

УДК 629.7.01

В.Е. Гайдачук, д-р техн. наук,
 А.В. Кондратьев, канд. техн. наук,
 Е.В. Омельченко

МЕТОДИКА ПРЕДЭСКИЗНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПАНЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ТРУБЧАТЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

В последние годы в практике зарубежного и отечественного авиастроения широко применяются панели различных створок, щитков и других агрегатов, типовыми конструктивно-технологическими решениями (КТР) которых являются трехслойные конструкции из полимерных композиционных материалов (ПКМ) с тонкими обшивками, подкрепленными трубчатым наполнителем (ТЗ), фрагмент которых показан на рис. 1 [1 - 2]. Такие КТР имеют массу на уровне конструкций с сотовым наполнителем, но более технологичны за счет реализации интегральной сборки, обеспечивают больший ресурс в эксплуатации вследствие малого количества непрочнеев и других производственных дефектов, обладают высокой прочностью и жесткостью.

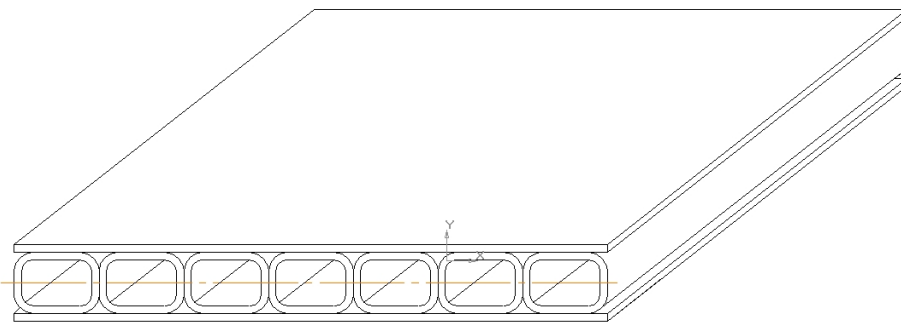


Рисунок 1 – Фрагмент КТР панельной трехслойной авиаконструкции с трубчатым наполнителем

Точные расчетные схемы (РС) панельных конструкций с дискретными креплениями для их проектирования практически отсутствуют, а перспектива их создания видится в использовании компьютерных технологий и пакетов программ, реализующих метод конечных элементов (МКЭ) [3 - 4]. В связи с этим на практике конструкторы всегда использовали и продолжают использовать для эскизного проектирования таких агрегатов интуитивно выбираемые приближенные РС в виде различного рода стержневых (балочных) систем, в последующем расчленяемых на отдельные балки.

После выбора квазиоптимальных геометрических параметров таких стержней, обеспечивающих их несущую способность при заданных нагрузках при минимальной массе, поверочный расчет исходной панельной конструкции выполняется в настоящее время одним из стандартных пакетов МКЭ с последующей корректировкой геометрии

сечений при обнаружении локальных зон, в которых не обеспечена прочность или жесткость [5].

Основным недостатком идеи перехода РС панели к системе балок является пренебрежение их связями, т.е. нарушение закона совместности деформаций, которое может привести к существенным ошибкам в выборе проектных параметров конструкции, выявляемым только на стадии поверочного расчета.

Другим недостатком РС системы балок является довольно произвольный их выбор и слабое обоснование того или иного варианта, каковых обычно можно предложить довольно много.

В качестве примера на рис. 2 показана прямоугольная в плане панель с шомпольным шарнирным соединением вдоль оси X и двумя дискретными шарнирными опорами, нагруженная равномерной распределенной поперечной нагрузкой p .

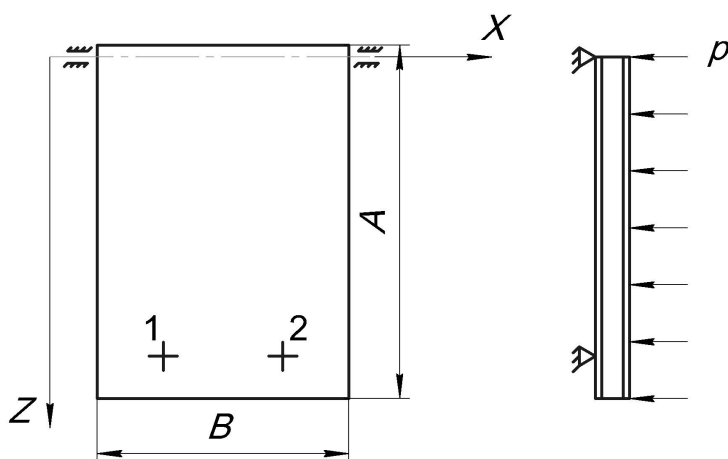


Рисунок 2 – Исходная панель:
1, 2 – дискретные шарнирные опоры

Панель имеет трехслойную структуру с заполнителем в виде трубок, ориентированных по одному из направлений X или Z . В результате анализа геометрических параметров конструктивных элементов панели по массе необходимо установить оптимальное (рациональное) направление трубчатого заполнителя (ТЗ).

На рис. 3 показан ряд возможных вариантов замены исходной панели РС балок или балочных систем. К ним можно было бы добавить, например, окантовывающие балки, всегда имеющие место в реальных конструкциях. Кроме того, возникают подварианты к каждой из показанных на рис. 3 РС, касающиеся интерпретации погонных нагрузок на балки вариантов а - г. Так, для варианта а всю распределенную нагрузку можно приложить к двум продольным балкам поровну, или

* Тем не менее различные вариации частичного или полного нарушения закона совместности деформаций (сплошности) являются типовыми в механике конструкций и материалов при построении приближенных методик проектирования разного уровня, когда тому или иному конструктивному элементу предписывается восприятие только определенного вида воздействий, например [5].

нагрузить эти балки только частью распределенной нагрузки, приходящейся на их условную ширину a . То же относится и ко всем остальным вариантам.

Априори обоснованно установить наиболее «точный» вариант РС едва ли представляется возможным. Поэтому окончательно выбранному варианту, видимо, должен предшествовать расчет каждого варианта с последующей проверкой их точности путем сравнения с расчетом исходной панели по напряжениям и перемещениям, определенным МКЭ, реализуемым одним из стандартных пакетов.

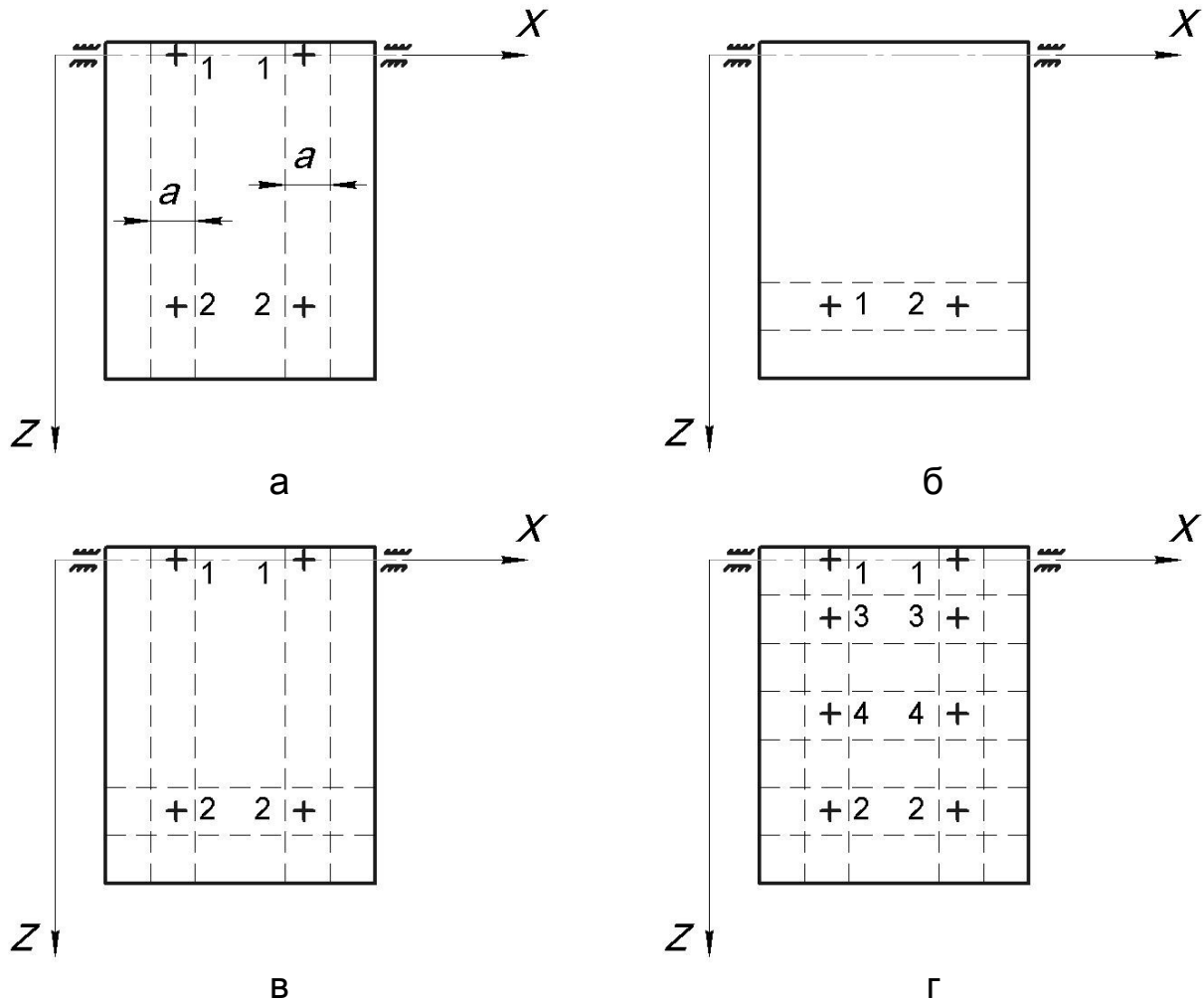


Рисунок 3 – Варианты замены исходной панели РС балок и балочных систем:

- а** – выделены две балки в направлении оси Z на двух шарнирных опорах 1 и 2 ;
- б** – выделена одна балка в направлении оси X на двух шарнирных опорах 1 и 2;
- в** – выделены три балки вариантов **а** и **б**, объединенные в систему;
- г** – к системе варианта **в** добавлено две поперечные балки с условными мнимыми упругими опорами 3 и 4 на продольных балках варианта **а**

Такая проверка является необходимой, но не достаточной, так как при расчете МКЭ придется конструировать математические модели для представления приведенных значений пределов прочности при растяжении (сжатии) и сдвиге и физико-механических характеристик (ФМХ) ТЗ в ортогональных направлениях: $\sigma_{\text{exTЗ}}$, $\sigma_{\text{eyTЗ}}$, $\tau_{\text{exzTЗ}}$, $\tau_{\text{exyTЗ}}$, модулей упругости $E_{\text{xTЗ}}$, $E_{\text{yTЗ}}$, $E_{\text{zTЗ}}$, модулей сдвига $G_{\text{xyTЗ}}$, $G_{\text{xzTЗ}}$, $G_{\text{yzTЗ}}$, а также коэффициентов Пуассона ν_{xy} , ν_{xz} , ν_{yz} .

Перераспределение внешней поверхностной нагрузки p будем осуществлять исходя из постоянной для всех балок системы ширины a , которая определяется из равенства площади поверхности панели площади поверхности всех заменяющих балок, т.е.

$$(n_z \cdot A \cdot a + n_x \cdot B \cdot a) - \frac{n_z \cdot n_x}{2} a^2 = A \cdot B, \quad (1)$$

где n_z – число балок в направлении оси Z ; n_x – число балок в направлении оси X .

Решая уравнение (1) относительно a , получим

$$a = \frac{A \cdot n_z + B \cdot n_x - \sqrt{A^2 \cdot n_z^2 + B^2 \cdot n_x^2}}{n_x \cdot n_z}. \quad (2)$$

Погонное усилие на каждую балку q определится как произведение поверхностной нагрузки p_e на ширину a :

$$q = p_e a. \quad (3)$$

Далее необходимо рассматривать выделенные в той или иной РС балки под действием погонной нагрузки q .

Для демонстрации предлагаемой методики предэскизного проектирования панели остановимся на РС, показанной на рис. 3, в, в которой выделяется всего три балки двух типов: две в направлении оси Z ($n_z = 2$) – балки первого типа, и одна – в направлении оси X ($n_x = 1$) – балки второго типа. Размеры балок первого и второго типов показаны на рис. 4. На рис. 5 и 6 показаны эти балки под нагрузкой q .

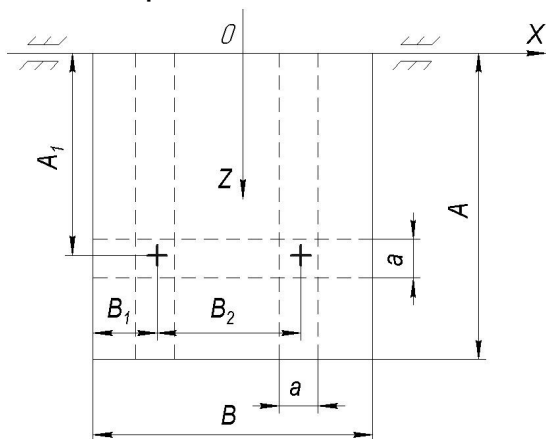


Рисунок 4 – Подкласс рассматриваемой панели

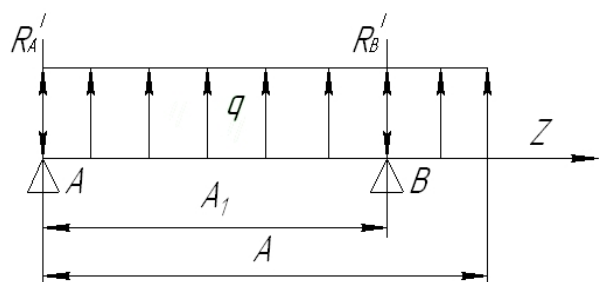


Рисунок 5 – Балка первого типа

Из рис. 5 и 6 видно, что балка первого типа является частным случаем балки второго типа, к которому приходим при $B_1 = 0$.

Поэтому для определения действующих на балку изгибающих моментов M и перерезывающих сил Q рассмотрим балку второго типа, введя обозначение $B_1 = c$, $B_2 = l$ и $B - B_1 - B_2 = b$.

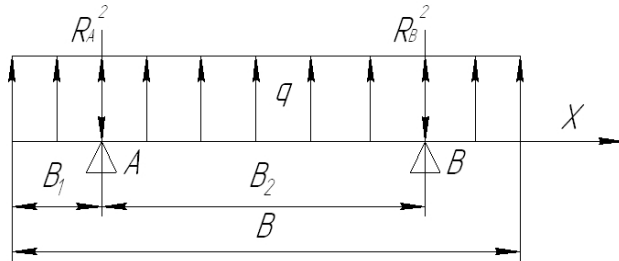


Рисунок 6 – Балка второго типа

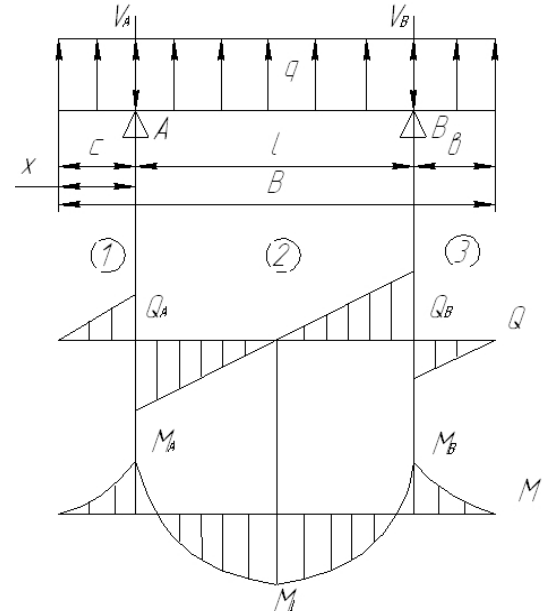


Рисунок 7 – Эпюры перерезывающих сил и изгибающих моментов в балке второго типа

Тогда реакции в опорах A и B соответственно будут иметь вид:

$$\begin{cases} V_A = \frac{q}{2l} [(c+l)^2 - b^2]; \\ V_B = \frac{q}{2l} [(l+b)^2 - c^2]. \end{cases} \quad (4)$$

Перерезывающие силы Q и изгибающие моменты M на участках балки 1, 2 и 3 будут:

$$\begin{aligned} Q_1 &= qx \text{ при } 0 \leq x < c; \\ Q_2 &= \frac{q}{2l} [2xl + b^2 - (c+l)^2] \text{ при } c \leq x < (c+l); \\ Q_3 &= q(x - c - l - b) \text{ при } (c+l) \leq x \leq (c+l+b); \\ M_1 &= \frac{qx^2}{2} \text{ при } 0 \leq x < c; \\ M_2 &= \frac{qx^2}{2} - V_A(x - c) \text{ при } c \leq x < (c+l); \\ M_3 &= \frac{qx^2}{2} - V_A(x - c) - V_B(x - c - l) \text{ при } (c+l) \leq x \leq (c+l+b). \end{aligned} \quad (5)$$

Эпюры перерезывающих сил Q и изгибающих моментов M показаны на рис. 7. Отметим, что при $c = b$ зависимости (4) – (5) и эпюры (рис. 7) обращаются в приведенные в работе [7], а при $c = 0$ – в соответствующие зависимости и эпюры балки с одной консолью того же источника [7].

Соответствующие этим участкам прогибы, равные f_1, f_2, f_3 , наиболее просто определяются с помощью теоремы Кастильо [8].

Максимальный прогиб для балки первого типа ($c = 0$ и $f_{(1)} = 0$)

$$f_{\max}^{(1)} = \max(f_{(2)}, f_{(3)}), \quad (6)$$

где верхний индекс (1) обозначает тип балки, а нижние индексы (1), (2) и (3) – участок балки, на котором найден прогиб.

Максимальный прогиб балки второго типа

$$f_{\max}^{(2)} = \max(f_{(1)}, f_{(2)}, f_{(3)}). \quad (7)$$

Для ограничения изгибной жесткости панели следует принять неравенство

$$f_{\max} = \max\{f_{\max}^{(1)}, f_{\max}^{(2)}\} \leq [f], \quad (8)$$

где $[f]$ – допустимое значение прогиба панели.

Максимальные напряжения в балках первого и второго типов определяются по известным формулам сопротивления материала:

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= \frac{M_{\max}}{W}; \\ \tau_{\max} &= \frac{Q_{\max}}{F_{\text{сдв}}}; \\ M_{\max} &= \max\{M_A, M_L, M_B\}; \\ Q_{\max} &= \max\{Q_A, Q_B\}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $W, F_{\text{сдв}}$ – момент сопротивления и площадь сдвига балок.

Конкретные значения параметров, входящих в формулы (9), зависят от величины нагрузки q и геометрических размеров балки первого и второго типов.

Для балки первого типа следует в формулах (4) – (9) положить

$$\begin{cases} c = 0, l = A_1, b = (A - A_1), V_A = R_A^{(1)}, V_B = R_B^{(1)}; \\ \sigma_{\max} = \sigma_{Z_{\max}}^{(1)}, M_{\max} = M_{Z_{\max}}, W = W_X; \\ \tau_{\max} = \tau_{yz}^{(1)}, Q = Q_{\max yz}, F_{\text{сдв}} = F_{\text{сдв}xy}, \end{cases} \quad (10)$$

где W_X и $F_{\text{сдв}xy}$ зависят от направления оси ТЗ в балке второго типа.

Для балки второго типа следует в формулах (6) – (20) принять

$$\begin{cases} c = B_1, l = B_2, b = (B - B_1 - B_2), V_A = R_A^{(2)}, V_B = R_B^{(2)}; \\ \sigma_{\max} = \sigma_{Z\max}^{(2)}, M_{\max} = M_{Z\max}, W = W_Z; \\ \tau_{\max} = \tau_{yx}^{(2)}, Q = Q_{\max yx}, F_{сдв} = F_{сдвzy}. \end{cases} \quad (11)$$

Для вычисления прогибов в балке первого типа необходимо принять $E_0 = E_{0Z}$ – модуль упругости обшивки в направлении оси Z.

Момент инерции сечения балки в зависимости от направления оси ТЗ:

- при ориентации ТЗ вдоль оси Z

$$J_{XII}^{(1)} = W_{XII}^{(1)} \frac{h - \delta_0}{2}; \quad (12)$$

- при ориентации ТЗ поперек оси Z

$$J_{X\perp}^{(1)} = W_{X\perp}^{(1)} \frac{h - \delta_0}{2}; \quad (13)$$

Для балки второго типа необходимо принять $E_0 = E_{0X}$ – модуль упругости обшивки в направлении оси X и соответственно:

- при ориентации ТЗ вдоль оси Z

$$J_{ZII}^{(2)} = J_{XII}^{(1)} = W_{XII}^{(1)} \frac{h - \delta_0}{2}; \quad (14)$$

- при ориентации ТЗ поперек оси Z

$$J_{Z\perp}^{(2)} = J_{X\perp}^{(1)} = W_{X\perp}^{(1)} \frac{h - \delta_0}{2}, \quad (15)$$

где

$$W_{XII}^{(1)} = a \left\{ \delta_0 (h - \delta_0) + \frac{\delta_{mp} (h - \delta_0 - \delta_{mp})^2}{h - \delta_0} \left[1 + \frac{h - \delta_0 - \delta_{mp}}{3t} \right] \frac{E_{mp}}{E_{0Z}} \right\},$$

или приближенно при $\delta_{mp} < \delta_0 \ll h$

$$W_{XII}^{(1)} \approx a \left\{ \delta_0 (h - \delta_0) + \delta_{mp} (h - \delta_0) \left[1 + \frac{h}{3t} \right] \frac{E_{mp}}{E_{0Z}} \right\} \approx a \left\{ \delta_0 h + \delta_{mp} h \left[1 + \frac{h}{3t} \right] \frac{E_{mp}}{E_{0Z}} \right\}. \quad (16)$$

Аналогично получим

$$\begin{aligned} W_{X\perp}^{(1)} &= a \delta_0 (h - \delta_0); \\ W_{ZII}^{(2)} &= W_{XII}^{(1)}; \\ W_{Z\perp}^{(2)} &= W_{X\perp}^{(1)}. \end{aligned} \quad (17)$$

Однако в формуле для определения $W_{XII}^{(2)}$ в соотношении $\frac{E_{mp}}{E_0}$ необходимо заменить E_{0Z} на E_{0X} .

Площади сдвига в формуле (9) для балки первого типа:

- при ориентации ТЗ вдоль оси Z

$$F_{сдвxy}^{(1)} = 2\delta_{ТЗ} h \frac{a}{t}, \quad (18)$$

где $\frac{a}{t}$ – число трубок в ширине балки a ;

- при ориентации ТЗ вдоль оси X принято, что на сдвиг работают только удвоенная толщина ТЗ на шаге t .

Тогда

$$F_{сдвxy\perp}^{(1)} = 2\delta_{ТЗ} a \frac{A}{t}, \quad (19)$$

где $2\delta_{ТЗ} a$ – площадь сдвига, приходящаяся на шаг t трубчатого заполнителя; $\frac{A}{t}$ – количество площадей сдвига, приходящихся на длину балки A .

Соответственно площадь сдвига для балки второго типа:

- при ориентации ТЗ вдоль оси X

$$F_{сдвzyl}^{(2)} = F_{сдвxyll}^{(1)} = 2\delta_{ТЗ} h \frac{a}{t}; \quad (20)$$

- при ориентации ТЗ вдоль оси Z в пределах гипотезы, принятой выше для $F_{сдвxy\perp}^{(2)}$, получим

$$F_{сдвzy\perp}^{(2)} = 2\delta_{ТЗ} a \frac{B}{t}, \quad (21)$$

где $\frac{B}{t}$ – количество площадей сдвига, приходящихся на длину балки B .

Отметим, что формулы (33) – (35) справедливы только при весьма качественной склейке ТЗ между собой в панели, как это должно обеспечиваться в интегральных конструкциях.

Прочность соответствующих балок на сдвиг следует определять по критерию

$$\tau_{\max} = \frac{Q}{F_{сдв}} \leq \tau_{вКМ}. \quad (22)$$

Выбор проектных параметров панели будем проводить по следующему алгоритму.

Сначала полагаем, что ТЗ ориентирован вдоль оси Z. Запишем

$$\sigma_{ZII}^{(1)} = \frac{M_{\max}}{W_{XII}} \leq \sigma_{\varepsilon Z}, \quad (23)$$

где $\sigma_{\varepsilon Z}$ – предел прочности ПКМ обшивки в направлении Z. Из формулы (16) следует, что W_{XII} является функцией параметров:

$$W_{XII} = \varphi_1 \{ \delta_{0II}, h_{II}, \delta_{mpII}, t_{II}, E_{mp}, E_{0Z} \}, \quad (24)$$

где индексы II означают, что соответствующие параметры выбраны при ориентации ТЗ вдоль оси Z. Исходя из (24) неравенство (23) можно записать как

$$\sigma_{ZII}^{(1)} = \varphi_1 \{ \delta_{0II}, h_{II}, \delta_{mpII}, t_{II}, E_{mp}, E_{0Z} \} \leq \sigma_{\varepsilon Z}. \quad (25)$$

Аналогично с учетом того, что

$$W_{X\perp}^{(2)} = \varphi_2 \{ \delta_{0II}, h_{II} \} \quad (26)$$

и параметры $F_{\text{сдвхуII}}^{(1)}$ и $F_{\text{сдвzу\perp}}^{(2)}$ определяются формулами (20) и (21) соответственно, а максимальный прогиб f_{\max} зависит от параметров $\delta_0, h, \delta_{mp}, t, E_{mp}, E_{0Z}$, можно записать

$$\begin{aligned} \sigma_{X\perp}^{(2)} &= \varphi_2 \{ \delta_{0II}, h_{II} \} \leq \sigma_{\varepsilon X}; \\ \tau_{yzII}^{(1)} &= \varphi_3 \{ \delta_{IIТЗ}, h_{II}, t_{II} \} \leq \tau_{\varepsilon yz}; \\ \tau_{yz\perp}^{(2)} &= \varphi_4 \{ \delta_{IIТЗ}, t_{II} \} \leq \tau_{\varepsilon yx}; \\ f_{\max} &= \varphi_5 \{ \delta_{0II}, h_{II}, \delta_{mpII}, t_{II}, E_{mp}, E_{0Z} \} \leq [f]. \end{aligned} \quad (27)$$

При ориентации ТЗ по оси X выражения (27) лишь поменяются местами:

$$\begin{aligned} \sigma_{Z\perp}^{(1)} &= \varphi_1 \{ \delta_{0\perp}, h_{\perp} \}; \\ \sigma_{XII}^{(2)} &= \varphi_2 \{ \delta_{0\perp}, h_{\perp}, \delta_{mp}, t_{\perp}, E_{mp}, E_{0X} \}; \\ \tau_{yz\perp}^{(1)} &= \varphi_3 \{ \delta_{\perpТЗ}, t_{\perp} \}; \\ \tau_{yz\perp}^{(2)} &= \varphi_4 \{ \delta_{\perpТЗ}, h_{\perp}, t_{\perp} \}; \\ f_{\max} &= \varphi_5 \{ \delta_{0\perp}, h_{\perp}, \delta_{mp\perp}, t_{\perp}, E_{mp}, E_{0Z} \}, \end{aligned} \quad (28)$$

или наоборот в зависимости от расположения f_{\max} .

Итак, имеем шесть независимых неравенств (25) – (28), в которые входят 7 или 6 неизвестных в зависимости от типа балки, на которой расположен f_{\max} . Седьмой неизвестной может быть E_{0X} . В качестве дополнительных (вспомогательных) условий для анализа возможности разрешения системы неравенств (25) – (28) можно добавить следующие:

1. Одно из первых двух неравенств системы (26) может быть обращено в равенство. Очевидно, это должно быть то из них, в котором действующее напряжение больше. По-видимому, это $\sigma_{X\perp}^{(2)}$, так как момент сопротивления $W_{X\perp}^{(2)} < W_{ZII}^{(1)}$, из чего следует, что $\sigma_{X\perp}^{(2)}$ может быть принято равным $\sigma_{\varepsilon X}$.

2. ТЗ обычно формируют на оправках намоткой полуфабриката ПКМ из однонаправленной ленты под углами $\pm 45^0$. Обычно за редким исключением для ТЗ достаточно одной пары монослоев. Таким образом, толщина ТЗ и его модуль упругости E_{mp} в первом приближении оказываются известными.

3. Максимальная перерезывающая сила в балке второго типа априори больше, чем в балке первого типа. Тогда имеется основание неравенство для $\tau_{yz\perp}^{(2)}$ системы (28) заменить равенством: $\tau_{yz\perp}^{(2)} = \tau_{eyx}$.

4. Пределы прочности ПКМ и его модули упругости зависят от схемы армирования – структуры ориентации монослоев полуфабриката. В общем виде схема армирования из монослоев ПКМ чаще всего имеет вид

$$(0_m^0, \pm 45_n^0, 90_l^0) s, \quad (29)$$

где m, n, l – число монослоев, ориентированных в соответствующем направлении ($\pm 45^0$ – рассматривается как один монослой двойной толщины); s – число кратности слоев данной структуры.

Для панели, нагруженной поперечной равномерной нагрузкой представляется оправданным в первом приближении принять схему армирования с параметрами: $m=l=1, n=1, s=1$.

Тогда согласно [9] можно принять

$$\begin{aligned} \sigma_{ez} &= \frac{\sigma_{e0} + \sigma_{\pm 45^0} + \sigma_{e90^0}}{4} = \sigma_{ex} ; \\ E_{0z} &= \frac{E_0 + E_{\pm 45^0} + E_{e90^0}}{4} = E_{0x} ; \\ \tau_{exy} &= \frac{\tau_{e090^0} + \tau_{e\pm 45^0}}{4} = \tau_{eyz} ; \\ G_{xy} &= \frac{G_{090^0} + G_{\pm 45^0}}{4} = G_{yz} . \end{aligned} \quad (30)$$

5. При допущениях п.4 получим

$$\tau_{yx\perp}^{(2)} = \frac{Q_{y\max}^{(2)}}{F_{сдвxy\perp}^{(2)}} = \frac{Q_{y\max}^{(2)} \cdot B}{2\delta_{mp\parallel} a t_{\parallel}} = \tau_{eyx} . \quad (31)$$

Откуда

$$t = \frac{Q_{y\max}^{(2)} B}{2\delta_{mp\parallel} a \tau_{eyx}} . \quad (32)$$

6. Первое равенство системы (27) запишем как

$$\sigma_{X\perp}^{(2)} = \frac{M_{\max}^{(2)}}{W_{X\perp}^{(2)}} = \frac{M_{\max}^{(2)}}{a\delta_{0\parallel}(h_{\parallel} - \delta_{0\parallel})} = \sigma_{ex} = \sigma_{ez} . \quad (33)$$

Откуда

$$h_{II} = \frac{M_{\max}^{(2)}}{a\delta_{0II}\sigma_{eX}} + \delta_{0II}. \quad (34)$$

7. Рассмотрев неравенство (25) в развернутом виде, запишем

$$\sigma_{ZII}^{(1)} = \frac{M_{\max}^{(1)}}{W_{XII}^{(1)}} = \frac{M_{\max}^{(1)}}{a(\delta_{0II}h_{II} + \delta_{mpII}h_{II}\left(1 - \frac{h_{II}}{3t_{II}}\right)\frac{E_{mp}}{E_{0Z}})} \leq \sigma_{eZ}, \quad (35)$$

где все параметры известны, следует проверить только его выполнение.

В случае невыполнения (35) в первую очередь следует осуществить его коррекцию, увеличивая h_{II} . При увеличенном h_{II} первое неравенство системы (26) будет выполняться именно в этом статусе, а не в виде неравенства, как было принято выше.

8. Остается проверить последнее неравенство системы (26). Это неравенство имеет вид

$$f_{\max} = \max\{f_{\max}^{(1)}, f_{\max}^{(2)}\} \leq [f], \quad (36)$$

где максимальные прогибы балок первого и второго типов могут быть эффективно и наиболее просто уменьшены в случае его нарушения за счет увеличения момента инерции, что в первую очередь возможно увеличением h_{II} .

После установления неизвестных, удовлетворяющих неравенствам (25) – (27), необходимо определить массу панели

$$m_{ZII} = 2AB\rho_{KM}\left(\delta_{0II} + \frac{\delta_{mpII}h_{II}}{t_{II}}\right). \quad (37)$$

После этого проводится выбор проектных параметров по приведенному выше алгоритму при ориентации ТЗ вдоль оси X панели и определяется ее масса

$$m_{Z\perp} = 2AB\rho_{KM}\left(\delta_{0\perp} + \frac{\delta_{mp\perp}h_{\perp}}{t_{\perp}}\right). \quad (38)$$

Весовую эффективность панели можно определить соотношением

$$\overline{m_Z} = \frac{m_{ZII}}{m_{Z\perp}} = \frac{2AB\rho_{KM}\left(\delta_{0II} + \frac{\delta_{mpII}h_{II}}{t_{II}}\right)}{2AB\rho_{KM}\left(\delta_{0\perp} + \frac{\delta_{mp\perp}h_{\perp}}{t_{\perp}}\right)}. \quad (39)$$

Дальнейшая проверка результатов предэскизного проектирования панельных конструкций из ПКМ должна проводиться в пакете МКЭ.

Список использованных источников

1. Цариковский В.И. АНТК «Антонов» – лидер в создании конструкций из композиционных материалов в авиастроении / В.И. Цариковский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 1 (27). – С. 25-31.
2. Опыт применения сотовых конструкций в изделиях «Ан» / А.М. Баранников, А.В. Мирошников, Г.В. Неминский и др. // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 49 (2). – Х., 2007. – С. 9-16.
3. Гайдачук В.Е. Концептуальные подходы к оптимизации по массе многоотсековых сотовых конструкций летательных аппаратов / В.Е. Гайдачук, В.В. Кириченко, В.И. Сливинский // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2005. – Вып. 43 (4). – С. 7-26.
4. Гайдачук В.Е. Концепция оптимизации композитных корпусов летательных аппаратов с сотовым наполнителем на основе синтеза метода конечных элементов и аналитических моделей / В.Е. Гайдачук, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 56 (5). – Х., 2008. – С. 7-14.
5. Кондратьев А.В. Проектирование панельных конструкций летательных аппаратов с трубчатым наполнителем при дискретном закреплении / А.В. Кондратьев, Е.В. Омельченко // XI Междунар. молодежная науч.-практ. конф. «Человек и Космос»: тез. докл. – Днепропетровск, 2009. – С. 435.
6. Гайдачук В.Е. Дифференциальный метод проектирования рациональных корпусных авиаконструкций из композиционных материалов / В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов // Самолетостроение. Техника воздушного флота: респ. межвед. науч.-техн. сб. / Мин-во высш. и средн. спец. образования УССР, Харьк. авиац. ин-т. – Х., 1978. – Вып. 43. – С. 81-92.
7. Справочная книга по расчету самолета на прочность / М.Ф. Астахов, А.В. Караваев, С.Я. Макаров, Я.Я. Суздальцев. – М.: Гос. изд-во оборон. пром., 1954. – 708 с.
8. Беляев Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев. – М.: Наука, 1976. – 607 с.
9. Руководящие технические материалы для конструкторов РТМ – 87. – К.: АНТК «Антонов», 1987. – 387 с.

Поступила в редакцию 23.06.09.

*Рецензент: д-р техн. наук, ст. науч. сотр. В.И. Сливинский
УкрНИИТМ, г. Днепропетровск*