

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.125.05 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)» ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от «25» марта 2015 г. № 9

О присуждении Нгуен Дак Куанг, гражданину социалистической республики Вьетнам, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Влияние термоциклических нагрузок на механические характеристики материала композитных панелей» по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела» принята к защите «21» января 2015 г., протокол № 8 диссертационным советом Д 212.125.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Министерство образования и науки РФ, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, приказ о создании диссертационного совета Д 212.125.05 – № 105/нк от «11» апреля 2012 г.

Соискатель Нгуен Дак Куанг 1980 года рождения, в 2007 году окончил с отличием федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». В период подготовки диссертации соискатель обучался в очной аспирантуре кафедры «Прочность авиационных и ракетно-космических конструкций» аэрокосмического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования

«Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»).

В настоящее время соискатель является аспирантом кафедры «Прочность авиационных и ракетно-космических конструкций» аэрокосмического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»).

Диссертация выполнена на кафедре «Прочность авиационных и ракетно-космических конструкций» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Министерство образования и науки РФ.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор **Дудченко Александр Александрович**, профессор кафедры «Прочность авиационных и ракетно-космических конструкций» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Официальные оппоненты:

Смердов Андрей Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» Федерального государственного бюджетного общеобразовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана)».

Хрущов Михаил Михайлович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» Российской академии наук (ИМАШ РАН).
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт прикладной механики (ИПРИМ)» Российской академии наук, г. Москва в своем положительном заключении, подписанном

кандидатом физико-математических наук, ведущим научным сотрудником ИПРИМ РАН Волковым-Богородским Дмитрием Борисовичем и утвержденным директором ИПРИМ РАН профессором Ю.Г. Яновским, указала, что в разработке метода расчета напряженного состояния, методики оценки роста поврежденности в слоистых композитах и оценке влияния накопленной поврежденности на процесс деградации механических свойств слоистого композита с использованием градиентной термоупругости, что позволило дать уточнения НДС в многослойном композиционном материале и оценить влияние температурного воздействия на свойства композиционного материала, широко используемого в конструкциях авиационной техники, и диссертация Нгуен Дак Куанг, посвященная исследованием влияния термоциклических нагрузок на механические характеристики материала композитных панелей является актуальной. Она как по объему проведенных исследований, так и ценности полученных научных результатов удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 - «Механика деформируемого твердого тела».

Соискатель имеет 7 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 7 работ, из которых 3 опубликованы в рецензируемых научных изданиях. В них рассматривается стационарная задача градиентной теории термоупругости для слоистых композитных структур. Приводится постановка задачи градиентной теории термоупругости для плоской деформации, дается решение задачи о неоднородном температурном нагреве однослойной и двухслойной структуры. Показано, что использование градиентной термоупругости, обеспечивающей непрерывность деформаций в контактных зонах, позволяет учесть неклассические эффекты, связанные с локализацией напряжений в зоне контакта. Исследовано влияние термоциклирования на механические свойства ортотропных образцов углепластика. Установлено, что в пределах 120 циклов нагрева и охлаждения

в диапазоне $+80/-196$ °С продольный модуль Юнга образцов углепластика снижается на 10%, при этом предел прочности изменяется незначительно. Проведено моделирование полученных экспериментальных данных. Напряженно-деформированное состояние образцов теоретически рассчитывается в рамках модели термупругости слоистого композита. Для описания зависимости эффективного модуля упругости композита от числа циклов нагрева/охлаждения использована модель деградации, связывающая значение поперечного модуля Юнга и модуля сдвига монослоя композита с амплитудой температурных напряжений, действующих в этом монослое. На основе экспериментальных данных проведена идентификация всех параметров модели деградации. Показана возможность достоверного теоретического описания эффекта падения продольного модуля Юнга композита при термоциклировании.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Нгуен, Д. К. Исследование локальных эффектов в распределении температурных напряжений на контактных границах слоистых сред / С. А. Лурье, Ю. О. Соляев, Д. К. Нгуен, А. Л. Медведский, Л. Н. Рабинский // Электронный журнал «Труды МАИ». — 2013. — № 71. — Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=47084>. (Статья в журнале из перечня ВАК).

2. Нгуен, Д. К. Градиентная модель термоупругости для слоистой композитной структуры / С. А. Лурье, А. А. Дудченко, Д. К. Нгуен // Электронный журнал «Труды МАИ». — 2014. — № 75. — Режим доступа: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49674>. (Статья в журнале из перечня ВАК).

3. Нгуен, Д. К. Моделирование влияния параметров вискеризации волокон на остаточное напряженно-деформированное состояние слоистых композитов / А. В. Афанасьев, Д. К. Нгуен, Ю. О. Соляев, Л. Н. Рабинский, А. А. Дудченко // Механика композиционных материалов и конструкций. — 2014. — Т. 20. — № 3. — С. 333–342. (Статья в журнале из перечня ВАК).

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

от ведущей организации **Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт прикладной механики (ИПРИМ)» Российской академии наук**, г. Москва, подписанный ведущим научным сотрудником ИПРИМ РАН, кандидатом физико-математических наук Волковым-Богородским Д.Б., заверенный ученым секретарем ИПРИМ РАН, кандидатом физико-математических наук Карнет Ю.Н., утвержденный директором ИПРИМ РАН, доктором технических наук, профессором Яновским Ю.Г., отзыв положительный;

от официального оппонента, **Смердова Андрея Анатольевича**, доктора технических наук, профессора кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители» **Федерального государственного бюджетного общеобразовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана)»**, г. Москва, заверенный руководителем НУК СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана Калугиным В.Т., отзыв положительный;

от официального оппонента, **Хрушова Михаила Михайловича**, кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова» Российской академии наук (ИМАШ РАН), г. Москва, заверенный заместителем директора по управлению персоналом, начальником отдела кадров Петюковым Э.Н., отзыв положительный;

от **Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ)**, подписанный доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой «Производство летательных аппаратов» Халиулиным В.И., утвержденный начальником управления делами КНИТУ-КАИ, отзыв положительный;

от **Открытого акционерного общества «Сухой»**, подписанный доктором технических наук, начальником департамента усталостной прочности и

ресурса Стрижиусом В.Е., заверенный заместителем генерального директора ЗАО «АэроКомпозит» Никитушкиным М.В., отзыв положительный;

от **Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)»**, подписанный доктором технических наук, профессором, заведующим кафедрой «Конструкция и проектирование летательных аппаратов СГАУ» Комаровым В.А., заверенный начальником отдела обеспечения деятельности советов СГАУ Павловой Н.Н., отзыв положительный.

от **Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»**, подписанный доктором физико-математических наук, профессором, профессором кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций», директором Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета Вильдеманом В.Э., заверенный ученым секретарем Пермского национального исследовательского политехнического университета Макаревичем В.И., отзыв положительный.

В поступивших отзывах отмечена актуальность темы диссертационного исследования, дан краткий обзор работы по главам, отмечены актуальность, новизна, достоверность полученных автором результатов и их практическая значимость.

В поступивших отзывах имеются замечания.

В отзыве ведущей организации ИПРИМ РАН имеются следующие замечания:

1. Обзорная часть не достаточно полно отражает этапы развития градиентных теорий и содержит погрешности. Так на стр. 15 говорится: "В настоящей работе для моделирования привлекается градиентная теория термоупругости, которая построена, как частный случай для среды с

сохраняющимися дислокациями (предложена в работах Лурье С.А., Белова П.А, Волкова-Богородского Д.Б. и др.)" - Волков-Богородский Д.Б. здесь упомянут ошибочно, он не занимался средами с сохраняющимися дислокациями, а П.А. Белов не занимался развитием градиентной термоупругости (см. автореферат).

2. Имеется неточность на стр. 23. Более корректно следовало бы говорить о моделях Миндлина, а не о моделях Тупина. В общем случае тензор упругих модулей шестого ранга, как показал Миндлин, содержит 15 физических постоянных, и только если учесть условие потенциальности и симметрию по порядку дифференцирования, то число моделей снижается до пяти.

3. К сожалению, после формулировки краевых условий на стр. 24 не дается трактовка всех граничных условий, а ведь эти условия являются нетривиальными с точки зрения классической теории упругости. Это - явное упущение.

4. Имеется некоторое несоответствие. С одной стороны в разделе 2.2 рассматривается плоская деформация, а с другой вводится величина деформации в поперечном направлении. Следовало бы дать пояснения и говорить об обобщенной плоской деформации, когда допускается однородная деформация.

5. Имеются неточности в определении напряжений σ_z^* , τ_{zx}^* . Неправильно называть их напряжениями. Напряжения определяются формулами Грина и имеют классическую форму. Величины же σ_z^* , τ_{zx}^* можно условно называть «классическими», но не полными, ибо дивергенция этих напряжений входит в уравнения равновесия. В градиентных моделях следует различать полные напряжения и «классические».

6. На стр. 28 говорится: "Дополнительные условия по неклассическим (моментным) напряжениям имеют, соответственно, вид..." - это также не совсем верно, так как неклассические краевые условия определяются выражением

$$\oint_F \frac{1}{C} C_{r_{qmn}} \frac{\partial^2 R_m}{\partial x_q \partial x_n} \delta(C_{r_{qij}} n_p \frac{\partial R_i}{\partial x_j}) dF.$$

В работе приравнивается нулю "статический" множитель в этом выражении. Однако может быть сформулировано и иное краевое условия, когда заданным является выражение при вариации. Это условие при закреплении края дает более жесткое условие заделки. Такой вариант в работе не рассматривается.

7. Для определения трансверсальных деформаций рассматривается полоса в условиях плоского напряженного состояния. Т.е. имеется синтез плоской деформации (когда исследуется градиентное состояние в направлении перпендикулярном плоскости слоев) и плоского напряженного состояния, когда определяются средние деформации в плоскости слоев. Этот момент следовало бы отметить специально.

8. Остается неясным, дает ли в дальнейшем градиентное уточнение, главная роль которого сводится к анализу дополнительного напряженного состояния в направлении перпендикулярном слоям, сколько-нибудь существенные уточнения в эффектах деградации механических характеристик. Дело в том, что анализ деградации касается механических характеристик в плоскости слоев, и при этом напряжения по толщине отдельных слоев считаются постоянными. Модель градиентной упругости действительно важна с точки зрения прочности. А в плоскости слоев градиентность дает вклад только за счет эффекта Пуассона. Непонятно, является ли этот эффект существенным?

9. Непонятно, почему имеется разрыв в распределении напряжений на правом рисунке 3а?

10. Неясно, является ли предложенная процедура прогноза деградации механических свойств устойчивой по отношению к системам тестовых испытаний конкретных структур, по которым идентифицируются параметры модели. В работе во второй главе было рассмотрено фактически две тестовые структуры $[0, 90_2]_s$ и $[0, \pm 45^\circ]_s$, см. раздел 3.5. Была ли сделана проверка

устойчивости параметров модели в зависимости от выбора тестовых структур?

11. К сожалению, имеется некоторая недоработка текста статьи, так как проблема идентификации параметров рассматривается дважды в различных разделах работы (в главе 2 и главе 4). Непонятно, согласованы ли при этом результаты?

12. В автореферате в рисунке 11 имеется ошибка, т.к. учет температуры (и это написано далее) приводит к усилению деградации. А из указанных в автореферате рисунков следует обратное.

13. Имеются стилистические и грамматические ошибки по тексту диссертации и автореферата, но не следует это считать большим недостатком, так как русский язык не является родным для соискателя.

Замечания в отзыве официального оппонента А.А. Смердова:

1. В диссертации не пояснен физический смысл введенного неклассического градиентного параметра C с размерностью ГПа/мм²; неясно, из каких соображений выбирать этот параметр для реальных многослойных композитов.

2. Неясно также, каким образом для реальных композитных панелей могут быть определены характеристики прослоек (в многослойных полимерных композитах прослойки постоянной толщины отсутствуют).

3. Текст диссертации не свободен от стилистических и грамматических ошибок.

Замечание в отзыве официального оппонента М.М. Хрущова:

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 ~ 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.

Замечание в отзыве на автореферат диссертации, поступившем из Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ):

При проведении эксперимента число температурных циклов ограничено.

Замечание в отзыве на автореферат диссертации, поступившем из ОАО «Сухой»:

1. Диапазон рассматриваемых температур при термоциклировании (от -196°C до $+80^{\circ}\text{C}$) не точно соответствует реальному диапазону эксплуатационных температур авиаконструкций.

2. В автореферате не всегда корректно даны (или отсутствуют вовсе) ссылки на использованные работы других авторов.

Замечание в отзыве на автореферат диссертации, поступившем из Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет):

Малое количество экспериментальных точек на графиках автореферата вызывает затруднения при оценке качества корреляции результатов испытаний с математическими моделями и не позволяет оценить, являются ли случайными или закономерными существенные отклонения некоторых экспериментальных точек от теоретических кривых

Замечание в отзыве на автореферат диссертации, поступившем из Пермского национального исследовательского политехнического университета:

1. Идентификация параметров модели давалась почему-то в двух в различных главах. Согласованы ли результаты идентификации.

2. Не допущены ли ошибки в подписях к красным и зеленым линиям на рисунках 11 и 12 в автореферате, иллюстрирующих влияние температуры на эффекты деградации механических свойств.

3. Проводилась ли статистическая обработка и оценка погрешности экспериментальных данных.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются высокопрофессиональными специалистами в данной области, имеют публикации в соответствующей сфере исследования, а ведущая организация проводит исследования в области неклассических моделей механики композиционных материалов и накопления рассеянных повреждений композитов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния в рамках градиентной модели термоупругости и методика моделирования процессов деградации механических свойств с учетом циклического воздействия температуры для многослойной композитной панели;

предложен оригинальный подход к решению новых задач термоупругости, позволяющий определить изменение механических характеристик композиционного материала при воздействии температуры;

доказано, что воздействие температуры снижает значения механических характеристик рассматриваемых структур;

новые понятия не вводились.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Доказано, что градиентная модель Тупина позволяет уточнить НДС для многослойных структур, слои которых состоят из изотропных или ортотропных композитных слоев. Воздействие температуры существенно уменьшает механические характеристики рассматриваемых структур;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использованы**

вариационный принцип и аналитический метод моделирования процессов деградации механических характеристик композиционного материала. Для

идентификации свойств монослоя композита привлекалась система

компьютерного моделирования свойств композиционных материалов

«DIGIMAT». Для проведения конечно-элементных расчетов был использован

программный комплекс «ANSYS». Для аналитических расчетов

привлекалась система символьных вычислений «MATHEMATICA».

Экспериментальное исследование процессов деградации свойств композитов

при термоциклировании проводилось на испытательной машине «INSTRON»

с применением программы обеспечения «BLUEHILL 3» для измерений и

регистрации параметров;

изложены методики проведения экспериментальных исследований влияния термоциклирования на механические характеристики композиционных

материалов и сравнение результатов испытаний с результатами

моделирования;

раскрыты особенности процессов накопления повреждения и деградации

механических характеристик композиционных материалов при

термоциклировании;

изучено влияние циклического воздействия температуры на характер накопления дефектов и изменение величин механических характеристик композиционного материала;

проведена модернизация расчетных методов по определению количества повреждений при циклическом нагружении без учета воздействия температуры и с учетом воздействия температуры.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния для многослойной композитной панели в рамках градиентной модели термоупругости;

определены направления практического использования предложенного метода исследования процессов накопления дефектов и деградации механических характеристик композитных конструкций при эксплуатации авиационной и космической техники с учетом температурного воздействия;

создана методика, которая позволяет получить основные соотношения для связи между собой параметров модели деградации анизотропных слоистых сред при различных условиях нагружения;

представлены рекомендации и предложения для усовершенствования методики расчета накопления дефектов и деградации механических свойств материала.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория подтверждается совпадением результатов аналитических и численных расчетов, полученных автором, с экспериментальными данными, приведенными в литературе, с результатами расчетов других авторов, а также с результатами экспериментальных исследований, проведенных самим автором;

идея базируется на анализе работы авиатехники в условиях эксплуатации и космических объектов, которые находятся на околоземной орбите и

подвергаются неоднократным воздействием нестабильных температурных режимов;

использовано обоснованное сравнение авторских данных с результатами полученными другими исследователями;

установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами из независимых источников;

использованы современные программные комплексы (ANSYS, MATHEMATICA, DIGIMAT, испытательная машина INTRON) для расчетов и моделирования в области механики композиционных материалов, оценки прочности и ресурса машиностроительных конструкций.

Личный вклад соискателя состоит в:

Постановке задач исследования; расчете напряженно-деформированного состояния многослойного композита с учетом межслоевых прослоек при температурном воздействии; разработки постановки задачи для среды, состоящей из ортотропных слоев, с использованием модели градиентной теории термоупругости; тестировании аналитической модели на основе сопоставления с результатами конечно-элементного моделирования; разработке метода выбора параметров модели деградации механических характеристик слоистых композитов; реализации расчетных программ для используемых математических моделей; проведении расчет и сравнении расчетных данных с известными экспериментальными данными; проведении испытаний, обработке и сравнении теоретического расчета с данными испытания.

На заседании 25 марта 2015 года диссертационный совет принял решение присудить Нгуен Дак Куанг ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 6 докторов технических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела», участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета,

дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 17, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Заместитель председателя диссертационного совета Д 212.125.05 д.т.н., профессор

Фирсанов В.В.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.05 к.ф.-м.н., доцент

Федотенков Г.В.

Ученый секретарь МАИ (НИУ)

к.т.н., доцент

«27» марта 2015 г.



Ульяшина А.Н.