

Научная статья

УДК 531 / 534

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16112>

ТЕРМОУПРУГИЕ ПАРАМЕТРЫ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

Р. В. Разакова ¹✉, **Р. А. Турусов** ^{1,2}

¹ Московский государственный строительный университет, Москва, Россия;

² Федеральный исследовательский центр химической физики
им. Н. Н. Семёнова РАН, Москва, Россия

✉ chernova_riorita@mail.ru

Аннотация. В статье представлены расчеты термоупругих параметров слоистой композиционной структуры (субстрат + адгезив) по методу контактного слоя. Соответствующая математическая модель (учитывает наличие контактного слоя) использована для исследования свойств слоистого стержня, подвергнутого нагреву. Получены и проанализированы температурные зависимости модуля Юнга, КЛТР и термических напряжений для слоистого, составного и полимерного стержней. Для объектов исследования проведено сравнение результатов расчета их эффективных свойств, полученных по классическим формулам смеси и по методу контактного слоя. Доказана важность учета наличия контактного слоя и его параметров при изучении термоупругих характеристик слоистых структур.

Ключевые слова: слоистый композит, адгезионная механика, метод контактного слоя, модуль Юнга, КЛТР

Для цитирования: Разакова Р. В., Турусов Р. А. Термоупругие параметры слоистых композитов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2023. Т. 16. № 1. С. 140–151. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16112>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16112>

THERMOELASTIC PARAMETERS OF LAYERED COMPOSITES

R. V. Razakova ¹✉, **R. A. Turusov** ^{1,2}

¹ National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia;

² Semenov Institute of Chemical Physics of RAS, Moscow, Russia

✉ chernova_riorita@mail.ru

Abstract. The paper presents calculations of thermoelastic parameters of layered composite structure (substrate + adhesive) using the contact layer method. The corresponding mathematical model (taking into account the presence of a contact layer) has been used to study properties of a layered rod subjected to heating. Temperature dependences of Young's modulus, CLTE and thermal stresses for layered, built-up and polymeric specimens were obtained and analyzed. A comparison of the calculation data on the effective properties of objects under investigation obtained by the classical formulae and by the contact layer method was made. The importance of taking into account the contact layer presence and its parameters in the study of thermoelastic characteristics of layered structures was proved.

Keywords: layered composite, adhesive mechanics, contact layer method, Young's modulus, CLTE

For citation: Razakova R. V., Turusov R. A., Thermoelastic parameters of layered composites, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 16 (1) (2023) 140–151. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16112>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Последние несколько десятилетий исследователи всего мира разрабатывают новые композиционные материалы и выделяют в отдельную группу материалы, имеющие слоистую структуру. Такая структура позволяет получать необходимые свойства материала и относительно просто их изготавливать. Слоистые композиционные материалы (СКМ) применяются во многих отраслях промышленности для производства элементов конструкций различного назначения [1]. Примерами таких элементов могут служить стержни, пластины и оболочки. Благодаря особым термоупругим свойствам, высокой прочности, коррозионной стойкости и относительно легкому весу, композиты выступают перспективными конкурентами традиционным материалам.

Для получения достоверных результатов расчета конструкций крайне необходимо умение моделировать физико-механическое поведение применяемого материала. В настоящее время большая часть текущих научных исследований сосредоточена на развитии физико-математических методов расчета эффективных свойств композиционных материалов [2]. В связи с увеличением количества материалов, соединяемых адгезивами, и с появлением новых клеящих веществ, происходит расширение и углубление знаний о механизме адгезии и теорий, его описывающих [3]. Механические свойства слоистых композитных структур могут изменяться в зависимости от различных геометрических и физических параметров модели, таких как размеры образца, модуль Юнга, коэффициент Пуассона и других параметров материалов адгезива и субстрата. Большое влияние на параметры композита оказывают давление, температура, старение и внешняя нагрузка. Таким образом, для расчета свойств материала такого рода чрезвычайно важно применять наиболее подходящие математические модели, точность которых подтверждена физическими экспериментами.

Материалы и методы

В классической теории для оценки упругих параметров композитов применяются формулы смеси, которые были получены У. Фойгтом (в 1889 г.) [4] и А. Рейссом (в 1929 г.) [5]. Формулы смеси для определения поперечного модуля упругости E_{mix} и эффективного коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР) α_{mix} записываются в следующей форме:

$$E_{mix} = \frac{E_0 E_1}{V_0 E_1 + V_1 E_0}, \quad (1)$$

$$\alpha_{mix} = \alpha_0 V_0 + \alpha_1 V_1, \quad (2)$$

где индексы 0 и 1 относятся к двум разным материалам.

Эти формулы не учитывают коэффициент Пуассона и характеристики контактного слоя, возникающего в результате адгезионного взаимодействия материалов, входящих в состав композита и контактирующих друг с другом. Использование формул смеси позволяет провести расчет термоупругих параметров только в первом приближении. Существует значительное количество научных трудов отечественных [6 – 10, 12] и зарубежных [11, 13 – 19] авторов, в которых предлагаются различные методы оценки напряженно-деформированного состояния и определения упругих параметров композитов, но результаты расчетов по представленным методам согласуются далеко не со всеми экспериментами и требуют доработки.

При расчетах материалов, которые состоят из относительно большого количества

слоев, происходит увеличение суммарной площади поверхности контакта взаимодействующих слоев по отношению к объему материала, что повышает значимость учета адгезионного взаимодействия слоев.

Модель контактного слоя. Р. А. Турусов предложил модель контактного слоя с ее теоретическим обоснованием [20]. В основе указанной модели лежит гипотеза существования определенного слоя в виде щетки коротких упругих стерженьков-связей, ориентированных нормально к поверхности контакта, и слой расположен между адгезивом и субстратом (рис. 1). В контактном слое отсутствует непосредственный контакт стерженьков друг с другом и, значит, отсутствуют нормальные напряжения σ_x и σ_z . Короткие стерженьки воспринимают напряжения сдвига σ_{yx} , σ_{zy} , σ_{xz} и, естественно, нормальные напряжения σ_y . В ходе решения контактных задач механики известными методами теории упругости, на границах между слоями и в угловых точках вблизи торцов контактного слоя для касательных напряжений возникает сингулярность типа $x^{-1/2}$ при $x \rightarrow 0$, т. е. бесконечность.

Модель контактного слоя, предложенная Р. А. Турусовым, позволяет удовлетворять всем граничным условиям при решении задачи Коши, поскольку открывает возможность избежать бесконечных напряжений в угловых точках склейки. При устранении такого рода сингулярностей, становится возможным применять известные критерии прочности адгезионных соединений. Данная модель контактного слоя может считаться верной на физическом уровне строгости, так как из существующей теории и косвенного эксперимента известно, что при адгезионном контакте число связей на 1 см^2 составляет 10^{12} , т. е. во взаимодействии субстрата с адгезивом участвует каждый десятый атом, а значит можно считать, что данные контакты являются относительно редкими и не соприкасаются друг с другом.

Таким образом, контакты в совокупности составляют регулярный слой стерженьков-связей, который имеет определенные параметры:

E^* – модуль упругости, G^* – модуль сдвига, h^* – толщина слоя.

Если число связей на 1 см^2 составляет 10^{12} , то во взаимодействии субстрата с адгезивом участвует каждый сотый атом, и в этом случае параметры среды составляют $0,01 \cdot E^*$, $0,01 \cdot G^*$ и h^* .

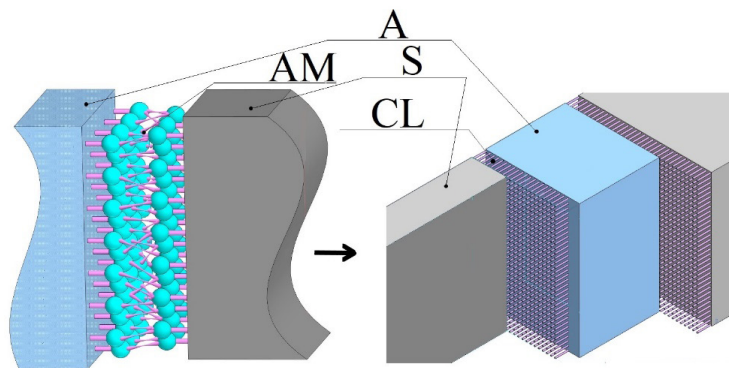


Рис. 1. Схематическое представление адгезионной связи между приведенными в контакт слоями из разнородных материалов:

A – адгезив (например, эпоксид), AM – молекулы адгезива,
S – субстрат (например, сталь), CL – контактный слой

В соответствии с теорией метода контактного слоя, в работе Р. А. Турусова [20] было получено следующее соотношение между полной деформацией слоистого стержня $\varepsilon_{z.l.b.}$ и его параметрами:



$$\varepsilon_{z.l.b.} = \bar{\varepsilon}_z + \bar{\varepsilon}_t = \frac{\sigma}{E_{eff.l.b.}} + \alpha_{eff.l.b.} \Delta T =$$

$$q \left[\left(\frac{v_0}{E_0} + \frac{v_1}{E_1} \right) + \frac{2\delta}{\omega^2} \left(\frac{\mu_0 v_0}{E_0 h_0} - \frac{\mu_1 v_1}{E_1 h_1} \right) \left(1 - \frac{\tanh(v)}{v} \right) \right] +$$

$$+ \left[(\alpha_0 v_0 + \alpha_1 v_1) + \frac{2\beta}{\omega^2} \left(\frac{\mu_0 v_0}{E_0 h_0} - \frac{\mu_1 v_1}{E_1 h_1} \right) \left(1 - \frac{\tanh(v)}{v} \right) \right] \Delta T, \quad (3)$$

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; ε_z – упругая деформация; ε_t – температурная деформация; ΔT , К – температурная разность.

Параметры v, δ, β в соотношении (3) характеризуют контактный слой и определяются следующим образом:

$$v = \frac{\omega l}{2}; \quad \delta = 2 \left(\frac{\mu_1}{E_1} - \frac{\mu_0}{E_0} \right) gr; \quad \beta = 2(\alpha_0 - \alpha_1) gr, \quad (4)$$

где l , мм, – размер стороны квадратного поперечного сечения (длина склейки слоя адгезива); gr , Па, – жесткость контактного слоя;

$$\omega^2 = gr \left[\frac{1 - \mu_0}{E_0 h_0} + \frac{2(1 - \mu_0)}{E_1 h_1} \right].$$

Если положить в соотношении (3) $\Delta T = 0$, 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:

$$E_{eff.l.b.} = \left[\left(\frac{V_0}{E_0} + \frac{V_1}{E_1} \right) - \frac{2 \cdot \left(\frac{\mu_0}{E_0} - \frac{\mu_1}{E_1} \right)^2}{\frac{(1 - \mu_1)}{E_1 \cdot V_1} + \frac{(1 - \mu_0)}{E_0 \cdot V_0}} \cdot \left(1 - \frac{\tanh(v)}{v} \right) \right]^{-1}. \quad (5)$$

Также из выражения (3) можно получить формулу для определения коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР) $\alpha_{eff.l.b.}$, при условии, что $q = 0$:

$$\alpha_{eff.l.b.} = (\alpha_0 \cdot V_0 + \alpha_1 \cdot V_1) + \frac{4 \cdot (\alpha_0 - \alpha_1) \cdot (\mu_0 \cdot E_1 - \mu_1 \cdot E_0) \cdot V_0 \cdot V_1}{(1 - \mu_0) \cdot E_1 \cdot V_1 + (1 - \mu_1) \cdot E_0 \cdot V_0} \cdot \left(1 - \frac{\tanh(v)}{v} \right). \quad (6)$$

Если в соотношении (3) положить суммарную деформацию всего слоистого стержня равной нулю, то получается зависимость температурных напряжений σ в стержне постоянной длины от различных характеристик стержня:

$$\sigma = -\alpha_{eff.l.b.} \cdot E_{eff.l.b.} \cdot \Delta T. \quad (7)$$

Коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) – это физическая величина, характеризующая относительное изменение линейных размеров тела с увеличением температуры на 1 К при постоянном давлении и без изменения фазы. КЛТР уникален для каждого материала и зависит от большого количества параметров. Это ключевое свойство материала оказывается особенно важным при исследовании композитной структуры, работающей в среде с изменяющейся температурой. Кристаллы, как правило, имеют самые низкие КЛТР, потому что их структура чрезвычайно однородна и прочна. Твердые тела с самыми высокими КЛТР имеют слабые межмолекулярные связи; к ним относятся, как правило, полимеры, для которых, как известно, характерны низкие температуры

плавления. При исследовании свойств композиционных материалов, содержащих в своем составе полимеры, большое внимание уделяется температуре стеклования, ниже которой полимерный материал становится твердым и хрупким. Данный параметр определяется для каждого полимера индивидуально и зависит от химического состава и строения молекулярной цепочки. Переход из твердого и хрупкого «стекловидного» состояния в мягкое и пластичное «каучукообразное» происходит при повышении температуры.

Предпосылки расчетов. Как было указано выше, для расчета физико-механических характеристик слоистых композиционных материалов необходимо знать достоверные значения параметров адгезива, субстрата, а также характеристики адгезионного взаимодействия контактирующих слоев. При исследовании термоупругого поведения композиционных стержней были использованы геометрические и физические параметры объектов экспериментального исследования, проведенного Р. А. Турусовым [20].

На рис. 2 схематично представлена геометрия исследованных образцов. Они имеют одинаковую длину; один сделан из чистого полимера, а два других состоят из двух материалов: металла и полимера.

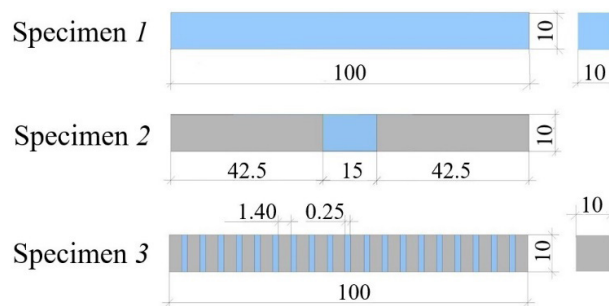


Рис. 2. Геометрия исследованных композитных стержней: цельного полимерного (1), составного (2) и слоистого (3) (размеры даны в мм)

Таблица 1

Исходные данные для расчетов

Параметр	Обозначение	Значение	
<i>Геометрия образцов</i>			
Общая длина, мм	L	100	
Размер стороны квадратного сечения, мм	l	10,0	
Толщина секций в образце 2, мм			
стальных	h_{st}	42,5	
полимерной	h_{pol}	15,0	
Толщина слоев в образце 3, мм			
стальных	h_0	1,40	
полимерных	h_1	0,25	
<i>Физические свойства материалов</i>			
Сталь:	модуль Юнга, ГПа	E_0	210
	коэффициент Пуассона	μ_0	0,3
	КЛТР, K^{-1}	α_0	$1,2 \cdot 10^{-7}$
	Коэффициент Пуассона полимера	μ_1	0,5
	Жесткость контактного слоя, ГПа/мм	gr	25

Образец 1 – это стержень из полимерного материала (в данном случае взят эпоксид). Образец 2 – стержень, составленный из двух стальных стержневых элементов (субстраты), между которыми находится слой из полимерного адгезива (эпоксид). Образец 3 – это слоистый стержень из стальных пластинок (субстраты), соединенных эпоксидом.

В табл. 1 представлены постоянные параметры композитов, принятые нами для расчетов. Необходимо обратить внимание на то, что слоистый и составной стержни содержат в своем составе одинаковое количество полимера и стали (в каждом из стержней 15 и 85 % соответственно).

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 3, а показаны графики температурных зависимостей модулей Юнга полимерного, составного и слоистого стержней. Модуль Юнга составного стержня (образец 2) рассчитывали по формуле смеси (1), а слоистого стержня (образец 3) – по модели Р. А. Турусова (см. формулу (5)). 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 [20]. Формула имеет следующий вид:

$$E_1 = -18,2 \cdot T + 8200. \quad (8)$$

Для КЛТР полимера α_1 также использовали эмпирическую формулу вида

$$\alpha_1 = (0,46T - 58) \cdot 10^{-6}. \quad (9)$$

Поведение кривой 1 на рис. 3, а показывает, что при увеличении температуры модуль упругости полимера снижается почти по линейному закону. Более точно оценить разницу между температурными зависимостями модулей упругости можно из анализа данных табл. 2. 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.

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)

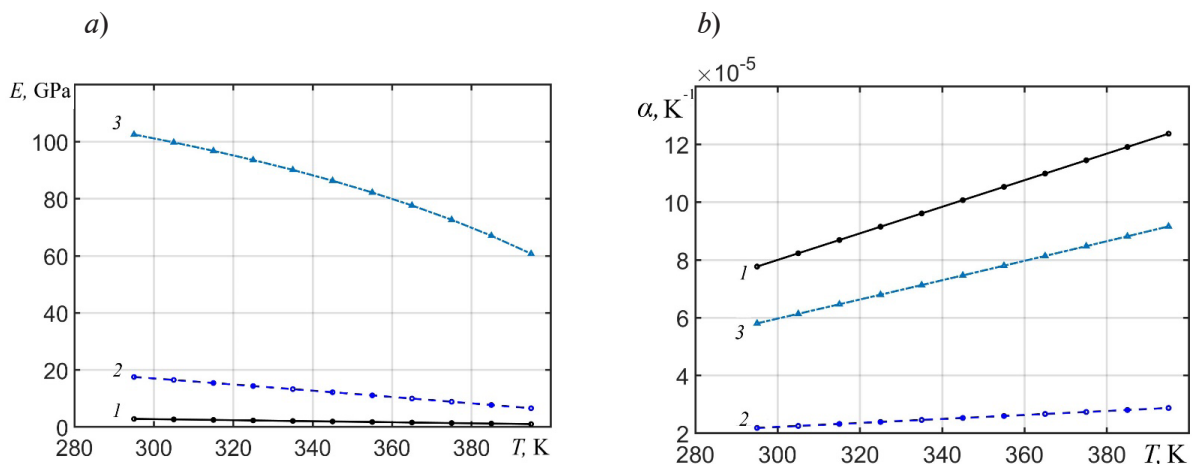


Рис. 3. Расчетное влияние температуры на модули упругости (а) и КЛТР (б) полимерного (1), составного (2) и слоистого (3) стержней. Используются данные табл. 1, а также формулы (8) и (9)

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. При увеличении температуры на 100 К модуль упругости снижается в 2,7 раза.

Таблица 2

Расчетные температурные зависимости модулей упругости и коэффициентов линейного теплового расширения (КЛТР) трех исследованных образцов

Температура, К	Модуль Юнга, МПа			КЛТР, 10^{-5} K^{-1}		
	1	2	3	1	2	3
295	2831	17 534	101 793	7,8	2,19	5,805
305	2649	16 482	99 065	8,2	2,25	6,134
315	2467	15 420	96 132	8,7	2,32	6,465
325	2285	14 349	92 965	9,2	2,39	6,797
335	2103	13 267	89 535	9,6	2,46	7,130
345	1921	12 176	85 801	10,1	2,53	7,465
355	1739	11 074	81 718	10,5	2,60	7,801
365	1557	9 961	77 227	11,0	2,67	8,138
375	1375	8 839	72 255	11,5	2,74	8,477
385	1193	7 705	66 711	11,9	2,81	8,818
395	1011	6 561	60 475	12,4	2,88	9,161

Примечание. Номера образцов соответствуют приведенным на рис. 2.

Кривая 3 на рис. 3, а, полученная по формуле Р. А. Турусова, заметно отличается от первых двух. Для этого случая важно отметить, что значение модуля Юнга при начальной температуре, полученное по формуле (5), 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 (4) позволяет учитывать наличие контактного слоя и его параметры, что и дает наблюдаемое расхождение. Поскольку расчет проводился для мягкого полимера (адгезива), модуль Юнга которого значительно выше модуля Юнга стали (субстрата), здесь вступает в силу модуль всестороннего объемного растяжения K (вместо обычного модуля упругости полимера), зависящий как от модуля упругости, так и от коэффициента Пуассона:

$$K = \frac{E}{2(1-2\mu)}. \quad (9)$$

В приведенном расчете коэффициент Пуассона близок к значению 0,5, а это означает главенство модуля K над модулем Юнга и сопротивлением слоистой структуры растяжению и сжатию.

В ходе изучения свойств материалов было установлено, что полимер обладает значительной долей свободного объема, который может представлять собой полости порядка молекулярных (мономерных размеров) или пустоты меньшей величины, связанные с нерегулярной упаковкой молекул. Процесс теплового расширения полимера представляет собой главным образом увеличение свободного объема при повышении температуры, тогда как подобные процессы в кристаллических твердых телах, с характерными для них много меньшими значениями КЛТР, связаны с ангармоничностью зависимости потенциальной энергии от межатомных или межмолекулярных расстояний [22]. В композиционных же структурах, каковыми являются слоистые материалы, разрушающие напряжения



могут возникнуть, например, вследствие разницы коэффициентов линейного теплового расширения компонентов, входящих в состав слоистого композита.

На рис. 3, *b* 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 итоге КЛТР слоистого стержня принимает большее значение, чем такового составного, рассчитанного по формуле смеси.

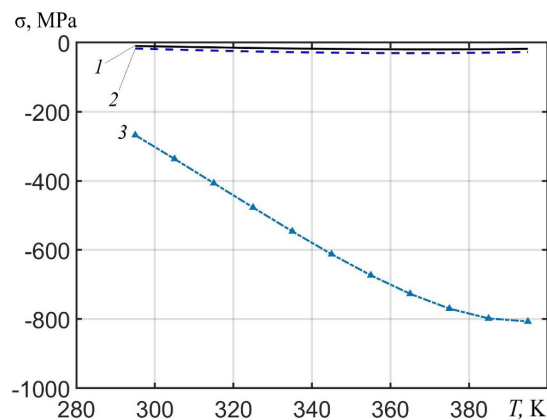


Рис. 4. Температурные зависимости температурных напряжений в полимерном (1), составном (2) и слоистом (3) стержнях (кривые 1 и 2 почти совпали) Используются данные табл. 1, а также формулы (8), (9)

Таблица 3

Расчетные температурные зависимости напряжений, вызванных нагревом, в трех образцах

Температура, К	Напряжение σ , МПа		
	1	2	3
295	-9,899	-17,244	-267,866
305	-11,991	-20,437	-336,650
315	-13,935	-23,289	-406,812
325	-15,681	-25,747	-477,141
335	-17,178	-27,758	-546,201
345	-18,377	-29,270	-612,286
355	-19,227	-30,225	-673,335
365	-19,678	-30,570	-726,839
375	-19,680	-30,245	-769,702
385	-19,182	-29,194	-798,035
395	-18,134	-27,356	-806,866
405	-16,486	-24,672	-789,686
415	-14,188	-21,079	-737,708

Примечание. Номера образцов соответствуют приведенным на рис. 2.

Чтобы на практике избежать расслоения материалов и разрушения их структуры, очень важно правильно проводить расчет температурных напряжений в композитных материалах. Результаты наших расчетов температурных напряжений в трех образцах показали, что поведение слоистого композита при повышении температуры кардинально отличается от соответствующих реакций составного (трехсекционного) и полимерного стержней.

На основании полученных значений (табл. 3) и построенных графиков (рис. 4) можно сделать заключение, что температурные напряжения в полимерном и составном стержнях оказываются гораздо меньше, чем таковые для слоистого стержня. Это обусловлено тем, что значения модуля Юнга и КЛТР, полученные по формуле смеси, меньше, чем полученные по формуле слоистого стержня. Анализ данных позволяет утверждать, что при температуре от 300 до 400 К напряжения увеличивались по абсолютной величине, но при 380 К они начали снижаться во всех трех случаях. Более интенсивный рост КЛТР (относительно начального значения) при повышении температуры, по сравнению со скоростью снижения модуля упругости, указывает на понижение температурных напряжений при температуре 380 К.

Важно подчеркнуть, что значение КЛТР полимера гораздо выше, чем соответствующее значение для стали (см. табл. 1). В слоистом и составном стержнях полимерные и стальные слои жестко соединены друг с другом и подвергнуты нагреву, при этом каждый материал стремится расширяться в соответствии со своим значением КЛТР, но, поскольку у полимера оно выше, а у стали ниже, возникают температурные напряжения (полимер стремится расширяться, а сталь этому препятствует). Сталь при этом будет подвергаться растягивающему напряжению, так как полимер «заставит» ее расширяться за предел, который у нее обусловлен значением КЛТР. Напряжения возникают в результате разницы КЛТР адгезива (эпоксиды) и субстрата (стали) и могут привести к расслоению. Как видно из приведенных зависимостей, изменение температуры во всем рассматриваемом диапазоне изменяет значение КЛТР для полимера более чем в шесть раз, а модуль упругости по мере приближения температуры к точке плавления падает до нуля. Такие зависимости справедливы и для стали, хотя и в меньшей степени.

Заключение

В статье представлены результаты расчетов термоупругих свойств слоистых композитов и проведен анализ полученных данных. В ходе анализа был выяснен физический механизм изменений, происходящих внутри материала под влиянием температурных изменений. Расчеты модуля Юнга и коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР) проводились на основе теории метода контактного слоя для слоистого стержня и по классическим формулам смеси для составного. Теория метода контактного слоя позволяет учитывать геометрические и физико-механические параметры субстрата, адгезива и контактного слоя (слой, образующийся при их взаимодействии), поэтому моделирование и расчет становятся более точными.

Показано, что при расчете характеристик слоистого стержня необходимо уделять особое внимание адгезионному взаимодействию межфазных слоев. На основе проведенных расчетов и анализа их результатов можно сделать очевидный вывод, что при изучении термоупругих параметров стержня со слоистой структурой следует учитывать большое количество механических характеристик. В частности, значительное влияние оказывают коэффициент Пуассона, толщина составляющих слоев и жесткость контактного слоя.

Коэффициенты линейного температурного расширения вычислены с использованием метода контактного слоя и формулы смеси.

Важно отметить, что аналитическая формула (5) для определения эффективного модуля Юнга по модели контактного слоя довольно хорошо согласуется с результатами физического эксперимента и может считаться достаточно точной. Использование в качестве параметра эффективного модуля, учитывающего контактный слой, дает возможность проводить численные эксперименты путем варьирования значений механических свойств материалов, входящих в состав слоистого композита.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Barros M. A. S., Fujiyama R. T., Leite J. C.** Advantages of applying composite material to replace metal alloys in aviation // *Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications*. 2015. Vol. 1. No. 3. Pp. 20–29.
2. **Sen F., Toparli M., Köksal N. S.** The evaluation of thermal stresses in thermoplastic laminated composites with different square holes // *Mathematical and Computational Applications*. 2007. Vol. 12. No. 1. Pp. 59–68.
3. **Awaja F., Gilbert M., Kelly G., Fox B., Pigram P. J.** Adhesion of polymers // *Progress in Polymer Science*. 2009. Vol. 34. No. 9. Pp. 948–968.
4. **Voigt W.** Über die Beziehung zwischen den beiden Elastizitäts konstanten Isotroper Körper // *Wiedemann's Annalen der Physik und Chemie*. 1889. Bd. 38. Nr. 12. S. 573–587.
5. **Reuss A.** Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle // *Zeitschrift Angewandte Mathematik und Mechanik*. 1929. Bd. 9. Nr. 1. S. 49–58.
6. **Образцов И. Ф., Яновский Ю. Г., Згаевский В. Э.** Упругие характеристики межфазного слоя полимерных матричных композитов // *Доклады Академии наук*. 2000. Т. 371. № 5. С. 617–620.
7. **Образцов И. Ф., Яновский Ю. Г., Власов А.Н., Згаевский В. Э.** Коэффициенты Пуассона межфазных слоев полимерных матричных композитов // *Доклады Академии наук*. 2001. Т. 378. № 3. С. 336–338.
8. **Муйземнек А. Ю., Иванова Т. Н., Карташова Е. Д.** Сопоставление результатов экспериментального и расчетного определения эффективных характеристик упругих свойств полимерных слоистых композитов из угле- и стеклотканей // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2021. № 2. С. 88–105.
9. **Турусов Р. А., Берлин А. А.** Адгезия и адгезионная механика // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2016. № 2. С. 17–23.
10. **Турусов Р. А.** Адгезионная механика. Определение параметров контактного слоя // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2021. № 6. С. 2–11.
11. **Huang Z.-M.** Simulation of the mechanical properties fibrous composites by the bridging micromechanics model // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2001. Vol. 32. No. 2. Pp. 143–172.
12. **Andreev V., Tsybin N., Turusov R.** Layered composite and contact layer. Effective modulus of elasticity // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 97. XXII International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2019). Published online 29 May 2019. P. 04071.
13. **Ran Zh., Yan Y., Li J., Qi Zh., Yang L.** Determination of thermal expansion coefficients for unidirectional fiber-reinforced composites // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2014. Vol. 27. No. 5. Pp. 1180–1187.
14. **Halpin J. C., Kardos J. L.** The Halpin – Tsai equations: A review // *Polymer Engineering and Science*. 1976. Vol. 16. No. 5. Pp. 344–352.
15. **Hashin Z., Rosen B. W.** The elastic moduli of fiber reinforced materials // *Journal of Applied Mechanics*. 1964. Vol. 31. No. 2. Pp. 223–232.
16. **Hashin Z., Shtrikman S.** A variational approach to the elastic behavior of multiphase minerals // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1963. Vol. 11. No. 2. Pp. 127–140.
17. **Hill R.** Theory of mechanical properties of fibre-strengthen materials – III. Self-consistent model // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1965. Vol. 13. No. 4. Pp. 189–198.
18. **Budiansky B.** On the elastic moduli of some heterogeneous materials // *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1965. Vol. 13. No. 4. Pp. 223–227.
19. **Kerner E.** The elastic and thermo-elastic properties of composite media // *Proceedings of the Physical Society. B*. 1956. Vol. 69. No. 8. Pp. 808–813.
20. **Турусов Р. А.** Адгезионная механика. М.: Изд. НИУ Московского государственного строительного университета, 2016. 228 с.
21. **Turusov R. A., Manevich L. I.** Contact layer method in adhesive mechanics // *Polymer Science. Series D*. 2010. Vol. 3. No. 1. Pp. 1–9.
22. **Ферри Дж.** Вязкоупругие свойства полимеров. Пер. с англ. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. 535 с.

REFERENCES

1. **Barros M. A. S., Fujiyama R. T., Leite J. C.**, Advantages of applying composite material to replace metal alloys in aviation, *J. Eng. Technology Industrial Appl.* 1 (3) (2015) 20–29.
2. **Sen F., Toparli M., Köksal N. S.**, The evaluation of thermal stresses in thermoplastic laminated composites with different square holes, *Math. Comput. Appl.* 12 (1) (2007) 59–68.
3. **Awaja F., Gilbert M., Kelly G., et al.**, Adhesion of polymers, *Prog. Polym. Sci.* 34 (9) (2009) 948–968.
4. **Voigt W.**, Über die Beziehung zwischen den beiden Elastizitäts Konstanten Isotroper Körper, *Wied. Ann.* 38 (12) (1889) 573–587.
5. **Reuss A.**, Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle, *Z. Angew. Math. Mech.* 9 (1) (1929) 49–58.
6. **Obraztsov I. F., Yanovskii Yu. G., Zgayevskii V. E.**, Elastic characteristics of an interfacial layer formed by polymeric matrix composites, *Doklady Physics.* 45 (4) (2000) 175–178.
7. **Obraztsov I. F., Yanovskii Yu. G., Vlasov A. N., Zgayevskii V. E.**, Poisson's ratios for interfacial layers of polymer matrix composites, *Doklady Physics.* 46 (5) (2001) 366–368.
8. **Muyzemnek A. Yu., Ivanova T. N., Kartashova E. D.**, Comparison of experimental and computation results of finding effective characteristics of elastic properties of polymer layered composites from carbon and glass fabrics, *PNRPU Mechanics Bulletin.* (2) (2021) 88–105 (in Russian).
9. **Turusov R. A., Berlin A. A.**, Adhesion and adhesion mechanics, *News of Material Science and Technology.* (2) (2016) 17–23 (in Russian).
10. **Turusov R. A.**, Adhesion mechanics. Estimation of contact-layer parameters, *Polym. Sci. D.* 15 (1) (2022) 1–9.
11. **Huang Z.-M.**, Simulation of the mechanical properties fibrous composites by the bridging micromechanics model, *Compos. Part A. Appl. Sci. Manuf.* 32 (2) (2001) 143–172.
12. **Andreev V., Tsybin N., Turusov R.**, Layered composite and contact layer. Effective modulus of elasticity, *E3S Web Conf.* 97 (FORM-2019) (29 May) (2019) 04071.
13. **Ran Zh., Yan Y., Li J., et al.**, Determination of thermal expansion coefficients for unidirectional fiber-reinforced composites, *Chinese J. Aeronaut.* 27 (5) (2014) 1180–1187.
14. **Halpin J. C., Kardos J. L.**, The Halpin – Tsai equations: A review, *Polym. Eng. Sci.* 16 (5) (1976) 344–352.
15. **Hashin Z., Rosen B. W.**, The elastic moduli of fiber reinforced materials, *J. Appl. Mech.* 31 (2) (1964) 223–232.
16. **Hashin Z., Shtrikman S.**, A variational approach to the elastic behavior of multiphase minerals, *J. Mech. Phys. Solids.* 11 (2) (1963) 127–140.
17. **Hill R.**, Theory of mechanical properties of fibre-strengthen materials – III. Self-consistent model, *J. Mech. Phys. Solids.* 13 (4) (1965) 189–198.
18. **Budiansky B.**, On the elastic moduli of some heterogeneous materials, *J. Mech. Phys. Solids.* 13 (4) (1965) 223–227.
19. **Kerner E.**, The elastic and thermo-elastic properties of composite media, // *Proc. Phys. Soc. B.* 69 (8) (1956) 808–813.
20. **Turusov R. A.**, *Adgezionnaya mekhanika [Adhesive mechanics]*, Moscow State University of Civil Engineering Publication, Moscow, 2016.
21. **Turusov R. A., Manevich L. I.**, Contact layer method in adhesive mechanics, *Polym. Sci. D.* 3 (1) (2010) 1–9.
22. **Ferry J. D.**, *Viscoelastic properties of polymers*, Wiley, New York, 1961.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

РАЗАКОВА Рио-Рита Вадимовна – аспирантка кафедры сопротивления материалов Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), Москва, Россия.

129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, 26

chernova_riorita@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7310-5266



ТУРУСОВ Роберт Алексеевич – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ФГБУН «Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук», профессор кафедры сопротивления материалов Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ), Москва, Россия.

119991, Россия, г. Москва, ул. Косыгина, 4.
rob-turusov@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-2753-0701

THE AUTHORS

RAZAKOVA Rio-Rita V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering
26 Yaroslavskoye Ave., Moscow, 129337, Russia
chernova_riorita@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7310-5266

TURUSOV Robert A.

Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences,
National Research Moscow State University of Civil Engineering
4 Kosygin St., Moscow, 119991, Russia
rob-turusov@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-2753-0701

Статья поступила в редакцию 10.06.2022. Одобрена после рецензирования 08.07.2022.
Принята 08.07.2022.

Received 10.06.2022. Approved after reviewing 08.07.2022. Accepted 08.07.2022.