
УДК 629.7.023

Разработка макромодели слоистого композита для анализа напряженно-деформированного состояния нерегулярных зон типовых конструкций планера самолёта

Грищенко С. В.^{*}, Попов Ю. И.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

**e-mail: grischenko1911@gmail.com*

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы предварительного качественного и количественного анализа напряжённо-деформированного состояния пакета полимерного слоистого композиционного материала в нерегулярных зонах типовых конструкций планера самолёта.

Разработана математическая модель деформирования произвольного пакета композиционного материала, основанная на теории слоистого материала и общей теории упругости, учитывающая межслоевые взаимодействия.

Математическое описание модели заключается в построении систем уравнений равновесия и совместности деформаций для каждого слоя композита и межслоевого пространства, заполненного связующим. Решение этих систем проводится для конкретных типовых случаев нагружения различных нерегулярных зон путём наложения граничных условий и условий связи систем уравнений.

Ключевые слова

композиционный материал, напряжённо-деформированное состояние, нерегулярная зона, межслоевой сдвиг

На сегодняшний день идёт широкое внедрение полимерных слоистых композиционных материалов (ПСКМ) в конструкции летательных аппаратов. Главная причина тому – высокие

по сравнению с металлическими конструкционными материалами значения удельной прочности. Это даёт значительный выигрыш в массе при сохранении необходимого уровня прочности конструкций. К настоящему времени доля ПСКМ из общей массы конструкции планера достигла 50%.

Однако в процессе внедрения ПСКМ в авиационные конструкции инженеры и исследователи столкнулись с рядом трудностей. Например, сложности с прогнозированием прочности конструкций из ПСКМ. Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) ПСКМ – это сложная многопараметрическая нелинейная задача, практически не поддающаяся математической формализации и зачастую не имеющая явного аналитического решения. Для решения этой проблемы проводится большой объём теоретических и экспериментальных исследований. В инженерной практике наибольшее распространение получил экспериментально-статистический подход к решению задач расчёта конструкций самолёта из ПСКМ как наиболее простой и надёжный.

Зоны в конструкциях планера можно условно разделить на регулярные и нерегулярные. В общем смысле под нерегулярной зоной можно понимать участок со значительным изменением структуры изделия и (или) материала по отношению к регулярной зоне. В композиционных материалах под нерегулярную зону попадают все участки в конструкции, где происходит изменение состава и структуры укладок. В этом случае меняются механические свойства материала, что значительно влияет на НДС.

Наличие межслоевых сдвиговых деформаций в пакете ПСКМ в общем случае неоспоримо, однако в регулярных зонах, где состав и структура укладок неизменны на участке, размеры которого значительно превышают толщину пакета, межслоевые сдвиги настолько малы, что ими при проектировании конструкции можно пренебречь. При составлении подавляющего большинства расчётных и математических моделей композиционного материала используют теорию упругости слоистого анизотропного материала, состоящего из упругих ортотропных пластин. Одно из допущений в этой теории – постоянство и равенство деформаций по всей толщине пакета. Поэтому такие методы расчёта и модели применимы для регулярных зон, однако при расчёте ими участков с изменением структуры композита может появиться ошибка, величина которой, возможно, превысит доверительный интервал погрешности вычисления той или иной методики или модели.

Основная методика проектирования нерегулярных зон заключается в компенсации структурных неоднородностей и концентрации напряжений за счёт материала. Однако, при использовании ПСКМ такая методика не применима, так как невозможно скомпенсировать

локальные концентрации напряжений, межслоевые концентрации напряжений и межслоевые сдвиговые деформации путём наращивания объёма материала ввиду анизотропии механических свойств и неоднородности структуры композита. Кроме того, подобные явления практически невозможно обнаружить при прочностных испытаниях, и, соответственно, их измерить. Эти явления, прежде всего, могут негативно сказаться на выносливости материала, что делает невозможным его применение в высокоответственных и высоконагруженных конструкциях, в конструкциях, подверженных динамическим нагрузкам, а также могут снизить ресурс и надёжность изделия.

Важным этапом при проектировании любой авиационной конструкции является доопытная оценка НДС конструкции, что позволяет ещё на этапе разработки в первом приближении определить геометрические параметры элементов разрабатываемой конструкции. И чем точнее методики оценки НДС, тем меньше затраты на последующую, уже опытную, доводку конструкции.

Для конструкций из ПСКМ при проектировочном расчете применяются, в основном, макромодели слоистого композита, основанные на теории слоистого анизотропного материала, а также различные конечноэлементные модели для определения действующих напряжений. В первом случае, как уже говорилось выше, для получения решения принимается допущение о равенстве и постоянстве деформаций по толщине пакета. Во втором случае, есть возможность построить такую модель слоистого композита, в которой будут учитываться межслоевые и межфазные взаимодействия компонентов ПСКМ, однако требуемые вычислительные мощности в этом случае вырастают в разы пропорционально количеству слоёв. Различного рода микромоделли композитов, среди которых есть как конечноэлементные модели, так и численно-аналитические, учитывающие различные физико-механические аспекты взаимодействия волокон и связующего, а также слоёв композита друг с другом, применяются, в основном, для уточнения макромоделей путём введения различного рода дополнительных коэффициентов и функций взаимодействия.

Задачей данного исследования является разработка методики анализа НДС произвольного пакета ПСКМ в нерегулярной зоне типовых конструкций планера самолёта путём составления специальной математической численно-аналитической макромодели деформирования произвольного пакета ПСКМ, допускающей возможные перемещения слоёв относительно друг друга с учётом жёсткости на сдвиг связующего.

В рамках данного исследования будет рассматриваться исключительно плоское напряжённое состояние. Считаем, что межслоевое пространство в пакете ПСКМ заполнено исключительно связующим, которое по своим механическим свойствам изотропно. В рамках

разрабатываемой модели считаем, что многослойный пакет ПСКМ фактически состоящий из N монослоев толщиной h_M , имеет N ортотропных слоёв толщиной h_K , представляющий собой композитный монослой с несколько большим процентом содержания волокон, и $N-1$ слоёв связующего толщиной h_C , обладающего изотропией механических свойств. На рисунке 1 дано схематическое изображение расчётной модели, $OXYZ$ – внешняя система координат для всего пакета, 1 – ортотропные слои, 2 – промежуточные слои связующего. На рисунке 2 даны графики гипотетического и принятого в расчётной модели распределения процента объёмного содержания волокон по толщине пакета. [1], [2].

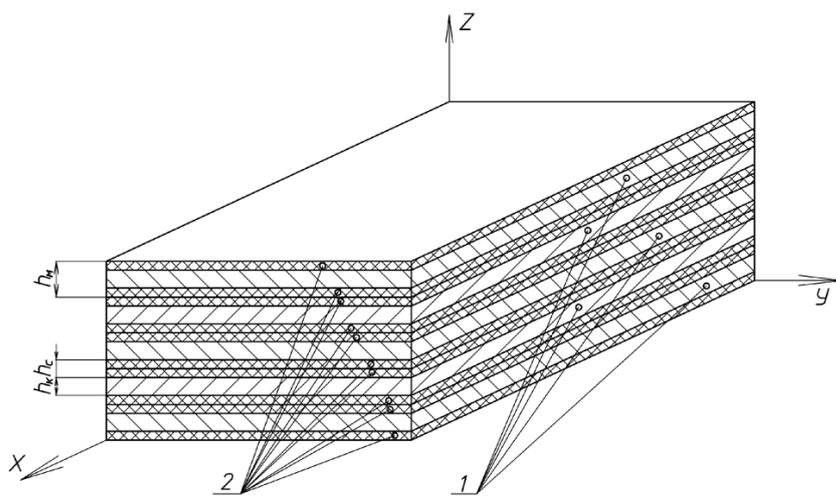


Рис. 1. Схематическое изображение расчётной модели. 1 – ортотропные слои, 2 – промежуточные слои связующего.

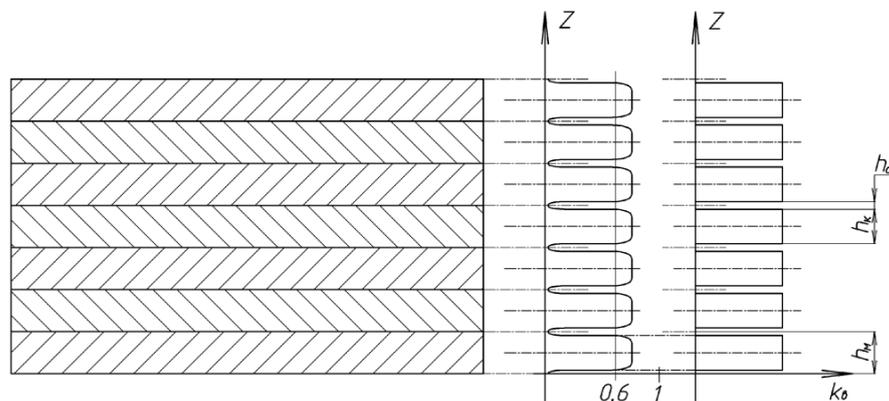


Рис. 2. Схема распределения объёмного содержания волокон по толщине пакета.

Таким образом, считаем, что пакет состоит из слоёв 2-х различных материалов. На границе раздела фаз связи считаем идеальными, т.е. деформации по границе раздела материалов одинаковые. Также считаем, что композитный монослой испытывает только плоское НДС, в то время как промежуточный слой связующего – объёмное НДС за исключением продольных деформаций вдоль оси Z . Поэтому в промежуточном слое связующего не исключаются возможность возникновения сдвиговых деформаций γ_{xz} и γ_{yz} и,

как следствие, касательных напряжений τ_{XZ} и τ_{YZ} .

Введём понятие коэффициента толщины связующего k_C :

$$h_C = k_C h_M$$

$$h_K = (1 - k_C) h_M$$

Деформации ε_X и ε_Y по толщине промежуточного слоя связующего изменяются по линейному закону, то есть функция деформации по оси Z в промежуточном слое связующего:

$$\varepsilon_{X,Y}(z) = \varepsilon_{X,Y}^{(1)} + \frac{\varepsilon_{X,Y}^{(2)} - \varepsilon_{X,Y}^{(1)}}{h_C} \cdot z;$$

где $\varepsilon_{X,Y}^{(1)}$ и $\varepsilon_{X,Y}^{(2)}$ – деформации по осям X и Y слоёв композита с номерами 1 и 2 соответственно (см. рис. 3).

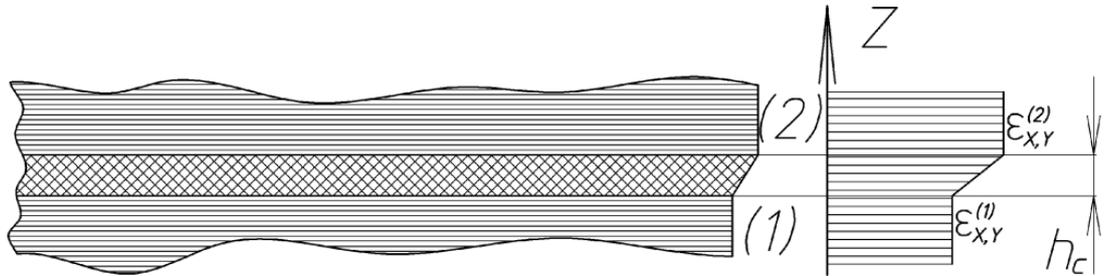


Рис. 3. Функция деформации связующего по толщине пакета.

НДС каждого композитного слоя подчиняется классическим закономерностям для анизотропной пластины. Для системы координат отдельного монослоя $012Z$, где ось 1 направлена вдоль волокон, а ось 2, соответственно, поперёк, из теории упругости анизотропного материала для ортотропных пластин можно записать следующее (см. рис. 5):

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{E}_1 & \bar{E}_1 \mu_{21} & 0 \\ \bar{E}_2 \mu_{12} & \bar{E}_2 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix};$$

где $\begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix}$ – вектор напряжений в системе координат $012Z$ (см. рис. 5),

$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix}$ – вектор деформаций в слое в системе координат $012Z$,

$$[A_{12}] = \begin{bmatrix} \bar{E}_1 & \bar{E}_1 \mu_{21} & 0 \\ \bar{E}_2 \mu_{12} & \bar{E}_2 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} - \text{матрица жёсткости слоя в осях } 012Z;$$

$$\bar{E}_{1,2} = \frac{E_{1,2}}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}, E_1 \text{ и } E_2 - \text{модули упругости слоя в направлении 1 и 2 соответственно}$$

(см. рис. 4),

$$\mu_{12} = \frac{E_1}{E_2} \cdot \mu_{21} - \text{коэффициент Пуассона. [3], [4], [5].}$$

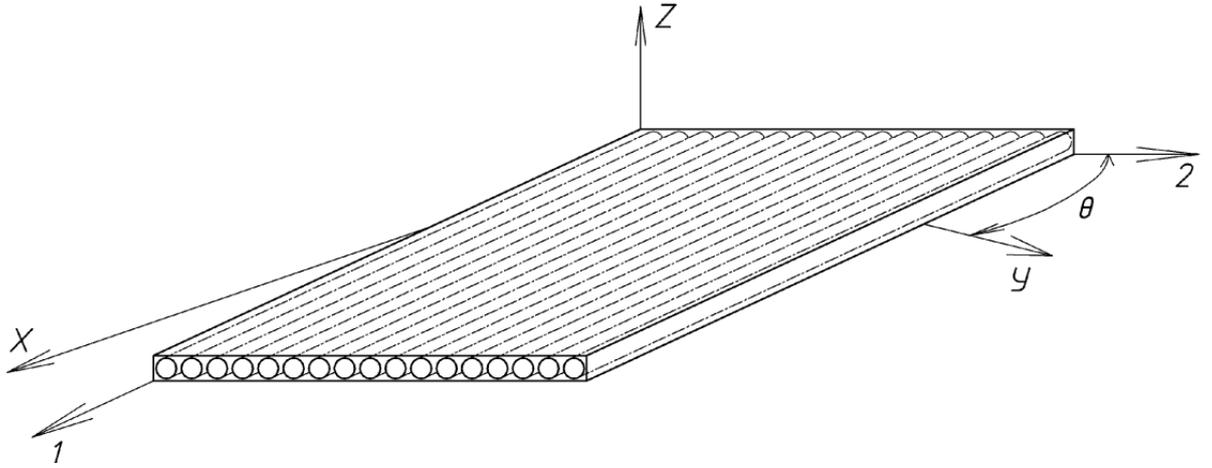


Рис. 4. Схема монослоя. Направление 1 – вдоль оси армирования, 2 – поперёк оси армирования, 0XYZ – произвольная система координат.

Для произвольной системы координат можно записать:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = [C(\theta)] \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{pmatrix} = [C(\theta)]^T \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix};$$

где $[C(\theta)]$ – матрица направляющих косинусов по углу θ между связанной системой координат 012Z и произвольной системой координат 0XYZ (см. рис. 5):

$$[C(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos^2 \theta & \sin^2 \theta & -\sin 2\theta \\ \sin^2 \theta & \cos^2 \theta & \sin 2\theta \\ \frac{1}{2} \sin 2\theta & -\frac{1}{2} \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix}$$

Матрица жёсткости для произвольной системы координат:

$$[A_{xy}] = [C(\theta)] \cdot [A_{12}] \cdot [C(\theta)]^T.$$

Жёсткость всего пакета определяется как:

$$[A_{\Sigma}] = \frac{1}{h_{\Sigma}} \sum_{k=1}^N h_k [C(\theta_k)] \cdot [A_{12}] \cdot [C(\theta_k)]^T;$$

где h_{Σ} – суммарная толщина пакета, h_k – толщина одного k -го слоя, θ_k – угол армирования k -го слоя. [4], [10].

Жёсткость пакета в случае N слоёв с одинаковой толщиной:

$$[A_{\Sigma}] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [C(\theta_k)] \cdot [A_{12}] \cdot [C(\theta_k)]^T$$

Суммарные модули упругости и сдвига пакета рассчитываются из элементов матрицы $[A_{\Sigma}]$:

$$E_x = A \cdot (A_{22}A_{33} - A_{23}^2)^{-1}; E_y = A \cdot (A_{11}A_{33} - A_{13}^2)^{-1}; G_{xy} = A \cdot (A_{11}A_{22} - A_{12}^2)^{-1}$$

$$\text{где } A = (A_{11}A_{22} - A_{12}^2) \cdot A_{33} + 2A_{12}A_{13}A_{23} - A_{11}A_{23}^2 - A_{22}A_{13}^2$$

При определении суммарных характеристик пакета не учитывается наличие промежуточных слоёв, так как паспортные характеристики слоя определяются при испытании материала в составе многослойного пакета.

Считаем, что распределение нагрузки происходит на длине всей нерегулярной зоны, и раздача нагрузки происходит по линейному закону. На рисунке 5 представлена схема нагружения слоя в составе пакета рассматриваемой модели. Считаем, что заделка – это сечение, где деформации по пакету распределения поровну, все слои нагружены соответственно условию:

$$\frac{q_1^{\text{экв}}}{E_{l1}} = \frac{q_2^{\text{экв}}}{E_{l2}} = \frac{q_3^{\text{экв}}}{E_{l3}} = \dots = \frac{q_n^{\text{экв}}}{E_{ln}} = \frac{q}{N \cdot E_{l\Sigma}} \quad [6]$$

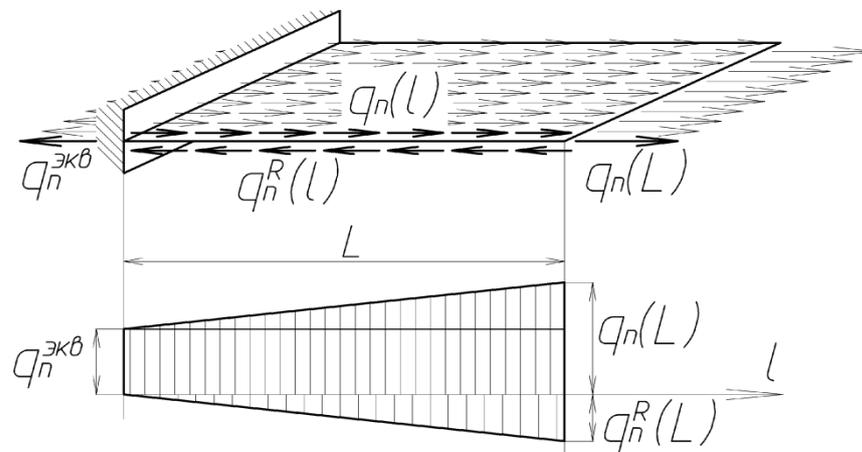


Рис. 5. Схема нагружения слоя.

Уравнение равновесия слоя:

$$q_n(l) - q_n^R(l) - q_n^{\text{экв}} = 0;$$

где $q_n(l)$ – погонная нагрузка на слой,

$$q_n^R(l) = \frac{q_n(L) - q_n^{\text{экв}}}{L} l - \text{реакция с прилегающих слоёв,}$$

L – размер переходной зоны,

l – переменная длины переходной зоны,

E_{l_n} – модуль упругости слоя в направлении l ,

E_{l_Σ} – модуль упругости всего пакета в направлении l ,

N – общее число слоёв в пакете,

q – внешняя погонная нагрузка.

Тогда нагрузку $q_n(l)$ можно представить в виде:

$$q_n(l) = \frac{q_n(L) - q_n^{\text{экв}}}{L} l + q_n^{\text{экв}}$$

Нагруженные слои можно рассматривать как один слой, так как деформации по толщине нагруженного пакета не меняются.

Для N_q нагруженных слоёв имеем:

$$q_{N_q}(L) = q, \quad q_{N_q}^{\text{экв}} = q \frac{N_q \cdot E_{l_{N_q}}}{N \cdot E_{l_\Sigma}};$$

где $E_{l_{N_q}}$ – модуль упругости пакета нагруженных слоёв.

Тогда нагрузку $q_{N_q}(l)$ для пакета из N_q нагруженных слоёв можно представить в виде:

$$q_{N_q}(l) = q \left[\left(1 - \frac{N_q \cdot E_{l_{N_q}}}{N \cdot E_{l_\Sigma}} \right) \frac{l}{L} + \frac{N_q \cdot E_{l_{N_q}}}{N \cdot E_{l_\Sigma}} \right]$$

Или для одного нагруженного слоя с учётом равенства деформаций среди нагруженных слоёв:

$$q_{nq}(l) = \frac{E_{l_n}}{N_q \cdot E_{l_{N_q}}} q_{N_q}(l) = q \cdot E_{l_n} \left[\left(\frac{1}{N_q \cdot E_{l_{N_q}}} - \frac{1}{N \cdot E_{l_\Sigma}} \right) \frac{l}{L} + \frac{1}{N \cdot E_{l_\Sigma}} \right]$$

Для ненагруженных слоёв введём отдельную нумерацию, начиная от нагруженных слоёв, то есть первый ненагруженный слой после нагруженного будет иметь индекс 1:

$$m = 1, 2, 3, \dots, M;$$

где M – количество ненагруженных слоёв по одну сторону от нагруженных. Согласно

изложенной выше гипотезе о минимуме потенциальной энергии деформации пакета ПСКМ, считаем, что на ненагруженный слой будет приходиться такая нагрузка, что его деформация будет соответствовать деформации для того случая, когда на него также приложена внешняя нагрузка, то есть общее число нагруженных слоёв N_q+m .

Тогда для ненагруженного слоя можем записать:

$$q_m(L) = q \frac{E_{l_m}}{(N_q + m) \cdot E_{l_{(Nq+m)}}}, \quad q_m^{\text{экс}} = q \frac{E_{l_m}}{N \cdot E_{l_\Sigma}};$$

где E_{l_m} – модуль упругости ненагруженного слоя с номером m , $E_{l_{(Nq+m)}}$ – общий модуль упругости пакета, включающего все нагруженные слои и m ненагруженных до рассматриваемого с номером m .

Тогда нагрузку $q_m(l)$ для ненагруженного слоя можно представить в виде:

$$q_m(l) = q \cdot E_{l_m} \left[\left(\frac{1}{(N_q + m) \cdot E_{l_{(Nq+m)}}} - \frac{1}{N \cdot E_{l_\Sigma}} \right) l + \frac{1}{N \cdot E_{l_\Sigma}} \right]$$

Механические свойства связующего будем определять из механических свойств композитного монослоя, так как характеристики любого материала в значительной мере улучшаются на микроуровне.

$$E_C = E_2, \quad \mu_C = \mu_{21}, \quad G_C = \frac{E_C}{2 \cdot (1 + \mu_C)} = \frac{E_2}{2 \cdot (1 + \mu_{21})}$$

Значение коэффициента толщины промежуточного слоя связующего можно получить из статистики. Очевидно, что толщины промежуточных слоёв связующего подчиняются нормальному распределению, вершина которого лежит некое среднее значение, которое наиболее часто встречается в композиционных конструкциях. Проанализировав крайние случаи распределения волокон (максимально плотное и максимально равномерное распределение волокон), можно получить расчётную формулу для определения коэффициента толщины промежуточного слоя связующего:

$$k_C = 0,5 \dots 0,55 \cdot (1 - 1,1 \cdot k_B);$$

где k_B – объёмное содержание волокон.

Для решения поставленных задач в рамках данного исследования будем считать, что $k_C = 0,18$ (для $k_B = 0,6$).

В модели имеется 2 типа слоёв: слой композита с присущими ему свойствами анизотропии, испытывающий только плоское НДС, и промежуточный слой связующего, представляющий собой изотропный материал, и испытывающий объёмное НДС за

исключением перемещений вдоль оси Z.

Мы допускаем в данной модели возможность различных деформаций слоёв, однако, находясь в практически идеальных механических связях, между деформациями слоёв существуют закономерности, определяемые из общей теории упругости.

Для слоя связующего уравнения Коши разрешаются в 4 дифференциальных зависимости совместности деформаций:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y},$$

$$\frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon_x}{\partial z} + C_x,$$

$$\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon_y}{\partial z} + C_y,$$

$$\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} = \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + C_{xy};$$

где C_x , C_y и C_{xy} – определяются из граничных условий.

Задача сводится к определению напряжений деформаций композитных слоёв по закономерностям классической теории упругости слоистого анизотропного материала. Для промежуточных слоёв связующего сначала будут определяться деформации, в том числе и сдвиговые, а потом касательные, нормальные и эквивалентные напряжения.

Межслоевые сдвиговые деформации определим, разрешив уравнения совместности деформаций для промежуточного слоя связующего, используя зависимость продольной деформации промежуточного слоя связующего по оси Z (граничные условия принимаем нулевыми):

$$\gamma_{iz} = \int \left(\frac{\partial \varepsilon_i}{\partial z} \right) dl = \frac{1}{k_c h_M} \int (\varepsilon_i^{(2)}(l) - \varepsilon_i^{(1)}(l)) dl;$$

где $\varepsilon_i^{(2)}(l)$ и $\varepsilon_i^{(1)}(l)$ - деформации прилегающих слоёв с номерами 1 и 2.

Деформации прилегающих слоёв определяются однозначно, независимо от нагрузки на слой:

$$\varepsilon_i(l) = \frac{q(l)}{h_M E_i}$$

Таким образом, получаем деформации для нагруженных и ненагруженных слоёв соответственно:

$$\varepsilon_{N_q}(l) = \frac{q}{h_M} \left[\left(\frac{1}{N_q \cdot E_{l_{N_q}}} - \frac{1}{N \cdot E_{l_\Sigma}} \right) \frac{l}{L} + \frac{1}{N \cdot E_{l_\Sigma}} \right]$$

$$\varepsilon_m(l) = \frac{q}{h_M} \left[\left(\frac{1}{(N_q + m) \cdot E_{l_{N_q+m}}} - \frac{1}{N \cdot E_{l_\Sigma}} \right) \frac{l}{L} + \frac{1}{N \cdot E_{l_\Sigma}} \right]$$

Разница деформаций между двумя ненагруженными слоями:

$$\Delta \varepsilon_{m,m+1}(l) = \frac{q}{h_M} \left(\frac{1}{(N_q + m) \cdot E_{l_{N_q+m}}} - \frac{1}{(N_q + m + 1) \cdot E_{l_{N_q+m+1}}} \right) \frac{l}{L}$$

Обращаю внимание, что в зоне заделки, то есть там, где деформации по пакету выравниваются, разница деформаций равна нулю, с другой стороны переходной нерегулярной зоны, соответственно, разница деформаций будет максимальна.

$$\Delta \varepsilon_{m,m+1}(0) = 0$$

$$\Delta \varepsilon_{m,m+1}(L) = \frac{q}{h_M} \left(\frac{1}{(N_q + m) \cdot E_{l_{N_q+m}}} - \frac{1}{(N_q + m + 1) \cdot E_{l_{N_q+m+1}}} \right)$$

Отсюда же получаем граничные условия для межслоевого сдвига:

$$\gamma_{l_z, m}(0) = 0$$

Итак, выразим межслоевой сдвиг:

$$\gamma_{l_z, m}(l) = \frac{q}{k_C (h_M)^2} \left(\frac{1}{(N_q + m) \cdot E_{l_{N_q+m}}} - \frac{1}{(N_q + m + 1) \cdot E_{l_{N_q+m+1}}} \right) \frac{1}{2} \frac{l^2}{L}$$

Или, если изначально известна разность деформаций:

$$\gamma_{l_z, m}(l) = \frac{1}{2} \frac{l}{k_C h_M} \Delta \varepsilon_{m,m+1}(l)$$

Теперь определим продольные деформации в промежуточном слое связующего, считая, что его деформация есть среднее значение деформаций соседних слоёв композита.

Таким образом, имеем:

$$\varepsilon_{C, m} = \frac{q}{k_C h_M} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{(N_q + m) \cdot E_{l_{N_q+m}}} - \frac{1}{(N_q + m + 1) \cdot E_{l_{N_q+m+1}}} \right) \frac{l}{L} + \frac{1}{N \cdot E_{l_\Sigma}} \left(1 - \frac{l}{L} \right) \right]$$

Далее определяем напряжённое состояние связующего:

$$\sigma_{C, m} = \varepsilon_{C, m} \cdot E_C$$

$$\tau_{C, m} = \gamma_{l_z, m}(l) \cdot \frac{E_C}{2 \cdot (1 + \mu_C)}$$

Затем можно определить эквивалентные напряжения для оценки прочности связующего.

Для исследования возможностей методики и анализа результатов, был проведён расчёт гипотетического расчётного случая. Рассматривался пакет ПСКМ, состоящий из 40 слоёв. Предполагалось, что на пакет действует некая нагрузка, приложенная к некоторому количеству верхних слоёв (нагруженные слои).

На основании анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Зависимость деформаций слоёв и межслойных деформаций по толщине пакета имеет явно выраженную обратнопропорциональную зависимость (см. рис. 6). Межслойные сдвиговые деформации с большей интенсивностью стремятся к нулю. Такая зависимость в большей степени проявляется для пакета, армированного только в одном направлении. На рисунке 7 приведены зависимости для произвольно армированных пакетов. Характер обратной пропорциональности сохраняется, однако имеют место скачки, обусловленные разностью в упругих характеристиках слоя в исследуемом направлении.

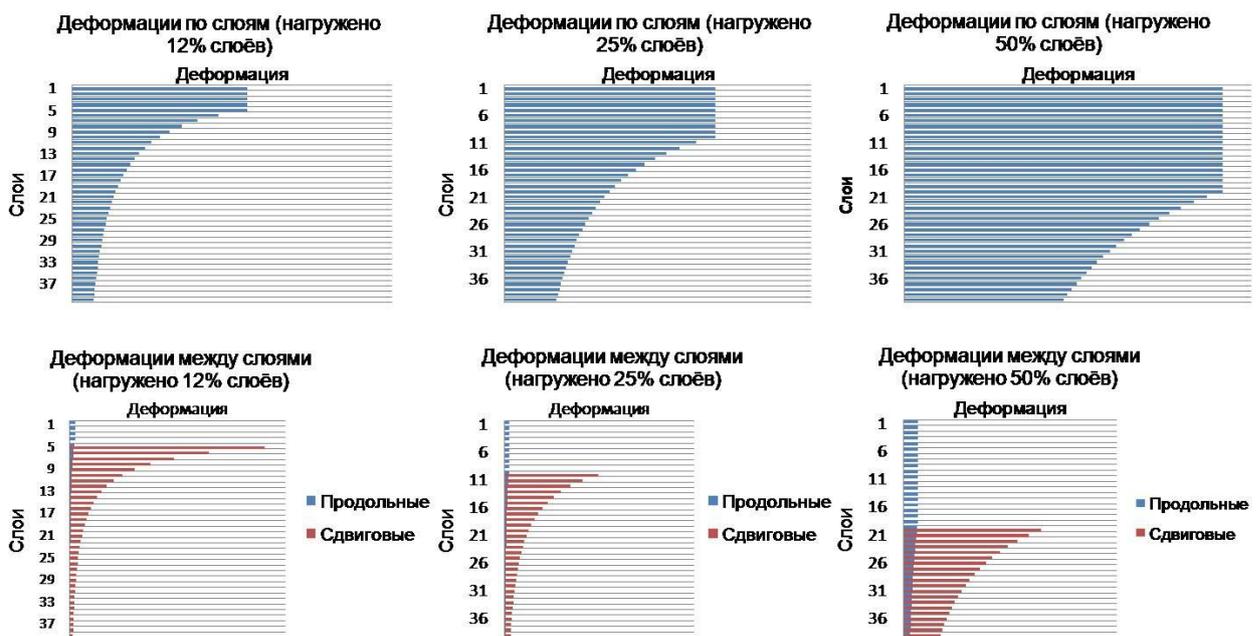


Рис. 6. Деформации слоёв по толщине пакета.

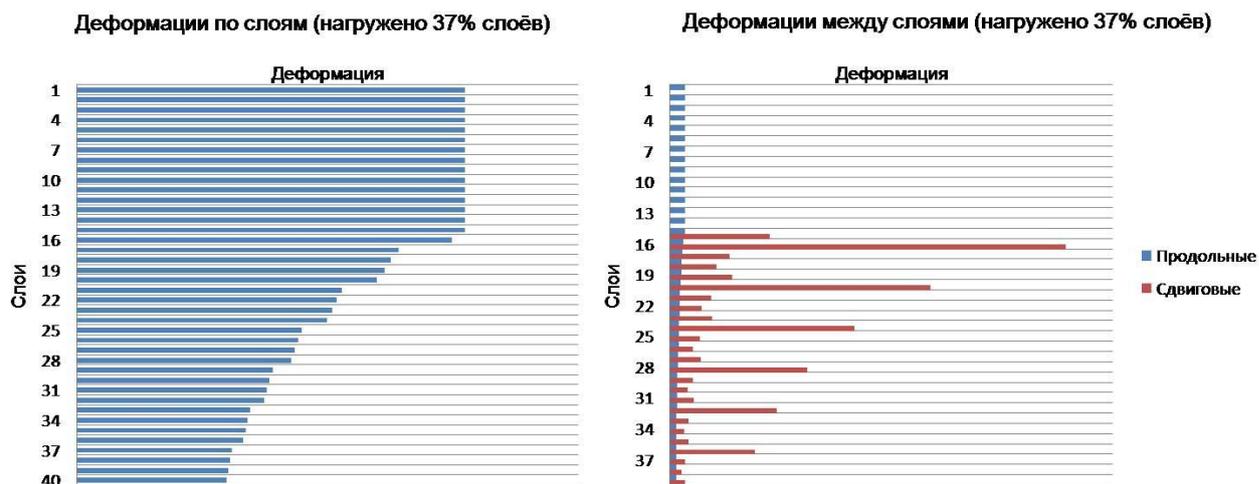


Рис. 7. Деформации по толщине пакета для произвольной укладки.

2. На рисунке 8 приведены сравнительные характеристики деформаций слоёв для однотипного пакета при различных условиях нагружения. На полученных диаграммах видно, что характер распределения деформаций по слоям не зависит от величины приложенной нагрузки, характера нагружения и расчётной схемы. Значит, имеет место некая инвариантная характеристика деформирования пакета ПСКМ, зависящая только от структуры и свойств пакета, позволяющая оценить НДС такого пакета на этапе, когда сама нагрузка и характер нагружения неизвестны.

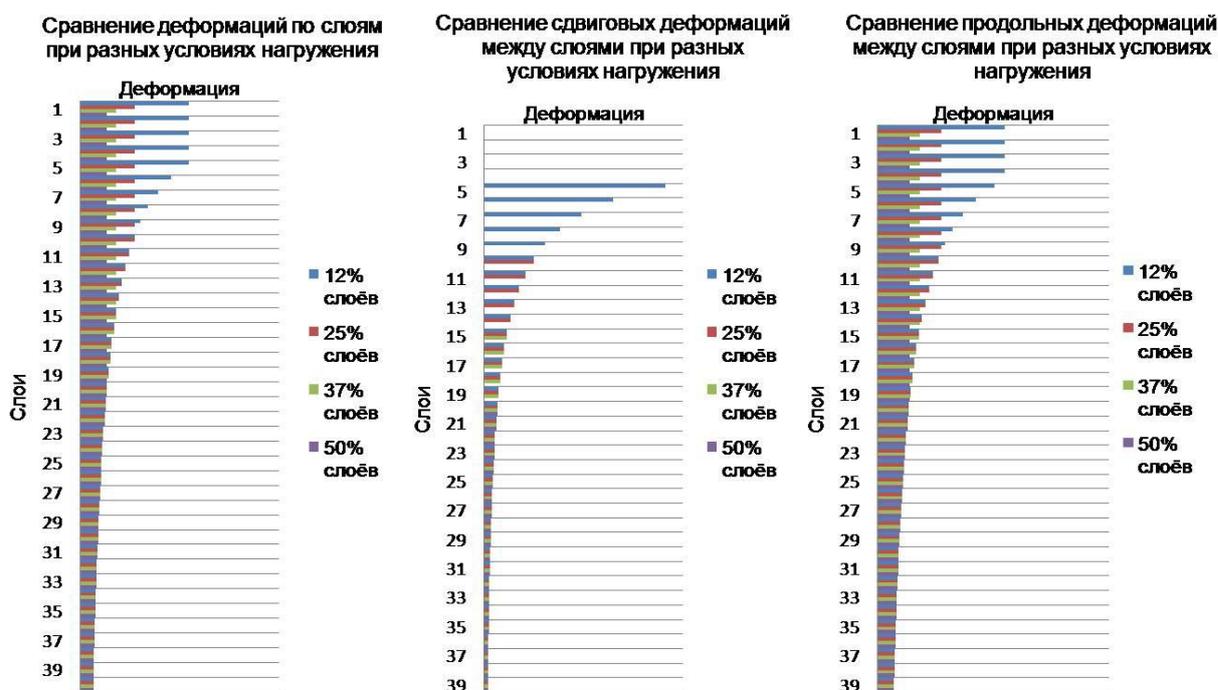


Рис. 8. Сравнение деформаций слоёв.

3. Также на основе сравнительных диаграмм на рисунке 8 можно сделать очевидный вывод о том, что чем больше слоёв включается в работу, тем меньше нагрузка на слой. Отсюда

можно сказать, что для более равномерного включения слоёв ПСКМ в работу под нагрузкой толщину в нерегулярной зоне нужно наращивать постепенно. Однако, на основе полученных решений для межслоевой деформации можно заключить, что межслоевой сдвиг напрямую зависит от размера переходной зоны. Поэтому появляется задача нахождения оптимального размера переходной зоны, позволяющей слоям постепенно включаться в работу, при этом не подвергая связующее между слоями опасным напряжениям.

4. Касательные напряжения между слоями (см. рис. 6 и 7), если они есть, как правило, значительно преобладают над нормальными, поэтому расчёт на расслоение можно проводить на основе прочности материала связующего на сдвиг. Однако, возможно, потребуется создание комплексного критерия прочности.
5. Наблюдается значительное увеличение межслоевых деформаций на участках, где передаётся нагрузка от слоя с армированием 90° на слой с армированием 0° (см. рис. 7). Это обусловлено слишком большой разницей в жёсткости таких слоёв. При передаче нагрузки от слоя 0° на слой 90° наблюдается обратный характер межслоевых эффектов, заключающийся в небольших величинах межслоевых деформаций и напряжений. Отсюда можно заключить, что нежелательно в нерегулярных зонах совмещать вместе слои с армированием 0° и 90° , то есть слои с слишком большой разницей в жёсткости в исследуемом направлении действия нагрузки.

Библиографический список

1. Межслойные эффекты в композитных материалах: Пер. с англ./Под ред. Н. Пэйгано. – М.: Мир, 1993. – 346 с., ил.
2. Кравцов В.А., «Конечно-элементные модели слоистого композиционного материала», «Вестник Московского авиационного института», т.16, выпуск 6, 2009 г.
3. Алфутов Н.А. и др. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов/Алфутов Н. А., Зиновьев П. А., Попов Б. Г. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
4. Расчет многослойных конструкций вариационно-матричными методами: Учебное пособие для вузов машино- и приборостроительных специальностей/ Б.Г. Попов . – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993 . – 294 с.
5. Композиционные материалы: Справочник/ В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общей редакцией В.В. Васильева.– М: Машиностроение, 1990. – 512 с.
6. В. Н. Максименко, И. П. Олегин. Прогнозирование прочности композитных конструкций:

учебно-методическое пособие/ Новосиб. гос. техн. ун-т, -Новосибирск, НГТУ, 1994. – 90 с.