

На правах рукописи

Разакова Рио-Рита Вадимовна

МЕХАНИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ

Специальность 1.4.7. – «Высокомолекулярные соединения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре химической физики имени Н.Н. Семенова Российской академии наук, г. Москва.

Научный руководитель:

Турусов Роберт Алексеевич

доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты:

Шевелев Валентин Владимирович

доктор физико-математических наук,
профессор, Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «МИРЭА -
Российский технологический
университет», Институт тонких
химических технологий им. М.В.
Ломоносова, профессор кафедры

Чистяков Евгений Михайлович

доктор химических наук, Федеральное
государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Российский химико-
технологический университет им. Д.И.
Менделеева», профессор кафедры

Ведущая организация:

Акционерное общество «НПО
Стеклопластик имени Н.Н. Трофимова»

Защита состоится «___» _____ 2026 года в ___ ч. ___ мин.
на заседании диссертационного совета 24.1.243.01 при Федеральном
государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском
центре химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (ФИЦ
ХФ РАН) по адресу: 119991, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФИЦ ХФ
РАН и на сайте <http://www.chph.ras.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.1.243.01
кандидат химических наук

Ладыгина Татьяна Александровна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Композиционные материалы с полимерной составляющей широко применяются в различных отраслях промышленности, включая ракетно-космическую и авиационную. Слоистые материалы с полимерным адгезивом позволяют создавать легкие, долговечные и прочные элементы конструкций. Полимерные композиты более устойчивы к коррозии, что также повышает их популярность. Точный расчет напряженно-деформированного состояния деталей из композиционных материалов позволяет гарантировать надежность и эффективную работоспособность конструкции. В таком случае, очевидна необходимость создания и развития методов, позволяющих производить достоверную оценку напряженно-деформированного состояния слоистых объектов. Также для прогнозирования поведения и оценки надежности конструкции необходимы оптимальные методы определения физико-механических характеристик слоистых материалов. В настоящей работе дается развитие метода контактного слоя, с помощью которого можно производить анализ напряженно-деформированного состояния моделей слоистых структур. Основное затруднение при анализе напряженно-деформированного состояния заключается в моделировании сложных условий на границах слоев. Анализ методом конечных элементов концентраторов напряжений на границе раздела, вблизи угловых точек демонстрирует, что при сгущении сетки напряжения возрастают. Таким образом получается, что при приближении к краям модели, касательные напряжения устремляются к бесконечности, но это является ошибкой, ибо в реальности эти напряжения там равны нулю (их нет). Сингулярность исключает возможность использования естественных критериев разрушения адгезионных соединений в условиях нагружения. Метод контактного слоя (метод Р.А. Турусова), который применяется в данной работе, позволяет избежать сингулярностей в угловых точках и оценить напряженно-деформированное состояние слоистой структуры с достаточной точностью.

Достаточно достоверным является тот факт, что полимерные материалы, и как следствие композиты, содержащие полимеры в своем составе, проявляют своеобразное вязкоупругое механическое поведение, которое довольно затруднительно моделировать. Практический и теоретический интерес представляет исследование релаксационных явлений в слоистых и полимерных стержнях при температурных воздействиях.

Таким образом, исследование механических явлений в слоистых структурах является актуальным, так как позволяет расширить представление о механизме совместной работы нескольких соединенных между собой слоев и выявить закономерности их влияния друг на друга. Привести доказательство целесообразности использования некоторых методов анализа напряженно-

деформированного состояния, а также указать границы их применимости и возможности усовершенствования.

Степень разработанности темы исследования.

Механические явления в слоистых структурах исследовали отечественные и зарубежные авторы, в том числе: В.Е. Басин, Б.В. Дерягин, А.А. Берлин, А.Л. Рабинович, Ю.С. Липатов, А.С. Фрейдин, Р.А. Турусов, А.Е. Чалых, А.А. Щербина, Л. М. Бреховских, С. Ву, А. Adamson, W. C. Wake, A.J. Kinloch, M.C. Boyce. Разработкой методов оценки напряженно-деформированного состояния слоистых тел занимались В. В. Болотин, А. Р. Ржаницын, А. Л. Рабинович, Р. А. Турусов. Одним из наиболее оптимальных является метод контактного слоя, предложенный Р. А. Турусовым, поскольку позволяет рассчитывать поля напряжений и деформаций в дискретных моделях композита при точном удовлетворении всех граничных условий, не исключая участия адгезива как активной среды. Стоит отметить, что большое количество исследователей направляют свои силы на разработку различных методов моделирования слоистых композитов в известных программных комплексах, основанных, как правило, на методе конечных элементов. Однако необходимо подчеркнуть, что разрабатываемые методы сопровождаются скудным количеством физических экспериментов.

Цель и задачи диссертационной работы.

Целью диссертационной работы является теоретическое и экспериментальное исследование термоупругих свойств слоистых композиционных структур, а также оценка температурных напряжений с учетом релаксационных явлений.

Задачи диссертационной работы:

1. Провести теоретическое исследование термоупругих свойств слоистых композиционных образцов.
2. Провести физический эксперимент для определения физико-механических свойств слоистых композиционных образцов с применением известных и разработанных автором методик.
3. Выполнить теоретические исследования температурных напряжений с учетом релаксационных процессов слоистого композиционного материала. Обработать, проанализировать, интерпретировать и представить результаты исследований.

Объект и предмет исследования.

В качестве объектов исследований были выбраны полимерные и слоистые стержни, в состав которых входит полимерный адгезив и слои жесткого субстрата.

Предметом исследований являются термоупругие параметры слоистых композитов и релаксационные процессы, влияющие на температурные напряжения.

Основную часть научной новизны составляют:

1. Разработанная методика изготовления слоистых композиционных образцов, которая позволяет производить экспериментальное исследование в процессе отвержения.

2. Разработанная математическая модель оценки температурных напряжений в слоистых образцах с применением метода контактного слоя (Турусова Р.А.) и нелинейного релаксационного дифференциального уравнения Максвелла-Гуревича.

3. Полученные зависимости скорости звука, модуля упругости, коэффициента линейного теплового расширения от некоторых механических и геометрических параметров рассматриваемых объектов.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая ценность диссертационного исследования определяется высокой степенью точности используемого физико-математического аппарата, позволяющего описывать термоупругие характеристики слоистых композитных тел и производить анализ температурных напряжений, что может быть успешно использовано при прогнозировании поведения новых высокоперспективных композитных материалов.

Практическую ценность имеют:

1. Методика изготовления слоистых композиционных образцов.

2. Математическая модель для определения температурных напряжений слоистых композитных материалов.

3. Математическое и алгоритмическое обеспечение.

4. Усовершенствованный метод исследования термоупругих свойств слоистых материалов, а также алгоритм, написанный на языке MATLAB, может использоваться в расчетных отделах научно-производственных предприятий, занимающихся созданием новых композитных материалов, а также при анализе элементов конструкций созданных с помощью аддитивных технологий. Данная работа актуальна для ряда предприятий, в первую очередь, специализирующихся на производстве изделий из полимерного сырья, а также заводах, занимающихся изготовлением шумозащитных, виброзащитных экранов, конструктивных элементов авиационной и ракетно-космической техники.

Методология и методы исследования. Экспериментальное исследование некоторых физико-механических параметров слоистых и полимерных образцов проводилось акустическими неразрушающими методами. Для теоретических исследований использовались формулы, полученные с применением метода контактного слоя. Для моделирования вязкоупругого поведения полимерных композитов использовалось обобщенное нелинейное дифференциальное уравнение Максвелла-Гуревича, полученное Г.И. Гуревичем из рассмотрения

молекулярного механизма упругих и не упругих деформаций. Решение задачи об оценке температурных напряжений в слоистом стержне проводилось численным методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Все теоретические расчеты производились в программной среде MATLAB.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика оценки термоупругих характеристик слоистых композиционных материалов.
2. Результаты сопоставления экспериментальных и теоретических данных, характеризующих свойства слоистых материалов.
3. Обоснование необходимости учета контактного слоя при оценке физико-механических свойств слоистых композитов и моделировании поведения моделей таких материалов под влиянием температуры.

Личный вклад автора заключается в:

1. Создании методики изготовления слоистых стержней и проведении физического эксперимента, направленного на получение данных измерений скорости звука и модуля упругости исследуемых образцов в процессе отверждения.
2. Увеличении области применения метода контактного слоя (метод Р.А. Турусова) и нелинейного физически обоснованного уравнения Максвелла-Гуревича.
3. Разработке программ на языке MATLAB для определения термоупругих свойств слоистых композитов. Формирование базы данных результатов экспериментальных исследований.

Степень достоверности. Достоверность результатов подтверждается применением строгих математических методов решения задач, а также удовлетворительным согласованием данных теоретических решений и физических экспериментов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и прошли апробацию на:

Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. «Машиностроение: новые концепции и технологии». Красноярск, 2021 г.

Двадцать восьмой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». Москва, 2022 г.

Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, учёных и специалистов «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе» Тюмень, 2022 г.

XXV Ежегодной научной конференции отдела полимеров «ПОЛИМЕРЫ 2024», посвященная 100-летию со дня рождения академика Н. С. Ениколопова. ФИЦ ХФ РАН, г. Москва, 11–12 и 14 марта 2024 г.

XXVI Ежегодной научной конференции отдела полимеров «ПОЛИМЕРЫ 2025». ФИЦ ХФ РАН, г. Москва, 17–20 февраля 2025 г.

Публикации автора по теме диссертации. По тематике диссертационной работы опубликовано 4 научные работы в журналах, входящих в перечень ВАК РФ рекомендованных для публикации результатов диссертаций и 5 публикаций в сборниках тезисов докладов научных конференций. Из указанных 4, входящих в ВАК изданий, 2 включены в международные системы цитирования Scopus и Web of Science. Также зарегистрированы 3 программы для ЭВМ и 1 база данных.

Описание структуры и объема работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, 5 приложений, списка цитируемой литературы. Работа изложена на 120 страницах, содержит 41 рисунок, 11 таблиц. Список использованных источников включает в себя 110 наименований.

Краткое содержание диссертации.

Во **введении** дана общая характеристика работы, сформулированы ее цели, задачи и методы их реализации, обоснована актуальность темы исследования. Приводятся достижения предшественников и новизна полученных и выносимых на защиту результатов, их теоретическая и потенциальная практическая значимость.

В **первой главе** описаны основные свойства адгезионных соединений. Описан механизм возникновения адгезии. Выделены существующие достижения ученых-исследователей в изучении межфазных областей, оказывающих влияние на свойства и поведение слоистых композитов. Приводятся виды разрушений адгезионных соединений.

Во **второй главе** описаны методы моделирования контакта между слоями композитов, а также выделяются их преимущества и недостатки. Наиболее подробно описывается метод контактного слоя Р.А. Турусова. Приводятся факты, обосновывающие целесообразность использования выделенного метода для исследований полимерных слоистых композитов.

Модели, позволяющие производить расчет многослойных объектов представлены на рисунке 1. Модель, которую предложил А.Р. Ржаницын представляет собой систему связей сдвига, воспринимающих сдвигающие усилия и поперечных связей, препятствующих отрыву или прижатию одного слоя к другому (рисунок 1, а). Область, в которой располагаются связи, А.Р. Ржаницын называет «швом» — это слой материала сварки. Подобный подход к расчету слоистых стержней и пластинок с учетом сдвига соединительных слоев и изгиба жестких слоев был представлен академиком В.В. Болотиным. Однако А.Р.

Ржаницын и В.В. Болотин в своих трудах не дают подробного анализа краевого эффекта.

При исследовании армированных пластиков А.Л. Рабинович уделил внимание наличию резко выраженного краевого эффекта в распределении касательных напряжений в полимерном адгезиве с армирующими элементами. А.Л. Рабиновичу удалось разработать метод расчета распределения напряжений в адгезионных соединениях. Метод базировался на концепции, согласно которой тонкие слои адгезионного полимера моделируются в виде сплошной анизотропной среды (рисунок 1, б). Модуль Юнга такой анизотропной среды в направлении касательной к поверхности склейки устремлен к нулю. Данный метод позволяет решать задачи, удовлетворяя всем граничным условиям и избежать сингулярных решений вблизи угловых точек.

Первые две модели (рисунок 1, а, б) позволяют производить расчет напряженно - деформированного состояния лишь некоторых слоистых объектов, но поскольку в обоих вариантах адгезив полностью представляется соединительной средой, то происходит исключение адгезива как активной среды. Такого рода допущение не позволяет оценить влияние изменения свойств полимера и его вклад (например, в температурные или усадочные напряжения модели) в общее напряженно-деформированное состояние адгезионного соединения, что может привести к значительным погрешностям.

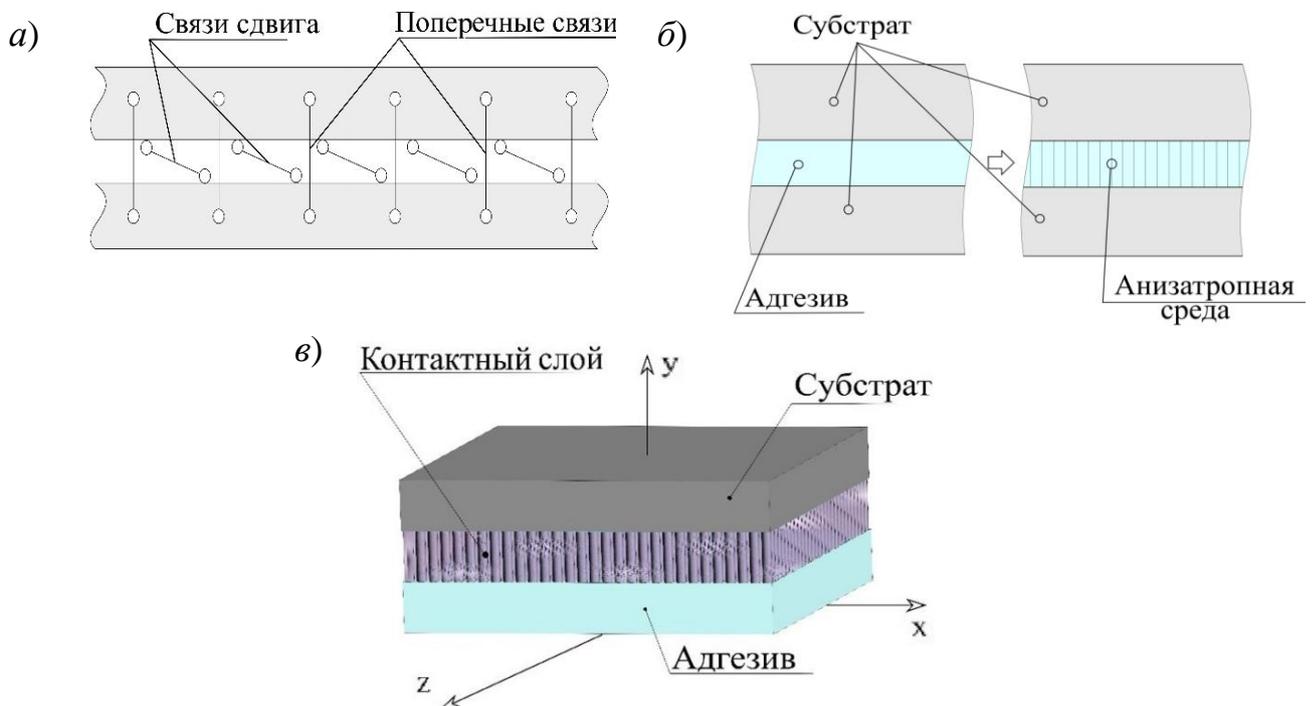


Рисунок 1 – Варианты моделей адгезионных соединений

а) Модель связей, соединяющих монолитные прямолинейные слои (модель, предложенная А.Р. Ржаницыным); б) Модель многослойной структуры, предложенная А. Л. Рабиновичем; в) Модель адгезионного взаимодействия, предложенная Р.А. Турусовым

Метод моделирования (метод контактного слоя), предложенный Р.А. Турусовым не исключает участие адгезива как активной среды, при этом позволяет полностью решить задачу Коши, удовлетворяя всем граничным условиям.

Контактные слои рассматривают как чисто упругую анизотропную среду (рисунок 1, в). Для плоской задачи уравнения равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0; \quad (1)$$

Также соотношения Коши, связывающие полные деформации с перемещениями частиц среды u и v в направлениях x и y :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (2)$$

где σ_x и σ_y – нормальные компоненты тензора напряжений; τ_{xy} – сдвиговые компоненты; ε_{xx} и ε_{yy} компоненты тензора деформаций вдоль осей x и y (рисунок 1, в); ε_{xy} – сдвиговая компонента тензора деформаций.

Закон Гука для ортотропного тела, связывающий упругие деформации e_{ij} в направлении осей упругой анизотропии с напряжениями (для плоской задачи $e_{zz}=0$) имеет вид:

$$\sigma_x = \frac{E_{xx}(e_{xx} + \mu_{xy}e_{yy})}{\Delta}; \quad \sigma_y = \frac{E_{yy}(e_{yy} + \mu_{yx}e_{xx})}{\Delta}; \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = G_{xy}e_{xy}; \quad \Delta = 1 - \mu_{xy}\mu_{yx},$$

где E_{xx} , E_{yy} , G_{xy} – нормальные модули Юнга и модуль сдвига ортотропного контактного слоя; μ_{xy} и μ_{yx} – коэффициенты Пуассона.

Для упругого контактного слоя вместо (2) имеем

$$e_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}; \quad e_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad e_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (4)$$

Как было написано ранее, рассматриваемый контактный слой состоит из стерженьков, которые не имеют контакта друг с другом и направлены перпендикулярно (нормально) к поверхности адгезионного контакта, т.е. параллельно оси Oy , поэтому напряжения σ_x в таком слое равны нулю. С учетом этого, в первом уравнении (3) модуль $E_{xx} = 0$. Таким образом, открывается возможность прямого интегрирования уравнений равновесия (1). В силу сохранения сплошности на границах $y = \pm h^*$ контактного слоя и соблюдения третьего закона Ньютона должны выполняться условия непрерывности векторов напряжений и перемещений. Т.е. в общем случае на этих границах перемещения u и v , а также касательные и нормальные напряжения контактного слоя и прилегающих к ним пластин должны быть равны друг другу. В силу сравнительно небольших поперечных размеров модели при решении задачи можно ограничиться

теорией пластин или балок. В этом случае, интегрируя систему уравнений (1) – (4) при удовлетворении граничных условий относительно перемещений становится возможным получить выражения напряжений и смещений в контактном слое.

Стоит подчеркнуть, что в одном кубическом сантиметре стали (субстрата) содержится 10^{22} атомов, тогда на одной из сторон (т.е. на одном квадратном сантиметре) будет располагаться приблизительно 10^{14} атомов, а при нанесении и распределении эпоксидного связующего (адгезива) не с каждым атомом на поверхности субстрата возникнет связь с активным атомом нанесенного, например, кистью адгезива. Более того, стоит учитывать наличие микроскопических неровностей, а также других несовершенств поверхности субстрата из-за которых доля участвующих в контакте атомов может уменьшаться. Таким образом, предполагается, что данные связи являются достаточно редкими и не контактируют друг с другом, поэтому могут быть представлены в виде некоторой системы стерженьков-связей (рисунок 2), образующей ортотропный слой между адгезивом и субстратом.

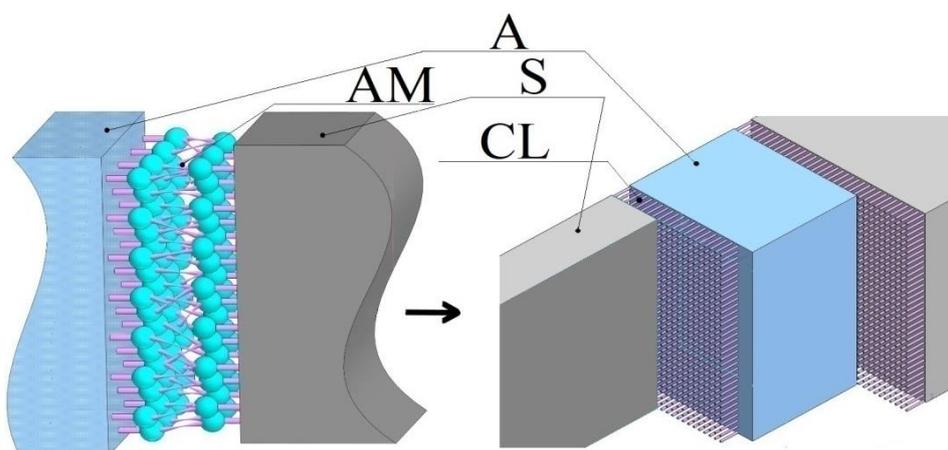


Рисунок 2 – Схематическое представление адгезионной связи между приведенными в контакт слоями из разнородных материалов: А – адгезив (например, эпоксид), АМ – молекулы адгезива, S – субстрат (например, сталь), CL – контактный слой

В третьей главе приводятся температурные зависимости модуля упругости и коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР) полимерного адгезива, а также трансверсально-изотропных композитов двух конфигураций (трехсекционный и многослойный). Также в главе приводятся результаты расчета температурных напряжений указанных композитов.

При расчете методом контактного слоя напряженно-деформированного состояния модели слоистого материала, растягивающегося (сжимающегося) нормальным напряжением $\sigma_z = q$, приложенным к торцам было получено следующее соотношение между полной деформацией слоистого стержня $\varepsilon_{z1.b}$ и его параметрами:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{z.l.b.} &= \bar{e}_z + \bar{\varepsilon}_t = \frac{\sigma}{E_{eff.l.b.}} + \alpha_{eff.l.b.} \Delta T = \\
&= q \left[\left(\frac{V_0}{E_0} + \frac{V_1}{E_1} \right) + \frac{2\delta}{\omega^2} \left(\frac{\mu_0 V_0}{E_0 h_0} - \frac{\mu_1 V_1}{E_1 h_1} \right) \left(1 - \frac{th(\nu)}{\nu} \right) \right] + \\
&+ \left[(\alpha_0 V_0 + \alpha_1 V_1) + \frac{2\beta}{\omega^2} \left(\frac{\mu_0 V_0}{E_0 h_0} - \frac{\mu_1 V_1}{E_1 h_1} \right) \left(1 - \frac{th(\nu)}{\nu} \right) \right] \Delta T,
\end{aligned} \tag{5}$$

где нижние индексы 0 относятся к субстрату, а 1 – к адгезиву; E_0, E_1 , Па, – модули Юнга; μ_0, μ_1 – коэффициенты Пуассона; h_0, h_1 , мм, – величины толщины; V_0, V_1 – относительные объемные доли содержания субстрата и адгезива, соответственно; e_z – упругая деформация; ε_t – температурная деформация; ΔT , К – температурная разность.

Параметры ν, δ, β в соотношении (5) характеризуют контактный слой и определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
\nu &= \frac{\omega l}{2}; \quad \delta = 2 \left(\frac{\mu_1}{E_1} - \frac{\mu_0}{E_0} \right) gr; \quad \beta = 2(\alpha_0 - \alpha_1) gr; \\
\omega^2 &= gr \left[\frac{1 - \mu_0}{E_0 h_0} + \frac{2(1 - \mu_1)}{E_1 h_1} \right],
\end{aligned} \tag{6}$$

где $gr = G^*/h^*$ жесткость контактного слоя, G^* и h^* – модуль сдвига и толщина контактного слоя, $G^* = E^*/2$; l , мм, – размер стороны квадратного поперечного сечения (длина склейки слоя адгезива); Параметр жесткости контактного слоя, как целое, появляется при решении задач механики адгезии в приближенном варианте. Как показали исследования приближенное (одномерное по сути решение) дает ошибку не более 10% по сравнению со строгим решением, например, с учетом изгиба в рассматриваемых задачах.

Если положить в соотношении (5) $\Delta T = 0$, то из него можно вывести выражение для определения эффективного (*eff*) модуля упругости $E_{eff.l.b.}$ (модуль Юнга) слоистого стержня (*l.b.*), которое принимает следующий вид:

$$E_{eff.l.b.} = \left[\left(\frac{V_0}{E_0} + \frac{V_1}{E_1} \right) - \frac{2 \cdot \left(\frac{\mu_0}{E_0} - \frac{\mu_1}{E_1} \right)^2}{\frac{(1 - \mu_1)}{E_1 \cdot V_1} + \frac{(1 - \mu_0)}{E_0 \cdot V_0}} \cdot \left(1 - \frac{\tanh(\nu)}{\nu} \right) \right]^{-1}. \tag{7}$$

Если в выражении (7) жесткость контактного слоя принять нулевой, то получится классическая формула смеси А. Рейсса:

$$E_{mix.eff} = \frac{E_0 E_1}{V_0 E_1 + V_1 E_0}, \tag{8}$$

Также из выражения (5) можно получить формулу для определения коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР) $\alpha_{eff.l.b.}$, при условии, что $q=0$:

$$\alpha_{eff.l.b.} = (\alpha_0 \cdot V_0 + \alpha_1 \cdot V_1) + \frac{4 \cdot (\alpha_0 - \alpha_1) \cdot (\mu_0 \cdot E_1 - \mu_1 \cdot E_0) \cdot V_0 \cdot V_1}{(1 - \mu_0) \cdot E_1 \cdot V_1 + (1 - \mu_1) \cdot E_0 \cdot V_0} \cdot \left(1 - \frac{\tanh(\nu)}{\nu}\right) \quad (9)$$

На рисунке 3, а показаны кривые температурных зависимостей модулей Юнга полимерного, составного и слоистого стержней. Модуль Юнга составного стержня (образец 2) рассчитывали по формуле смеси (8), а слоистого стержня (образец 3) – по формуле, учитывающей параметры контактного слоя (см. формулу (7)). Модуль Юнга полимера E_1 вычисляли по эмпирической формуле, полученной путем аппроксимации экспериментальных данных, измеренных в процессе лабораторного исследования зависимости модуля Юнга эпоксидного адгезива E_1 от температуры T . Для КЛТР полимера α_1 также использовали эмпирическую формулу.

Поведение кривой 1 на рисунка 3, а показывает, что при увеличении температуры модуль упругости полимера снижается почти по линейному закону. Такой анализ показывает, что модуль упругости полимера при начальной температуре полимера, равной 295 К, составляет 2831 МПа, а при температуре 395 К – 1011 МПа (уменьшается приблизительно в 2,8 раза с увеличением температуры на 100 К). Такой эффект снижения модуля упругости можно объяснить увеличением межатомных и межмолекулярных расстояний, а также ослаблением усилий взаимодействия между микрочастицами в теле материала.

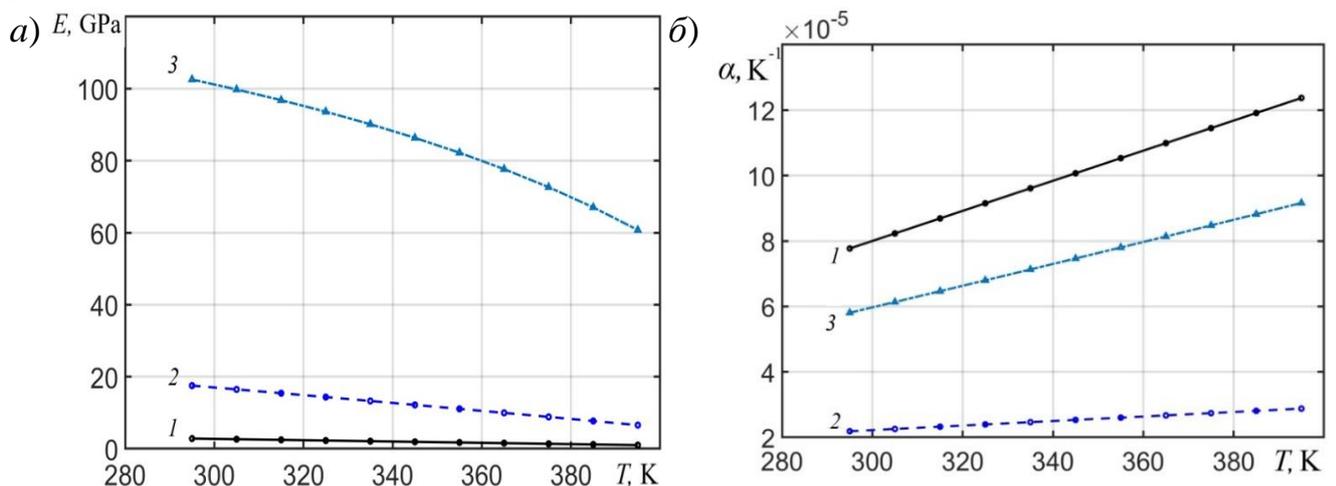


Рисунок 3 – Расчетное влияние температуры на модули упругости (а) и КЛТР (б) полимерного (1), составного (2) и слоистого (3) стержней

Результаты, полученные по формуле смеси для составного стержня (см. кривую 2 на рис. 3, а), свидетельствует о том, что при повышении температуры модуль Юнга снижается так же, как у полимера, но кривая 2 имеет угол наклона к оси абсцисс гораздо больший, чем у кривой 1. Такая разница обусловлена тем, что

составной стержень (образец 2) включает в себя секцию полимера между двумя секциями стали (относительные объемные доли полимера и стали равны соответственно 15 и 85 %), а это есть следствие того, что начальное значение модуля Юнга у такого составного стержня больше, чем у полимерного.

Кривая 3 на рисунке 3, а, полученная по формуле, учитывающей контактный слой, заметно отличается от первых двух. Для этого случая важно отметить, что значение модуля Юнга при начальной температуре, полученное по формуле (7), оказывается гораздо выше такового, полученного по формуле смеси. Такой синергетический эффект в слоистой структуре возникает ввиду влияния контактного слоя, возникающего между адгезивом и субстратом. Выражение (7) позволяет учитывать наличие контактного слоя и его параметры, что и дает наблюдаемое расхождение. Поскольку расчет проводился для мягкого полимера (адгезива), модуль Юнга которого значительно ниже модуля Юнга стали (субстрата), здесь с точки зрения физики, вступает в силу модуль всестороннего объемного растяжения K (вместо обычного модуля упругости полимера), зависящий как от модуля упругости, так и от коэффициента Пуассона:

$$K = \frac{E}{2(1 - 2\mu)}. \quad (10)$$

В приведенном расчете коэффициент Пуассона близок к значению 0,5, а это означает, что вместо обычного модуля Юнга полимера работает модуль всестороннего объемного сжатия (растяжения) K и сопротивление слоистой структуры растяжению и сжатию возрастает.

На рисунке 3, б представлены графики температурных зависимостей КЛТР полимерного, составного и слоистого стержней. Видно, что все три кривые демонстрируют рост при повышении температуры. КЛТР полимера возрастает в связи с тем, что при увеличении температуры молекулы становятся более подвижными и в процессе своего движения ослабляют межмолекулярные связи.

Согласно расчетным данным для слоистого стержня, наличие контактных слоев значительно влияет на результаты; это есть следствие преобладающего влияния модуля всестороннего объемного растяжения K (вместо обычного модуля Юнга полимера, как уже было указано выше).

В **четвертой главе** приводятся теоретические и экспериментальные данные по скорости звука в слоистых композитах в зависимости от модуля упругости полимера (рисунок 4). Представлены теоретические исследования скорости звука в зависимости от коэффициента Пуассона, а также от размера поперечного сечения образца. В результате исследований, содержащихся в данной главе, был составлен план акустических экспериментальных исследований.

Существует известное утверждение, что геометрические размеры сечения, значительно меньшие длины стержня, являются признаком корректности

ультразвукового контроля параметров материала стержня. Однако все эти принципы относятся к стержням с однородной структурой. Выражение для вычисления модуля упругости слоистого стержня (7) дает возможность учесть длину стороны квадратного сечения стержня l , параметры контактного слоя и коэффициент Пуассона. Таким образом, становится возможным увидеть влияние размера сечения (рисунок 5, *a*), а также модуля упругости (рисунок 4) и коэффициента Пуассона полимера (рисунок 5, *б*) (эпоксидной смолы) на скорость проходящего в материале звука. Связь между модулем упругости и скоростью звука выражается известной формулой:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (11)$$

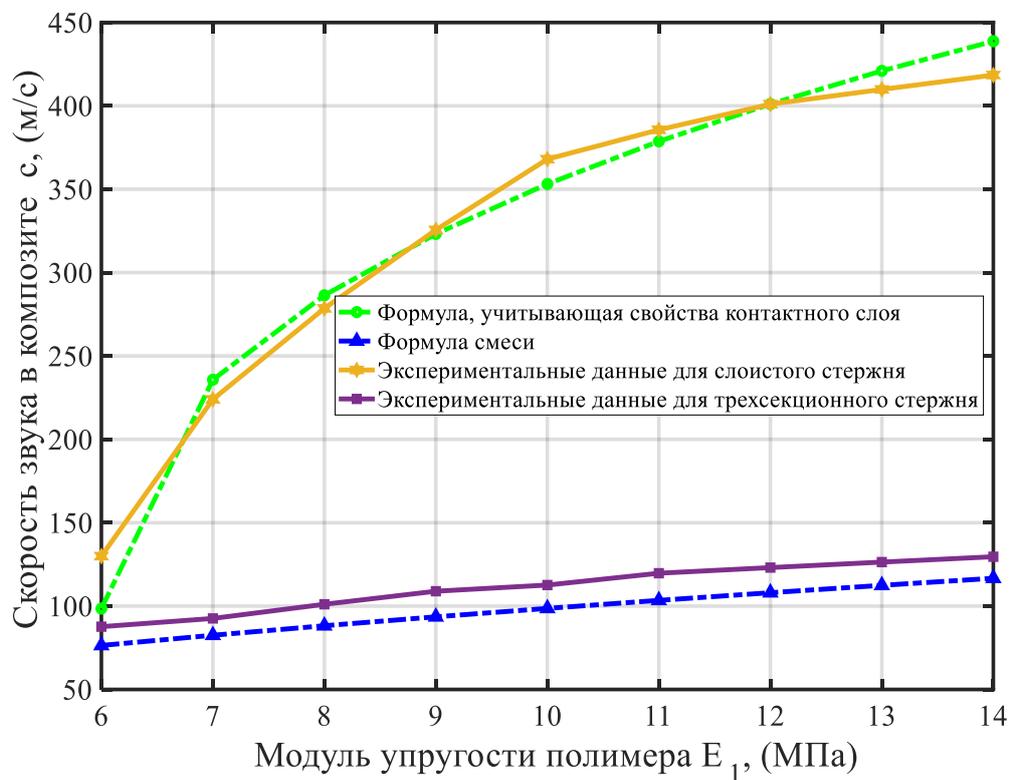


Рисунок 4 – Экспериментальное и теоретическое исследование влияния модуля Юнга полимерного связующего на скорости звука композиционных стержней (трехсекционный и слоистый)

Скорость звука в стержне слоистой структуры зависит от многих параметров, которые необходимо учитывать. Важно отметить, что аналитическая формула 7 для определения эффективного модуля Юнга с использованием модели контактного слоя достаточно хорошо согласуется с результатами физического эксперимента (рисунок 4).

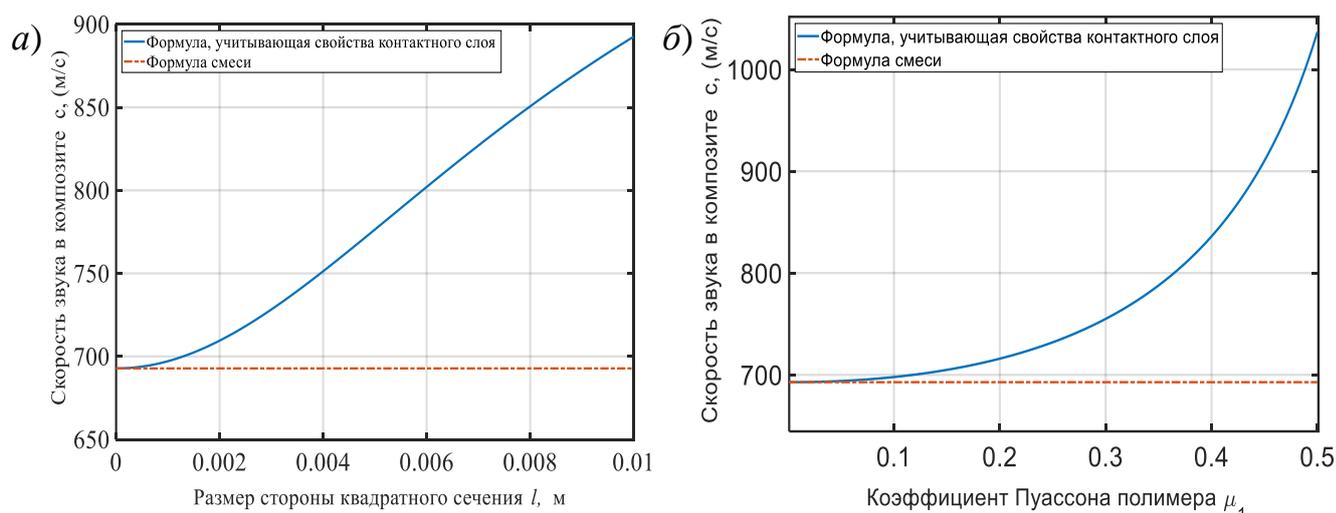


Рисунок 5 – Влияние параметров композита (размера квадратного сечения l (а) и коэффициента Пуассона полимера (б)) на скорость звука в слоистом материале. Исходные данные: $l = 0,01$ м; $E_0 = 210\,000$ МПа; $E_1 = 500$ МПа; $\mu_0 = 0,3$; $\mu_1 = 0,44$; $\rho_0 = 7800$ кг/м³; $gr = 25000$ МПа/м; $\rho_1 = 1200$ кг/м³

Формула эффективного модуля, в которую включен контактный слой может использоваться для определения скорости звука и дает возможность проводить численные эксперименты путем изменения размера прямоугольного сечения и значений механических свойств двух материалов, составляющих слоистый композит. При изменении размера сечения стержня будет происходить видимое изменение модуля упругости, что является значимым для обнаружения синергетического эффекта композита. Исходя из представленных в настоящей главе исследований было проведено расширенное экспериментальное исследование металлополимерных многослойных стержней.

В пятой главе представлен порядок проведения физического эксперимента. Отдельное внимание уделяется технологии изготовления слоистых образцов. Приводится описание устройств, с помощью которых проводились измерения скорости звука в полимерных и слоистых образцах. Следует отметить, что эксперимент проводился в процессе отверждения образцов. В завершающей части главы полученные эмпирические кривые анализируются и сравниваются с теоретическими.

В ходе эксперимента одновременно изготавливались пять стержневых образцов (рисунок б). Один из стержней изготовлен полностью из эпоксидного полимера, второй и третий состоит из тонких слоев латуни, склеенных между собой эпоксидным адгезивом. Второй и третий образцы отличаются друг от друга геометрическими размерами, но составляющие их слои имеют одинаковые физико-механические параметры. Четвертый образец составлен из алюминиевых и

полимерных слоев. Пятый образец изготовлен из двух алюминиевых пластин, соединенных между собой слоем полимерного адгезива.

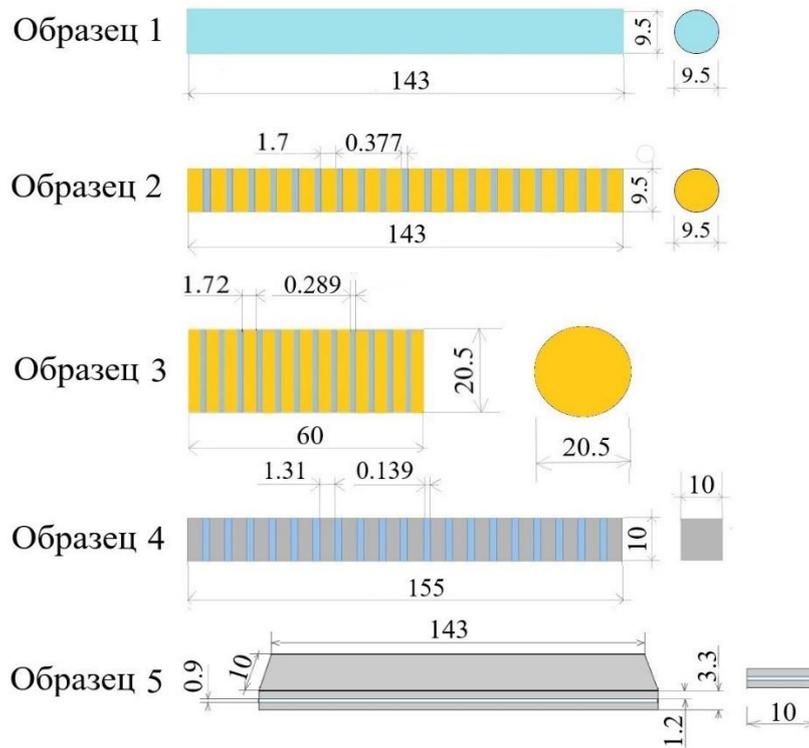


Рисунок 6 – Геометрия исследованных композитных стержней: цельного полимерного (1) и слоистых (2,3,4,5) (размеры даны в мм)

С помощью экспериментального исследования планировалось провести оценку влияния параметров модели материала на ее термоупругие свойства, а также верифицировать математическую модель (7), полученную по теории контактного слоя.

Для изготовления металлических слоев использовался лазерный станок по металлу с числовым программным управлением. Поскольку при соединении большого количества металлических слоев полимерное связующее стремится покинуть площадь склейки под давлением вышележащего слоя субстрата (металла) предлагается использовать прозрачную трубку из поливинилхлоридной (ПВХ) пленки (толщина ≤ 100 мкм), которая будет удерживать процесс растекания адгезива (рисунок 7). Далее идет процесс компоновки слоистого образца, состоящий из десяти этапов. После того, как пленка готова в нее помещается первый металлический слой как показано на рисунке 7. Предварительно приготовленная смесь ЭД-20 с отвердителем заливается в цилиндр шприца с установленной иглой, через которую на металлический диск наливается полимер. Дальнейший процесс становится циклическим. На рисунке 7 показан порядок создания слоистого стержня.

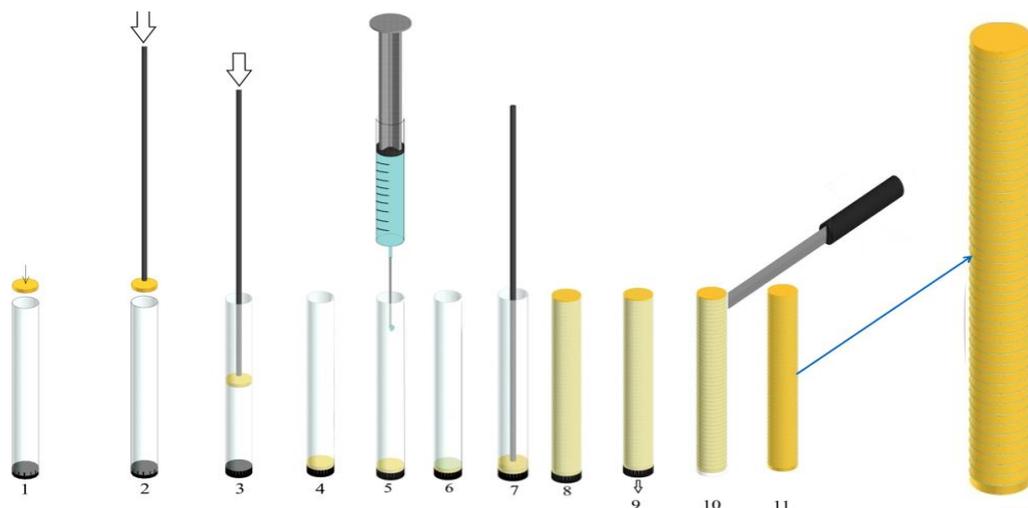


Рисунок 7 – Порядок изготовления слоистых образцов

Модуль упругости у всех трех образцов определялся в процессе отверждения ультразвуковым прибором Пульсар 2.2. Измерения производились на образцах в пленке. Промежуток времени от изготовления образцов до начала измерения составил 30 минут, а от начала измерения до его завершения прошло 28 часов. На рисунке 8 представлены кривые зависимости модуля упругости слоистых композитных стержней от модуля упругости (модуля Юнга) полимера. Экспериментальные данные (кривая 1 на всех трех графиках) были получены путем одновременного измерения полимерного и слоистых стержней, т.е. при одинаковой глубине отверждения. Помимо экспериментальной кривой, на каждом графике (*а*, *б*, *в*) рисунка 8 представлены еще две кривые, полученные численными расчетами, в основе которых лежат разные математические модели. Для получения кривой 2 на рисунке 8, *а*, *б*, *в*, была применена математическая модель (7), позволяющая учитывать физико-механические параметры адгезионного контакта. На рисунке 8, *а*, *б*, *в*, представлена кривая 3, для получения которой была использована известная формула смеси Рейсса (8).

Модуль упругости всех рассматриваемых композиционных образцов в процессе отверждения адгезионных слоев повышался. Вначале, при модуле упругости полимера равном 1500 МПа экспериментальная кривая 1 на рисунке 8, *а* показывает модуль упругости слоистого композита равным $3,6310 \cdot 10^4$ МПа, а кривая 2, построенная по модели, учитывающей контактный слой показывает значение $3.599 \cdot 10^4$ МПа, которое на $\sim 1\%$ больше полученного из физического эксперимента. При использовании формулы смеси был получен более низкий модуль упругости композита, который при $E_1 = 1500$ МПа равен $1,359 \cdot 10^4$ МПа. Полученный результат свидетельствует о том, что формула смеси может быть эффективно использована только для расчета модуля упругости композита в первом приближении.

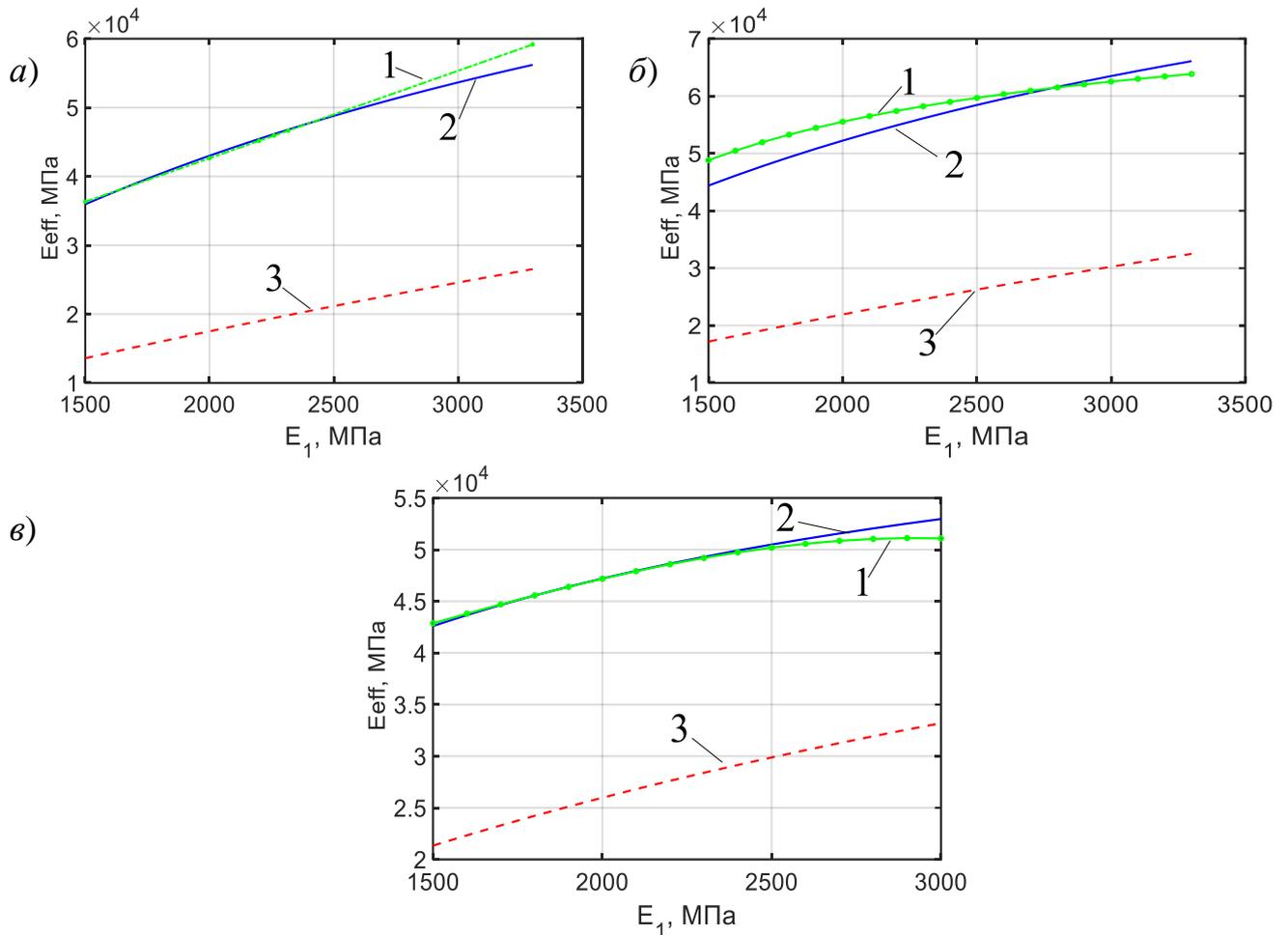


Рисунок 8 – Кривые зависимости модуля упругости композитного стержня в зависимости от модуля упругости полимера (*а* — образец 2, *б* — образец 3, *в* — образец 4). Эксперимент (1), модель, учитывающая контактный слой (2) и формула смеси (3)

Модель базирующаяся на теории метода контактного слоя показывает результат на всем рассматриваемом диапазоне изменения модуля упругости полимера не отличающийся от экспериментального более чем на 6%. Однако стоит отметить, что такая погрешность зафиксирована (для образцов 2 и 4) лишь тогда, когда модуль полимера достигает наибольшего значения (3300 МПа). Можно сделать предположение, что такая погрешность возникает вследствие изменения жесткости контактного слоя, которая при расчете была принята константой. На рисунке 8, б проиллюстрированы кривые, которые отражают модуль упругости (модуль Юнга) слоистого образца 3, в зависимости от модуля упругости полимера. Интересным является тот факт, что модуль упругости у слоистого стержня с большим диаметром поперечного сечения выше, чем у образца с меньшим диаметром сечения. Объемные доли полимера и латуни в образцах 2 и 3 приблизительно равны. Формула смеси не позволяет учесть геометрические размеры исследуемого образца, поэтому получается заметная погрешность. Также

стоит отметить, что размер краевого эффекта остается практически неизменным при увеличении длины l , а доля всесторонне растянутого полимера увеличивается, в связи с чем и происходит повышение модуля упругости всего композита. Как можно заметить, экспериментальные данные имеют достаточно хорошую согласованность с математической моделью, полученной по теории контактного слоя.

На рисунке 8, *в* представлены кривые, характеризующие модуль упругости слоистого композита из алюминия и полимера. Кривая 2 (рисунок 8, *в*), построенная согласно данным полученным по формуле (7) с достаточной точностью описывает модуль упругости в зависимости от модуля адгезива, что подтверждается экспериментальной кривой 1 (рисунок 8, *в*). Но в первую очередь данный эксперимент был проведен для выявления некоторой закономерности изменения жесткости контактного слоя в зависимости от характеристик субстрата и толщины полимера. Если сравнивать полученные экспериментальным путем данные для полимерного композита из слоев латуни (рисунок 8, *а*) с данными для композита из слоев алюминия, то можно сделать предположение, что вклад контактного слоя зависит от толщины полимера, а также от свойств адгезива и субстрата. Иначе говоря, всесторонне растянутый слой практически исчезает, превращаясь в небольшой толщины слой адгезива вблизи жесткой пластинки, растянутый только в плоскости этой пластинки, вследствие адгезии. Остальной материал адгезива сопротивляется в обычном режиме посредством модуля Юнга.

Также важно отметить, что пятый образец исследовался в лаборатории Института проблем механики РАН после полного отверждения методом акустического резонанса. В результате сравнения теоретических и экспериментальных данных было определено, что для расчета продольного модуля достаточно хорошо работает формула смеси Фойгта.

В **шестой главе** приводится вывод нелинейной системы дифференциальных уравнений для расчета температурных напряжений с учетом зависимости термоупругих и релаксационных констант полимера от температуры в слоистых стержнях квадратного сечения. Полученная система уравнений позволяет оценивать релаксационные явления, происходящие в полимерном адгезиве при нагревании. Также в главе приводится тестовый пример использования полученной системы для анализа температурных напряжений в слоистом стержне, состоящем из стальных и полимерных слоев. Представлена оценка влияния параметров композитного стержня на температурные напряжения, а также влияние скорости нагревания. Помимо результатов расчета температурных напряжений в слоистых стержнях дополнительно представляются результаты экспериментального и теоретического исследований стержней из чистого полимера.

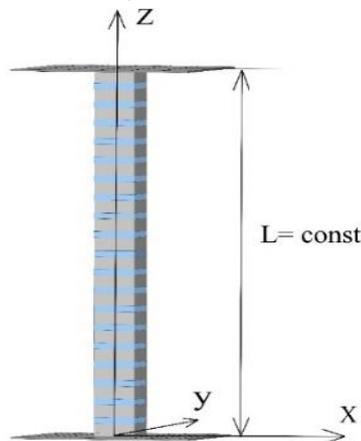
Объектом исследования является слоистый стержень из n слоев стали, чередующихся с $n-1$ слоем полимера. Стержень нагревается однородно (по длине и толщине) с некоторой скоростью ω так, что в любой момент времени его температура

$$T = T_0 + \omega t, \quad (12)$$

где t – время; T_0 – начальная температура; ω – скорость изменения температуры.

Слоистый стержень зажат с двух концов двумя жесткими стенками (рисунок 9), которые ограничивают какие-либо продольные перемещения и деформации. Длина стержня в процессе нагревания не изменяется, то есть $L = \text{const}$. Сечение стержня квадратное со стороной « l ».

Граничные условия для всего стержня записываются в следующем виде:



$$\begin{aligned} z = 0: w = 0. \\ z = L: w = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

По осям x и y :

$$x = \pm \frac{l}{2}: \sigma_{x,k} = 0; \quad x = \pm \frac{l}{2}: \sigma_{y,k} = 0. \quad (14)$$

Рисунок 9 – Слоистый стержень с жестко закрепленными краями

Направления x и y идентичны, поэтому рассматриваем только одно направление x .

Одной из особенностей механического поведения полимерных материалов является наличие у них большой доли обратимых деформаций, не совпадающих по фазе с напряжениями, так называемых высокоэластических деформаций. Таким образом, у полимеров зависимость физико-механических характеристик от скорости деформации, температуры и длительности воздействия нагрузок гораздо больше, чем у металлов. Также стоит выделить большую вероятность возникновения «холодной» ползучести и значительную роль релаксационных процессов.

Для получения используемой в работе модели Максвелла-Гуревича была задействована физическая теория, в основе которой лежат законы молекулярной природы деформации полимерных и иных материалов. Механическое поведение вязкоупругих жестких полимеров описывается обобщенным нелинейным уравнением Максвелла-Гуревича. Для напряжений и деформации изотропного полимера в одномерном случае указанное уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \varepsilon_{x1}^*}{\partial t} = \frac{\sigma_{x,1} - E_{\infty} \cdot \varepsilon_{x1}^*}{\eta_{0s}^*} \exp \left| \frac{\sigma_{x1} - E_{\infty} \cdot \varepsilon_{x1}^*}{m_0^*} \right| \quad (15)$$

где: $\sigma_{x,1}$ и ε_{x1}^* — напряжения и высокоэластические деформации; η_{0s}^* — коэффициент начальной релаксационной вязкости s -ой составляющей спектра высокоэластической деформации пропорционального начальному времени релаксации; E_{∞} — модуль высокоэластической деформации; m_s^* — модуль скорости, отражающий влияние скорости деформации на напряжения при фиксированной деформации. Ниже приведена аппроксимация зависимостей параметров от температуры по данным В.Ф.Бабича.

Модуль высокоэластической деформации 1-ой составляющей спектра высокоэластической деформации, $E_{1,\infty}$ определялся следующим образом:

$$E_{1,\infty} = \frac{2,4 \cdot 10^6}{T} - 6120, \text{ МПа} \quad (16)$$

Коэффициент начальной релаксационной вязкости 1-ой составляющей спектра высокоэластической деформации, η_1^* принят согласно следующим условиям:

$$\eta_1^* = 36000 \exp \left(\frac{9500}{T} - 21 \right), \text{ МПа} \quad (17)$$

Модуль скорости, отражающий влияние скорости деформации на напряжение при данной фиксированной деформации m_1^* :

$$m_1^* = -0.0155T + 7.73, \text{ МПа} \quad (18)$$

Для получения температурных напряжений, было рассмотрено уравнение нормальных усилий слоистой структуры (19), а также уравнение для определения высокоэластической деформации (15). Уравнение (19) было получено с применением теории метода контактного слоя.

$$\frac{\partial^2 N_1}{dx^2} = \frac{2G^*}{h^*} \left[\left(\frac{1-\mu_1}{E_1 h_1} + \frac{1-\mu_0}{2E_0 h_0} \right) N_1 + \left(\frac{\mu_0}{E_0} - \frac{\mu_1}{E_1} \right) q_n + \varepsilon_{t,1} - \varepsilon_{t,0} + \varepsilon_{x,1}^* \right] \quad (19)$$

где:

$$q = A_1 N_1 + A_{t,0} \cdot \varepsilon_{t,0} + A_{t,1} \cdot \varepsilon_{t,1} + A^* \varepsilon_{z1}^*$$

$$A_1 = \frac{2\mu_1 E_0 - 2\mu_0 E_1}{h_1 E_0 + 2h_0 E_1}; A_{t,0} = -\frac{2h_0 E_0 E_1}{E_0 h_1 + 2E_1 h_0}; A_{t,1} = -\frac{E_0 E_1 h_1}{E_0 h_1 + 2E_1 h_0}; A^* = -\frac{2E_0 E_1 h_1}{E_0 h_1 + 2E_1 h_0}.$$

Принимая во внимание также, что:

$$N_1(x, t) = h_1 \cdot \sigma_{x,1}(x, t)$$

Все начальные условия для искомым функций однородные, т.е. нулевые при $t = 0$:

$$N_1 = h_1 \sigma_{x,1} = 0; \varepsilon_{x,1}^* = 0; T = T_0. \quad (20)$$

Граничные условия для $N_1(\pm l/2)$, равны нулю.

Уравнение (15) решалось с использованием численного метода Рунге-Кутты 4 порядка в программной среде matlab.

Для примера был проведен анализ температурных напряжений в сталь-полимерном слоистом стержне. На рисунке 10 видно, что при нагревании до 29 °С кривые по всем трем скоростям сливаются в одну линию, что может означать то, что в диапазоне относительно низких температур влияние скорости нагревания в выбранном интервале скоростей не проявляется. Начиная с 30 °С влияние становится более существенным. Максимальная разница проявляется при температуре 60 °С. При приближении к конечной температуре 92 °С разница становится менее заметной, чем при 60 °С. Самые большие температурные напряжения, возникают при скорости нагревания $\omega = 4$ град/мин, а самые низкие при более медленном режиме повышения температуры $\omega = 0.04$ град/мин. Напряжения, полученные при нагревании $\omega = 0.4$ град/мин получились меньше, чем при $\omega = 4$ град/мин, но большими, чем $\omega = 0.04$ град/мин. Таким образом видна закономерность — чем выше скорость нагревания, тем напряжения больше.

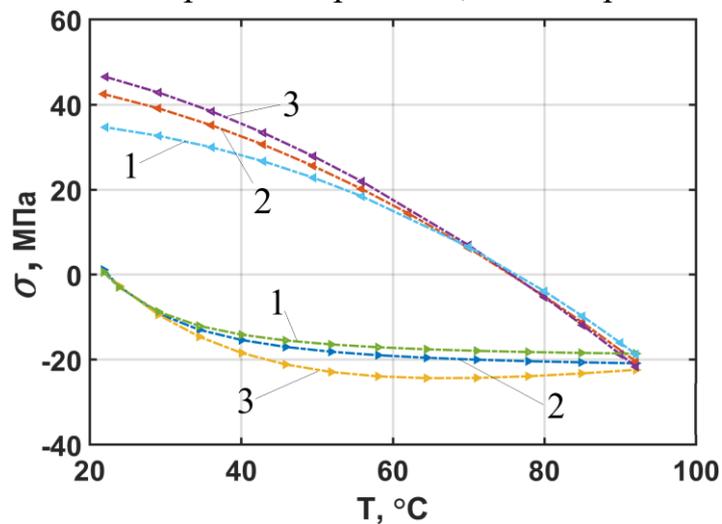


Рисунок 10 – График зависимости температурных напряжений в слоистом стержне при нагревании и охлаждении для трех разных скоростей изменения температуры: 1— $\omega = 0.04$ град/мин; 2— $\omega = 0.4$ град/мин; 3— $\omega = 4$ град/мин.

Стрелки на кривых указывают направление изменения температуры (нагревание— стрелка вправо, охлаждение— стрелка влево).

Кривые охлаждения также отражают влияние скорости изменения температуры. При понижении температуры от 92 до 70° С все три кривые охлаждения находятся близко друг к другу и не указывают на значительное влияние скорости изменения температуры. Влияние начинает проявляться после 70 °С и увеличивается до завершения процесса. Охлаждение при скорости $\omega = 0.04$ град/мин происходит более плавно и релаксационные процессы проявляются гораздо лучше, чем при более высоких скоростях, что и отражают приведенные

кривые. При скорости $\omega = 4$ град/мин. объект не успевает релаксировать, поэтому напряжения более высокие.

Основные выводы и результаты

Протестирован и верифицирован метод анализа напряженно-деформированного состояния слоистых структур, позволяющий учитывать свойства межфазных контактных слоев.

Полученные методом контактного слоя выражения для расчета модуля упругости и коэффициента линейного теплового расширения слоистого композита были реализованы в виде программы «FUSION 1.0».

С применением разработанной программы «FUSION 1.0» был проведен анализ влияния на эффективный модуль упругости и скорость звука слоистого стержня некоторых параметров: размер стороны сечения образца; коэффициент Пуассона и модуль упругости полимера. В результате было определено, что при увеличении коэффициента Пуассона, модуля упругости полимера и длины склейки эффективный модуль упругости (Юнга) слоистого композита повышается.

Разработана технология изготовления экспериментальных слоистых композиционных образцов, а также методика измерения скорости звука в процессе отверждения.

Показано, что при расчете модуля упругости композита формула смеси Рейсса дает значительно заниженный результат по сравнению с экспериментальным. Результат, полученный по формуле смеси может быть использован для анализа в первом приближении, но для более точных расчетов целесообразнее воспользоваться выражением, полученным с применением изложенного в настоящей работе метода контактного слоя.

Экспериментально выявлено, что жесткость контактного слоя сильно зависит как от свойств полимера, так и от свойств субстрата. В частности, для образца, изготовленного из слоев латуни и ЭД–20 жесткость контактного слоя gr равна 25 ГПа/мм, а для образца из алюминия с тем же связующим – 8 ГПа/мм.

Получена система разрешающих уравнений для оценки температурных напряжений в слоистом стержне, открывающая возможность производить численный анализ релаксационных явлений, происходящих в полимерном связующем (составляющем слоистый композит) при нагревании и охлаждении. Результаты проведенных расчетов температурных напряжений в сталь-полимерном слоистом стержне при различных скоростях нагревания позволили лучше понять механическое поведение модели слоистого материала, находящегося в нестационарном однородном температурном поле. На основании расчетов было определено, что по мере увеличения скорости нагревания, температурные напряжения в композитном стержне будут выше, а проявление релаксационных процессов будет менее заметным.

Список публикаций по теме диссертации

По результатам работы опубликованы в рецензируемых журналах из перечня **ВАК РФ**, индексируемых в Web Of Science, Scopus, следующие статьи:

1. Разакова Р.В. Термоупругие параметры слоистых композитов / Р. В. Разакова, Р.А. Турусов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2023. – Т. 16, № 1.– С. 140-151.
2. Razakova R.-R.V. Influence of adhesive interaction on the sound speed in layered composites / R.-R.V. Razakova, R.A. Turusov // Materials Physics and Mechanics. – 2024. – Vol. 52, No. 3. – P. 13-21.

Статьи в журналах, входящих в перечень **ВАК РФ**:

1. Турусов Р. А. Температурные напряжения в полимерах и слоистых композитах / Р. А. Турусов, Р. В. Разакова // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 22. – С. 20-24.
2. Разакова Р. В. Особенности численного моделирования композитных материалов с вязкоупругими полимерными слоями / Р. В. Разакова, М. А. Разаков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 77-86.

Свидетельства о государственной регистрации программ для электронных вычислительных машин и базы данных:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021663764 Российская Федерация. Программа прочностного анализа элементов конструкции из композиционных материалов "FusionComp 1.0" : № 2021662762 : заявл. 16.08.2021; дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 23.08.2021, Бюл. № 9 / автор и правообладатель Р. Р. В. Разакова. – 1 с.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686390 Российская Федерация. Программа для расчета физико-механических характеристик слоистых структур «Fusion 1.0» : № 2023685687 : заявл. 29.11.2023; дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 06.12.2023, Бюл. № 12 / автор и правообладатель Р. Р. В. Разакова. – 1 с.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023686391 Российская Федерация. Программа для расчета температурных напряжений в слоистых структурах : № 2023686009 : заявл. 29.11.2023 : опубл. 06.12.2023, Бюл. № 12 / автор и правообладатель Р. Р. В. Разакова. – 1 с.
4. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624603 Российская Федерация. База данных результатов экспериментальных исследований упругих и акустических характеристик полимерных и слоистых материалов : № 2023624321 : заявл. 29.11.2023 : опубл. 13.12.2023, Бюл. № 12 / автор и правообладатель Р. Р. В. Разакова. – 1 с.