

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ПАНЕЛЯХ С НЕСИММЕТРИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ ПАКЕТА КОМПОЗИТА ПО ТОЛЩИНЕ

© 2012 О.В. Биткина, Е.В. Биткина

Филиал ФГБОУ ВПО Самарский государственный технический университет в г. Сызрани

Поступила в редакцию 10.10.2012

Рассмотрено влияние предварительного натяжения волокон, углов армирования и процентного содержания компонентов композита на прочность несущих слоев многослойных композитных панелей при автоклавном методе изготовления. Приведены результаты расчета остаточных напряжений в слоях анизотропных пластин несимметричного строения по толщине, возникающих в результате влияния технологических факторов.

Ключевые слова: композиционные материалы, остаточные напряжения, анизотропия, термомеханические свойства, технологические погрешности, размеростабильные конструкции

Для слоистых элементов конструкции, состоящих в общем случае из слоев с различными термоупругими характеристиками и расположенными несимметрично относительно срединной поверхности, матрица жесткостей B_y не равна нулю и задача расчета остаточных напряжений не разделяется на плоскую и изгиб [1].

В общем случае это означает, что растяжение таких пластин приводит к дополнительному изгибу, а изгиб вызывает дополнительное растяжение. Это одна из существенных особенностей анизотропных слоистых элементов конструкции, которая говорит о том, что связь между изгибом и растяжением уменьшает эффективную жесткость пластины. Анализ показывает, что неучтенные дополнительные напряжения могут вызывать ошибку между фактическим и расчетным уровнями до 30%.

Так при проектировании слоистых панелей и других элементов конструкции важно учитывать степень армирования и ориентацию слоев, существенно влияющую не только на несущую способность конструкции, но и на образование и распределение в них остаточных напряжений и деформаций. Т.е. в тонкостенных слоистых анизотропных элементах конструкций из композиционных материалов при их изготовлении могут формироваться технологические остаточные напряжения такой величины, которые приводят, в отдельных случаях, к самопроизвольному растрескиванию слоев в поперечном направлении еще на стадии изготовления, до приложения внешней нагрузки. Очевидно, что эти напряжения будут оказывать определенное

влияние и на несущую способность элементов конструкции при действии на них внешнего нагружения. Для оценки несущей способности слоистых элементов конструкции под воздействием суммарных остаточных напряжений $\{\sigma_i^{T,H}\}$ в каждом слое необходимо знать характеристики прочности слоев, из которых состоит элемент.

Прочностью слоя волокнистого композита при нагружении считается то предельное напряжение, которое вызывает разрушение (разделение) слоя или при котором достигается его предел пропорциональности.

В отличие от металлов волокнистый композит, как известно, характеризуется пятью компонентами прочности: при растяжении вдоль волокон $\bar{\sigma}_1^+$, при сжатии вдоль волокон $\bar{\sigma}_1^-$, при растяжении поперек волокон $\bar{\sigma}_2^+$, при сжатии поперек волокон $\bar{\sigma}_2^-$, прочностью на сдвиг $\bar{\tau}_{12}$.

Расчет на прочность слоистых композитов заключается в последовательной оценке прочности составляющих его слоев, находящихся в плоском напряженном состоянии. При этом используются различные феноменологические теории и критерии прочности, которые должны в той или иной степени учитывать особенности поведения этих материалов.

В рамках анизотропной модели, пользуясь технической теорией тонких пластинок, рассмотрим расчет многослойной панели, обладающей анизотропией вследствие несимметрии свойств структуры пакета по толщине и находящейся под действием температурного поля T и технологического натяжения K_{HB} .

Препреги предварительно натянуты, после отверждения натяжение снято. Так как структура слоистого элемента несимметрична, при последующей реализации гипотез о нормальном элементе в расчетной схеме теряется смысл сре-

Биткина Ольга Владимировна, преподаватель.

E-mail: ol_vl_bitkina@mail.ru

Биткина Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент. E-mail: elena_bitkina@mail.ru

динной поверхности. Поэтому плоскость приведения, в которой располагаются координатные оси, и, соответственно, начало отсчета координаты z в дальнейшем могут быть выбраны произвольно. С использованием гипотезы Кирхгофа, соотношений Коши, формул геометрических преобразований, а также закона Гука с учетом влияния температуры и формул преобразования напряжений при повороте осей [2, 4, 8] получим выражения для компонент состояния k -го слоя [5, 6].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}^{(K)} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^{(K)} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^\circ + K_x^\circ z^{(K)} - \alpha_1 \Delta T - \varepsilon_{H1} \\ \varepsilon_y^\circ + K_y^\circ z^{(K)} - \alpha_2 \Delta T - \varepsilon_{H2} \\ \gamma_{xy}^\circ + K_{xy}^\circ z^{(K)} - \alpha_6 \Delta T - \varepsilon_{H6} \end{Bmatrix}^{(K)}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \varepsilon_x^0 + K_x^0 \cdot z = \frac{\partial U_0}{\partial x} - \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \cdot z; \\ \varepsilon_y &= \varepsilon_y^0 + K_y^0 \cdot z = \frac{\partial V_0}{\partial y} - \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \cdot z; \\ \gamma_{xy} &= \gamma_{xy}^0 + K_{xy}^0 \cdot z = \frac{\partial U_0}{\partial y} + \frac{\partial V_0}{\partial x} - 2 \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \cdot z, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\varepsilon_x^\circ, \varepsilon_y^\circ, \gamma_{xy}^\circ$ - деформации в плоскости приведения, $K_x^\circ, K_y^\circ, K_{xy}^\circ$ - кривизны панели.

Жесткости слоя $\bar{Q}_{IJ}^{(K)}$ ($I, J=1,2,6$), коэффициенты температурного расширения $\alpha_J^{(K)}$ ($J=1,2,6$) и деформации натяжения слоя $\varepsilon_{HJ}^{(K)}$ ($J=1,2,6$) в (1), приведенные к осям панели, определяются через жесткостные и температурные характеристики слоя, заданные в системе координат (1, 2) с ним связанной, с учетом поворота последней относительно декартовой системы координат пластинки (x, y) . Соответствующие преобразования для $\bar{Q}_{IJ}^{(K)}$ и $\alpha_J^{(K)}$ представлены в работах [2, 3, 4, 6]. Жесткости слоя, приведенные к осям панели, определяются соотношением:

$$\begin{Bmatrix} \bar{Q}_{11} \\ \bar{Q}_{12} \\ \bar{Q}_{22} \\ \bar{Q}_{66} \\ \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{26} \end{Bmatrix}^{(K)} = \begin{bmatrix} m^4 & 2m^2n^2 & n^4 & 4m^2n^2 \\ m^2n^2 & m^4+n^4 & m^2n^2 & -4m^2n^2 \\ n^4 & 2m^2n^2 & m^4 & 4m^2n^2 \\ m^2n^2 & -2m^2n^2 & m^2n^2 & (m^2-n^2)^2 \\ m^3n & -mn(m^2-n^2) & -mn^3 & -2mn(m^2-n^2) \\ mn^3 & mn(m^2-n^2) & -m^3n & 2mn(m^2-n^2) \end{bmatrix}^{(K)} \begin{Bmatrix} Q_{11} \\ Q_{12} \\ Q_{22} \\ Q_{66} \end{Bmatrix}^{(K)} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned} Q_{11}^{(K)} &= \frac{E_1^{(K)}}{1 - \nu_{12}^{(K)} \nu_{21}^{(K)}}; \quad Q_{12}^{(K)} = Q_{21}^{(K)} = Q_{11}^{(K)} \nu_{21}^{(K)}; \\ Q_{22}^{(K)} &= \frac{E_2^{(K)}}{1 - \nu_{12}^{(K)} \nu_{21}^{(K)}}; \quad Q_{66}^{(K)} = G_{12}^{(K)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Преобразование для коэффициентов температурного расширения представлено в виде:

$$\begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_6 \end{Bmatrix}^{(K)} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 \\ n^2 & m^2 \\ 2mn & -2mn \end{bmatrix}^{(K)} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{Bmatrix}^{(K)} \quad (5)$$

Для деформации натяжения имеем:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{H1} \\ \varepsilon_{H2} \\ \varepsilon_{H6} \end{Bmatrix}^{(K)} = \begin{Bmatrix} m^2 \\ n^2 \\ 2mn \end{Bmatrix}^{(K)} \{\varepsilon_H\}^{(K)} \quad (6)$$

где $m^{(K)}$ и $n^{(K)}$ тригонометрические функции угла поворота осей координат (1, 2) связанных с "k"-ым слоем, относительно декартовой системы координат (x, y) , а именно:

$$\begin{aligned} m^{(K)} &= \cos \varphi_K \\ n^{(K)} &= \sin \varphi_K \\ \text{а } \varepsilon_H^{(K)} &= K_{HB} \varepsilon_B^{(K)}, \end{aligned}$$

где K_{HB} - безразмерный коэффициент, определяющий уровень натяжения и изменяющийся (по модулю) от 0 до 1; $\varepsilon_B^{(K)}$ - допускаемая деформация препрега "k"-ого слоя.

Модули упругости в направлении слоя $E_1^{(K)}$ и перпендикулярно к нему $E_2^{(K)}$, соответственно, модуль сдвига $G_{12}^{(K)}$, коэффициенты Пуассона $\nu_{12}^{(K)}, \nu_{21}^{(K)}$ и коэффициенты температурного расширения $\alpha_1^{(K)}$ и $\alpha_2^{(K)}$ зависят от температурных свойств волокон и матрицы, а так же от степени армирования слоя.

При записи физических соотношений в виде (1) не учитывается, что в препреге (слое) предварительно натягиваются лишь волокна, в то время как после снятия натяжения слой деформируется полностью.

Погонные нормальные и сдвигающие силы, изгибающие и крутящие моменты для всего пакета, действующие, например, по площадке, перпендикулярной оси x , определяются интегриро-

ванием соответствующих компонент напряженного состояния по толщине, что, с учетом гипотезы Кирхгофа дает:

$$\begin{aligned} N_x &= \int_{-H/2}^{H/2} \sigma_x^{(K)} dz; & N_{xy} &= \int_{-H/2}^{H/2} \tau_{xy}^{(K)} dz; \\ M_x &= \int_{-H/2}^{H/2} \sigma_x^{(K)} z dz; & H_{xy} &= \int_{-H/2}^{H/2} \tau_{xy}^{(K)} z dz. \end{aligned} \quad (7)$$

Отсюда и из (1) вытекают соотношения, связывающие внутренние силовые факторы с деформацией слоистого элемента:

$$\begin{Bmatrix} N_I \\ N_J \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{IJ} & B_{IJ} \\ B_{IJ} & D_{IJ} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_J^0 \\ K_J^0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} N_I^T \\ M_I^T \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} N_I^H \\ M_I^H \end{Bmatrix}, \quad I, J=1,2,6 \quad (8)$$

(x, y, xy)

где $N_x^T, N_y^T, N_{xy}^T, M_x^T, M_y^T, H_{xy}^T$ - "температурные" усилия и моменты.

$$\begin{aligned} \{N_I^T\} &= \Delta T \sum_{k=1}^N [Q_{IJ}]^{(K)} \{\alpha_J\}^{(K)} F^{(K)}; \\ \{M_I^T\} &= \Delta T \sum_{k=1}^N [Q_{IJ}]^{(K)} \{\alpha_J\}^{(K)} S^{(K)} \quad \frac{I, J=1,2,6}{(x, y, xy)} \quad (9) \end{aligned}$$

а $N_x^H, N_y^H, N_{xy}^H, M_x^H, M_y^H, H_{xy}^H$ - усилия и моменты от натяжения.

$$\begin{aligned} \{N_I^H\} &= \sum_{k=1}^N [Q_{IJ}]^{(K)} \{\varepsilon_{IJ}\}^{(K)} F^{(K)}; \\ \{M_I^H\} &= \sum_{k=1}^N [Q_{IJ}]^{(K)} \{\varepsilon_{IJ}\}^{(K)} S^{(K)} \quad \frac{I, J=1,2,6}{(x, y, xy)} \quad (10) \end{aligned}$$

В свою очередь, $F^{(K)}, S^{(K)}, J^{(K)}$ - погонные площадь, статический момент и момент инерции "k"-го слоя соответственно.

Обобщенные жесткостные характеристики многослойной панели (A_{IJ}, B_{IJ}, D_{IJ}) ($I, J=1,2,6$) даны в работах [4, 6, 8].

Так как усилия и моменты согласно формулам (8) зависят как от деформации в плоскости панели, так и от кривизны поверхности приведения, в рассматриваемом случае из-за несимметрии свойств структуры пакета по толщине задача не разделяется на плоскую и изгиб пластинки.

Если известен столбец внутренних силовых факторов, в том числе температурных и связанных с натяжением, на основании равенства (8) путем обращения матриц могут быть найдены компоненты деформированного состояния

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_J^0 \\ K_J^0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{IJ} & B_{IJ} \\ B_{IJ} & D_{IJ} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N_I^T + N_I^H \\ M_I^T + M_I^H \end{Bmatrix}, \quad (11)$$

следовательно, напряжения по формуле (1)

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}^{(K)} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^{(K)} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 + K_x^0 z - \bar{\alpha}_1^{(K)} \Delta T - \bar{\varepsilon}_{H_1}^{(K)} \\ \varepsilon_y^0 + K_y^0 z - \bar{\alpha}_2^{(K)} \Delta T - \bar{\varepsilon}_{H_2}^{(K)} \\ \gamma_{xy}^0 + K_{xy}^0 z - \bar{\alpha}_6^{(K)} \Delta T - \bar{\varepsilon}_{H_6}^{(K)} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

В системе координат, связанной с направлением армирования "k"-го слоя, напряженное состояние определяется посредством преобразования при повороте осей:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix}^{(K)} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & (m^2 - n^2) \end{bmatrix}^{(K)} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

В данной работе для слоя однонаправленного волокнистого композита используется тензорно-инвариантный критерий Гольденבלата - Копнова, который записывается в виде:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_1^+} - \frac{1}{\bar{\sigma}_1^-} \right) \sigma_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_2^+} - \frac{1}{\bar{\sigma}_2^-} \right) \sigma_2 + \\ &+ \left[\frac{1}{4} \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_1^+} - \frac{1}{\bar{\sigma}_1^-} \right)^2 \sigma_1^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_2^+} - \frac{1}{\bar{\sigma}_2^-} \right)^2 \sigma_2^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\bar{\tau}_{12}} \right)^2 \right]^{1/2} \leq 1. \quad (14) \end{aligned}$$

Согласно критерию прочности Гольденבלата-Копнова для однонаправленного слоя КМ, расстрескивание или разрушение пакета не произойдет, пока в каждом слое выполняется условие (14).

Следует отметить, что тензорная теория прочности является более общей, чем все другие теории, характеризуется инвариантностью относительно координатных осей, возможностью проведения преобразований в соответствии с обычными тензорными преобразованиями, симметрией прочностных свойств, подобной симметрии для жесткостей и податливостей и поэтому при проведении проектировочных расчетов может считаться более предпочтительной, чем другие [7].

Формоизменение или коробление изготавливаемых конструкций определяется рядом факторов, которые следует учитывать как при проектировании, так при изготовлении.

Формулы для прогиба W , а также для продольного U_0 и тангенциального V_0 смещений получены интегрированием соответствующих компонент вектора деформаций, когда кромки панелей свободны от закрепления:

$$\begin{aligned} W &= -\frac{1}{2} (K_x^0 \cdot x^2 + K_{xy}^0 \cdot x \cdot y + K_y^0 \cdot y^2); \\ U_0 &= \varepsilon_x^0 \cdot x + \frac{\gamma_{xy}^0}{2} \cdot y; \end{aligned}$$

Таблица 1. Схемы укладки слоев в пакете композита

Номер панели	Схема укладки пакета			
1	0	15	-15	90
2	0	30	-30	90
3	0	45	-45	90
4	0	60	-60	90
5	0	75	-75	90

$$V_0 = \varepsilon_y^0 \cdot y + \frac{\gamma_{xy}^0}{2} \cdot x. \quad (15)$$

Учитывая важность данной проблемы, с помощью программы, разработанной в соответствии с изложенным выше алгоритмом на языке ФОРТРАН, было исследовано влияние предварительного натяжения волокон, процентного содержания компонентов композита на прочность несущих слоев многослойных панелей при автоклавном методе изготовления (температура отверждения $T=175^{\circ}C$, разница между начальной температурой и температурой отверждения $\Delta T= -155^{\circ}C$). Несущие слои имеют вид четырехслойных углепластиковых пластин со схемами укладки пакета $(0^{\circ}/\pm\theta^{\circ}/90^{\circ})$. Уровень предварительного натяжения волокна изменялся ступенчато от 0 до 40% от допускаемой деформации волокна $\bar{\varepsilon}_B$ с приращением $0.2 \cdot \bar{\varepsilon}_B$. Параметрический анализ выполнен при варьировании взаимной ориентации слоев в пакете $(0^{\circ}/\pm\theta^{\circ}/90^{\circ})$ и степени армирования слоя ($V_B = 46\%$, $V_B = 60\%$, $V_B = 76\%$).

Материал слоев – углепластик КМУ - 4Л.

Толщина элементарного слоя равна 0,11 мм, зависимость эквивалентных остаточных напряжений от степени армирования слоя для различных схем укладок $(0^{\circ}/\pm\theta^{\circ}/90^{\circ})$ без учета предварительного натяжения показаны на рис.1-2. За исключением укладок $(0^{\circ}/\pm 15^{\circ}/90^{\circ})$ и $(0^{\circ}/\pm 75^{\circ}/90^{\circ})$, замечен рост уровня максимальных остаточных напряжений с увеличением V_B . При достижении $V_B = 76\%$ происходит растрескивание для всех схем укладки пакета композита, изготовление их в таком режиме становится невозможным. Для укладок $(0^{\circ}/\pm 15^{\circ}/90^{\circ})$ и $(0^{\circ}/\pm 75^{\circ}/90^{\circ})$ происходит незначительное падение уровня максимальных эквивалентных остаточных напряжений с $V_B = 46\%$ до $V_B = 60\%$ и затем повышение их значения. При $V_B = 76\%$ величина $y_{эки}$ превосходит 1. Как видно из приведенных результатов, эквивалентные остаточные напряжения могут достигать значений, сопоставимых со значениями прочности материала.

Роль и влияние предварительного натяжения волокон на прочность панелей из углепластика при изготовлении можно оценить, сравнивая значения максимальных остаточных эквивалентных напряжений, показанных на рис. 3-5.

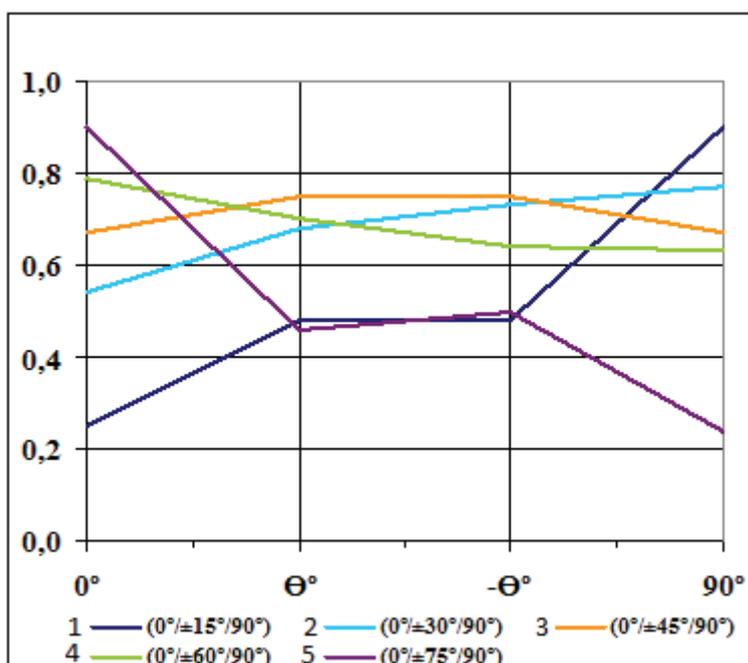


Рис. 1. Распределение приведенных эквивалентных остаточных температурных напряжений в зависимости от углов укладки $\pm\theta$, $V_B = 46\%$, $K_{HB} = 0$: 1 - $(0^{\circ}/\pm 15^{\circ}/90^{\circ})$; 2 - $(0^{\circ}/\pm 30^{\circ}/90^{\circ})$; 3 - $(0^{\circ}/\pm 45^{\circ}/90^{\circ})$; 4 - $(0^{\circ}/\pm 60^{\circ}/90^{\circ})$; 5 - $(0^{\circ}/\pm 75^{\circ}/90^{\circ})$.

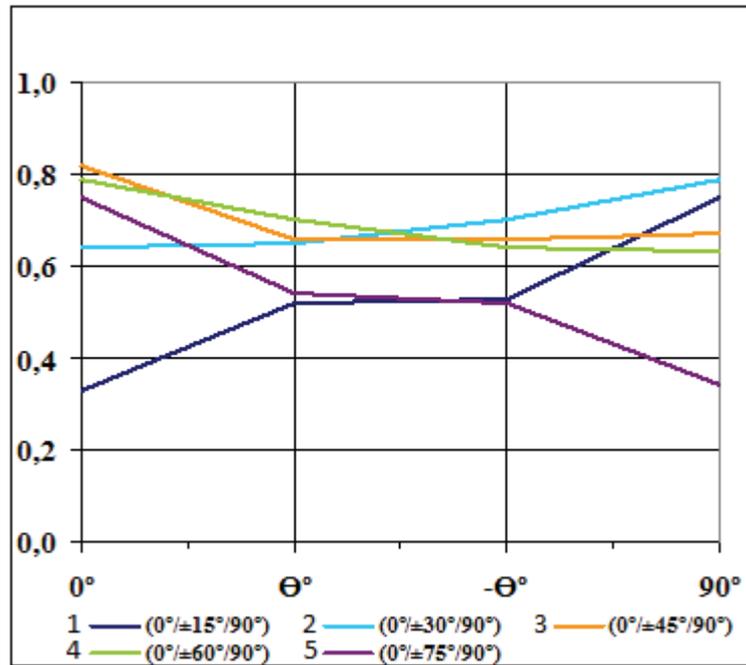


Рис. 2. Распределение приведенных эквивалентных остаточных температурных напряжений в зависимости от углов укладки $\pm \theta$, $V_B = 60\%$, $K_{HB} = 0$:
 1 - $(0^\circ/\pm 15^\circ/90^\circ)$; 2 - $(0^\circ/\pm 30^\circ/90^\circ)$; 3 - $(0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ)$; 4 - $(0^\circ/\pm 60^\circ/90^\circ)$; 5 - $(0^\circ/\pm 75^\circ/90^\circ)$

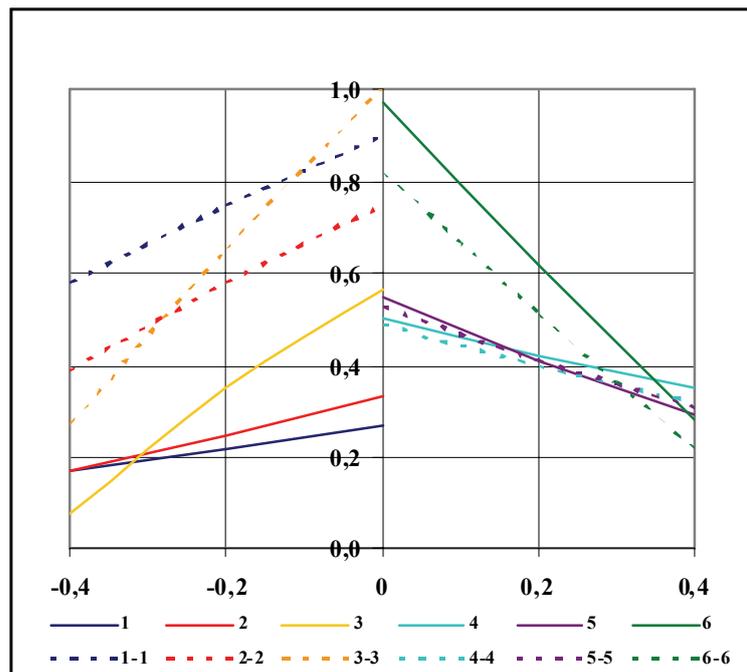


Рис. 3. Влияние уровня натяжения волокна при различной степени армирования слоя на распределение приведенных остаточных температурных напряжений с углами армирования $(0^\circ/\pm 15^\circ/90^\circ)$:

- 1 - $V_B = 46\%$, $\theta = 0^\circ$; 1-1 - $V_B = 46\%$, $\theta = 90^\circ$; 4 - $V_B = 46\%$, $\theta = 15^\circ$; 4-4 - $V_B = 46\%$, $\theta = -15^\circ$;
- 2 - $V_B = 60\%$, $\theta = 0^\circ$; 2-2 - $V_B = 60\%$, $\theta = 90^\circ$; 5 - $V_B = 60\%$, $\theta = 15^\circ$; 5-5 - $V_B = 60\%$, $\theta = -15^\circ$;
- 3 - $V_B = 76\%$, $\theta = 0^\circ$; 3-3 - $V_B = 76\%$, $\theta = 90^\circ$; 6 - $V_B = 76\%$, $\theta = 15^\circ$; 6-6 - $V_B = 76\%$, $\theta = -15^\circ$.

Характер приведенных кривых (рис. 3-5) $\bar{\sigma}_{эке} = f(K_{HB})$ идентичен. При всех углах ориентации слоев и степени армирования слоя $V_B = 46\%$, $V_B = 60\%$, $V_B = 76\%$, с увеличением уровня предварительного натяжения волокон приведен-

ные напряжения падают. Чем выше степень армирования слоя, тем эффективнее влияет предварительное натяжение волокон на прочность панелей после отверждения - увеличивается градиент построенных кривых:

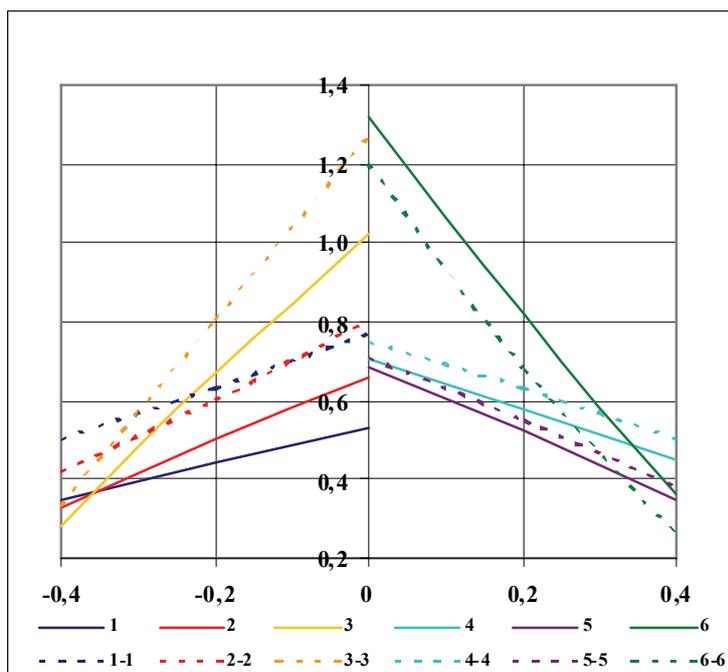


Рис. 4. Влияние уровня натяжения волокна при различной степени армирования слоя на распределение приведенных остаточных температурных напряжений с углами армирования ($0^\circ/\pm 30^\circ/90^\circ$):

- 1 - $V_B = 46\%$, $\theta = 0^\circ$; 1-1 - $V_B = 46\%$, $\theta = 90^\circ$; 4 - $V_B = 46\%$, $\theta = 30^\circ$; 4-4 - $V_B = 46\%$, $\theta = -30^\circ$;
- 2 - $V_B = 60\%$, $\theta = 0^\circ$; 2-2 - $V_B = 60\%$, $\theta = 90^\circ$; 5 - $V_B = 60\%$, $\theta = 30^\circ$; 5-5 - $V_B = 60\%$, $\theta = -30^\circ$;
- 3 - $V_B = 76\%$, $\theta = 0^\circ$; 3-3 - $V_B = 76\%$, $\theta = 90^\circ$; 6 - $V_B = 76\%$, $\theta = 30^\circ$; 6-6 - $V_B = 76\%$, $\theta = -30^\circ$.

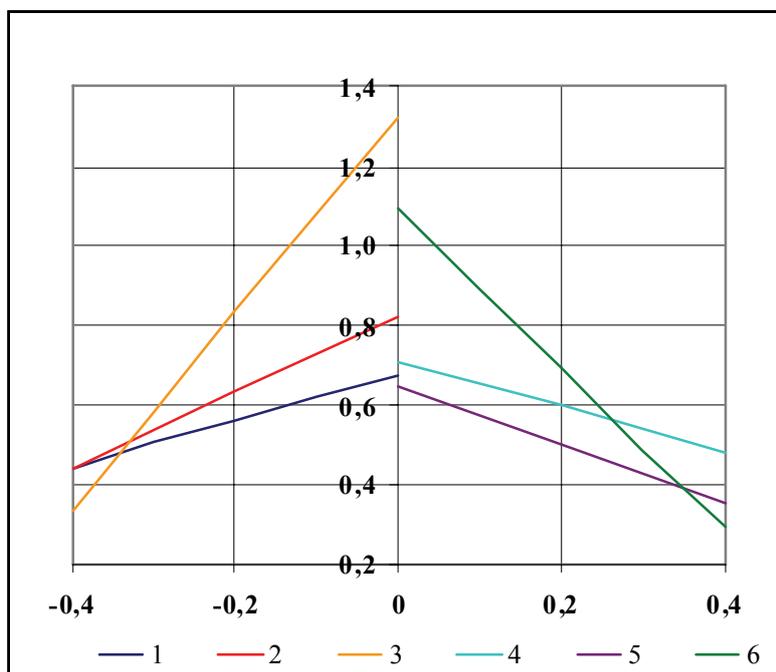


Рис. 5. Влияние уровня натяжения волокна при различной степени армирования слоя на распределение приведенных остаточных температурных напряжений с углами армирования ($0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$):

- 1 - $V_B = 46\%$, $\theta = 0^\circ$; 4 - $V_B = 46\%$, $\theta = 45^\circ$; 2 - $V_B = 60\%$, $\theta = 0^\circ$; 5 - $V_B = 60\%$, $\theta = 45^\circ$;
- 3 - $V_B = 76\%$, $\theta = 0^\circ$; 6 - $V_B = 76\%$, $\theta = 45^\circ$.

$$\left(\frac{\partial \bar{\sigma}_{\text{экв}}}{\partial |K_{\text{HB}}|} \right)_{V_B=76\%} \rangle \left(\frac{\partial \bar{\sigma}_{\text{экв}}}{\partial |K_{\text{HB}}|} \right)_{V_B=60\%} \rangle \left(\frac{\partial \bar{\sigma}_{\text{экв}}}{\partial |K_{\text{HB}}|} \right)_{V_B=46\%}$$

Изготовление панелей с $V_B = 76\%$ становится возможным (рис. 3-5), если армирующие волокна предварительно натянуты до $0.09 \cdot \bar{\epsilon}_B$ для панелей типа 2 - 4, и до $0.03 \cdot \bar{\epsilon}_B$ - для па-

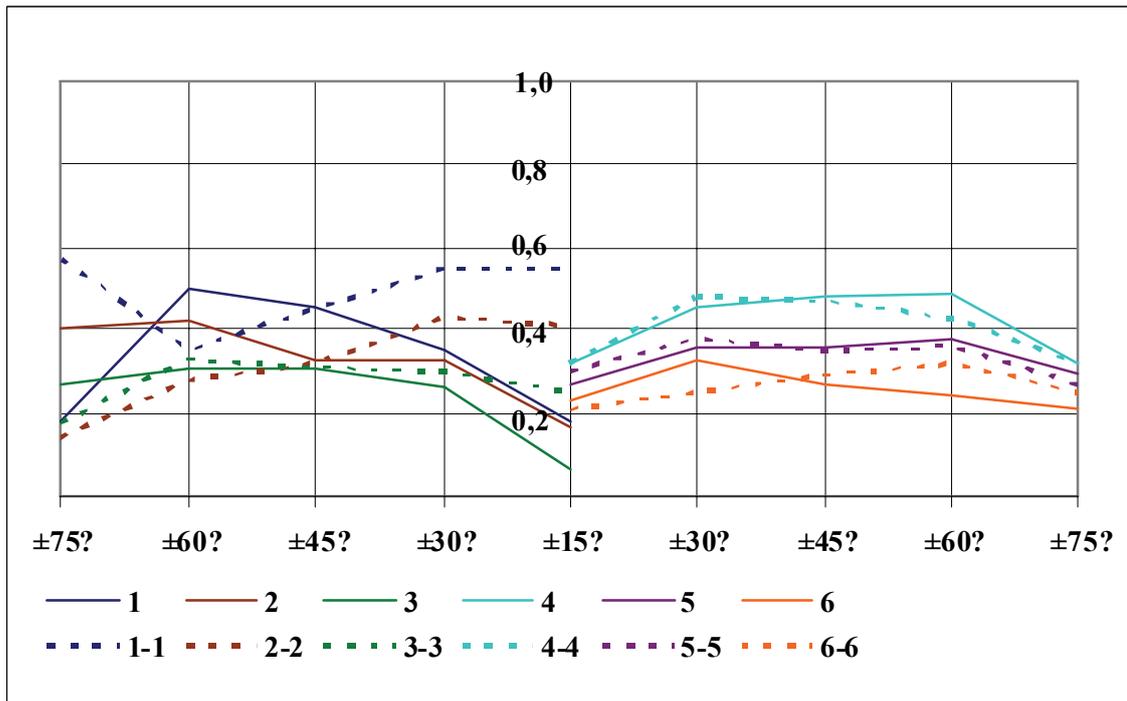


Рис. 6. Влияние углов армирования ($0^\circ/\pm\theta/90^\circ$) и степени армирования слоя при уровне натяжения волокна $K_{НВ} = 0.4$, на распределение приведенных остаточных температурных напряжений (критерий Гольденבלата - Копнова):

1 - $V_B = 46\%$, $\theta = 0^\circ$; 1-1 - $V_B = 46\%$, $\theta = 90^\circ$; 4 - $V_B = 46\%$, $\theta = (15...75)^\circ$;
 4-4 - $V_B = 46\%$, $\theta = -(15...75)^\circ$; 2 - $V_B = 60\%$, $\theta = 0^\circ$; 2-2 - $V_B = 60\%$, $\theta = 90^\circ$;
 5 - $V_B = 60\%$, $\theta = (15...75)^\circ$; 5-5 - $V_B = 60\%$, $\theta = -(15...75)^\circ$; 3 - $V_B = 76\%$, $\theta = 0^\circ$;
 3-3 - $V_B = 76\%$, $\theta = 90^\circ$; 6 - $V_B = 76\%$, $\theta = (15...75)^\circ$; 6-6 - $V_B = 76\%$, $\theta = -(15...75)^\circ$.

нелей типа 1, 5.

Влияние углов армирования и степени армирования слоев в пакете при предварительном натяжении волокон $0.4 \cdot \bar{\epsilon}_B$ показаны на рис. 6. Уровень максимальных эквивалентных остаточных напряжений принимает наименьшее значение при $V_B = 76\%$.

При углах ориентации $\theta = \pm 45^\circ$ значения $\bar{\sigma}_{экв}$ для 1-го и 4-го, а также 2-го и 3-го слоев совпадают. В слоях 0° и 90° - $\bar{\sigma}_{экв}$ принимают максимальное значение и равны $\bar{\sigma}_{экв} = 0.335$.

Таким образом, с точки зрения практики проектирования панелей из углепластика рациональным вариантом можно считать панели, изготовленные с учетом предварительного натяжения волокна, так как уровень максимальных напряжений, имеющих место при отверждении в этом случае ниже, а разброс распределения их по слоям незначителен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молодцов Г. А., Биткин В. Е., Симонов В. Ф., Урмансов Ф. Ф. Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 2000. 352 с.
2. Образцов И. Ф., Васильев В. В., Бунаков В. А. Опти-

мальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1977. 144 с.

3. Биткина Е. В., Пидодья В. Г., Биткина О. В. Исследование влияния технологических факторов на остаточные напряжения в волокнистом композите // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2011. №4(25). С. 59 - 66.
4. Молодцов Г. А. Остаточные напряжения в слоистых анизотропных пластинках // Механика композиционных материалов. М., 1979. Вып. 4. С. 730 - 733.
5. Молодцов Г. А., Гавва Л. М., Иванов В. И. Макро- и микро модели анализа прочности тонкостенных слоистых конструкций из композиционных материалов с учетом остаточных технологических напряжений и предварительного натяжения волокон // Тез. докл. на XI Всесоюз. конф. "Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов". Куйбышев, 1986.
6. Молодцов Г. А., Гавва Л. М., Осипская Е. А. Параметрический анализ остаточных температурных напряжений в плоских слоистых панелях из композиционных материалов. М.: МАИ, 1985. 47 с.
7. Биткина Е. В. Разработка метода анализа напряженно-деформированного состояния многослойных композиционных материалов и конструкций с учетом температурных, силовых и технологических воздействий. Дис. ... канд. техн. наук. Самара. 2009. 162 с.
8. Чамис К. Композиционные материалы. Т.8. Анализ и проектирование конструкций. М., 1978. 300 с.

**ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL RESIDUAL STRESSES ARISING IN MULTILAYERED
COMPOSITE PANELS THAT HAVE ASYMMETRIC STRUCTURE
OF COMPOSITE'S PACKAGE ALONG ITS THICKNESS**

© 2012 O.V. Bitkina, E. V. Bitkina

Syzran Branch of Samara State Technical University

The influence of technological pre-tension of fibers, orientation angles of composite layers and volume fraction of fibers and resin on the strength of the bearing layers of multilayered composite panels manufactured by the process of autoclaving are considered in this article. The results of a calculation of residual stresses in the layers of anisotropic plates with asymmetric structure along its thickness arising as result of the influence of technological factors are presented.

Key words: composite materials, residual stresses, anisotropy, thermo-mechanical properties, technological errors, dimensionally stable structures.