
УДК:688.5

Анализ температурных напряжений и деформаций в кессонных конструкциях из композиционных материалов

Семенцова А. Н.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

e-mail: sane4ka_sn@mail.ru

Аннотация

В работе приведена методика расчета остаточных температурных напряжений и деформаций, возникающих в кессонных композитных конструкциях после технологического процесса. В работе впервые исследуются вопросы поводок при температурном воздействии на объемных конструкциях интегральной схемы.

Ключевые слова

композиционный материал, температурные деформации, погиби, кессон, интегральная конструкция

Введение

Композиционные материалы (КМ) находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Прочностные свойства композитов используются при проектировании, прочностных расчетах и изготовлении узлов и агрегатов из КМ.

Высокий модуль упругости и высокая удельная прочность обеспечивают композитным материалам преимущества при эксплуатации ЛА в условиях сложного нагружения. Эти преимущества в полной мере могут быть использованы при условии создания интегральной конструкции. Методология изготовления таких конструкций позволяет получить сложную высоконагруженную композитную конструкцию с большим числом входящих в нее элементов без механической подгонки деталей, сверления отверстий и установки механического крепежа. Интегральные конструкции могут обеспечить

существенное снижение массы с одновременным повышением жесткости, прочности и технологичности. При использовании композиционных материалов для подкрепления основных силовых элементов масса фюзеляжа может быть снижена на 20%, масса крыла – на 15-20%, масса оперения – на 10-15%. Таким образом, задача современного производства связана с технологией создания данного типа конструкций для уменьшения механических соединений, которые ослабляют материал и уменьшают ресурс и прочность изделий.

Однако одной из важнейших проблем производства изделий из КМ является возникновение технологических остаточных деформаций. Они возникают при изготовлении изделий вследствие перепада температур, недостатков технологических процессов, например, неравномерное распределение связующего. Для интегральных конструкций особенно важно, чтобы остаточные деформации не приводили к отклонению от теоретического профиля конструкции.

Целью данной работы являлась созданиерасчетной методики, позволяющей при проектировании избегать температурные напряжения и деформации, которые приводят к образованию погни после технологического процесса. Практически данная методика может быть использована при создании реальных конструкций таких, как кессон крыльев, кессон горизонтального и вертикального оперения. Технологически кессонные конструкции изготавливаются с помощью методов: вакуумной инфузии, RTM метода (ResinTransferMoulding), препреговой технологии. В данной методике рассматривается препреговая технология, т.к. при производстве изделий с использованием данной технологии обеспечивается равномерность межслоевой структуры.

Методика расчета

Для описания температурных деформаций и перемещений используется балочная теория, так как рассматриваемая конструкция не имеет крепления и физической силовой нагрузки. Сформулируем гипотезы и допущения:

1. Примем, что продольные деформации ε_z в любом поперечном сечении оболочки распределяются по закону плоскости $\varepsilon_z = ax + by + c$.
2. Оболочка считается безмоментной, так как структура многослойной стенки оболочки симметрична по толщине, нет поперечной силовой нагрузки и закреплений на границе.

3. Композиционный материал в конструкции остается упругим вплоть до разрушения и связь между напряжениями и деформациями определяются законом Гука, при этом считается, что обшивка и стенки не теряют устойчивости.

4. Считаем, что деформации возникают только вследствие температурного воздействия.

5. Расчетная часть цилиндрической оболочки считается длиной, регулярной по длине, без вырезов, без резкого изменения жесткости и нагрузок, без учета условий закрепления.

Так как материал ортотропный, используем гипотезу Дюамеля-Неймана, полные деформации определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\varepsilon_z &= \varepsilon_z^y + \varepsilon_z^t, \\ \varepsilon_s &= \varepsilon_s^y + \varepsilon_s^t, \\ \gamma_{zs} &= \gamma_{zs}^y.\end{aligned}\quad (1)$$

Здесь $\varepsilon_z, \varepsilon_s$ – относительные удлинения в плоскости пластины, составляющей оболочку, по двум взаимно перпендикулярным направлениям z, s ; γ_{zs} – деформация сдвига в той же плоскости. Так как температурная деформация связана только с объемным расширением, то в выражении для сдвига γ_{zs} температурный член отсутствует. Далее будем рассматривать только полные деформации $\varepsilon_z, \varepsilon_s$, которые складываются из так называемых упругих и температурных деформаций. Запишем чисто температурные деформации для многослойного ортотропного материала, связанные с температурным расширением материала: $\varepsilon_z^t = \alpha_z T, \varepsilon_s^t = \alpha_s T$, где α_z, α_s – коэффициенты линейного расширения материала с учетом структуры материала определяются соотношениями $\alpha_z = \frac{B_{1t} B_{22} - B_{2t} B_{12}}{B_{11} B_{22} - B_{12}^2}, \alpha_s = \frac{B_{2t} B_{11} - B_{1t} B_{12}}{B_{11} B_{22} - B_{12}^2}$, $T(z, s)$ – заданное в оболочке распределение температуры. В свою очередь упругая деформация связана с напряжениями соотношениями закона Гука:

$$\begin{aligned}\varepsilon_z^y &= \frac{1}{E_z} (\sigma_z - \mu_{zs} \sigma_s), \\ \varepsilon_s^y &= \frac{1}{E_s} (\sigma_s - \mu_{sz} \sigma_z),\end{aligned}\quad (2)$$

где коэффициенты уравнений определяются по формулам:

$$E_z = \frac{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}{B_{22}}, E_s = \frac{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}{B_{11}}, \mu_{zs} = \frac{B_{12}}{B_{11}}, \mu_{sz} = \frac{B_{12}}{B_{22}}. \quad (3)$$

Подставляя выражения(2)в зависимости (1), получим соотношения закона Гука для случая температурного воздействия на многослойную ортотропную оболочку:

$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= \frac{1}{E_z}(\sigma_z - \mu_{zs}\sigma_s) + \alpha_z T, \\ \varepsilon_s &= \frac{1}{E_s}(\sigma_s - \mu_{sz}\sigma_z) + \alpha_s T. \end{aligned} \quad (4)$$

Данные уравнения (4)можно записать и в форме, разрешенной относительно напряжений. Запишем с помощью соотношения закона Гука формулы для нормальных сил для плоской задачи ортотропного материала:

$$\begin{aligned} N_z &= \sigma_z h = B_{11}\varepsilon_z + B_{21}\varepsilon_s - B_{1T}T, \\ N_s &= \sigma_s h = B_{12}\varepsilon_z + B_{22}\varepsilon_s - B_{2T}T = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Упругие коэффициенты в уравнениях(3)и (5) имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} B_{11}^k &= h(\bar{E}_1^k \cos^4 \varphi_k + 2\bar{E}_1^k \mu_{12}^k \sin^2 \varphi_k \cos^2 \varphi_k + \bar{E}_2^k \sin^4 \varphi_k + G_{12}^k \sin^2 2\varphi_k), \\ B_{22}^k &= h(\bar{E}_1^k \sin^4 \varphi_k + 2\bar{E}_1^k \mu_{12}^k \sin^2 \varphi_k \cos^2 \varphi_k + \bar{E}_2^k \cos^4 \varphi_k + G_{12}^k \sin^2 2\varphi_k), \\ B_{12}^k &= B_{21}^k = h((\bar{E}_1^k + \bar{E}_2^k) \sin^2 \varphi_k \cos^2 \varphi_k + \bar{E}_1^k \mu_{12}^k (\sin^4 \varphi_k + \cos^4 \varphi_k) - G_{12}^k \sin^2 2\varphi_k), \\ B_{1T}^k &= h(\bar{E}_1^k (\alpha_1^k + \mu_{12}^k \alpha_2^k) \cos^2 \varphi_k + \bar{E}_2^k (\alpha_2^k + \mu_{21}^k \alpha_1^k) \sin^2 \varphi_k), \\ B_{2T}^k &= h(\bar{E}_1^k (\alpha_1^k + \mu_{12}^k \alpha_2^k) \sin^2 \varphi_k + \bar{E}_2^k (\alpha_2^k + \mu_{21}^k \alpha_1^k) \cos^2 \varphi_k), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{где } \bar{E}_1^k = \frac{E_1^k}{1 - \mu_{12}^k \mu_{21}^k}, \bar{E}_2^k = \frac{E_2^k}{1 - \mu_{12}^k \mu_{21}^k}.$$

Исключая из выражений (5) ε_s , получим связь между усилием N_z и деформацией ε_z в виде:

$$N_z = E_z h \varepsilon_z + T B_z', \quad (7)$$

где $B_z^t = (\mu_{zs} B_{2T} - B_{1T})$, h – толщина обшивки.

Выведем зависимость между перемещениями и напряжениями в конструкции. С учетом сформулированных выше гипотез полная осевая деформация поперечного сечения будет иметь вид:

$$\varepsilon = \varepsilon_z^y + \varepsilon_z^t = u_1' + \theta_x' y + \theta_y' x + T \bar{B}_z^t, \quad (8)$$

$$\text{где } \bar{B}_z^t = (\bar{\mu}_{zs} \bar{B}_{2T} - \bar{B}_{1T}), \bar{B}_{pq} = \frac{B_{pq}}{h}.$$

Так как продольная деформация связана с продольным перемещением сечения $u = u(z, s)$ соотношением $\varepsilon_z = du / dz$, то интегрирование этого выражения с учетом (8) определяет перемещение в виде:

$$u(z, s) = u_1 + \theta_x(z) y + \theta_y(z) x + T \bar{B}_z^t z. \quad (9)$$

В уравнениях (8) и (9) слагаемые: u_1 – осевое смещение поперечного сечения, θ_x и θ_y – углы поворота относительно осей x и y . Будем считать, что оси x и y – главные центральные оси поперечного сечения кессона. Подставив значение для деформации (8) в выражение (7) запишем физический закон:

$$N_z = \sigma_z h = E_z h (u_1' + \theta_x' y + \theta_y' x) + T B_z^t. \quad (10)$$

Таким образом, решение поставленной температурной задачи сводится к поиску данных неизвестных коэффициентов u_1' , θ_x' , θ_y' . Так как задача технологическая, то в данной задаче отсутствуют закрепления и любые нагрузки на конструкцию, все неизвестные выражаются через температурные составляющие, которые в данном случае и являются нагрузкой. Для определения неизвестных коэффициентов воспользуемся статическими соотношениями:

$$P_z = \oint N_z dS = \oint E_z u_1' h dS + \oint E_z \theta_x' y h dS + \oint E_z \theta_y' x h dS + \sum_j \sigma_{zj} F_j + \\ + \oint T B_z^t dS + \sum_j \sigma_{zj}^t F_j = 0,$$

$$M_x = \oint N_z y dS = \oint E_z u'_1 y h dS + \oint E_z \theta'_x y^2 h dS + \oint E_z \theta'_y x y h dS + \sum_j \sigma_{zj} F_j y_j + \oint T B'_z y dS + \sum_j \sigma'_j F_j y_j = 0, \quad (11)$$

$$M_y = \oint N_z x dS = \oint E_z u'_1 x h dS + \oint E_z \theta'_x x y h dS + \oint E_z \theta'_y x^2 h dS + \sum_j \sigma_{zj} F_j x_j + \oint T B'_z x dS + \sum_j \sigma'_j F_j x_j = 0.$$

Здесь F_j - площадь сечения j -го продольного элемента; E_z - модуль упругости в продольном направлении обшивки, который может быть переменным по контуру.

Данную систему (11) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} P_z &= \tilde{F} + \theta'_x \tilde{S}_x + \theta'_y \tilde{S}_y + \tilde{T} = 0, \\ M_x &= \tilde{S}_x u'_1 + \theta'_x \tilde{I}_x + \theta'_y \tilde{I}_{xy} + \tilde{T}_x = 0, \\ M_y &= \tilde{S}_y u'_1 + \theta'_x \tilde{I}_{xy} + \theta'_y \tilde{I}_y + \tilde{T}_y = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Вводя следующие обозначения:

$$\tilde{F} = \oint E_z h ds + \sum_j E_{zj} F_j - \text{жесткость сечения на растяжение};$$

$$\tilde{S}_x = \oint E_z y h ds + \sum_j E_{zj} F_j y_j - \text{эквивалент статического момента относительно оси } x;$$

$$\tilde{S}_y = \oint E_z x h ds + \sum_j E_{zj} F_j x_j - \text{эквивалент статического момента относительно оси } y;$$

$$\tilde{I}_x = \oint E_z y^2 h ds + \sum_j E_{zj} F_j y_j^2 - \text{изгибная жесткость поперечного сечения относительно оси } x;$$

$$\tilde{I}_y = \oint E_z x^2 h ds + \sum_j E_{zj} F_j x_j^2 - \text{изгибная жесткость поперечного сечения относительно оси } y;$$

$$\tilde{I}_{xy} = \oint E_z x y h ds + \sum_j E_{zj} F_j x_j y_j - \text{эквивалент центробежному моменту инерции сечения};$$

$$\tilde{T} = \oint T B'_z dS + \sum_j \sigma'_j F_j - \text{жесткость сечения на растяжение, возникающая при температурном перепаде};$$

$\tilde{T}_x = \int TB'_z y dS + \sum_j \sigma'_j F_j y_j$ - эквивалент статического момента относительно оси x ,

возникающий при температурном перепаде;

$\tilde{T}_y = \int TB'_z x dS + \sum_j \sigma'_j F_j x_j$ - эквивалент статического момента относительно оси y ,

возникающий при температурном перепаде.

Решая данную систему уравнений(12), находим искомые коэффициенты. Интегрируя полученные выражения, получим искомые перемещения.

Пример расчета

В качестве примера был рассмотрен кессон с разной конструкцией верхней и нижней панели (рисунок):

- 1) Стрингерная симметричная конструкция;
- 2) Стрингерная несимметричная конструкция;
- 3) Стрингерная симметричная и несимметричная конструкция с двумя лонжеронами.

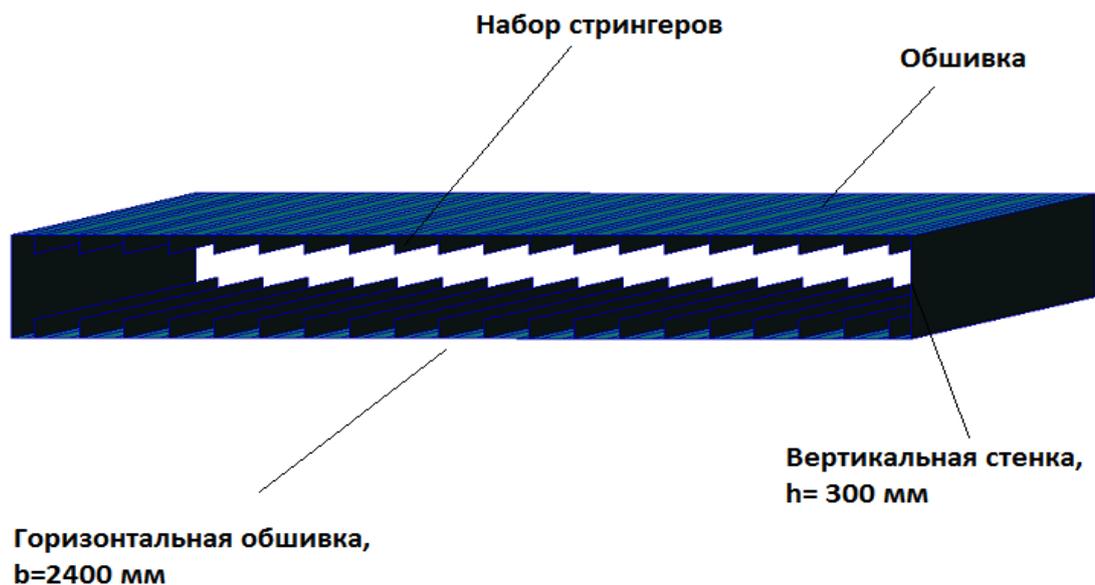


Рисунок 1 – Расчетная модель кессона.

Исходные данные рассматриваемого кессона представлены в 1.

Таблица 1

Исходные данные расчетной модели.

№	Характеристика		Значение
1	Модуль вдоль волокна, кг/мм ²		E_1 17300
2	Модуль поперек волокна, кг/мм ²		E_2 830
3	Модуль сдвига, кг/мм ²		G_{12} 430
4	Коэффициенты Пуассона		μ_{21} 0,3
5			$\mu_{12} = \mu_{21} \frac{E_2}{E_1}$ 0,014
6	Коэффициенты температурного расширения, 1/град.		α_1 $-1,5 \cdot 10^{-6}$
7			α_2 $22 \cdot 10^{-6}$
8	Поперечное сечение	Высота, мм	h 300
9		Ширина, мм	b 2400
10	Количество стрингеров		$N_{стр.}$ 40
11	Количество лонжеронов		$N_{лонж.}$ 2
12	Перепад температуры, град.		ΔT -120

Расчет проведен при перепаде температуры от 140⁰ до 20⁰С от точки стеклования связующего до комнатной температуры. Технологическая толщина элементарного слоя, который образует слои структуры, равна $\delta=0,184$ мм.

Структура элементов конструкции:

- 1) Структура обшивки

Структура горизонтальной обшивки состоит из 33 слоев, в основу которых положены повторяющиеся 11 слоев с укладкой $\varphi = +45^0, 0^0, -45^0, 0^0, 0^0, 90^0, 0^0, 0^0, -45^0, 0^0, +45^0$, в укладке вертикальных стенок обшивки отсутствуют продольные слои, структура состоит из 15 слоев, в основу которых положены повторяющиеся 5 слоев.

2) Структура стрингеров

Полка верхнего стрингера состоит из 33 слоев, стенка из 66 слоев. Полка нижнего стрингера состоит из 22 слоев, стенка из 44 слоев

3) Структура лонжеронов

Полка лонжерона состоит из 33 слоев, в стенке лонжерона отсутствуют продольные слои, структура состоит из 15 слоев.

Проведя расчеты кессона с различными вариантами конструкции верхней и нижней панели, приходим к следующим результатам. Для апробации методики первой рассмотрим симметричную конструкцию.

1) Бесстрингерная конструкция

Данная конструкция не имеет продольного подкрепления и представляет собой простую оболочку. Искомые коэффициенты имеют следующие значения: $u'_1 = 3.019 \cdot 10^{-5}$, $\theta'_x = 0$, $\theta'_y = 0$. Т.к. конструкция симметричная относительно оси X и Y, то имеет место только осевое смещение поперечного сечения.

2) Стрингерная симметричная конструкция

В случае такого типа конструкции структура верхнего и нижнего стрингера одинаковая: полка верхнего стрингера состоит из 33 слоев, стенка из 66 слоев. Значения коэффициентов: $u'_1 = 2.89 \cdot 10^{-5}$, $\theta'_x = 0$, $\theta'_y = 0$. Значение коэффициентов конструкции с наличием двух лонжеронов: $u'_1 = 2.978 \cdot 10^{-5}$, $\theta'_x = 0$, $\theta'_y = 0$. Данная конструкция так же симметричная относительно оси X и Y и имеет место только осевое смещение поперечного сечения

Рассмотрим результаты расчета несимметричной конструкции.

3) Стрингерная несимметричная конструкция

Значения коэффициентов: $u'_1 = 2.9 \cdot 10^{-5}$, $\theta'_x = -7.143 \cdot 10^{-10}$, $\theta'_y = 0$. Значение коэффициентов конструкции с наличием двух лонжеронов: $u'_1 = 2.997 \cdot 10^{-5}$, $\theta'_x = -1.265 \cdot 10^{-9}$, $\theta'_y = 0$. Конструкция симметричная относительно оси Y, коэффициент $\theta'_y = 0$.

Для того, чтобы подчеркнуть влияние нарушения симметрии на наличие погиби, были рассмотрена конструкция с увеличением несимметричности между верхней и нижней панелями. Результаты расчетов представлены в виде графиков зависимостей прогибов W_x от координаты z . На рисунках 2– 3 показаны результаты расчета симметричной и несимметричной стрингерной конструкции и стрингерной конструкции с двумя лонжеронами.

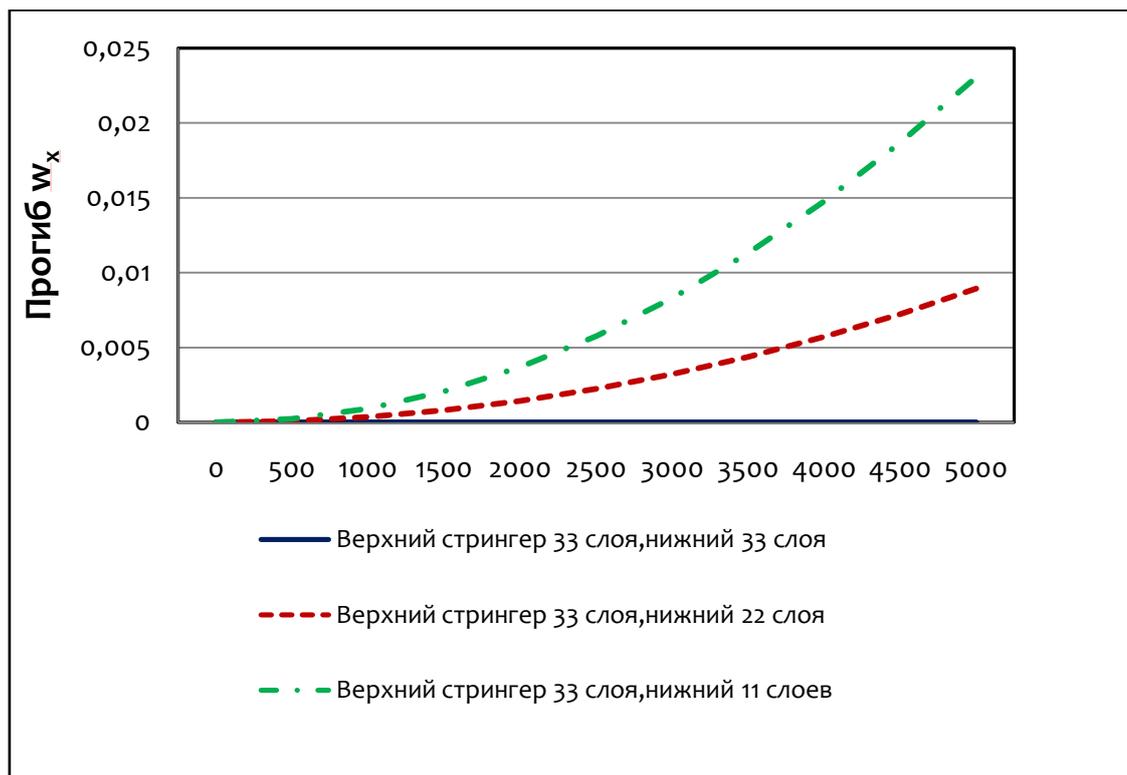


Рисунок 2 – График зависимости прогибов W_x от продольной координаты z в стрингерной конструкции (влияние нарушения симметрии).

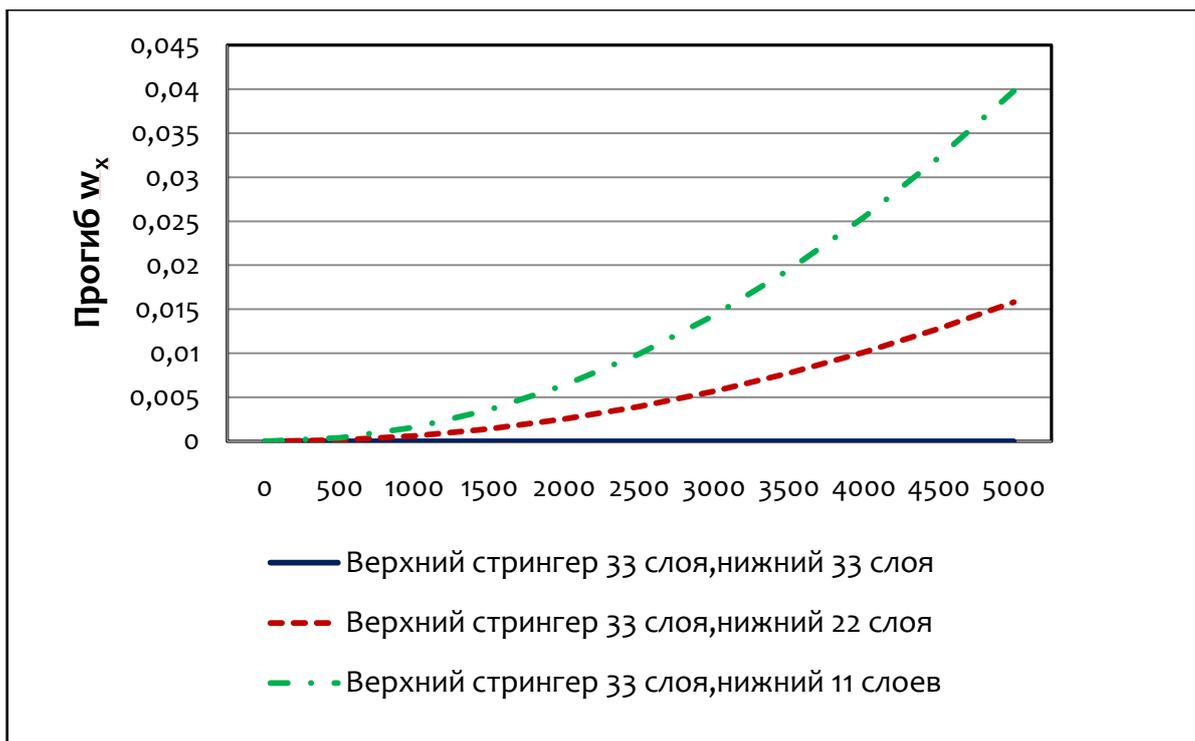


Рисунок 3 – График зависимости прогибов W_x от продольной координаты z в стрингерной конструкции с наличием двух лонжеронов (влияние нарушения симметрии).

Сплошными линиями показаны результаты расчета симметричной конструкции, в структуре верхнего и нижнего стрингера содержатся по 33 слоя. Штриховыми и штрихпунктирными линиями – значения, полученные при несимметричной конструкции, в структуре нижнего стрингера 22 и 11 слоев соответственно.

В проведенном расчете так же исследовалось влияние внутренней структуры на наличие погиби. В качестве примера на следующем рисунке 4 приведены результаты аналитической оценки влияния наличия поперечных слоев в укладке композита. Из графика видно, что при увеличении количества слоев с укладкой 90^0 увеличился значение прогиба W_x .

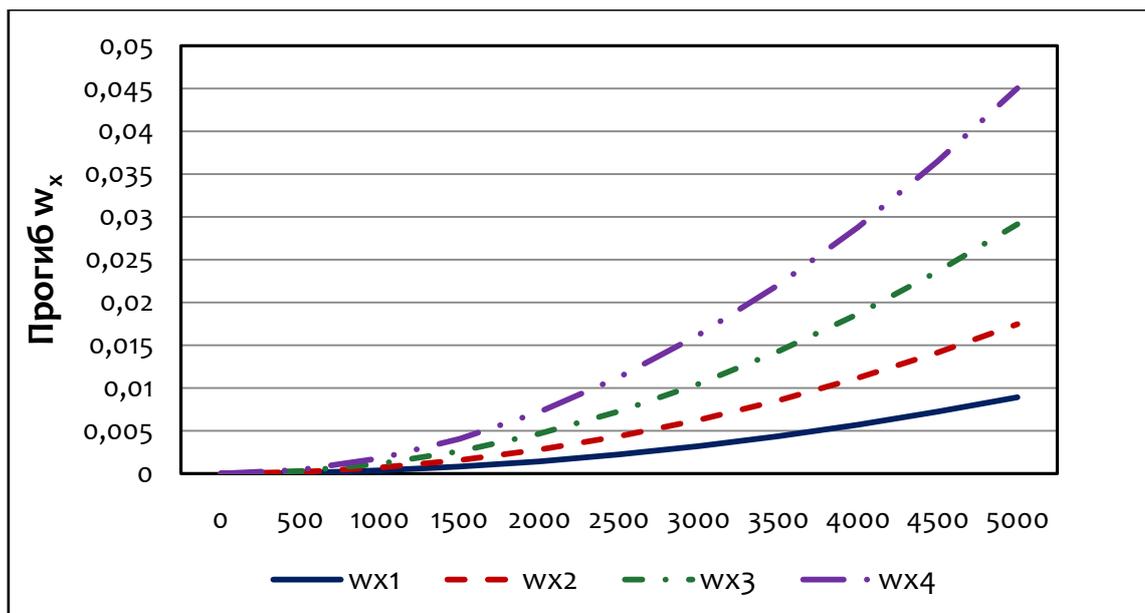


Рисунок 4 – График зависимости прогибов W_x от продольной координаты z (влияние наличия поперечных слоев в укладке).

Сплошной линией показаны значения прогиба W_{x_1} , которые соответствуют исходной укладке $\varphi = +45^0, 0^0, -45^0, 0^0, 0^0, 90^0, 0^0, 0^0, -45^0, 0^0, +45^0$. Штриховой, штрихпунктирной и двойной штрихпунктирной линией – значения прогибов $W_{x_1} - W_{x_4}$, которые соответствуют укладке с увеличением количества поперечных слоев (таблица 2).

Таблица 2

Варианты укладки композитного пакета.

№	Прогиб	Укладка
1	W_{x_1}	$\varphi = +45^0, 0^0, -45^0, 0^0, 0^0, 90^0, 0^0, 0^0, -45^0, 0^0, +45^0$
2	W_{x_2}	$\varphi = +45^0, 0^0, -45^0, 0^0, 90^0, 0^0, 90^0, 0^0, -45^0, 0^0, +45^0$
3	W_{x_3}	$\varphi = +45^0, 0^0, -45^0, 0^0, 90^0, 90^0, 90^0, 0^0, -45^0, 0^0, +45^0$
4	W_{x_4}	$\varphi = +45^0, 0^0, -45^0, 90^0, 90^0, 0^0, 90^0, 90^0, -45^0, 0^0, +45^0$

Выводы:

1. При строгом соблюдении структуры и условий технологического процесса препрегового метода прогиб в конструкции практически отсутствует. Чем больше нарушение симметрии в конструкции, тем больше прогиб в кессоне.

2. Увеличение количества поперечных слоев в укладке композита существенно влияет на увеличение погиби в конструкции.
3. В дальнейшем задача проводимых расчетов связана с отысканием конструктивно-технологических и структурных приемов для устранения погиби.

Библиографический список

1. В. В. Васильев Механика конструкций из композиционных материалов. - М.: Машиностроение, 1988, 272 с.
2. И. Ф. Образцов Вариационные методы расчета тонкостенных авиационных пространственных конструкций. - М.: Машиностроение, 1966, 392 с.
3. А. А. Дудченко Анизотропные панели – плоская задача: Учебное пособие. – М.: изд. МАИ, 1991, 96с

Автор статьи выражают благодарность научному руководителю
д.т.н. Дудченко А.А.