

ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ВЯЗКОУПРУГИМИ ПОЛИМЕРНЫМИ СЛОЯМИ© 2024 Р.В. Разакова¹, М.А. Разаков^{1,2}¹Московский энергетический институт

(национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

²Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 31.05.2024

Целью исследования является анализ существующих конфигураций композитных материалов, позволяющих моделировать контакт между двумя поверхностями материалов, имеющих различные физико-механические параметры с достаточной точностью. Рассмотрены возможности исследования механических свойств и прочностных характеристик слоистых материалов с помощью конечно-элементного анализа, который основан на создании численных моделей, воспроизводящих объекты исследуемого физического объекта и явления. Описаны особенности при определении напряженно-деформированное состояния моделей материалов с помощью численного эксперимента в современном программном комплексе, который позволяет определять многие физико-механические параметры без физических экспериментальных испытаний на которые затрачивается значительное количество времени и ресурсов. Приводится метод контактного слоя, открывающий возможность максимально точно прогнозировать поведение слоистых композитов и численно воспроизводить оценку напряженно-деформированного состояния. В работе представлены способы конечно-элементного моделирования контакта между двумя различными материалами, составляющими слоистый композит. Также в статье описаны подходы в моделировании контакта с использованием программных пакетов численного моделирования LS-DYNA и ЛИРА-САПР. Было рассмотрено несколько сценариев моделирования адгезионного контакта с целью поиска наиболее оптимального и позволяющего производить анализ элементов конструкций из слоистых композитов. Полученные результаты анализа не только демонстрируют потенциал в моделировании контактного слоя, учитывая физические параметры адгезионного взаимодействия, но и дают сравнительную оценку конфигурациям существующих программ, что является важным для развития прочностных расчетов. Работа представляет интерес для специалистов, конструкторов и инженеров в области моделирования физико-механических характеристик материалов композитной структуры.

Ключевые слова: численное моделирование, контактное взаимодействие, композит, композитный материал, полимер, полимерный материал, составной композитный материал, слоистый композитный материал, напряжение сдвига, нормальное напряжение, модель Турусова.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4-77-86

EDN: DGLBCL

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших путей совершенствования современных строительных конструкций является рациональное использование слоистых композиционных материалов, состоящих из сравнительно мягкой полимерной матрицы и армирующего жесткого субстрата. Композиционные материалы, имеющие слоистую структуру, включающую в себя полимерную матрицу, являются очень востребованными, поскольку

отличаются от традиционных материалов коррозионной стойкостью, легкостью без потери прочностных характеристик. Также при оптимальном регулировании анизотропии структуры и свойств, составляющих слоистую структуру материалов можно добиться совершенно необыкновенных характеристик, которые не присущи классическим материалам. Однако для прогнозирования прочностных характеристик сложно найти оптимальный метод математического моделирования физико-механического поведения слоистых структур в процессе нагружения. Одной из основных преград, не позволяющей запустить повсеместное использование композиционных материалов является сложность математического описания их физическое поведение, которое проявляется в процессе нагружения. Для гарантирования долговечности и надежности конструкций из слоистых материалов, необходимо произвести адекватные

Разакова Рио-Рита Вадимовна, ассистент кафедры энергетические и гидротехнические сооружения.

E-mail: RazakovaRV@mpei.ru

Разаков Мухаммет Азатович, преподаватель-исследователь, старший преподаватель кафедры энергетические и гидротехнические сооружения, инженер лаборатории экологической безопасности и энергоэффективности инженерного оборудования зданий.
E-mail: RazakovMA@mpei.ru

численные расчеты, которые по возможности должны быть верифицированы физическим экспериментом. Для проведения исследования композиционных материалов с вязкоупругой полимерной матрицей был использован программный пакет LS-DYNA, который имеет ряд преимуществ перед другими популярными программными комплексами. LS-DYNA - это программа конечно-элементного моделирования общего назначения, которая позволяет проводить статические и динамические расчеты. В ней можно производить динамический и квазистатический анализ изменения состояния материалов при больших видах деформаций. В ней существуют опции моделирования обработки материалов под давлением (в основном металлы), основных разделов геомеханики и деформирования материалов с неоднородными нелинейными физико-механическими характеристиками. Данный программный комплекс позволяет производить анализ высоконелинейных динамических воздействий с использованием различных схем интегрирования по времени. Алгоритм контактно-ударного воздействия позволяет легко решать сложные контактные задачи [1]. Другие специальные инструменты позволяют легко моделировать волочильные валики в приложениях для штамповки металлов, просто определяя линию узлов вдоль волочильных валиков. Адаптивное перестроение конечно-элементной сетки доступно для элементов оболочки и широко используется при различных расчетах. Использование данного программного пакета дает представление о математической и физической составляющей технически сложных расчетов. В настоящее время метод конечных элементов является самым популярным методом решения задач различного типа. Данный метод реализован в большом количестве программных комплексах таких как ANSYS, ABAQUS, NASTRAN, ЛИРА САПР, SCAD и др. Для моделирования соединения в LS-DYNA представлен контакт «nodes_to_surface», кото-

рый связывает два объекта из разнородных материала. Опции для моделирования контактов в LS-DYNA базируются на методе штрафных функций или на методе ограничений [2,3]. В большинстве современных работ применяется метод ограничений. В связи с нарастающей популярностью слоистых материалов в промышленных сферах [4-6], возникает потребность в совершенствовании методов расчета такого рода материалов, а также выполненных из них конструкций. В статье [7] рассматривается сэндвич панель, состоящая из двух алюминиевых пластин, между которыми находится слой клея. Авторы публикации [7-9] приводят основные проблемы при моделировании свойств клея, который изменяется при различных тепловых, химических и механических условиях. Также авторы утверждают, что адгезионная прочность до полного отверждения имеет решающее значение для предотвращения пластической деформации в местах соединения. Некоторое количество научных публикаций посвящено моделированию расслоения в композиционных материалах [10,11]. При углублении в процесс расслоения, конструкторам становится необходимо правильно произвести подбор метода моделирования адгезионного контакта между слоями материала [12]. От выбранного метода моделирования контактов между слоями будет зависеть результат расчета напряженно-деформированного состояния объекта исследования и как следствие прочность, устойчивость и долговечность конструкций, созданных из слоистых материалов. Также вопрос моделирования адгезионного контакта имеет значение для расчетов пары матрица-волокно [13,14]. Приведено несколько нелинейных численных примеров, которые показывают осуществимость такого подхода для моделирования контакта.

В работе проводится исследование слоистого и составного стержней (Рисунок 1) в программном комплексе LS-DYNA. Описание процесса приводится ниже.

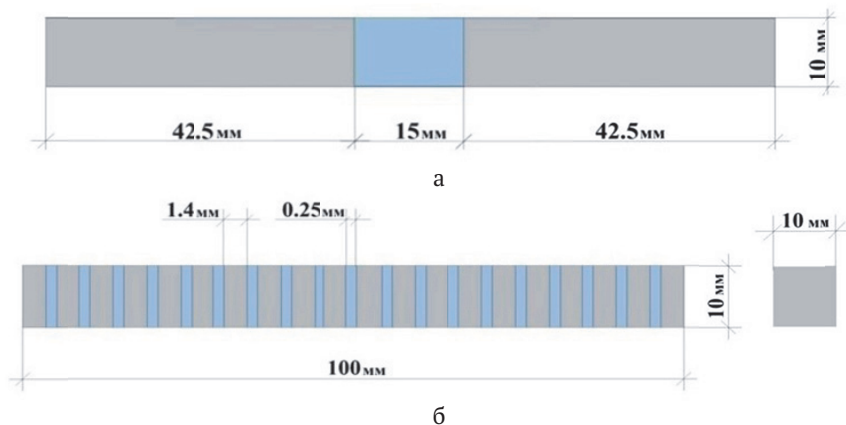


Рис. 1. Исследуемые композитные стержни:
а – составной, б – слоистый

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ИССЛЕДУЕМЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТЕРЖНЕЙ

Задание геометрической модели происходит через препроцессор с помощью функций моделирования и создания твердых элементов (Рис.2). После задания твердотельных Solid-элементов следует присвоение свойств материалов. Далее на каждой стороне полимерной прослойки были созданы узлы, а на стальном слое сегменты. Это требуется для моделирования контакта между слоем полимера и субстрата с помощью функции «CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE». (Связанный контакт (CONTACT_TIED) – привязывает ведомую сторону контакта к ведущей стороне.). При таком выборе контакта подчиненные узлы привязаны (фиксированы) к главной поверхности, что означает, что они перемещаются вместе с ней. В начале моделирования подчиненные узлы ищут основную поверхность, а затем перемещаются к ней. В результате исходная геометрия может немного

измениться. При реализации опции «смещение (offset)» ведомые узлы не перемещаются на ведущую поверхность, а значит, не происходит модификация исходной геометрии [15]. Опция такого типа также применяется в большом количестве расчетах промышленных образцов, опубликованных в работах зарубежных авторов [16, 17, 18, 19]. Визуализация данного контактного взаимодействия представлена на рисунках 2 и 3.

Следующим этапом является задание граничных условий и моделирование нагрузок. Последним элементом конструирования конечно-элементной модели слоистого стержня является установка параметров-характеристик моделирования: количество шагов моделирования, частота сохранения результатов и варианты анализа. После создания всех деталей, готовая модель загружается в решатель. Объем расчета и скорость моделирования зависят от количества КЭ, заложенных в модель. В постпроцессоре можно посмотреть все напряжения, перемещения и произвести необходимый анализ. На рисунке 4 показана конечно-элементная модель в состоянии покоя.

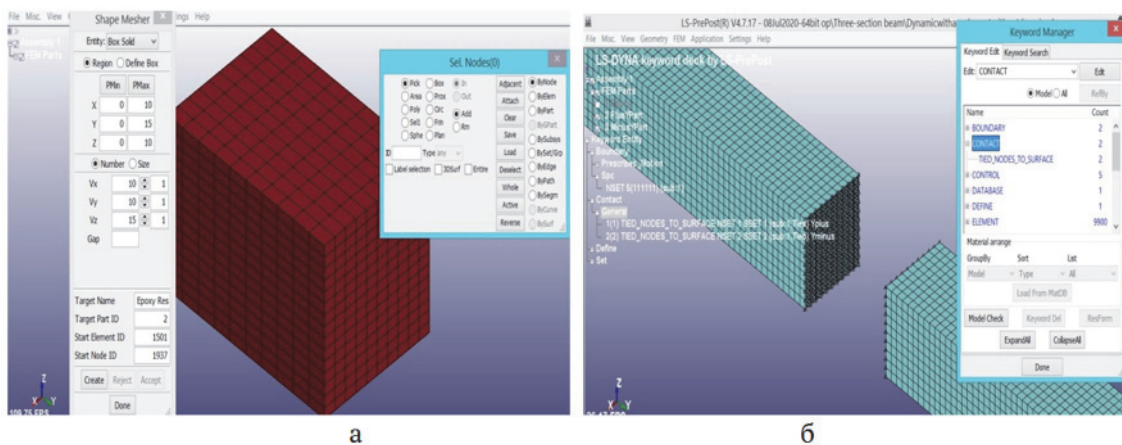


Рис. 2. Создание геометрической модели трехсекционного стержня:
а – полимерный слой, б – контакт, созданный с помощью функции
«CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE»

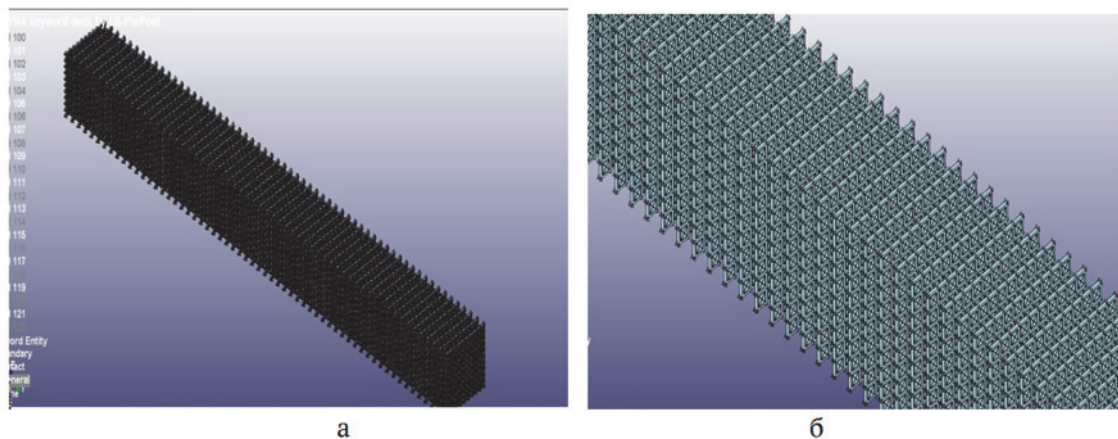


Рис. 3. Создание геометрической модели слоистого стержня:
а – Конечно-элементная модель слоистого стержня с выключенными слоями субстрата
и визуализированным контактным взаимодействием CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE,
б – Та же конечно-элементная модель слоистого стержня в увеличенном масштабе

На рисунках 5 и 6 представлены исследуемые образцы, которые находятся под воздействием динамической нагрузки.

Если произвести динамический расчет без учета контактного взаимодействия, то слои будут перемещаться относительно друг друга на большое расстояние что является совершенно неправильным и противоречит законам физики. В научной публикации [20] приводится более подробное описание особенностей конечно-элементного анализа без установления определенного контакта между связанными объектами и утверждается, что если контакт между объектами не определен, то объекты (слои) проникают друг в друга без определенного агломерированного контакта. На рисунке 6 представлен данный способ расчета модели слоистого стержня. Важно подчеркнуть, что в расчетах часто используется формула смеси для получения модуля упругости композита, т.е.

производится некоторая гомогенизация, которая позволяет производить расчет однородного объекта, без учета слоев и их свойств. Такой подход явно упрощает расчет, но как видно из приведенных на рисунке 5 результатов рассматриваемого композитного стержня, напряжения распределяются совершенно по-разному. При этом объемные доли полимера и металла в обоих рассмотренных стержнях составляют 15 и 85 % соответственно. Свойства материалов и нагрузки также эквивалентны. Таким образом, логично предположить, что пренебрежительное отношение конфигурации структуры может привести к значительной погрешности.

Тип контактного взаимодействия “CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE” является удобным для численного расчета, но не может обеспечить точность описания контактного взаимодействия между адгезивом (в данном случае это полимер) и субстратом (в данном случае это

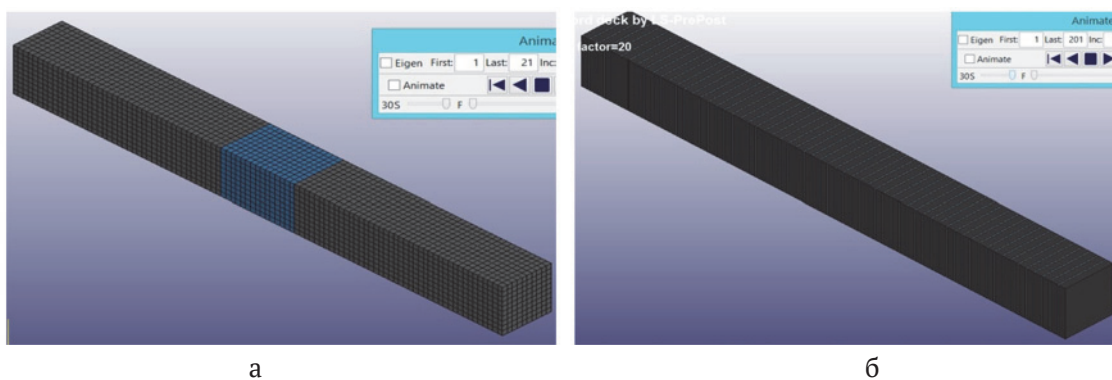


Рис. 4. Конечно-элементные модели в состоянии покоя:
а – составного трехсекционного стержня, б – слоистого стержня

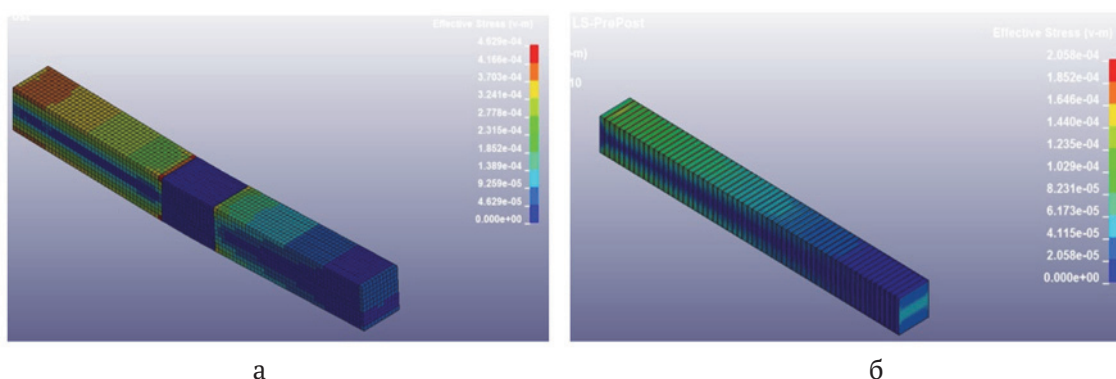


Рис. 5. Визуализация напряжений в конечно-элементной модели:
а – составного трехсекционного стержня, б – слоистого стержня

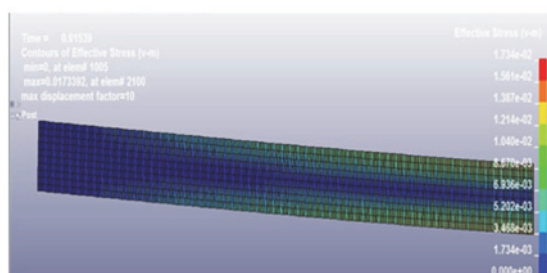


Рис. 6. Визуализация напряжений в модели без учета контактного взаимодействия

алюминий). А особо важным является то, что при уменьшении сетки напряжения в угловых точках контакта слоев возрастают, т.е. проявляется сингулярность. В научных работах Р.А. Турусова [21-24] была предложена модель контактного слоя в виде стерженьков-связей, которые моделируют адгезионное взаимодействие между слоями полимера и субстрата. Важно отметить, что в модели контактного слоя, предложенной Р.А. Турусовым, взаимодействие между слоями адгезива и субстрата осуществляется с помощью межфазного контактного слоя (см. Рисунок 7), являющегося системой коротких тонких эластичных стерженьков-связей, ориентированных под прямым углом к поверхности контакта [23]. В таком слое отсутствует прямой контакт стерженьков-связей друг с другом и, следовательно, отсутствуют нормальные напряжения σ_x и σ_z . Короткие стерженьки-связи воспринимают напряжения сдвига σ_{yx} , σ_{zy} , σ_{xz} и нормальные напряжения σ_y . Эта теория была успешно протестирована в ряде работ В. И. Андреева, Р. А. Турусова [21, 22, 24]. На рисунке 7 представлено схематическое изображение модели контактного слоя в виде стерженьков-связей, соединяющих слои полимерного адгезива и субстрата.

Значительное количество исследований подтверждает, что средняя адгезионная прочность соединения является функцией, характеризующей геометрические и физико-механические параметры модели и, как следствие, экспериментальные данные не дают достаточной информации и становятся несопоставимыми, поскольку выполняются на неидентичных

образцах [25]. Небольшое количество проведенных измерений касательных напряжений по площади склейки с использованием преимущественно поляризационно-оптических методов показали, что распределение напряжений является нелинейным типом функций [26]. При этом наблюдается концентрация напряжений в угловых точках у торцов модели. Важным показателем этой проблемы является тот факт, что при уменьшении размеров конечных элементов и приближения результатов численного расчета к точным результатам, величина плотности энергии и соответственно напряжений возрастает и стремится к бесконечности [27, 28]. Для решения этой проблемы исследователи и инженеры используют либо физически-нелинейные модели деформирования материалов, либо производят добавление в угловые точки мениска [29, 30].

Контактные слои рассматривают как чисто упругую анизотропную среду. Для плоской задачи уравнения равновесия имеют следующий вид:

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

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

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

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

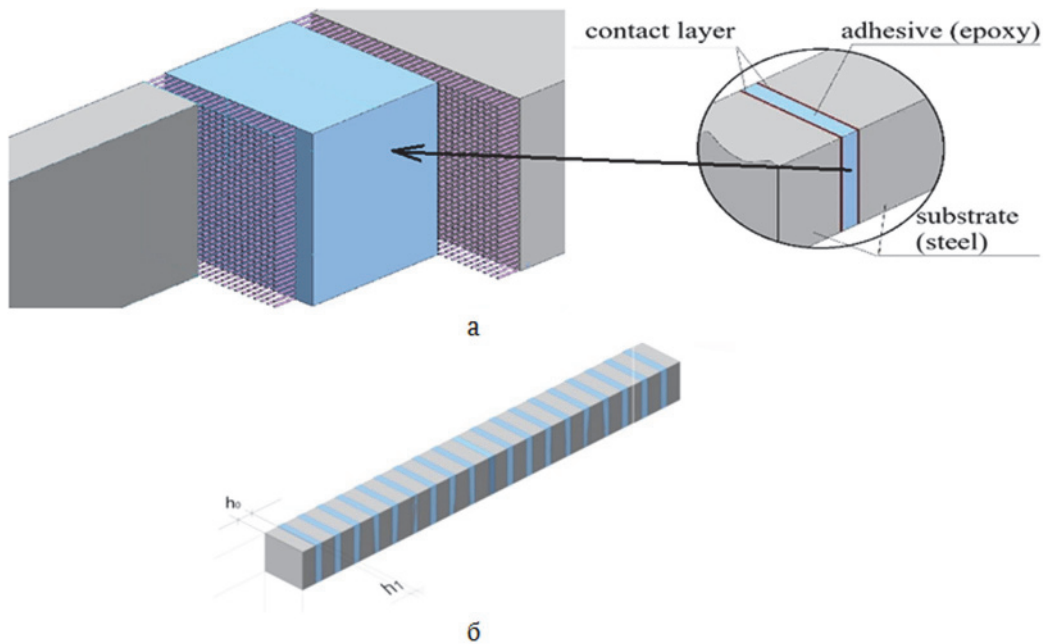


Рис. 7. Принципиальная схемы, показывающие модель контактного слоя Турусова для рассматриваемых видов моделей: а – для составного стержня, б – для слоистого стержня

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:

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

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

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 соотношений (2) имеем следующие зависимости:

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

Как видно на рисунке 1, контактный слой состоит из стерженьков, которые не имеют контакта друг с другом и направлены перпендикулярно (нормально) к поверхности контакта, 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).

Рассматриваемая модель контактного взаимодействия позволяет избежать сингулярностей (в случае идеального контакта слоев) в угловых точках, что является очень важным для расчета напряженно-деформированного состояния. В программном комплексе контактный слой вводится отдельным Solid элементом,

обладающим ортотропными свойствами, при этом модуль упругости такого слоя в направлениях, перпендикулярных их боковой поверхности задаются нулевыми. Коэффициент Пуассона также принимается нулевым. Таким образом, контактный слой имеет толщину, модуль упругости вдоль стерженьков и модуль сдвига. Важно подчеркнуть, что представленная модель контактного взаимодействия является достаточно физически обоснованной, что было подтверждено натурными экспериментами [21]. Впервые, вышеописанную модель контактного слоя применил Н.Ю. Цыбин для анализа классической модели адгезионного соединения внахлестку в программе ЛИРА-САПР. В таблице 2 приведены некоторые результаты, представленные в работе [31]. В отличие от исследований приведенных в [31] в настоящей работе осуществляется попытка учета контактного слоя Р.А. Турусова для моделирования трехмерной конечно-элементной модели составного стержня в программном комплексе Ansys Ls-Dyna. Важно отметить, что в указанных программных комплексах невозможно задать модуль упругости равным нулю, поэтому введено было значение близкое к нулю и равное 10^{-45} (максимально малое значение допустимое программой).

В качестве наглядного примера рассматривалась задача о сжатии модели трехсекционного стержня представленного на рисунке 1, а силой 1 кН, приложенной к торцам модели. Некоторые свойства материалов, составляющих трехсекционный стержень, указаны в таблице 1.

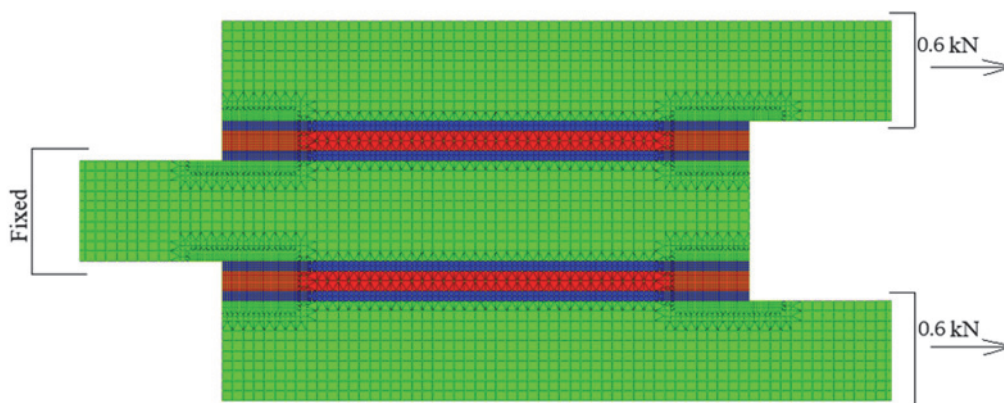


Рис. 8. Конечно-элементная модель с контактным слоем Турусова Р.А., созданная в программном комплексе ЛИРА-САПР, для слоистого стержня (контактные слои отмечены синим цветом, адгезив – красным, сталь – зеленым).

Таблица 1. Механические характеристики материалов трехсекционного стержня

Материал	Модуль сдвига G, ГПа			Модуль упругости E, ГПа			Коэффициент Пуассона μ		
Алюминий 5083-Н34	2.6698E+01			7.1016E+01			0.33		
Полимер	3.55E+01			8.227			0.45		
Контактный слой	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
	E/2	E/2	E/2	1E-45	1E-45	4.227	0	0	0

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате был проведен сравнительный анализ максимальных касательных напряжений в угловых точках контакта слоев четырех моделей двух различных объектов (соединение пластин внахлестку и трехсекционный стержень). Для каждого объекта была построена модель с учетом и без учета контактного слоя. В таблице приведены данные, которые показывают, каким образом изменяются касательные напряжения в зависимости от размера конечного элемента.

После того как размер сетки был уменьшен до 0.2 мм результат расчета модели соединения внахлестку стабилизируется и при дальнейшем уменьшении сетки не изменяется, т.е. выходит на плато, а касательные напряжения в угловых точках модели без контактного слоя продолжают увеличиваться. При корректном моделировании ортотропного контактного слоя решается проблема сингулярностей и таким образом открывается возможность оценки напряженно-деформированного состояния адгезион-

ных соединений в конструктивных элементах различного назначения. Ls-dyna, в отличие от Ansys Workbench, позволяет задавать различные параметры модели, выбирать тип конечного элемента, вариант контакта и т.д. что является очень важным для научных численных экспериментов, но при этом требует большой мощности ЭВМ. При уменьшении сетки в пять раз (с 1 до 0.2 мм) максимальные касательные напряжения в элементах трехслойного стержня увеличились на 113.4 % в модели без контактного слоя, а в модели с контактным слоем на 22 %.

На рисунке 9, б видно, что максимальные напряжения отделились от угловой точки склейки в область контактного слоя. Также видно, что максимальные касательные напряжения в элементах модели с контактным слоем меньше, чем таковые в элементах модели без контактного слоя.

Для более точных расчетов необходимо проводить физические эксперименты и осуществлять сравнительный анализ. Жесткость контактного слоя, которая определяется как G/h, точно можно получить только экспериментальным путем.

Таблица 2. Максимальные касательные напряжения конечно-элементной модели в зависимости

Размер конечного элемента, мм	Максимальные касательные напряжения конечно-элементной модели без контактного слоя τ_{max} , МПа		Максимальные касательные напряжения конечно-элементной модели с учетом контактного слоя τ_{max} , МПа	
	Модель соединения внахлестку ЛИРА-САПР	Модель трехслойного стержня в Ls-Dyna	Модель соединения внахлестку ЛИРА-САПР	Модель трехслойного стержня в Ls-Dyna
1	2.3	24.71	2.15	19.21
0.5	3.1	35.34	2.45	20.20
0.2	3.6	52.74	2.52	23.43

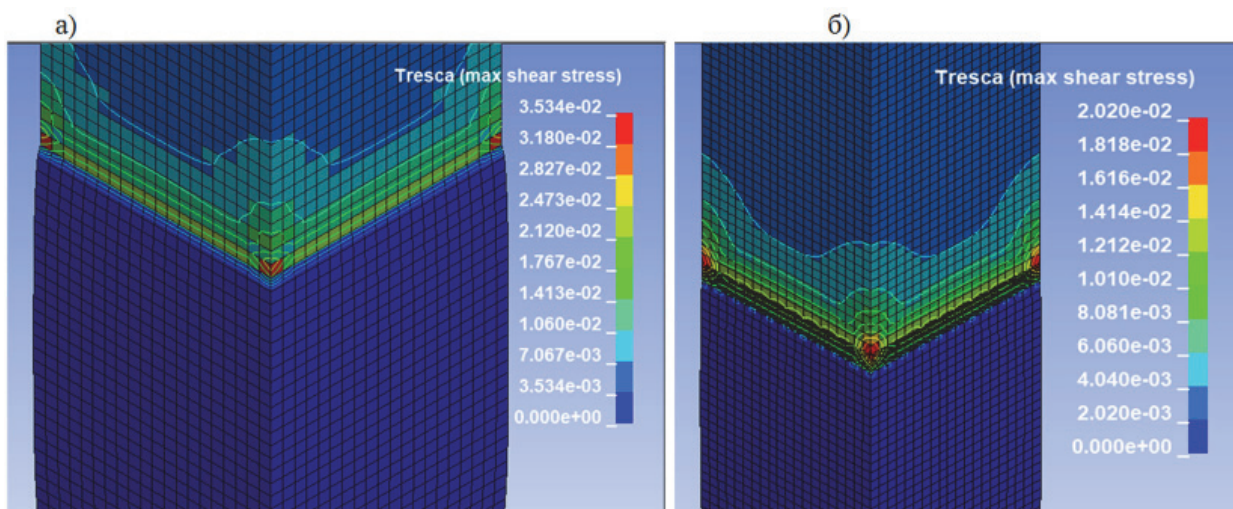


Рис. 9. Распределение максимальных касательных напряжений в конечно-элементных моделях, созданная в программном комплексе Ansys LS-Dyna (размер КЭ - 0.5мм):
 а – модель с контактным взаимодействием CONTACT_TIED_NODES_TO_SURFACE (без учета контактного слоя);
 б – модель с учетом контактного слоя

Примечание. Шкала напряжений, изображенная на рисунке 9, а, б показывает значения в ГПа

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведено обоснование применения современных подходов к моделированию слоистых образцов, состоящих из слоев жесткого субстрата и мягкого полимера. Представлены подходы к числительному моделированию для прогнозирования физического поведения слоистых структур с использованием коммерческих решателей, работающих на основе метода конечных элементов (МКЭ). Реализация поставленных задач производилась с использованием конечно-элементного моделирования в программном комплексе LS-DYNA и ЛИРА-САПР. В ходе исследования был осуществлен обзор методов моделирования адгезионного взаимодействия, что является важным для создания адекватной модели, а следовательно и точности расчета. Предлагаемый подход к моделированию адгезионного взаимодействия, основанный на теории метода контактного слоя Турусова позволяет избежать бесконечных напряжений в угловых точках, вблизи склейки. Также использование метода контактного слоя в моделировании слоистых структур является более физически обоснованным, чем модули, предлагаемые в комплексе LS-DYNA. Представленное в данной статье исследование имеет высокий уровень значимости для дальнейших научных и теоретических исследований, а также практической деятельности, направленной на совершенствование существующих методов моделирования поведения конструкций из сложных композиционных материалов. Полученные результаты могут быть учтены при проведении физического и численного эксперимента, направленного на исследование поведения слоистых структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муйземнек, А.Ю. Математическое моделирование процессов удара и взрыва в программе LS-DYNA / А.Ю. Муйземнек, А.А. Богач. – Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2005. – 106 с.
2. Zhou, L., Simon J-W., Reese S. Proper orthogonal decomposition for substructures in nonlinear finite element analysis: coupling by means of tied contact // *Archive of Applied Mechanics*. – 2018, – Т. 88, No. 11. – pp. 1975-2001. doi: 10.1007/s00419-018-1427-1
3. Zhang, Y., Xian, C., Zhao, Y. Solving specified-time distributed optimization problem with local inequality constraint based on penalty method // *3rd International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI)*. 2021, pp. 1-6. doi:10.1109/IAI53119.2021.9619230
4. Tiwary A., Kumar R., Chohan J.S. A review on characteristics of composite and advanced materials used for aerospace applications // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 51, No. 1. – pp. 865-870.
5. Liu, Q., Huang S., He, A. Composite ceramics thermal barrier coatings of yttria stabilized zirconia for aero-engines // *Journal of materials science & technology*. – 2019. – Т. 35, No. 12. – pp. 2814-2823.
6. Peng, J. et al. Inverse nacre-like epoxy-graphene layered nanocomposites with integration of high toughness and self-monitoring // *Matter*. – 2020, – Т. 2, No. 1. – pp. 220-232.
7. Dong, S., Smith, A., Sheldon, A. Modeling of Curing Adhesives between Jointed Steel and Aluminum Plates using MAT 277 in LS-DYNA // *11th European LS-DYNA Conference, Salzburg, Austria, 2017*.
8. Kowatz, J., Teutenberg, D., Meschut, G. Optimization of inductive fast-curing of epoxy adhesive by model-based kinetics // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. – 2023, – Т. 124. – pp. 103392.
9. Agha A. et al. Cure History Dependent Viscoelastic Modeling of Adhesively Bonded Joints using MAT 277 in LS-DYNA® // *15th International LS-DYNA Conference, 2018*.
10. Sciuva, M. Di., et al. FEM Modeling of a Composite Sandwich Laminate with LS-DYNA for Aerospace Applications // *ENGINSOFT NEWSLETTER*, – 2015, – Т.12, No. 2. – pp. 43-48.
11. Elmarakbi, A. Finite Element Analysis of Delamination Growth in Composite Materials Using LS-DYNA: Formulation and Implementation of New Cohesive Elements. *Intechopen // Advances in Composite Materials Ecodesign and Analysis*. – 2011, – pp. 409-428 doi:10.5772/13862
12. Yue Z. et al. A surrogate model based calibration method for structural adhesive joint progressive failure simulations // *The Journal of Adhesion*. – 2022. – Т. 99, No. 10. – pp. 1579-1606. <https://doi.org/10.1080/00218464.2022.2149325>
13. Wei, H., et al. LS-DYNA Machine Learning-based Multiscale Method for Nonlinear Modeling of Short Fiber-Reinforced Composites // *Journal of Engineering Mechanics*. – 2023, – Т. 149, No. 3. – pp. 04023003. doi:10.1061/JENMDT.EMENG-6945
14. Dong S., Sheldon A., Carney K. Modeling of carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) composites in LS-DYNA® with optimization of material and failure parameters in LS-OPT® // *15th International LS-DYNA Users Conference, 2018*, pp. 10-12.
15. LS-DYNA® Keyword User's Manual R12. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 2020. Vol. 1.
16. Wang, C. et al. Dynamic behavior of aero-engine rotor with fusing design suffering blade off // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2017, – Т. 30, No. 3. – pp. 918-931, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.03.015>.
17. Paciello, C.S. et al. Crashworthiness of a Composite Bladder Fuel Tank for a Tilt Rotor Aircraft // *Journal of Composite Sciences*. – 2021. – Т. 5. – pp. 285. <https://doi.org/10.3390/jcs5110285>
18. Erbayrak E. Investigations of low-velocity impact behaviour of single-lap joints having dissimilar hybrid composite adherends through cohesive zone model approach // *Journal of Adhesion Science and Technology*. – 2022. – Т. 36. – №. 5. – pp. 545-565.
19. Hartlen, D. C., Montesano, J., Cronin, D. S. Cohesive Zone Modeling of Adhesively Bonded Interfaces: The Effect of Adherend Geometry, Element Selection, and Loading Condition // *International LS-DYNA Users Conference, 2020*.
20. Shinohara, K, Nishibori, K. Finite element modeling of fabric-tying based on Arimatsu Narumi Shibori Robot

- // Measurement and Control. – 2023, – Т. 56, No. 1-2. – pp. 71-92. doi:10.1177/00202940221091584
21. Турусов, Р.А. Адгезионная механика / Р.А. Турусов. – Москва: НИУ МГСУ, 2015. – 232 с.
 22. Tsybin, N.Y., et al. Stress-strain state of a three-layer rod. Comparison of the results of analytical and numerical calculations with the experiment // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Т. 196. – pp. 01057. doi: 10.1051/mateconf/201819601057
 23. Разакова, Р.Р.В. Термоупругие параметры слоистых композитов / Р.Р.В. Разакова, Р.А. Турусов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2023. – Т. 16, № 1. – С. 140-151. doi: 10.18721/JPM.16112.
 24. Tsybin, N.Y., Turusov, R.A., Andreev, V. I. Adhesive Problem in the Mechanics of Materials // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Т. 189. – pp. 245-254. doi: 10.1007/978-3-030-86001-1_29.
 25. Lertora, E., et al. Comparison Between FSW and Bonded Lap Joints – a Preliminary Investigation // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Т. 1896, – No. 1. – pp. 110004. doi: 10.1063/1.5008131
 26. Туразян, А.В.О распределении напряжений в базовой модели однонаправленных конструкций / Туразян А.В., Рабинович А.Л. // ДАН СССР. – 1970. – Т. 194, № 6. – С. 1305-1307.
 27. Dionísio, J.M.M., et al.. Fracture mechanics approach to stress singularities in composite adhesive joints // Composite Structures. – 2021. – Т. 276. – pp. 114507. doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114507
 28. Bhowmick, S, Liu, GR. On singular ES-FEM for fracture analysis of solids with singular stress fields of arbitrary order // Engineering Analysis with Boundary Elements. – 2018. – Т. 86. – pp. 64-81. doi.org/10.3390/app8122488
 29. Calic, A., Yildirim, S. Effect of adherend recessing on bi-adhesively bonded single-lap joints // Sadhana. – 2017. – Т. 42, No. 3. – pp. 317-325. doi: 10.1007/s12046-017-0603-2
 30. Calic, A. Effect of adherend shape on stress concentration reduction of adhesively bonded single lap joint // Engineering Review. – 2016. – Т. 16, – pp. 29-34.
 31. Цыбин, Н.Ю. Расчет слоистых конструкций с использованием модели контактного слоя: автореферат дис. ... канд. техн. наук : 01.02.04 / Цыбин Никита Юрьевич. – [Место защиты: Тул. гос. ун-т]. – М., 2019. – 22 с.

FEATURES OF COMPOSITE MATERIALS WITH VISCOELASTIC POLYMER LAYERS NUMERICAL SIMULATION

© 2024 R.V. Razakova¹, M.A. Razakov^{1,2}

¹Moscow Power Engineering Institute (National Research University),
Moscow, Russia

²Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences,
Moscow, Russia

Authors have analyzed the existing configurations of composite materials, which help to modeling the contact between two materials surfaces with different physical and mechanical parameters. This is the main purpose of the research. Researchers have considered the possibilities of studying the layered materials mechanical properties and strength characteristics by using finite element analysis. It was based on the creation of numerical models, which reproduce the objects of the studied physical object and phenomenon. There are the features in determining the stress-strain state of material models by using a numerical experiment in a modern software package, which allows the determination process of many physical and mechanical parameters without physical experimental tests. Authors presented the method of the contact layer, which could give the possibility of predicting the layered composites behavior as accurately as possible and numerically reproducing the stress-strain state rate. There are the methods for finite element modeling of contact between two different materials that make a layered composite in this paper. Researchers also describe approaches to contact modeling using the LS-DYNA and LIRA-SAPR numerical simulation software packages in this article. It has been considered the several scenarios for modeling adhesive contact in order to find the most optimal one, which could allow analysis of layered composites structural elements. The obtained results of the analysis demonstrate the potential in modeling the contact layer, which include the physical parameters of the adhesive interaction. They also provide a comparative assessment of the existing programs configurations, which is important for the strength calculations development. This work could be interested to specialists, designers and engineers in the field of modeling the physical and mechanical composite structure materials characteristics.

Keywords: numerical simulation, contact interaction, composite, composite material, polymer, polymer material, multiple composite material, layered composite material, shear stress, normal stress, Turusov model.

DOI: 10.37313/1990-5378-2024-26-4-77-86

EDN: DGLBCL

REFERENCES

1. *Muyzemnek, A.Yu.* Matematischeskoye modelirovaniye protsessov udara i vzryva v programme LS-DYNA [Mathematical modeling of impact and explosion processes in the LS-DYNA] / A.Yu. Muyzemnek, A.A. Bogach. – Penza, PGU Publishing, 2005. – 106 p.
2. *Zhou, L., Simon, J-W., Reese, S.* Proper orthogonal decomposition for substructures in nonlinear finite element analysis: coupling by means of tied contact, *Archive of Applied Mechanics*, 2018; 88(11), pp. 1975-2001. doi:10.1007/s00419-018-1427-1
3. *Zhang, Y., Xian, C., Zhao, Y.* Solving specified-time distributed optimization problem with local inequality constraint based on penalty method. 3rd International Conference on Industrial Artificial Intelligence (IAI). 2021, pp. 1-6. doi:10.1109/IAI53119.2021.9619230
4. *Tiwary, A., Kumar, R., Chohan, J.S.* A review on characteristics of composite and advanced materials used for aerospace applications, *Materials Today: Proceedings*, 2022, 51 (1), pp. 865-870.
5. *Liu, Q., Huang S., He, A.* Composite ceramics thermal barrier coatings of yttria stabilized zirconia for aero-engines, *Journal of materials science & technology*, 2019, 35 (12), pp. 2814-2823.
6. *Peng, J. et al.* Inverse nacre-like epoxy-graphene layered nanocomposites with integration of high toughness and self-monitoring, *Matter*, 2020, 2 (1), pp. 220-232.
7. *Dong S., Smith A., Sheldon A.* Modeling of Curing Adhesives between Jointed Steel and Aluminum Plates using MAT 277 in LS-DYNA. 11th European LS-DYNA Conference, Salzburg, Austria, 2017.
8. *Kowatz J., Teutenberg D., Meschut G.* Optimization of inductive fast-curing of epoxy adhesive by model-based kinetics, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2023; 124, pp. 103392.
9. *Agha A. et al.* Cure History Dependent Viscoelastic Modeling of Adhesively Bonded Joints using MAT 277 in LS-DYNA®. 15th International LS-DYNA Conference, 2018.
10. *Sciava, M.Di., et al.* FEM Modeling of a Composite Sandwich Laminate with LS-DYNA for Aerospace Applications, *ENGINSOFT NEWSLETTE*, 2015; 12(2), pp. 43-48.
11. *Elmarakbi, A.* Finite Element Analysis of Delamination Growth in Composite Materials Using LS-DYNA: Formulation and Implementation of New Cohesive Elements. *Intechopen, Advances in Composite Materials Ecodesign and Analysis*, 2011, pp. 409-428 doi:10.5772/13862
12. *Yue Z. et al.* A surrogate model based calibration method for structural adhesive joint progressive failure simulations. *The Journal of Adhesion*, 2022; 99 (10), pp. 1579-1606. <https://doi.org/10.1080/00218464.2022.2149525>
13. *Wei, H., et al.* LS-DYNA Machine Learning-based Multiscale Method for Nonlinear Modeling of Short Fiber-Reinforced Composites, *Journal of Engineering Mechanics*, 2023; 149(3), p. 04023003. doi:10.1061/JENMDT.EMENG-6945
14. *Dong S., Sheldon A., Carney K.* Modeling of carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) composites in LS-DYNA® with optimization of material and failure parameters in LS-OPT®. 15th International LS-DYNA Users Conference, 2018, pp. 10-12.
15. LS-DYNA® Keyword User's Manual R12. Livermore, CA: Livermore Software Technology Corporation, 2020. Vol. 1.
16. *Wang, C. et al.* Dynamic behavior of aero-engine rotor with fusing design suffering blade off, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017; 30(3), pp. 918-931. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.03.015>.
17. *Paciello, C.S. et al.* Crashworthiness of a Composite Bladder Fuel Tank for a Tilt Rotor Aircraft, *Journal of Composite Sciences*, 2021; 5, pp. 285. <https://doi.org/10.3390/jcs5110285>
18. *Erbayrak E.* Investigations of low-velocity impact behaviour of single-lap joints having dissimilar hybrid composite adherends through cohesive zone model approach, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2022; 36(5), pp. 545-565.
19. *Hartlen, D. C., Montesano, J., Cronin, D. S.* Cohesive Zone Modeling of Adhesively Bonded Interfaces: The Effect of Adherend Geometry, Element Selection, and Loading Condition // *International LS-DYNA Users Conference*, 2020.
20. *Shinohara K, Nishibori K.* Finite element modeling of fabric-tying based on Arimatsu Narumi Shibori Robot, *Measurement and Control*, 2023; 56(1-2), pp. 71-92. doi:10.1177/00202940221091584
21. *Turusov R.A.* Adgezionnaya mehanika [Adhesive mechanics] / R.A. Turusov. Moscow, MSU of Civil Engineering Publishing, 2015, 232 p.
22. *Tsybin, N.Y., et al.* Stress-strain state of a three-layer rod. Comparison of the results of analytical and numerical calculations with the experiment, *MATEC Web of Conferences*, 2018; 196, pp. 01057. doi: 10.1051/mateconf/201819601057
23. *Razakova, R.V., Turusov, R.A.* Thermoelastic parameters of layered composites, *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, 2023; 16 (1), pp. 140–151. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.16112>
24. *Turusov, R., Andreev, V., Tsybin, N.,* Adhesive Problem in the Mechanics of Materials, *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022; 189, pp. 245-254. doi: 10.1007/978-3-030-86001-1_29.
25. *Lertora, E., et al.* Comparison Between FSW and Bonded Lap Joints – a Preliminary Investigation, *AIP Conference Proceedings*, 2017; 1896 (1), pp. 110004. doi: 10.1063/1.5008131
26. *Turazyan A. V., Rabinovich A. L.* On the distribution of stress in the basic model the unidirectional structures, *The academy of sciences of the USSR. (DAN SSSR)*, 1970; T. 194(6), pp. 1305-1307
27. *Dionísio J.M.M., et al.* Fracture mechanics approach to stress singularities in composite adhesive joints, *Composite Structures*, 2021; 276, pp. 114507. doi. [org/10.1016/j.compstruct.2021.114507](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114507)
28. *Bhowmick, S, Liu, GR.* On singular ES-FEM for fracture analysis of solids with singular stress fields of arbitrary order, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2018; 86, pp. 64-81. doi.org/10.3390/app8122488
29. *Calic, A., Yildirim, S.* Effect of adherend recessing on bi-adhesively bonded single-lap joints, *Sadhana*, 2017; 42 (3), pp. 317-325. doi: 10.1007/s12046-017-0603-2
30. *Calic, A.* Effect of adherend shape on stress concentration reduction of adhesively bonded single lap joint, *Engineering Review*, 2016; 16, pp. 29-34.
31. *Tsybin, N.,* Calculation of layered structures using the contact layer model. PhD Thesis. Tula State University. - Moscow, 2019. - 22 p.

Rio-Rita Razakova, Assistant at the Energy Structures and Hydro-Technical Installations Department.

E-mail: RazakovaRV@mpei.ru

Muhammet Razakov, Researcher, Lecturer at the Energy Structures and Hydro-Technical Installations Department, Engineer at the Ecological Safety and Engineering Equipment Energy Efficiency of Building Laboratory.

E-mail: RazakovMA@mpei.ru