

Проректору по научной работе,
д.т.н., профессору Ю.А. Равиковичу
125993 г. Москва, А-80, ГСП-3
Волоколамское шоссе, д. 4
ФГБОУ ВО Московский
авиационный институт (НИУ)

Уважаемый Юрий Александрович!

Направляем Вам отзыв МГУ имени М.В. Ломоносова как ведущей организации по диссертации Кривень Галины Ивановны на тему «Прочность модифицированных волокнистых композитов с вискеризованными волокнами», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры».

Приложение: Отзыв в 2-х экземплярах.

Проректор МГУ имени М.В. Ломоносова
д.ф.-м.н., профессор

Федянин А.А.



ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № 22
17 20 19

УТВЕРЖДАЮ

Проректор МГУ имени М.В.

Ломоносова,

д.ф.-м.н., профессор

Федянин А.А.



20.11.2019

(дата)

ОТЗЫВ

Отзыв ведущей организации на диссертацию КРИВЕНЬ Галины Ивановны на тему «Прочность модифицированных волокнистых композитов с вискеризованными волокнами», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»

Актуальность темы и цель диссертационной работы

Волокнистые композитные материалы получили свое развитие достаточно давно и активно применяются при изготовлении различных изделий во многих областях техники. Одним из недостатков классических волокнистых композитов являются низкие показатели по трансверсальной прочности, поэтому в последнее время ведутся активные исследования возможностей устранения этого недостатка, например, путем улучшения взаимосвязи волокно-матрица. К таким разработкам относятся и попытки вискеризации волокон, т.е. модификация поверхности волокна микро-жгутами, микро-проволками а также нановолокнами. Анализ экспериментальных исследований действительно показывает, что вискеризация волокон приводит к увеличению трансверсальной прочности модифицированного композита по сравнению с классическим более чем в 2 раза. Тем не менее, известно, что возникают проблемы, связанные с прочностью подобных композитов. Например, зачастую наблюдается уменьшения прочности композита в направлении волокон. В настоящее время существует большое число

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. № 22 / 11 2019

работ по описанию эффективных свойств модифицированных композитов с вискеризованными волокнами, однако прочность таких модифицированных композитов обсуждалась, как правило, только в работах, связанных с экспериментальными исследованиями. Оценка прочности модифицированных композитов на различных масштабных уровнях является несомненно актуальной проблемой. Поэтому диссертационная работа, в которой развивается метод аналитической оценки прочности волокнистых композитов на всех масштабных уровнях (матрица, волокно, вискеризованный межфазный слой) с учетом объемного содержания волокон, длины вискерсов, их объемного содержания в межфазном слое и всего комплекса геометрических и физических параметров модифицированного композита, несомненно, выполнена на актуальную тему.

Научная новизна

В работе разработан метод оценки прочности модифицированных композитов с вискеризованными волокнами, определены локальные поля напряжений и деформаций во всех элементах структуры рассматриваемых модификаций композита с вискеризованными волокнами, возникающие при статическом нагружении композита.

Дан анализ влияния физико-механических характеристик компонент модифицированного композита и параметров вискеризации на уровень напряжений в каждой из фаз композита, включая вискеризованный слой, установлены закономерности формирования напряженного состояния в зависимости от характеристик вискеризации, позволяющие определять оптимальные характеристики структуры модифицированных композитов.

В диссертации определены локальные поля напряжений и деформаций и в элементах структуры высокомодульных классических композитов с теми же объемными содержания волокна, что и в структуре модифицированных композитов и дан сравнительный анализ прочностных свойств с указанием роли межфазного модифицированного слоя.

В диссертации предложена новая методика определения эффективного модуля поперечного сдвига в межфазном слое и в волокнистом композите в целом

при использовании метода трех фаз Эшелби-Кристенсена, основанная на изменении численной процедуры определения решения нелинейной алгебраической системы, возникающей в такого рода задачах за счет появления квадратного уравнения среди системы алгебраических разрешающих уравнений. Предложено вместо прямого численного решения воспользоваться процедурой последовательного решения линейных алгебраических задач, позволяющих найти коэффициенты квадратного уравнения точно, а затем найти точно и решение квадратного уравнения.

Достоверность

При определении полей напряжений и деформаций в элементах структуры модифицированного композита использовался метод трех фаз (в рассматриваемой работе это метод четырех фаз), который построен на строгих подходах теории упругости и механики композитов. Во всех рассматриваемых задачах решения по определению констант, входящих в выражения напряжений и деформаций в элементах структур, сводились к решениям линейных либо нелинейных (задача чистого сдвига поперек волокна) систем алгебраических уравнений, так что достоверность полученных решений легко проверяется. Достоверность полученных результатов подтверждается также физической адекватностью полученных результатов на всех стадиях моделирования и соответствием их результатам, полученными другими авторами и результатам экспериментальных исследований.

Рецензируемая диссертация изложена на 156 страницах, состоит из введения, 4 глав, заключения, приложения и списка литературы, состоящего из 72 наименований.

Первая глава содержит обзор различных видов модифицированных композитов с вискеризованными волокнами. В главе дается анализ степени изученности эффективных свойств модифицированных композитов, подходов к моделированию таких композитов, а также обсуждаются существующие

критерии прочности и применимость их к оценке прочности волокнистых композитов.

Вторая глава посвящена решению четырех задач – одноосного растяжения вдоль волокна, чистого сдвига вдоль волокна, чистого сдвига поперек волокна, всесторонней нагрузки поперек волокна. Для каждой задачи находятся выражения для определения напряженно-деформированного состояния в элементах структуры и эффективных модулей. При решении поставленных задач учитывается, что материалы каждой фазы рассматриваемого модифицированного композита – волокна, вискеризованный межфазный слой и матрицы, обладают разными условиями симметрии. Так волокно считается трансверсально-изотропным материалом с плоскостью симметрии, расположенной поперек волокна, межфазный вискеризованный слой рассматривается как трансверсально-изотропный материал с плоскостью симметрии, расположенной поперек вискерсов, а матрица является изотропным материалом.

Напряженно-деформированное состояние в элементах структуры и эффективные модули модифицированного композита находятся с использованием метода трех фаз, расширенного на многофазную среду, при этом учитываются геометрические и физические характеристики элементов структур. Показано, что использование метода трех фаз для решения задачи чистого сдвига поперек волокна приводит к необходимости решения нелинейной системы уравнений, из которой определяются эффективный модуль поперечного сдвига и константы, входящие в выражения для определения напряженно-деформированного состояния в элементах структуры. В случае, когда рассматривается трехфазная структура композитного материала, система уравнений состоит из 10 линейных уравнений и 2 нелинейных. Решить такую нелинейную систему уравнений аналитически не удастся, при ее численном решении также имеются проблемы, связанные с наличием нелинейности в системе уравнений общего высокого порядка. В рецензируемой диссертационной работе предложен метод, который позволяет обойти необходимость решения нелинейной системы уравнений, и сводящийся к последовательному решению трех линейных алгебраических задач и, на заключительной стадии, точному

решению квадратного уравнения, из которого искомое значение эффективного модуля поперечного сдвига находится как положительный корень уравнений.

Третья глава посвящена анализу влияния объемного содержания волокна и длины вискерсов на распределение напряжений и деформаций в элементах структуры: волокне, вискеризованном межфазном слое и матрице. Анализ проводится на примере композита состоящего из углеродного волокна Т-650, на поверхности которого выращены углеродные нанотрубки и погруженного в слой эпоксидной матрицы. Полученные результаты по напряженно-деформированным состояниям в элементах структуры модифицированного композита сравниваются с напряженно-деформированными состояниями в элементах структуры классического композита с одинаковыми объемными содержаниями волокон.

Четвертая глава посвящена оценке несущей способности модифицированного композита. Для этого была разработана методика оценки прочности модифицированного композита с вискеризованными волокнами, которая позволяет учитывать влияние объемного содержания волокна, длины вискерсов, объемного содержания вискерсов в межфазном слое и иных геометрических и физических параметров на прочность модифицированного композита. Согласно этой методике прочность модифицированного композита контролируется слабой фазой, а именно, в зависимости от вида нагружения, либо высокопрочным волокном, либо податливой матрицей. Такой выбор слабых фаз объяснен характером разрушения волокнистого композита под воздействием различных видов нагрузок. Так, при одноосном растяжении вдоль волокна, разрушение композита связано с разрушением волокна, а при чистом сдвиге вдоль волокон, при чистом сдвиге поперек волокон и при всесторонней нагрузке поперек волокон разрушение может контролироваться либо прочностью матрицы, либо прочностью границы волокно/матрица. В разделе 4.4, посвященном приближенной оценке прочности межфазного слоя по сравнению с прочностью матрицы показано, что прочность структуры, образованной вискерсами и матрицей, оказывается весьма высокой по сравнению с прочностью матрицы за счет масштабных эффектов в нано-структурированных композитах, связанных с разгрузкой слабой фазы (матрицы) и перегрузки жесткой фазы

(углеродных нановолокон). Поэтому считается, что прочность модифицированного композита в случаях чистого сдвига вдоль волокна, чистого сдвига поперек волокна и всесторонней нагрузки поперек волокна контролируется матрицей.

Также в главе приведено сравнение численных значений параметров, характеризующих относительную несущую способность модифицированных и классических волокнистых композитов (без вискеризации). При этом считается, что объемное содержание волокон в модифицированных композитах и классических композитах одно и то же. В целом, вискеризация приводит к увеличению прочности. Кроме этого, приводятся характеристики традиционного волокнистого композита с объемным содержанием волокна 60 %, который наиболее часто встречается в разрабатываемых изделиях. Особое внимание уделяется модифицированному композиту с вырожденным матричным слоем, когда имеет место замещение матрицы вискеризованным слоем. Для таких композитов ожидается наибольшее увеличение прочности при воздействии различных видов нагрузок по сравнению с традиционными композитами.

Результаты, полученные в каждом разделе работы, кратко изложены в выводах, содержащихся в конце соответствующего раздела. Кроме того, имеется общее заключение по всей диссертации.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1 В разделе 4.4. диссертации, описывающем новый способ определения эффективного модуля поперечного сдвига в полной мере не объяснено за счет чего решение нелинейной системы уравнений сводится к решению квадратного уравнения и не доказано, что решением такого квадратного уравнения могут быть только два корня один из которых положительный, а другой отрицательный.

2 Не исследовано влияние объемного содержания вискерсов на прочностные свойства модифицированного композита в то время как сделан значительный анализ по оценке влияния объемного содержания волокна и длины вискерсов на прочностные характеристики. Уместнее было бы сократить объем работ по оценке влияния объемного содержания волокна и длины вискерсов на

прочностные характеристики модифицированного композита и добавить оценку влияния на прочность объемного содержания вискерсов и плотности упаковки вискерсов.

3 Полученные в диссертационной работе аналитические решения по оценке прочности сравниваются с экспериментальными данными, приведенными для модифицированных композитов с иными геометрическими характеристиками элементов структуры.

4 В тексте диссертации имеются опечатки. Так, на странице 48, в формуле, определяющей внешние граничные при чистом сдвиге поперек волокна перемещения вдали от включения имеют вид $u_{rr}(r, \theta) = \varepsilon_0 r \cos(2\theta)$, $u_{r\theta}(r, \theta) = -\varepsilon_0 r \sin(2\theta)$. Тогда напряжения вдали от включения должны иметь вид $\sigma_{rr}(r, \theta) = 2\varepsilon_0 \mu_{12}^{N+1} \cos(2\theta)$, $\sigma_{r\theta}(r, \theta) = -4\varepsilon_0 \mu_{12}^{N+1} \sin(2\theta)$. Аналогично, на странице 48, в контактных условиях, выражения для напряжений в эквивалентной гомогенной среде должны иметь вид $\sigma_{rr}(r, \theta) = 2\varepsilon_0 \mu_{12}^{N+1} \cos(2\theta)$, $\sigma_{r\theta}(r, \theta) = -4\varepsilon_0 \mu_{12}^{N+1} \sin(2\theta)$.

Заключение

Рассмотренная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-техническая проблема. Новизна полученных результатов, их достоверность и практическое значение сомнений не вызывают. Сформулированные замечания относятся больше к форме изложения, а не к сути проделанной работы и не изменяют общего положительного отношения к диссертации. В 8 публикациях автора работы ее содержание изложено достаточно подробно. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Таким образом, рецензируемая диссертация удовлетворяет все критериям, установленным Положением «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Кривень Г.И. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры.

Результаты диссертации докладывались соискателем на заседании аспирантского семинара кафедры механики композитов 23 сентября 2019 г.

Настоящий отзыв рассмотрен и одобрен 11 ноября 2019 г. на заседании аспирантского семинара кафедры механики композитов.

Отзыв составил:

Зав. кафедрой механики композитов
отделения механики механико-
математического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова
д.ф.-м.н., профессор

В.И. Горбачев

Подпись Горбачева В.И. удостоверяю

кан. студия кафедр. Сел.
(Селищева Т.А.)

Контактные данные организации: МГУ имени М.В. Ломоносова
119 234, Российская Федерация, г. Москва, Ленинские горы, д. 1
Телефон: (495) 939-10-00
Факс: (495) 939-01-26
E-mail: info@rector.msu.ru
Официальный сайт: www.msu.ru