

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БАЛКИ ИЗ КОМПОЗИТОВ ПРИ НЕСКОЛЬКИХ РАСЧЕТНЫХ СЛУЧАЯХ НАГРУЖЕНИЯ

Элементы конструкций типа балки и лонжерона в условиях эксплуатации испытывают разные по характеру и величине нагрузки, которые, как правило, нормируются и называются расчетными случаями. Например, лонжерон крыла с подкосом может быть нагружен аэродинамической силой, направленной вверх или вниз (рис. 1). Параметры балки, определяемые перерывающей силой Q_y , не зависят от направления её действия, поэтому в расчетах необходимо принимать максимальное значение Q_y или для балки в целом (при постоянной толщине стенки) или по участкам (при переменной величине δ_{cm}). Изгибающий момент и осевая сила приводят к напряжениям разного знака в полках и с учетом существенной разницы в пределах прочности КМ на растяжение и сжатие расчет по максимальным значениям становится невозможным, поэтому необходима методика, которая позволила бы определить такие параметры, при которых условия прочности выполнялись для всех случаев нагружения, т.е. напряжения в полках не выходили за границы заштрихованной зоны на рис. 2, а масса была бы минимальной.

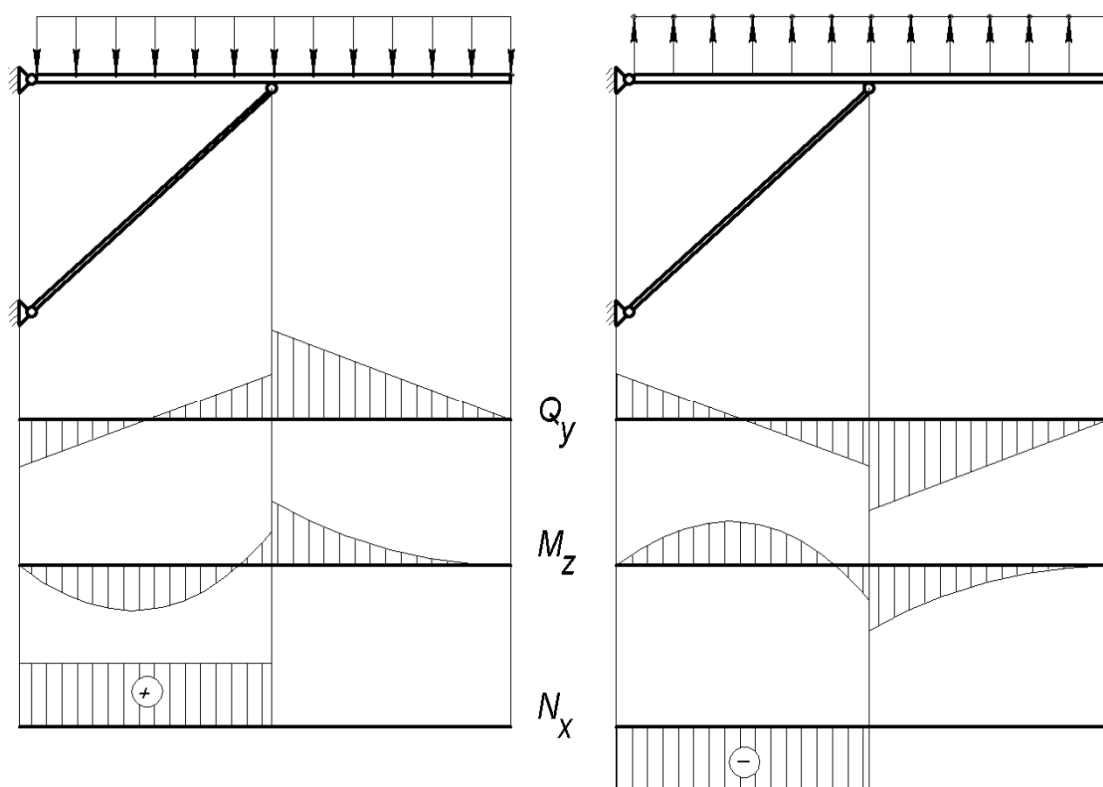


Рисунок 1 – Примеры расчётных случаев балки

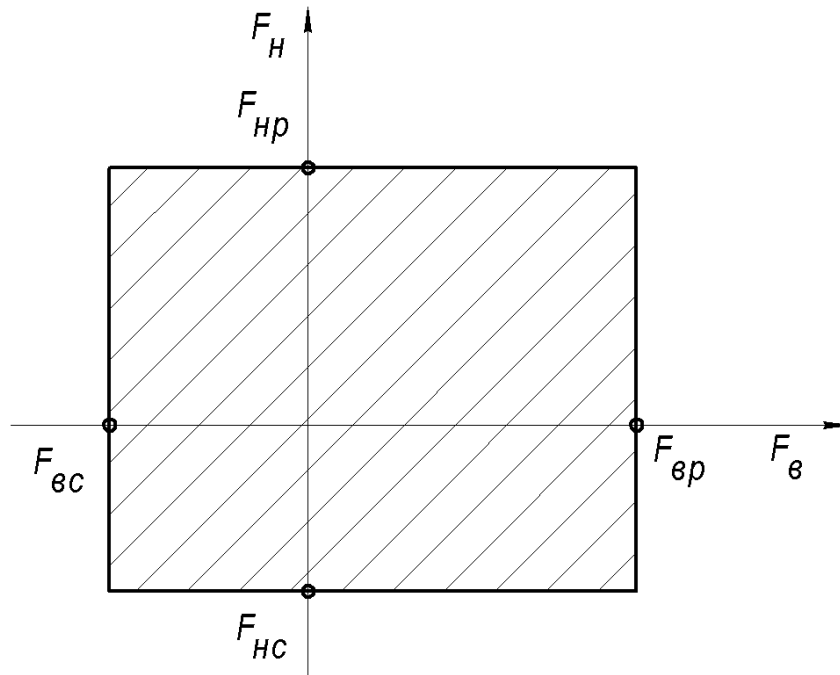


Рисунок 2 – Интервалы допустимых напряжений в полках балки

Запишем условия прочности полок для нескольких расчетных случаев нагружения:

$$\begin{aligned}
 -F_{вс} &\leq \frac{2M_{zj} + N_{xj}(2y_{Nj} - 2H + 2H_{эф} + \delta_в)}{2H_{эф}b_в\delta_в} \leq F_{вp}; \\
 -F_{Hp} &\leq \frac{-2M_{zj} + N_{xj}(2H_{эф} - 2y_{Nj} + \delta_H)}{2H_{эф}b_H\delta_H} \leq F_{Hp},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где j – номер расчетного случая;

$F_{вp}$, $F_{вс}$, F_{Hp} , F_{Hc} – предел прочности КМ полок на растяжение и сжатие;

M_z , N_x , y_N – изгибающий момент, осевая сила и координата точки приложения осевой силы (см. рис. 3);

$H_{эф}$ – эффективная высота балки, $H_{эф} = H - \delta_в/2 - \delta_H/2$.

Суть методики проектирования заключается в том, что назначается базовый расчетный случай и для него выбираются такие предельные напряжения в полках $F_в^*$ и F_H^* , при которых найденные по ним толщины полок обеспечивали бы их прочность для всех расчетных случаев. В качестве базового расчетного случая можно принять один из заданных или искусственно синтезированный. Желательно назначить такой, для которого predeterminedены знаки напряжений в верхней и нижней полках. Пусть это будет только положительный изгибающий момент M_z^* , растягивающий верхнюю полку. Тогда из формул (1) получим

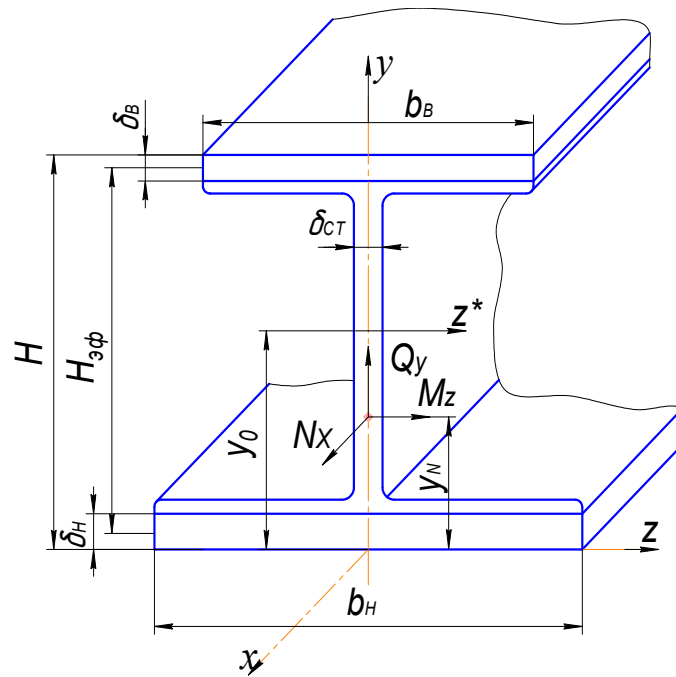


Рисунок 3 – Проектная форма поперечного сечения балки

$$\delta_B = \frac{M_z^*}{H_{эф} b_B F_B^*}; \quad \delta_H = \frac{-M_z^*}{H_{эф} b_H F_H^*}, \quad (2)$$

где F_B^* и F_H^* – искомые параметры, причем $F_B^* > 0$ и $F_H^* < 0$.

Подставим формулы (2) в условие (1), в результате чего получим следующие неравенства:

$$2H_{эф} b_B F_B^* [M_{zj} + N_{xj} (y_{Nj} + H_{эф} - H)] \leq M_z^* (2H_{эф} b_B F_{Bпр} - N_{xj}); \quad (3)$$

$$2H_{эф} b_B F_B^* [M_{zj} + N_{xj} (y_{Nj} + H_{эф} - H)] \geq M_z^* (-2H_{эф} b_B F_{Bс} - N_{xj});$$

$$2H_{эф} b_H F_H^* [-M_{zj} + N_{xj} (H_{эф} - y_{Nj})] \geq M_z^* (-2H_{эф} b_H F_{Hпр} + N_{xj}); \quad (4)$$

$$2H_{эф} b_H F_H^* [-M_{zj} + N_{xj} (H_{эф} - y_{Nj})] \leq M_z^* (2H_{эф} b_H F_{Hр} + N_{xj}).$$

Решение этих неравенств относительно F_B^* и F_H^* приводит к таким результатам:

- при $[M_{zj} + N_{xj} (y_{Nj} + H_{эф} - H)] \geq 0$

$$F_B^* \leq \frac{M_z^* (2H_{эф} b_B F_{Bпр} - N_{xj})}{2H_{эф} b_B [M_{zj} + N_{xj} (y_{Nj} + H_{эф} - H)]}; \quad (5)$$

$$F_B^* \geq \frac{M_z^* (-2H_{эф} b_B F_{Bс} - N_{xj})}{2H_{эф} b_B [M_{zj} + N_{xj} (y_{Nj} + H_{эф} - H)]};$$

$$\begin{aligned}
 & - \text{при } \left[M_{zj} + N_{xj} (H_{\text{эф}} - y_{Nj}) \right] \geq 0 \\
 & F_H^* \geq \frac{M_z^* (-2H_{\text{эф}} b_H F_{Hr} + N_{xj})}{2H_{\text{эф}} b_H \left[-M_{zj} + N_{xj} (H_{\text{эф}} - y_{Nj}) \right]}; \\
 & F_H^* \leq \frac{M_z^* (2H_{\text{эф}} b_H F_{Hc} - N_{xj})}{2H_{\text{эф}} b_H \left[-M_{zj} + N_{xj} (H_{\text{эф}} - y_{Nj}) \right]}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

Рассмотрим подробно возможные варианты решения неравенств (3), характер которого показан на рис. 4. Принимая во внимание, что $F_e^* > 0$ и по логике расчёта на прочность F_e^* должно быть ограничено сверху, варианты *b*, *c*, *f*, и *g* (рис. 3) необходимо отбросить. В соответствии с [3], определяющей условия положительности толщин полок, решения *d* и *e* также не следует рассматривать. Таким образом, для дальнейшего анализа остаются варианты *a* и *h* (см. рис. 3), причем случай *a* относится к тем расчётным случаям, в которых верхняя полка растянута, а для случая *h* - сжата.

Аналогичный анализ решения (4) представлен на рис. 4. Варианты *a*, *c*, *f*, *h* не могут быть решением из-за того, что толщина нижней полки получится отрицательной, а случаи *d* и *e* противоречат принципам расчета на прочность (ограничения на напряжения накладываются снизу, а не сверху). Таким образом, для расчетных случаев, для которых нижняя полка растянута, решением является вариант *b*, а когда нижняя полка сжата, – вариант *g* (см. рис. 5).

Итогом приведенного выше анализа является следующий алгоритм определения F_e^* и F_H^* :

а) выясняем, для каких расчётных случаев верхняя полка растянута или сжата [3], и вычисляем соответствующие предельные напряжения

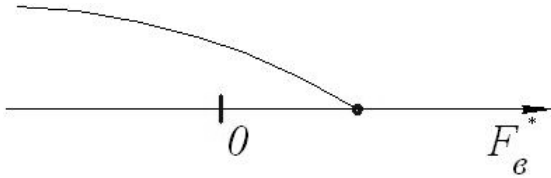
$$\begin{aligned}
 F_{e1}^* &= \frac{M_z^*}{2H_{\text{эф}} b_e} \min_r \left[\frac{(2H_{\text{эф}} b_e F_{ep} - N_{xr})}{M_{zr} + N_{xr} (y_{nr} + H_{\text{эф}} - H)} \right]; \\
 F_{e2}^* &= \frac{M_z^*}{2H_{\text{эф}} b_e} \min_s \left[\frac{(-2H_{\text{эф}} b_e F_{ec} - N_{xs})}{M_{zs} + N_{xs} (y_{ns} + H_{\text{эф}} - H)} \right],
 \end{aligned} \tag{7}$$

где *r*, *s* - номера случаев, для которых полка растянута и сжата соответственно;

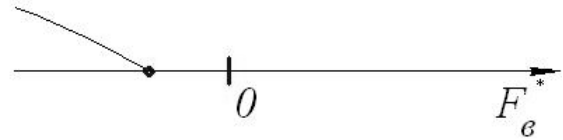
б) аналогично поступаем с нижней полкой ($F_H^* < 0$)

$$F_{H1}^* = \frac{M_z^*}{2H_{\text{эф}}b_H} \max_r \left[\frac{(-2H_{\text{эф}}b_H F_{HP} + N_{xr})}{-M_{zr} + N_{xr}(H_{\text{эф}} - y_{Nr})} \right];$$

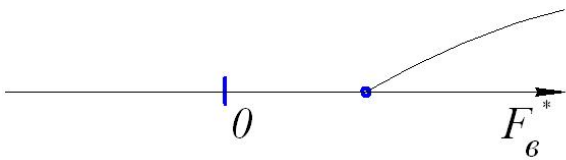
$$F_{H2}^* = \frac{M_z^*}{2H_{\text{эф}}b_H} \max_s \left[\frac{(2H_{\text{эф}}b_H F_{HC} - N_{xs})}{-M_{zs} + N_{xs}(H_{\text{эф}} - y_{Ns})} \right].$$
(8)



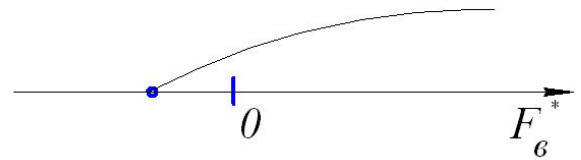
a $(2H_{\text{эф}}b_{\epsilon}F_{\epsilon p} - N_{xj} > 0;$
 $M_{zj} + N_{xj}(y_{Nj} + H_{\text{эф}} - H) > 0)$



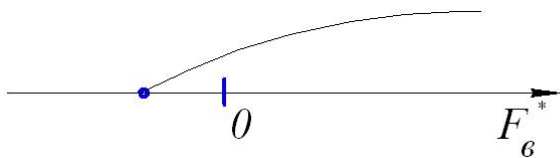
b $(2H_{\text{эф}}b_{\epsilon}F_{\epsilon p} - N_{xj} < 0;$
 $M_{zj} + N_{xj}(y_{Nj} + H_{\text{эф}} - H) > 0)$



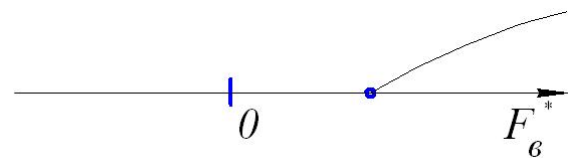
c $(-2H_{\text{эф}}b_{\epsilon}F_{\epsilon c} - N_{xj} > 0;$
 $M_{zj} + N_{xj}(y_{Nj} + H_{\text{эф}} - H) > 0)$



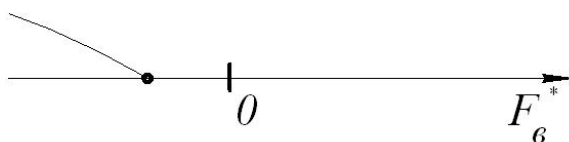
d $(-2H_{\text{эф}}b_{\epsilon}F_{\epsilon c} - N_{xj} < 0;$
 $M_{zj} + N_{xj}(y_{Nj} + H_{\text{эф}} - H) > 0)$



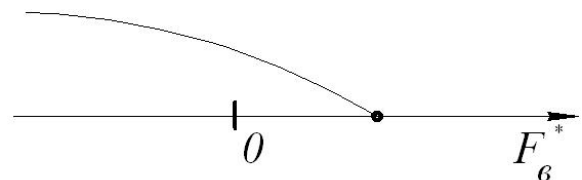
e $(2H_{\text{эф}}b_{\epsilon}F_{\epsilon p} - N_{xj} > 0;$
 $M_{zj} + N_{xj}(y_{Nj} + H_{\text{эф}} - H) < 0)$



f $(2H_{\text{эф}}b_{\epsilon}F_{\epsilon p} - N_{xj} < 0;$
 $M_{zj} + N_{xj}(y_{Nj} + H_{\text{эф}} - H) < 0)$

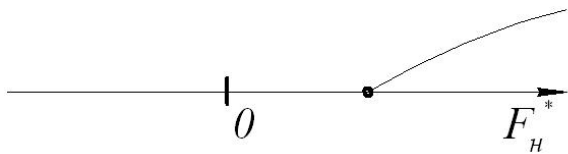


g $(-2H_{\text{эф}}b_{\epsilon}F_{\epsilon c} - N_{xj} > 0;$
 $M_{zj} + N_{xj}(y_{Nj} + H_{\text{эф}} - H) < 0)$

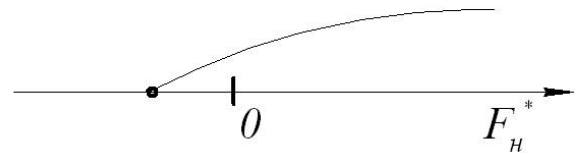


h $(-2H_{\text{эф}}b_{\epsilon}F_{\epsilon c} - N_{xj} < 0;$
 $M_{zj} + N_{xj}(y_{Nj} + H_{\text{эф}} - H) < 0)$

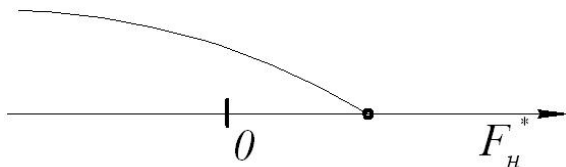
Рисунок 4 – Определение предельных напряжений базового расчётного случаев в верхней полке



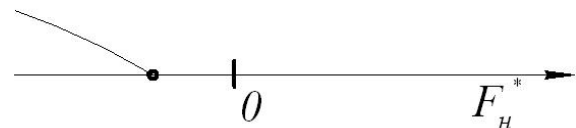
$$\text{a } \begin{cases} (-2H_{\text{эф}}b_H F_{Hp} + N_{xj} > 0; \\ -M_{zj} + N_{xj}(H_{\text{эф}} - y_{Nj}) > 0) \end{cases}$$



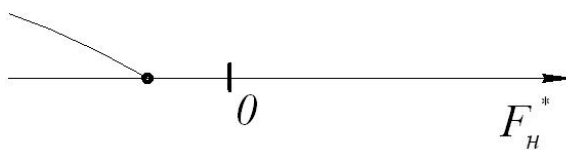
$$\text{b } \begin{cases} (-2H_{\text{эф}}b_H F_{Hp} + N_{xj} < 0; \\ -M_{zj} + N_{xj}(H_{\text{эф}} - y_{Nj}) > 0) \end{cases}$$



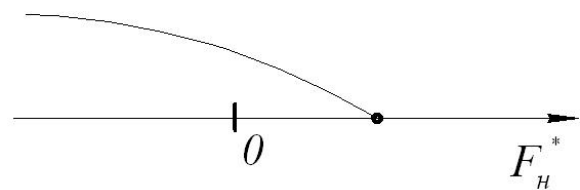
$$\text{c } \begin{cases} (2H_{\text{эф}}b_H F_{Hc} + N_{xj} > 0; \\ -M_{zj} + N_{xj}(H_{\text{эф}} - y_{Nj}) > 0) \end{cases}$$



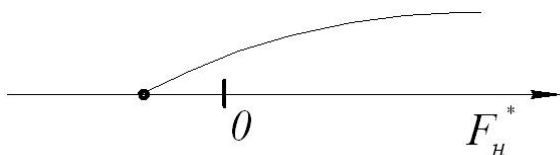
$$\text{d } \begin{cases} (2H_{\text{эф}}b_H F_{Hc} + N_{xj} < 0; \\ -M_{zj} + N_{xj}(H_{\text{эф}} - y_{Nj}) > 0) \end{cases}$$



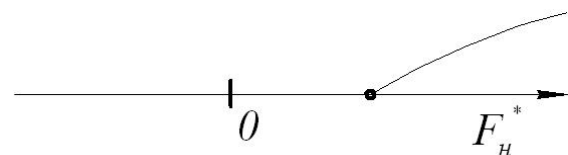
$$\text{e } \begin{cases} (-2H_{\text{эф}}b_H F_{Hp} + N_{xj} > 0; \\ -M_{zj} + N_{xj}(H_{\text{эф}} - y_{Nj}) < 0) \end{cases}$$



$$\text{f } \begin{cases} (-2H_{\text{эф}}b_H F_{Hp} + N_{xj} < 0; \\ -M_{zj} + N_{xj}(H_{\text{эф}} - y_{Nj}) < 0) \end{cases}$$



$$\text{g } \begin{cases} (2H_{\text{эф}}b_H F_{Hc} + N_{xj} > 0; \\ -M_{zj} + N_{xj}(H_{\text{эф}} - y_{Nj}) < 0) \end{cases}$$



$$\text{h } \begin{cases} (-2H_{\text{эф}}b_H F_{Hc} + N_{xj} < 0; \\ -M_{zj} + N_{xj}(H_{\text{эф}} - y_{Nj}) < 0) \end{cases}$$

Рисунок 5 – Определение предельных напряжений базового расчетного случаев в нижней полке.

Здесь номера r и s для верхней и нижней полок не обязательно одни и те же;

в) определяем расчетные значения $F_{\text{в}}^*$ и $F_{\text{н}}^*$

$$F_{\epsilon}^* = \min(F_{\epsilon 1}^*, F_{\epsilon 2}^*);$$

$$F_H^* = \min(F_{H 1}^*, F_{H 2}^*).$$
(9)

Рассмотрим вариант, когда в качестве базового расчетного случая выбрано нагружение только осевой силой N_x^* при $y_N^* = H/2$. Тогда из условий прочности (1) определим толщины полок

$$\delta_{\epsilon} = \frac{N_x^* (2H_{\text{эф}} - H)}{2H_{\text{эф}} b_{\epsilon} F_{\epsilon}^* - N_x^*};$$

$$\delta_H = \frac{N_x^* (2H_{\text{эф}} - H)}{2H_{\text{эф}} b_H F_H^* - N_x^*},$$
(10)

где $F_{\epsilon}^* > 0$ и $F_H^* > 0$.

После подстановки этих выражений в условия прочности (1) и некоторых преобразований получаем:

- при $\left[M_{zj} + N_{xj} (y_{Nj} + H_{\text{эф}} - H) \right] \geq 0$

или

$$F_{\epsilon}^* \geq \frac{N_x^*}{2H_{\text{эф}} b_{\epsilon}} \left[\frac{(2H_{\text{эф}} - H)(2H_{\text{эф}} b_{\epsilon} F_{\epsilon p} - N_{xj})}{2M_{zj} + 2N_{xj} (y_{Nj} + H_{\text{эф}} - H)} + 1 \right],$$

$$F_{\epsilon}^* \geq \frac{N_x^*}{2H_{\text{эф}} b_{\epsilon}} \left[\frac{(2H_{\text{эф}} - H)(-2H_{\text{эф}} b_{\epsilon} F_{\epsilon c} - N_{xj})}{2M_{zj} + 2N_{xj} (y_{Nj} + H_{\text{эф}} - H)} + 1 \right];$$
(11)

- при $\left[M_{zj} + N_{xj} (H_{\text{эф}} - y_{Nj}) \right] \geq 0$

или

$$F_H^* \geq \frac{N_x^*}{2H_{\text{эф}} b_H} \left[\frac{(2H_{\text{эф}} - H)(2H_{\text{эф}} b_H F_{H p} - N_{xj})}{-2M_{zj} + 2N_{xj} (H_{\text{эф}} - y_{Nj})} + 1 \right],$$

$$F_H^* \geq \frac{N_x^*}{2H_{\text{эф}} b_H} \left[\frac{(2H_{\text{эф}} - H)(-2H_{\text{эф}} b_H F_{H c} - N_{xj})}{-2M_{zj} + 2N_{xj} (H_{\text{эф}} - y_{Nj})} + 1 \right].$$
(12)

Анализ этих решений с учетом ограничений, приведенных в таблице [3], позволяет записать следующее:

- для расчётных случаев, когда верхняя полка растянута или сжата,

$$F_{\epsilon}^* = \frac{N_x^*}{2H_{\text{эф}} b_{\epsilon}} \min_s \left[\frac{(2H_{\text{эф}} - H)(-2H_{\text{эф}} b_{\epsilon} F_{\epsilon c} - N_{xs})}{2M_{zs} + 2N_{xs} (y_{Ns} + H_{\text{эф}} - H)} + 1 \right],$$
(13)

$$F_e^* = \frac{N_x^*}{2H_{эф}b_e} \min_r \left[\frac{(2H_{эф} - H)(2H_{эф}b_e F_{ep} - N_{xr})}{2M_{zr} + 2N_{xr}(y_{Nr} + H_{эф} - H)} + 1 \right];$$

где r - номер расчетного случая с растянутой полкой, а s - со сжатой.

- для расчетных случаев, когда нижняя полка растянута или сжата,

$$F_H^* = \frac{N_x^*}{2H_{эф}b_H} \min_r \left[\frac{(2H_{эф} - H)(2H_{эф}b_H F_{Hp} - N_{xr})}{-2M_{zr} + 2N_{xr}(H_{эф} - y_{Nr})} + 1 \right]; \quad (14)$$

$$F_H^* = \frac{N_x^*}{2H_{эф}b_H} \min_s \left[\frac{(2H_{эф} - H)(-2H_{эф}b_H F_{Hc} - N_{xs})}{-2M_{zs} + 2N_{xs}(H_{эф} - y_{Ns})} + 1 \right].$$

В зависимостях (11) и (12) значения r и s могут отличаться друг от друга.

Учитывая, что для выбранного базового расчетного случая $F_e^* > 0$ и $F_H^* > 0$ (действует только растягивающая сила N_x^* , которая приложена в точке $y_N^* = H/2$), запишем окончательные формулы для определения предельных напряжений базового расчетного случая:

$$F_e^* = \min(F_{e1}^*, F_{e2}^*); \quad F_H^* = \min(F_{H1}^*, F_{H2}^*). \quad (15)$$

Рассмотрим численную реализацию разработанной методики на примере балки с параметрами $H = 300$ мм, $b_e = b_H = 100$ мм, $H_{эф} = H - \delta_e/2 - \delta_H/2 = 290$ мм, изготавливаемой из КМ с пределами точности $F_{ep} = F_{Hp} = 1000$ МПа, $F_{ec} = F_{Hc} = 600$ МПа. Нагрузки расчетных случаев приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Характеристика расчетных случаев

Номер расчетного случая	M_z , Н·мм	N_x , Н	y_N , мм
1	$3 \cdot 10^8$	-	-
2	$-3 \cdot 10^8$	-	-
3	-	$2 \cdot 10^6$	0
4	$2 \cdot 10^8$	-10^6	300

Определяем характер нагружения полки. Результаты расчётов сведём в табл. 2, откуда следует, что верхняя полка растянута в 1-м расчетном случае и сжата во 2-м, 3-м и 4-м, а нижняя полка растянута во 2-м и 3-м, а сжата в 1-м и 4-м расчётных случаях.

Пусть базовым расчетным случаем будет нагружение только положительным изгибающим моментом $M_z^* = 1$. Тогда по зависимостям (7) и (9) получим:

$$\text{а) при } r = 1 \quad F_{\sigma_1}^* = \min\left(\frac{0.58 \cdot 10^8}{2 \cdot 290 \cdot 100 \cdot 3 \cdot 10^8}\right) = 0.333 \cdot 10^{-5} \text{ МПа};$$

$$\text{б) при } s = 2, 3, 4 \quad F_{\sigma_2}^* = \frac{1}{2 \cdot 290 \cdot 100} \left(\frac{-0.348}{-3}, \frac{-0.368}{-0.2}, \frac{-0.338}{-0.9} \right) = 0.2 \cdot 10^{-5} \text{ МПа};$$

$$F_{\sigma}^* = \min(0.333 \cdot 10^{-5}; 0.2 \cdot 10^{-5}) = 0.2 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}.$$

Для нижней полки по формулам (8) и (9) получим:

а) при $r = 2, 3$

$$F_{H_1}^* = \frac{1}{0.58 \cdot 10^5} \max\left(\frac{-0.58 \cdot 10^8}{3}, \frac{-0.56 \cdot 10^8}{5.8}\right) = -0.166 \cdot 10^{-5} \text{ МПа};$$

$$\text{б) при } s = 1, 4 \quad F_{H_2}^* = \frac{1}{0.58 \cdot 10^5} \max\left(\frac{0.348}{-3}, \frac{0.338}{-1.9}\right) = -0.2 \cdot 10^{-5} \text{ МПа};$$

$$F_H^* = \max(-0.166 \cdot 10^{-5}; -0.2 \cdot 10^{-5}) = -0.166 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}.$$

Зная $F_{\sigma c}$ и $F_{H c}$, по формулам (2) определим значение толщин полок

$$\delta_{\sigma} = \frac{1}{290 \cdot 100 \cdot 0.2 \cdot 10^{-5}} = 17.24 \text{ мм};$$

$$\delta_H = \frac{1}{290 \cdot 100 \cdot 0.166 \cdot 10^{-5}} = 20.74 \text{ мм}.$$

Пусть теперь базовым расчетным случаем будет растягивающая сила N_x^* при $y_N^* = H/2$.

Для верхней полки из зависимостей (13) и (15) получим:

а) при $r = 1$

$$F_{\sigma_1}^* = \frac{1}{58 \cdot 10^3} \min\left(\frac{280 \cdot 0.58}{2 \cdot 3} + 1\right) = 0.484 \cdot 10^{-3} \text{ МПа};$$

б) при $s = 2, 3, 4$

$$F_{\sigma_2}^* = \frac{1}{58 \cdot 10^3} \min\left(\left(\frac{-0.348 \cdot 280}{-3 \cdot 2} + 1\right), \left(\frac{-0.368 \cdot 280}{-0.2 \cdot 2} + 1\right), \left(\frac{-0.338 \cdot 280}{-0.9 \cdot 2} + 1\right)\right) = 0.297 \cdot 10^{-3} \text{ МПа};$$

$$F_{\sigma}^* = 0.297 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}.$$

Предельные напряжения для нижней полки находим по формулам (14) и (15) с учетом данных табл. 2

а) при $r = 2, 3$

$$F_{H_1}^* = \frac{1}{58 \cdot 10^3} \min\left(\frac{280 \cdot 0.58}{3 \cdot 2} + 1, \frac{280 \cdot 0.56}{5.8 \cdot 2} + 1\right) = 0.250 \cdot 10^{-3} \text{ МПа};$$

Таблица 2 – Характер напряжений в полках

№ р.с.	Определяющее условие	Верхняя полка	Нижняя полка
1	$M_z + N_x (y_N + H_{\text{эф}} - H) = 3 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{мм} > 0$ $2H_{\text{эф}} b_{\text{в}} F_{\text{вр}} - N_x = 0.58 \cdot 10^8 \text{ Н} > 0$ $-2H_{\text{эф}} b_{\text{в}} F_{\text{вс}} - N_x = -0.348 \cdot 10^8 \text{ Н} < 0$ $-M_z + N_x (H_{\text{эф}} - y_N) = -3 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{мм} < 0$ $2H_{\text{эф}} b_{\text{н}} F_{\text{нр}} - N_x = 0.58 \cdot 10^8 \text{ Н} > 0$ $-2H_{\text{эф}} b_{\text{н}} F_{\text{нс}} - N_x = -0.348 \cdot 10^8 \text{ Н} < 0$	Растяжение	Сжатие
2	$M_z + N_x (y_N + H_{\text{эф}} - H) = -3 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{мм} < 0$ $2H_{\text{эф}} b_{\text{в}} F_{\text{вр}} - N_x = 0.58 \cdot 10^8 \text{ Н} > 0$ $-2H_{\text{эф}} b_{\text{в}} F_{\text{вс}} - N_x = -0.348 \cdot 10^8 \text{ Н} < 0$ $-M_z + N_x (H_{\text{эф}} - y_N) = 3 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{мм} > 0$ $2H_{\text{эф}} b_{\text{н}} F_{\text{нр}} - N_x = 0.58 \cdot 10^8 \text{ Н} > 0$ $-2H_{\text{эф}} b_{\text{н}} F_{\text{нс}} - N_x = -0.348 \cdot 10^8 \text{ Н} < 0$	Сжатие	Растяжение
3	$M_z + N_x (y_N + H_{\text{эф}} - H) = -0.2 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{мм} < 0$ $2H_{\text{эф}} b_{\text{в}} F_{\text{вр}} - N_x = 0.56 \cdot 10^8 \text{ Н} > 0$ $-2H_{\text{эф}} b_{\text{в}} F_{\text{вс}} - N_x = -0.368 \cdot 10^8 \text{ Н} < 0$ $-M_z + N_x (H_{\text{эф}} - y_N) = 5.8 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{мм} > 0$ $2H_{\text{эф}} b_{\text{н}} F_{\text{нр}} - N_x = 0.56 \cdot 10^8 \text{ Н} > 0$ $-2H_{\text{эф}} b_{\text{н}} F_{\text{нс}} - N_x = -0.368 \cdot 10^8 \text{ Н} < 0$	Сжатие	Растяжение
4	$M_z + N_x (y_N + H_{\text{эф}} - H) = -0.9 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{мм} < 0$ $2H_{\text{эф}} b_{\text{в}} F_{\text{вр}} - N_x = 0.59 \cdot 10^8 \text{ Н} > 0$ $-2H_{\text{эф}} b_{\text{в}} F_{\text{вс}} - N_x = -0.338 \cdot 10^8 \text{ Н} < 0$ $-M_z + N_x (H_{\text{эф}} - y_N) = -1.9 \cdot 10^8 \text{ Н} \cdot \text{мм} < 0$ $2H_{\text{эф}} b_{\text{н}} F_{\text{нр}} - N_x = 0.59 \cdot 10^8 \text{ Н} > 0$ $-2H_{\text{эф}} b_{\text{н}} F_{\text{нс}} - N_x = -0.338 \cdot 10^8 \text{ Н} < 0$	Сжатие	Сжатие

б) при $s = 1, 4$

$$F_{H_2}^* = \frac{1}{58 \cdot 10^3} \min \left(\left(\frac{0.348 \cdot 280}{3 \cdot 2} + 1 \right), \left(\frac{0.338 \cdot 280}{1.9 \cdot 2} + 1 \right) \right) = 0.297 \cdot 10^{-3} \text{ МПа};$$

$$F_e^* = \min(0.250 \cdot 10^{-3}, 0.297 \cdot 10^{-3}) = 0.250 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}.$$

Величина толщины полок определяется формулами (10)

$$\delta_e = \frac{280}{2 \cdot 290 \cdot 100 \cdot 0.297 \cdot 10^{-3} - 1} = 17.26 \text{ мм};$$

$$\delta_H = \frac{280}{2 \cdot 290 \cdot 100 \cdot 0.250 \cdot 10^{-3} - 1} = 20.74 \text{ мм}.$$

Рассмотренный численный пример подтверждает возможность проектирования балки при нескольких расчётных случаях на основе выбора таких предельных значений напряжений в полках, при которых условия прочности в остальных случаях соблюдаются. Показано также, что конечный результат в виде толщин полок не зависит от выбранного базового расчётного случая. Приведенная методика достаточно хорошо приспособлена для реализации на компьютере.

Список использованных источников

1. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов / В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
2. Карпов Я.С. Проектирование и конструктивно-технологические решения лонжеронного крыла из композиционных материалов: учеб. пособие / Я.С. Карпов, Ф.М. Гагауз, П.М. Гагауз. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2004. – 143 с.
3. Карпов Я.С. Определение значений пределов прочности при проектировании полок балки из композитов. Сборник научных трудов. Вып. 4 (60) / Я.С. Карпов, И.В. Лялюхина // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2009. – Вып. 4 (60).

Поступила в редакцию 03.02.2011.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.А. Фомичев,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*