

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ
Российской академии наук



125040, Москва, Ленинградский пр-т, д.7, стр.1
тел. (495)946-18-06, 946-18-02; факс: (495)946-18-03
e-mail: iam@iam.ras.ru

" 17 " февраля 2015 г.
Исх. № 11509/22

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИПРИМ РАН,
д.т.н, проф. Яновский Ю.Г.



«17» февраля 2015

ОТЗЫВ

ведущей организации ФГБУН «Институт прикладной механики» РАН
на диссертацию Нгуен Дак Куанг «Влияние термоциклических нагрузок на
механические характеристики материала композитных панелей», представленной
на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

Композиционные материалы широко используются в авиационной и космической технике, так как обладают высокими удельными механическими характеристиками, стойкостью к воздействию температур и к вибрационным нагрузкам и др. Эти материалы используются при изготовлении силовых элементов планера самолета, отсеков ракет и космических аппаратов. При эксплуатации летательные аппараты могут подвергаться неоднократным

воздействием различных температурных режимов (диапазон изменения температур лежит в пределах $113\text{ K} - 393\text{ K}$). В результате конструкции из композиционных материалов за срок службы испытывают в полете многократные циклические температурные перепады, которые воздействуют как нагрузки от температурного поля. Из-за разницы между коэффициентом линейного температурного расширения волокна и матрицы на порядок и более композит будет испытывать переменные термические воздействия, что в результате приводит к значительному изменению его механических характеристик (модулей упругости) и разрушению конструкций. К исследованию температурных воздействий и исследованию поведения разрушения композитов под действием циклических механических и температурных нагрузок приступили сравнительно недавно. В связи с этим исследования процессов накопления и деградации механических характеристик композиционных материалов при термоциклировании имеют важное значение для обеспечения безопасного полета летательных аппаратов и увеличения их надежности и ресурса. Поэтому тема диссертации, посвященная исследованию влияния термоциклических нагрузок на механические характеристики материала композитных панелей является актуальной.

Целью диссертационной работы является исследование влияния циклического воздействия температуры на характер накопления дефектов и процесс изменения величин механических характеристик материала (процесс деградации свойств).

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана методика расчета НДС для многослойной композитной панели в рамках градиентной модели термоупругости.
2. Построена модель деградации механических характеристик слоистого композита при циклическом нагружении.
3. Проведено исследование влияния воздействия температуры на изменение свойств механических характеристик.

4. Проведено сравнение влияния циклических нагрузок без учета температуры и с учетом температуры на изменение значений механических характеристик композиционного материала.

5. Проведенные автором экспериментальные исследования подтвердили правильность выбора модели деградации для решения задачи определения накопления дефектов, влияющих на свойства материала композитных панелей при термоциклировании.

Диссертационная работа Нгуен Дак Куанг состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 121 страницу, из них 8 занимает список использованных источников. Список используемой литературы включает 72 наименований (из них 26 на иностранном языке).

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, формулируются цели работы, проанализированы основные проблемы. Отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Приведены основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, сведения об апробации результатов работы и описана структура диссертации.

Первая глава носит обзорный характер. В ней приводится литературный обзор, посвященный публикациям по теме диссертации: обсуждается задача термоупругости в рамках градиентной теории для многослойных композиционных конструкций, проблема построения модели деградации механических характеристик в процессе эксплуатации композиционных материалов; излагаются результаты экспериментальных исследований об усталостном поведении слоистых композитов при термоциклировании.

Во второй главе диссертации сформулированы и решены задачи термоупругости в рамках градиентной модели для слоистых изотропных и ортотропных сред. Рассмотрена задача о плоской деформации многослойной среды, в которой каждый слой является изотропным, дается градиентное уточнение напряженного состояния в многослойной композитной панели под

действием температуры. Полученные результаты аналитических расчетов НДС и распределение температуры по толщине с учетом изотропных прослоек подтверждены расчетом МКЭ с помощью программы «ANSYS».

В третьей главе развивается модель накопления повреждений при циклическом нагружении с учетом воздействия температуры. Приводятся расчеты оценки деградации механических свойств для трех исследуемых структур: слоистый композит с продольно-поперечной укладкой слоев типа $[0,90_2]_s$, слоистый композит с укладкой слоев только 0° и 45° типа $[0,\pm 45]_s$ и слоистый композит с квазиизотропной укладкой типа $[0,\pm 45,90]_s$ без учета воздействия температуры и с учетом воздействием температуры. Показано, что воздействие температуры существенно уменьшает механические характеристики рассматриваемых структур, т.е. оказывает существенное влияние на процесс деградации механических свойств слоистых композитов.

В четвертой главе приведено описание испытательной машины «INSTRON» которая используется для проведения экспериментальных исследований деградации механических свойств образцов углепластика при термоциклировании, дается описание последовательности экспериментов, представлены основные результаты испытаний, приводятся идентификация свойств материала с помощью программы «DIGIMAT», приводится оценка деградации механических характеристик образцов при термоциклировании и приводится сопоставление результатов, найденных расчетным путем, с данными испытания.

Достоверность результатов обосновывается использованием строгих подходов механики сплошных сред, прикладной теории упругости, термоупругости, методов механики композитов и математических методов, а также 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.

Теоретическая и практическая значимость работы заключаются 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.

По диссертации можно сделать 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

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

В работе приравняется 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 $[0, \pm 45]_s$, 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.

Отмеченные недостатки не снижают научной и практической ценности диссертации Нгуен Дак Куанг и могут рассматриваться как рекомендации для дальнейших исследований.

Основные результаты диссертации опубликованы в 7-ти работах, 3 из которых – в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК.

Результаты диссертации и опубликованных по ее теме работ Нгуен Дак Куанг могут быть использованы в практической, научной и учебной работе в авиационной промышленности, в ОКБ, НИИ и других организациях.

Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа Нгуен Дак Куанг как по объему проведенных исследований, так и ценности полученных научных результатов удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно п.п. 9-13 Положения ВАК о присуждении ученых степеней (утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842), а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Ведущий научный сотрудник
ФГБУН «ИПРИМ РАН»,
кандидат физико-математических наук

Волков-Богородский Дмитрий Борисович

Настоящий отзыв рассмотрен и утвержден на заседании Ученого совета ИПРИМ РАН: Протокол №02/15 от 10 февраля 2015 г.

Ученый секретарь ИПРИМ РАН, к.ф.-м.н.



МП

(Карнет Ю.Н.)