

## ОТЗЫВ

официального оппонента ХРУЩОВА Михаила

Михайловича на диссертацию

НГУЕН Дак Куанга

на тему «Влияние термоциклических нагрузок на механические характеристики

материала композитных панелей»

по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Материаловедение композиционных материалов интенсивно развивается в последние годы. Композитные и нанокompозитные структуры широко используются в современной технике в качестве основы для перспективных высокопрочных и функциональных материалов. Речь здесь идет, как о «традиционных» металлических и полимерных композитах, армированных волокнами, так и о искусственно создаваемых с применением передовых технологий материалах и покрытиях. В частности, применительно к таким материалам многие вопросы, связанные с механикой композитов и временным поведением их свойств при внешних воздействиях всё еще остаются не вполне исследованными. Диссертационная работа Нгуен Дак Куанга посвящена поведению композитов под действием циклических механических и температурных нагрузок. Как правило, в известных работах ограничивались изучением закономерностей термоусталостного разрушения в условиях циклических термических напряжений, не исследуя возможные причины развития процессов накопления и деградации характеристик композитов при термоциклировании.

**Актуальность избранной темы** связана с тем, что такие процессы имеют большое значение в обеспечении безопасности, надежности и ресурса космических и летательных аппаратов, в которых из композитов могут быть изготовлены многие ответственные элементы, конструкции из которых из-за разницы ТКЛР волокна и матрицы подвергаются многократному действию термических нагрузок, приводящих к деградации свойств и последующему разрушению.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Подход, применяемый диссертантом, основан на известной градиентной модели Тупина и является её дальнейшим развитием применительно к оценке напряженно-деформированного состояния многослойных композитных структур. Работы диссертанта выполнены в сотрудничестве с представителями авторитетной научной школы ИПРИМ РАН в области градиентной теории упругости. Это, как кажется оппоненту, может также гарантировать высокий

уровень проделанной работы. Полученные результаты были подтверждены данными расчетов МКЭ, а также результатами механических испытаний по термоциклированию.

**Достоверность, полученных результатов.** Результаты и положения, выносимые на защиту, сомнений в высокой степени их достоверности у оппонента не вызывают. Они были опубликованы в рецензируемых изданиях, входящих в Перечень ВАК, докладывались и обсуждались на ряде международных и российских конференций.

**Новизна полученных результатов** связана с разработкой новой методики расчета напряженно-деформированного состояния для слоистого композита (многослойной композитной панели) в рамках градиентной модели термоупругости, построенной на этой основе модели деградации механических характеристик композита при его циклическом нагружении, и учете влияния температурных воздействий на изменение механических свойств материала.

**Теоретическая и практическая значимость полученных результатов** состоит в том, что предложен расчетный метод для определения напряженно-деформированного состояния и механических свойств плоских неоднородных слоистых, в том числе многослойных, структур со слоями, обладающими разными коэффициентами термического расширения, в условиях термического воздействия. Метод может быть использован для прогнозирования поведения и возможной деградации прочностных свойств, ведущей к снижению ресурса изделий из композиционных материалов в условиях эксплуатации при циклическом воздействии высоких и низких температур, например, в авиационно-космической и другой подобной технике.

**Оценка содержания диссертации, её завершенность.** Диссертационная записка Нгуен Дак Куанга состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка из 72 работ. В ней 121 стр. текста, 61 рисунок и 12 таблиц.

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы и формулируются цели работы.

**В 1-ой главе** представлен обзор литературы по тематике диссертации. Проанализированы работы, связанные с механикой композиционных материалов, работы по градиентной теории упругости. В последнем случае особо отмечена роль масштабных эффектов, связанных с характерным размером в микроструктурной модели (размер зерна, включения, молекулярных и надмолекулярных структур). В обзоре уделено внимание также вопросам моделирования деградации механических свойств в многослойных волокнистых и наполненных материалах при статическом, повторно-статическом и



циклическом нагружении, а также состоянию экспериментальных работ по усталости композитов при термоциклировании.

**Во 2-ой главе** дается решение задачи термоупругости в рамках градиентной модели для  $n$ -слоистых изотропных и ортотропных сред на основе однопараметрического варианта градиентной теории межфазного слоя. Приводятся основные соотношения теории и примеры тестовых расчетов для задачи с одним слоем, двухслойной изотропной структуры, равномерно нагретой в направлении нормали к поверхности, а также многослойной композитной панели с различной укладкой волокон. Рассмотрен случай воздействия постоянного и переменного температурных полей. Проведено сравнение результатов тестовых расчетов с результатами конечно-элементного моделирования, показавшее хорошее согласие получаемых аналитических выражений с данными расчетов с использованием пакета ANSYS.

**В 3-ей главе** развита модель накопления повреждений при циклическом нагружении с учетом воздействия температуры на основе микромеханического описания процессов, учитывающая особенности генерируемых микродефектов. Рассмотрены конкретные типы микродефектов – типа продольных микротрещин или поперечного растрескивания. Для последнего случая получены оценки деградации механических свойств для трех типов структур – слоистого композита с продольно-поперечной укладкой слоев; слоистого композита с укладкой типа  $[0, \pm 45^\circ]$  и композита с квазиизотропной укладкой слоев.

Было проведено сравнение падения механических характеристик при силовом воздействии без учета и с учетом температуры, которое показало, что воздействие температуры существенно уменьшает механические характеристики, т.е. способствует деградации упругих свойств всех рассмотренных слоистых структур.

В этой связи возникла задача экспериментальной проверки полученных результатов, которой посвящена **глава 4**. Было проведено исследование деградации механических свойств образцов из углепластика при термоциклировании на машине «INSTRON» серии 5980, оборудованной климатической камерой. Цикл термоциклических испытаний включал нагрев до 353 К и охлаждение до 77 К с двумя промежуточными выдержками при 300 К. Результаты испытаний подтвердили, что перепады температуры могут существенно сказываться на механических свойствах, что связано с растрескиванием связующего в промежуточном слое. Было показано, что приведенные модули материала снижались при росте числа термических циклов, что, по мнению диссертанта, указывает на корректность разработанного им теоретического подхода.

Таким образом, диссертация представляет собой законченное научное исследование, выводы которого в полном объеме соответствуют поставленным в работе целям исследования влияния циклического воздействия температуры на характер термоупругого поведения изделий из композиционных материалов, накопления дефектов и изменения величин (деградации) механических характеристик материала и его экспериментального подтверждения.

**Достоинство и недостатки в содержании и оформлении диссертации, влияние отмеченных недостатков на качество исследования.**

*К достоинствам и сильным сторонам работы* следует отнести высокую квалификацию диссертанта, которую он продемонстрировал, освоив методы градиентной теории упругости и адаптировав к решению своих задач, связанных с термоупругим поведением слоистых композитов. Можно констатировать хорошее владение им рядом современных программных комплексов для расчетов в области механики деформируемых твердых тел, оценки прочности и ресурса машиностроительных конструкций (ANSYS, LS-DYNA, ABAQUS, MATHEMATICA, DIGIMAT, специализированное ПМО для механических испытаний).

Наряду с теоретическими исследованиями в области термоупругости диссертант освоил экспериментальные методы механических испытаний композиционных материалов. Им проведена экспериментальная проверка полученных теоретических оценок в условиях температурных испытаний на установке «INSTRON», причем эксперимент выполнен крайне обстоятельно и добросовестно.

Обращает на себя внимание, что хочется отметить особо, хороший русский язык, практически полное отсутствие опечаток и вполне литературный стиль изложения.

***К недостаткам следует отнести:***

1. Весьма схематичный стиль изложения работ других авторов в литературном обзоре (глава 1).
2. Отсутствие достаточно подробного обсуждения результатов расчета по аналитической модели и его сравнения с расчетом МКЭ в главе 2. Это замечание, на взгляд оппонента, применимо и к обсуждению результатов других расчетов, комментариев к которым в тексте недостаточно.
3. Данные рис. 1.1 и текст на стр.65-66 полностью дублируют друг друга.
4. Как следует из текста (стр. 34), параметр градиентной модели  $C$  выбирается, исходя из размеров зерна  $\sim 10$  мкм, что, по-видимому, может быть оправдано в случае поликристаллических материалов, однако для слоистых композитов,



армированных волокнами, подобный выбор величины  $C$  требует специального обоснования.

5. Если роль параметра микромеханической модели  $t$  (время, число циклов) вполне ясна, то физический смысл параметра поврежденности  $S$ , под которой понимается сумма всех параметров  $s$  микродефектов (величин типа площади или длины микротрещин в матрице, длины отслоения волокна от матрицы и т.д.), не совсем понятен (стр. 68)..
6. Выбор диссертантом при моделировании монослоя завышенного значения поперечного модуля, равного 28 ГПа (стр. 108), не выглядит обоснованным.

Следует оговориться, что указанные недостатки, в целом, никак не влияют на оценку оппонентом основных теоретических и практических результатов, полученных в диссертации.

**Соответствие автореферата основному содержанию диссертации.**

Автореферат диссертации Нгуен Дак Куанга соответствует основному содержанию диссертационной записки.

**Соответствие диссертации и автореферата требованиям ГОСТ Р 7.0Л1-2011.**

Оформление диссертационной работы и автореферата соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0Л1-2011 «Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Диссертация и автореферат диссертации; Структура и правила оформления».

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» по пунктам 10, 11 и 14.** Все основные научные результаты получены автором лично, авторство текста также сомнений не вызывает. Работа содержит предложения по использованию предлагаемых расчетных методов оценки механических свойств изделий из слоистых композитов при прогнозировании жизненного цикла авиационной техники. Основные научные результаты опубликованы в рецензируемых изданиях. В диссертации содержатся ссылки на конкретных авторов и другие источники используемых материалов. Таким образом, пунктам 10, 11 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней» она соответствует.

**Вывод.** Диссертация Нгуен Дык Куанга на соискание ученой степени кандидата технических наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится научно-обоснованное решение задачи, связанной с прогнозированием механических характеристик слоистых композиционных материалов, подвергающихся действию циклических термических нагрузок. Подобные материалы широко используются в авиакосмической технике гражданского и двойного назначения, поэтому решение этой

задачи имеет существенное значение для соответствующей отрасли знаний, позволяя оценить эволюцию механических свойств слоистых композитов и возможные механизмы их разрушения в условиях эксплуатации. Таким образом, она соответствует требованиям п. 9 «Положение о присуждении ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени,

Официальный оппонент,  
Хрущов Михаил Михайлович,  
кандидат физико-математических наук,  
101990, Москва, Малый Харитоньевский пер., д.4,  
(499)135-43-29, E-Mail: [michel\\_x@mail.ru](mailto:michel_x@mail.ru),  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,  
ведущий научный сотрудник  
лаборатории механики термоциклического разрушения

М.М. Хрущов

Подпись М.М. Хрущова заверяю:

Заместитель директора  
по управлению персоналом  
– начальник отдела кадров



Э.Н. Петюков

6 марта 2015 г.