

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Разаковой Рио-Риты Вадимовны «Механические явления в слоистых структурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.4.7 «Высокомолекулярные соединения»

Моделирование механических свойств слоистых композиционных материалов представляет собой сложную задачу, поскольку при контакте поверхности субстрата с полимерным адгезивом происходит взаимное согласование двух разнородных молекулярных структур. В результате этого в межфазном пространстве образуется дополнительный слой, свойства которого отличаются от свойств полимера и субстрата.

Исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) слоистых объектов без введения дополнительных гипотез о характере взаимодействия фаз неизбежно приводит к возникновению бесконечных напряжений вблизи свободных краев на границах раздела. Это не позволяет производить адекватный расчет НДС деталей из композиционных материалов и, как следствие, оценивать надежность и эффективную работоспособность конструкций.

Математическая модель контактного слоя, в которой взаимодействие между адгезивом и субстратом моделируется дополнительным ортотропным слоем, которая выбрана автором для исследования НДС, позволяет избежать такого рода сингулярностей, а, следовательно, адекватно описывать термоупругие характеристики слоистых композиционных материалов и производить анализ температурных напряжений, что может быть успешно использовано при прогнозировании поведения новых высокоперспективных композитных материалов.

В связи с этим, автором была поставлена цель теоретически, в рамках концепции контактного слоя, и экспериментально, исследовать термоупругие свойства слоистых композиционных структур и оценить температурные напряжения в них с учетом релаксационных явлений на основе нелинейного дифференциального уравнения Максвелла-Гуревича.

Поэтому считаю, что представленная диссертационная работа, посвященная исследованию механических явлений в слоистых структурах, является актуальной.

**Общая характеристика работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, пяти приложений и списка использованных источников. Общий объем работы – 120 страниц, включая 41 рисунок и 11 таблиц. Список использованных источников включает в себя 110 наименований.

**Во введении** автор дает характеристику своей работе, указывает цели и задачи исследования, обосновывает актуальность и необходимость исследования механических явлений в полимерных слоистых материалах. Указывается объект и предмет исследования. Приводит список опубликованных научных трудов, а также сведения об апробации работы.

**В первой главе** представлен обстоятельный обзор и анализ литературных источников, формирующих теоретическую и методологическую основу диссертационного исследования.

**Во второй главе** приводится сравнительный анализ существующих подходов к моделированию контактных взаимодействий, позволяющих производить оценку напряженно-деформированного состояния конструкций из слоистых композитов. Излагаются фундаментальные механико-математические предпосылки, формирующие основу для практической реализации применяемого автором метода контактного слоя.

Для достижения поставленной цели, Разаковой Рио-Ритой Вадимовной в **третьей главе** были проведены расчеты температурных зависимостей эффективного модуля Юнга, коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР) и температурных напряжений по формулам метода контактного слоя в сопоставлении с формулами смеси для слоистого и составного, а также для полимерного стержней. Для проведения расчетов физико-механических свойств слоистых композитов была написана и использована программа «FUSION 1.0» на языке Matlab.

Далее автором проведен анализ полученных температурных зависимостей, из которого следует, что при изучении термоупругих параметров стержня со слоистой структурой, помимо адгезионного взаимодействия межфазных слоев, оказывающего на них существенное влияние, следует учитывать большое количество других механических характеристик.

В частности показано, что, кроме модулей упругости и КЛТР полимера и субстрата, значительное влияние на термоупругие параметры слоистого стержня оказывают коэффициент Пуассона, толщина составляющих слоев, размер поперечного сечения и жесткость контактно слоя. Метод контактного слоя позволяет это учитывать.

**В четвертой главе**, в соответствии с поставленными целями, на основе экспериментальных зависимостей модуля упругости композита от модуля упругости полимерного связующего, полученных другими авторами квазистатическим методом, проведены расчеты зависимости скорости звука от модуля упругости полимерного связующего в слоистом и трехсекционном стержнях. Получено хорошее согласие между теоретической, полученной по формуле, учитывающей свойства контактного слоя, и экспериментальной, зависимостями скорости звука от модуля упругости полимерного связующего.

Проведенные автором расчеты зависимости скорости звука в композите от коэффициента Пуассона полимерного связующего и размеров поперечного сечения образца по формулам, учитывающим свойства контактного слоя и по формулам смеси, показали ее существенную зависимость от указанных параметров в первом случае и ее полное отсутствие во втором.

Полученные автором результаты, показывающие, что метод контактного слоя позволяет учитывать геометрические и физико-механические параметры субстрата, адгезива и контактного слоя при прогнозировании механических свойств слоистых композиционных материалов, логично, на мой взгляд, привели к необходимости проведения комплекса физических экспериментов, направленных на исследование свойств многослойных композиционных материалов.

В связи с этим, Разаковой Р-Р. В. была поставлена задача с помощью экспериментального определения модуля упругости слоистых образцов в процессе отверждения, провести оценку влияния параметров модели материала на его термоупругие свойства, и тем самым проверить математическую модель контактного слоя.

Для решения указанной задачи **в главе пять** автором предложена методика изготовления слоистых композиционных образцов, процедура проведения эксперимента, указаны используемые материалы и изготовленные образцы, описана экспериментальная установка.

Полученные в результате экспериментальные кривые зависимости модуля упругости композитных стержней различных конструкций в зависимости от модуля упругости полимера хорошо согласуются с теоретическими кривыми, полученными с учетом контактного слоя, чего не наблюдается при расчете по формулам смеси. Результаты экспериментов подтвердили справедливость формулы определения модуля упругости слоистого композита, полученной в модели контактного слоя.

На завершающем этапе исследований автором предложен математический аппарат, позволяющий выполнять теоретические исследования температурных напряжений с учетом релаксационных процессов в слоистом композиционном материале, обрабатывать, анализировать, интерпретировать результаты исследований.

В главе шесть приведена система уравнений, позволяющая проводить расчет температурных напряжений при охлаждении и нагревании с учетом релаксационных явлений в полимерном связующем. С использованием полученной системы автор проводит исследование влияния скорости изменения температуры и параметров слоистого стержня квадратного сечения, состоящего из стали и полимера на температурные напряжения в нем.

Расчеты показали, что при увеличении размера поперечного сечения стержня температурные напряжения возрастают, а при увеличении толщины полимерного адгезива, наоборот – уменьшаются. Чем больше в составе слоистого композита доли полимерного связующего, тем сильнее будут проявляться релаксационные процессы.

В заключении приводятся основные результаты проделанной работы, указаны особенности исследования физико-механических свойств и анализа поведения слоистых композитов.

Автор делает справедливый вывод, что математический аппарат в сочетании с экспериментальными данными, отражающими поведение материалов, из которых состоит композит, позволяют реализовать возможность эффективной оценки напряженно деформированного состояния и, как следствие, позволят инженерам создавать прочные, долговечные, термостойкие конструкции из композиционных материалов.

Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию работы, поскольку в нем детально представлены все ключевые результаты исследований.

Основные результаты, изложенные в диссертации, были опубликованы в научных журналах и апробированы на международных и российских конференциях. Автором опубликованы четыре печатные работы в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК.

На основании изложенного считаю, что:

**научная новизна работы** заключается в том, что автор предложил и реализовал новый способ оценки модуля упругости (модуля Юнга) слоистых композиционных материалов, который позволяет производить измерения в

процессе отверждения полимерного связующего. В рамках проведенных исследований представлено всестороннее научное обоснование допустимости использования метода контактного слоя. Также научной новизной обладает предлагаемая для расчета температурных напряжений в жестко заземленном слоистом стержне система уравнений, включающая в себя нелинейное дифференциальное уравнение Максвелла-Гуревича;

**практическая значимость** состоит в том, что применяемый для расчета метод контактного слоя, а также эксперимент позволяют производить исследование физико-механических свойств слоистых материалов с достаточной точностью. Представленные в работе методы могут применяться на предприятиях, которые занимаются разработкой полимерных композиционных материалов. Также практическую значимость имеют зарегистрированные в ФИПС автором программы для ЭВМ и база данных;

**достоверность** результатов диссертации обеспечивается как теоретической базой, основанной на фундаментальных положениях теории упругости, так и эмпирической составляющей: проведением экспериментальных исследований физико-механических свойств композиционных материалов на современном оборудовании. Дополнительным подтверждением достоверности служит сопоставление полученных данных с результатами, опубликованными в других научных работах.

По работе имеются следующие замечания:

- 1) Известно, что звуковые волны отражаются от границ раздела сред. В случае исследуемого слоистого стержня – от множества границ раздела. В работе не представлена информация о влиянии отраженных волн на результаты эксперимента.
- 2) По тексту встречаются орфографические и пунктуационные ошибки.
- 3) В процессе работы над оформлением текста автором были упущены некоторые детали, например, несколько ссылок в тексте оказались в неверной последовательности.
- 4) Несмотря на детальное осмысление результатов расчетов, опирающихся на физику явления, для более полного понимания температурных напряжений в слоистых композитах желательно провести серию натурных экспериментов.
- 5) При проведении расчетов автор никак не обосновывает выбранные им для их проведения значения параметра жесткости  $g_r = G^*/h^*$ , который, на мой взгляд, является ключевым параметром метода контактного слоя, так как зависит от толщины контактного слоя, который необходимо определять из дополнительных соображений.

Указанные замечания не снижают значимости представленной диссертационной работы. Все поставленные автором цели и задачи решены.

Диссертация Разаковой Рио-Риты Вадимовны «Механические явления в слоистых структурах» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые, научно обоснованные решения и рекомендации по теоретическому и экспериментальному исследованию термоупругих и релаксационных свойств слоистых композиционных материалов, имеющих важное значение для прогнозирования и конструирования их эксплуатационных свойств.

Диссертация Разаковой Рио-Риты Вадимовны соответствует пунктам 7,8 паспорта научной специальности 1.4.7. – «Высокомолекулярные соединения», отвечает всем требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.4.7. – Высокомолекулярные соединения (физико-математические науки).

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук  
(специальность 01.04.19, физика полимеров), профессор кафедры высшей и прикладной математики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА) (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), профессор

Шевелев Валентин Владимирович

«17» сентября 2026 г.

119454, г. Москва, пр-кт Вернадского 78, +7 499 600-80-80 доб. 20563,

E-mail: valeshevelev@yandex.ru

Подпись Шевелева Валентина Владимировича заверяю

Заместитель Первого проректора РТУ МИРЭА

Ефимова Ю.А.

