформационный критерий прочности по предельным деформациям для матрицы и критерий прочности по предельным напряжениям для волокна.

Расчетные значения напряжений или деформаций, определяющие прочность модифицированного волокнистого композита с вискерсами разной длины в зависимости от вида нагружения, сравниваются с соответствующими значениями, найденными для классических композитов, находящимися в тех же условиях нагружения. Предполагается, что во всех случаях объемное содержание волокна в модифицированном и классическом композите одно и то же.

В таком случае характеристиками прочностной эффективности являются отношение максимальных расчетных деформаций матрицы для классического волокнистого композита $[\varepsilon]$ к максимальным расчетным значениям деформаций в матрице модифицированного волокнистого композита ε

$$n = \frac{[\varepsilon]}{\varepsilon}, \quad (3)$$

и, аналогично, отношение максимальных расчетных напряжений волокна для классического волокнистого композита $[\sigma]$ к максимальным расчетным значениям напряжений в волокне модифицированного волокнистого композита σ

$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma}, \quad (4)$$

Величина n , в случае $n > 1$ показывает во сколько раз может быть увеличена действующая на модифицированный композит нагрузка по сравнению с действующей нагрузкой на классический композит. Другими словами предложенный критерий позволяет определить во сколько раз большую нагрузку может выдержать модифицированный композит по сравнению с классическим волокнистым композитом при том же самом объемном содержании волокон.

Из графиков, представленных в разделе 3, были определены максимальные значения компонент деформаций и напряжений в соответствующих элементах структуры композитов различных модификаций для каждого вида нагружения. Согласно данным, полученным из графиков, для случая сдвига в направлении вдоль волокон, максимальные значения принимают сдвиговые деформации $\varepsilon_{\theta z}(r)$, для случая одноосного растяжения вдоль волокон - осевые напряжения $\sigma_{zz}(r)$, для случая всесторонней нагрузки в направлении поперек волокон - радиальные деформации $\varepsilon_{rr}(r)$, для случая чистого сдвига в направлении поперек волокон - сдвиговые деформации $\varepsilon_{r\theta}(r)$. На основе найденных значений максимальных деформаций или напряжений (в зависимости от вида нагружения) сформированы таблицы, каждая из которых соответствует определенному виду нагружений (например таблицы 3 – 4, соответствующие случаям чистого сдвига вдоль волокон и чистого сдвига поперек волокон соответственно). Также в таблицы занесены значения эффективных модулей, соответствующих виду нагружения, и внесены рассчитанные по формулам (3)-(4) коэффициенты, определяющие несущую способность, при этом несущая способность классического композита принята равной единице.

Также в четвертой главе был описан подход приближенной оценки прочности межфазного слоя, основанный на градиентной теории

упругости, учитывающей эффекты масштаба, и проведен качественный анализ прочности межфазного слоя.

Судя по графику рисунка 2 эффект усиления относительно квадрата предельных напряжений может достигать величины 1.6. Таким образом, проведенный качественный анализ дает основание утверждать, что, в силу эффекта усиления в межфазной волокнистой наноструктуре, из-за эффекта разгрузки слабой фазы и, наоборот, догрузки жесткой фазы, прочность структуры, образованной вискерсами и матрицей, весьма высока по сравнению с прочностью матрицы. Такой анализ позволяет считать, что в рассматриваемой многослойной системе в случаях чистого сдвига вдоль волокна, чистого сдвига поперек волокна и всесторонней нагрузки поперек волокна именно матрица ответственна за разрушение, а проводимая в работе оценка прочности идет в запас.

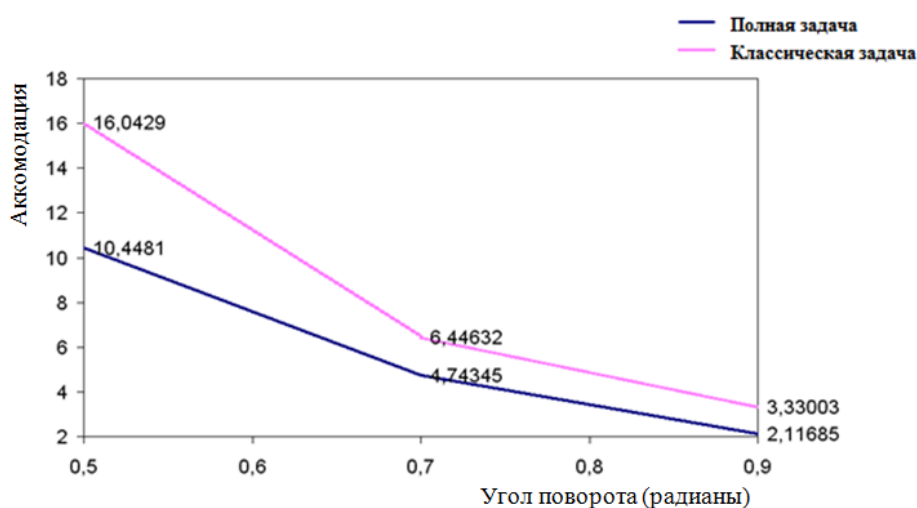


Рисунок 2 - Зависимость коэффициента аккомодации η от угла поворота включений относительно оси OX

В заключении представлены выводы по работе и перечислены основные результаты проведенного исследования.

В приложении представлена интегральная формула Эшелби, используемая в методе трех фаз, применяемого для определения напряженно-деформированного состояния модифицированного композита с вискеризованными волокнами, а также его эффективных свойств.

Таблица 3 – Несущая способность модифицированного композита для случая чистого сдвига вдоль волокон

Наименование Композита	Эффективный модуль продольного сдвига μ_{23}^{N+1} , МПа	Максимальная деформация $\varepsilon_{\theta z}(r)$ (расчетное значение)	Коэффициенты, определяющие несущую способность
Модифицированный композит 1			
Модификация 1.1	2609	0.0017	1.3
Модификация 1.2	3570	0.0013	1.7
Классический композит 1	2046	0.0022	1
Модифицированный композит 2			
Модификация 2.1	2001	0.0027	1.19
Модификация 2.2	2425	0.0022	1.45
Классический композит 2	1708	0.0032	1
Модифицированный композит 3			
Модификация 3.1	1593	0.0044	1.1
Модификация 3.2	1772	0.0039	1.23
Классический композит 3	1454	0.0048	1
Модифицированн ый композит 4	4152	0.00096	1.77
Классический композит 4	2413	0.0017	1
Модифицированн ый композит 5	5243	0.00067	1.64
Классический композит 5	3128	0.0011	1
Классический композит 6	6302	0.00098 (сдвиговая деформация $\varepsilon_{rz}(r)$)	1

Таблица 4 – Несущая способность модифицированного композита для случая чистого сдвига поперек волокон

Наименование Композита	Эффективный модуль поперечного сдвига μ_{12}^{N+1} , МПа	Максимальная деформация $\varepsilon_{r\theta}(r)$ (расчетное значение)	Коэффициенты, определяющие несущую способность
Модифицированный композит 1			
Модификация 1.1	2005	0.0014	1.07
Модификация 1.2	4015	0.00079	1.9
Классический композит 1	1492	0.0015	1
Модифицированный композит 2			
Модификация 2.1	1636	0.0015	1.07
Модификация 2.2	2267	0.0014	1.14
Классический композит 2	1371	0.0016	1
Модифицированный композит 3			
Модификация 3.1	1401	0.0016	1
Модификация 3.2	1628	0.0015	1.07
Классический композит 3	1276	0.0016	1
Модифицированный композит 4	3984	0.0008	1.88
Классический композит 4	1617	0.0015	1
Модифицированный композит 5	3975	0.00081	1.85
Классический композит 5	1843	0.0015	1
Классический композит 6	2643	0.0015	1

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1 На основе метода трех фаз получены эффективные характеристики композита и определены напряженно-деформированные состояния в элементах структуры модифицированного композита с вискеризованными волокнами при различных базовых видах нагружения: чистый сдвиг в направлении вдоль волокон, одноосное растяжение в направлении вдоль волокон, всесторонняя нагрузка в направлении поперек волокон, чистый сдвиг в направлении поперек волокон. При определении эффективных характеристик разработан метод, который позволяет обойти необходимость решения громоздкой нелинейной системы уравнений, возникающей при использовании метода трех фаз для решения задачи нагружения композита чистым сдвигом поперек волокон, и сводящийся к решению квадратного уравнения.

2 Предложен метод оценки прочности модифицированных композитов с вискеризованными волокнами учитывающий достижение предельных состояний в отдельных фазах композита, основанный на структурных критериях прочности по максимальным напряжениям и максимальным деформациям.

3 Установлены важные прикладные аспекты вискеризованных композитов. Показано, что с точки зрения прочности и жесткости в случаях чистого сдвига в направлении вдоль волокон и поперек волокон, а также для случая всесторонней нагрузки поперек волокон предпочтительным оказывается композит с предельным объемным содержанием волокна, ограниченным длиной вискерсов. Такие композиты выдерживают нагрузки, значительно превосходящие нагрузки, выдерживаемые классическими волокнистыми композитами с теми же объемными содержаниями волокна и традиционными волокнистыми композитами с объемным содержанием волокна 60 %. Кроме этого показано, что вискеризованный слой может в некоторой степени

компенсировать уменьшение жесткости волокнистого композита, связанного с уменьшением объемного содержания волокна.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1 Лурье С.А., Рабинский Л.Н., Кривень Г.И., Лыкосова Е.Д. Напряженное состояние в элементах структуры модифицированных волокнистых композиционных материалов с вискеризованными волокнами // Механика композиционных материалов, 2018, т.24, №1, стр. 122-144.

2 Лурье С.А., Кривень Г.И., Рабинский Л.Н. О прочности модифицированного волокнистого композита с вискеризованными волокнами // Композиты и наноструктуры, 2019, т.11, №1, стр. 1-15.

Статьи в рецензируемых изданиях, входящих в базу данных Scopus и Wbs:

1 Volkov-Bogorodsky D.B., Lurie S.A., Kriven G.I.: Modeling the effective dynamic properties of fiber composites modified across length scales // Nanoscience and Technology: An International Journal, 2018, Vol.9, No 2, pp. 117-138.

2 Sergey A. Lurie, Dmitrii B. Volkov-bogorodskii, Galina I. Kriven and Lev N. Rabinskiy, 2018. On estimating structural stresses in composites with whiskerized fibers // International Journal of Civil Engineering & Technology (IJCIET), 2018, Volume:9, Issue:6, Pages: 294-308.

Публикации в других изданиях:

1 Золотова Д.И. Кривень Г.И., Рабинский Л.Н. Исследования структуры и состава композиционного материала на основе алюминия,

армированного волокнами оксида алюминия // Тезисы докладов III международного научного семинара «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы». Москва, МАИ (НИУ), 19-21 октября 2015 г., стр. 64-65

2 Кривень Г.И., Лурье С.А., Рабинский Л.Н. Моделирование эффективных механических и динамических свойств вискеризованных волокнистых // Тезисы докладов V международного научного семинара «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы». Москва, МАИ (НИУ), 17-19 октября 2016 г., стр. 103-105.

3 Кривень Г.И., Лурье С.А., Рабинский Л.Н. Модель определения эффективного поперечного модуля сдвига многофазного композита // Тезисы докладов XXV международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г.Горшкова. 2019. Том 2., стр. 101-102.

4 Кривень Г.И., Рабинский Л.Н., Лыкосова Е.Д. Оценка прочности модифицированного композита с вискеризованными волокнами для случая чистого сдвига поперек волокон // Тезисы докладов XXV международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г.Горшкова. 2019. Том 2, стр. 102-103.