



**МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА  
(МГУ)

**МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ**

Ленинские горы, Москва, ГСП-1, 119991  
Телефон: 939-12-44, Факс: 939-20-90

№ \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_

### **ОТЗЫВ**

**официального оппонента о диссертационной работе  
РУСЛАНЦЕВА АНДРЕЯ НИКОЛАЕВИЧА  
“Разработка моделей деформирования полимерных волокнистых слоёв с  
различной укладкой”,  
представленной на соискание учёной степени  
кандидата технических наук по специальности 01.02.04 –  
механика деформируемого твёрдого тела.**

Диссертационная работа Русланцева А.Н. посвящена разработке методики исследования напряжённо деформированного состояния многослойных пластин, когда каждый слой представляет собой однородную среду, перекрёстно армированную волокнами. Такие композиты имеют широчайшее применение в самых разных отраслях гражданского и военного машиностроения. Многие нюансы поведения элементов конструкций из слоистых композитов до сих пор до конца не исследованы. Поэтому тема исследования является актуальной.

В диссертационной работе 172 страницы. Она состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 192 работ. В конце каждой главы приведены краткие выводы по главе.

**Во введении** проводится достаточно полный обзор литературы по теме диссертации. Определяется её место среди похожих по теме изысканий.

**В первой главе** рассматриваются примеры применения волокнистых композитов в элементах конструкций различного назначения. Анализируются подходы к определению реакции этих элементов на статические и динамические нагрузки. Дается обзор известных критериев разрушения анизотропных материалов. Подробно рассмотрен случай матрицы из вязкоупругого материала. Показано, что в макроскопическом

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. №

«1» 10 2018

масштабе композит из вязкоупругой матрицы, армированный упругими волокнами представляет собой вязкоупругий материал, описываемый уравнениями наследственной механики.

**Вторая глава** посвящена экспериментальным методам определения упругих констант слоистых композитов, каждый слой которых представляет собой углерод углеродный волокнит с перекрёстным направлением волокон в слое. Такие материалы находят все большее применение в элементах авиационной и космической техники. Анализ содержания главы показал, что диссертант владеет методиками проведения и обработки экспериментов на современных специализированных комплексах. Приводятся диаграммы растяжения углепластиков и стеклопластиков при различных углах ориентации волокон относительно направления растягивающей силы. Показано, что при углах ориентации волокон близких к направлению растяжения или к перпендикулярному направлению композит является линейно упругим анизотропным материалом. В других случаях анизотропия сопровождается нелинейными эффектами, зависящими от угла между перекрёстными волокнами.

**В третьей главе** анализируются факторы, приводящие к нелинейным эффективным определяющим соотношениям в слоистых композитах, перекрёстно армированных упругими волокнами. Подчёркивается, что нелинейность диаграмм деформирования возникает по причине наличия технологических дефектов изготовления композита, за счёт накопления и развития повреждений в процессе деформации, а также за счёт нелинейных определяющих соотношений компонентов. Кроме этого особо выделяется конструктивный фактор, связанный со схемой армирования. В экспериментах при разных углах перекрёстного армирования выявлено, что в случае армировки почти параллельной и почти перпендикулярной растягивающей силе, диаграммы деформирования пакета линейны. В остальных случаях они нелинейны. Такая нелинейность объясняется существенным влиянием самих макроскопических касательных напряжений, а также нелинейностью диаграммы деформирования при сдвиге в плоскости отдельного слоя. Автором предложена модель, позволяющая по упругим характеристикам отдельного линейно армированного слоя и по его нелинейной сдвиговой диаграмме прогнозировать нелинейное поведение всего пакета. Предложенная модель проверена в экспериментах на образцах из различных угле и стеклопластиков. Очерчены границы применимости модели при статическом нагружении.

**Четвёртая глава.** В этой главе экспериментально изучается ползучесть и релаксация полимерных композиционных материалов, перекрёстно армированных упругими нитями. Материал, как и ранее, представляет собой многослойный пакет, каждый слой которого перекрёстно армирован упругими нитями. Установлено, что временные эффекты являются следствием касательных напряжений в плоскости слоёв. Предполагается, что связь между касательными напряжениями и деформациями сдвига описывается соотношениями наследственного типа. В качестве ядер



ползучести и релаксации приняты ядра Абея и Работнова. Установочные эксперименты проводились для двух типов углепластиков с разными схемами армирования. После этого делались проверочные эксперименты по разным программам нагружения. Показано хорошее совпадение экспериментальных и теоретических диаграмм ползучести и релаксации. Экспериментально проверенные определяющие соотношения использовались для расчёта прочности и жёсткость элементов зеркала космического радиотелескопа.

**В пятой главе** описывается четырёхточечный изгиб балки из многослойного линейно армированного композита. Такие эксперименты проводятся для прогнозирования расслоения композита вследствие более низкой прочности связующего. Теоретический анализ НДС балки при четырёхточечном изгибе проводился различными способами. Рассматривалось решение С.Г. Лехницкого, решение Тимошенко о чистом изгибе криволинейного бруса с прямоугольным сечением, численное решение методом конечных элементов с применением программного комплекса ANSYS. Было проведено сопоставление численного решения с аналитическим решением Лехницкого. Показано очень хорошее совпадение. Разработанная и отлаженная диссертантом методика использовалась при коррекции формы зеркал космических аппаратов.

**В заключении** подведён итог проделанной работе. Перечислены основные результаты.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается корректностью разработанных математических моделей полимерных композитов, основанных на проверенных временем подходах, а также тщательно проведённой экспериментальной проверкой принятых моделей.

**Теоретическая и практическая значимость** заключается в разработке адекватной математической модели, описывающей процесс деформирования многослойных пластин из упругих и вязкоупругих материалов, упрочнённых волокнами.

### **Замечания по работе**

Замечаний довольно много, но все они носят несущественный характер.

1. В частности на странице 20 первой главы, где рассматриваются различные методы расчета НДС конструкций из композиционных материалов, даётся ссылка на работу [64] - книга Гантмахера по теории матриц. Диссертант видимо имел в виду какую-то другую работу. В списке литературы теория матриц Гантмахера Ф.Р. указана дважды: под номером [64] и [124].
2. При анализе критериев разрушения композитов не указаны критерии, представленные в работах Б.Е. Победри, основанные на совместных инвариантах тензора напряжений и единичных векторов главных направлений анизотропии материала.
3. На странице 56 приведены графики изменения модуля Юнга и коэффициента Пуассона для композита, перекрестно армированного волокнами. Классический коэффициент Пуассона изменяется в

пределах -1 до 0,5. Видимо автор имел в виду коэффициент поперечной деформации, поскольку у него этот коэффициент изменяется от 0 до 2,5.

4. На странице 64 на графиках зависимости напряжений от деформаций используются разные обозначения для деформаций.
5. Нигде не указаны объёмные доли волокон и матрицы.
6. В работе не используются многочисленные результаты по теоретическим методам вычисления эффективных определяющих соотношений упругих и вязкоупругих композитов. Было бы интересно сопоставить эксперименты, проведенные диссертантам с аналитическими формулами для эффективных характеристик.

В целом диссертационная работа производит хорошее впечатление. Диссертант владеет современными экспериментальными и математическими методами исследования сложных процессов, протекающих в многофазных средах.

Сделанные в отзыве замечания не умаляют значимости проведённого исследования, направленного на решение важной научной и прикладной проблемы. Автореферат диссертации достаточно полно отражает содержание работы. Диссертация Русланцева А.Н. соответствуют всем требованиям, предъявляемым ВАК России к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Автор диссертационной работы РУСЛАНЦЕВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ за разработку моделей деформирования полимерных волокнистых слоёв с различной укладкой заслуживает присуждения ему искомой степени.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
и. о. зав. кафедрой механики композитов  
мех-мата МГУ имени М.В. Ломоносова,  
профессор



В.И. Горбачев

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, д.1, Главное здание,  
механико-математический факультет  
МГУ им. М.В. Ломоносова;  
тел./факс +7 (495) 939-4343  
e-mail: vigorby@mail.ru

Подпись В.И. Горбачева заверяю:  
Исполняющий обязанности декана  
Механико-математического ф-та,  
профессор



В.Н. Чубариков