

ПРИВЕДЕННЫЕ ПРЕДЕЛЫ ПРОЧНОСТИ КВАЗИОДНОРОДНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ТРУБЧАТЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И ОБШИВКАМИ

В работе [1] были получены приведенные физико-механические характеристики (ФМХ), а в статье [2] – приведенные пределы прочности трубчатых заполнителей для композитных трехслойных панелей. Для получения этих характеристик использован принцип равенства относительных деформаций растяжения-сжатия и сдвига трубчатого элемента и одинакового с ним по объему сплошного элемента по аналогии с идентичным подходом [3, 4], реализованным ранее для сотового заполнителя трехслойных панелей. Однако, как отмечено в [5], эти ФМХ позволяют выполнять расчет и проектирование панельных и оболочечных конструкций по модели сэндвичей, состоящих из несущих обшивок и заполнителя. В [5] также указано, что конструкцию с трубчатыми элементами и обшивками в ряде случаев целесообразно рассматривать как квазисплошной ортотропный композиционный материал (КМ), в котором трубки и обшивки «размазаны» по всему объему. Ниже изложена методика определения пределов прочности такого приведенного КМ при осевых нагрузках растяжения-сжатия и сдвиге. Как и в работах [1, 5], при получении приведенных характеристик использована идея о равенстве предельных относительных осевых и сдвиговых деформаций в типовом сплошном элементе КМ и равному ему по объему типовом элементе, учитывающем только содержащийся в нем материал КМ.

1. Приведенные пределы прочности ТЗ при растяжении и сжатии

1.1. Приведенный предел прочности КМ в направлении оси Z определится из таких условий.

Рассматривая тот же типовой элемент ТЗ, что и в случае определения $E_{привZ}^{+(-)}$ в работе [5] (рис. 1) и, принимая, что КМ деформируется упруго вплоть до разрушения, для приведенных относительных деформаций в направлении оси Z $\varepsilon_{привZ}^{+(-)}$, получаем:

$$\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon_{привZ}^{+(-)} = \frac{\sigma_{\varepsilon_{привZ}}^{+(-)}}{E_{привZ}^{+(-)}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\epsilon_{привZ}}^{+(-)}$, $E_{привZ}^{+(-)}$ - приведенные предел прочности и модуль упругости КМ в направлении оси Z при растяжении (+) и сжатии (-).

В то же время предельное относительное удлинение этого элемента при учете только материала трубки и присоединенной к ней обшивки равно

$$\epsilon_{mpZ}^{+(-)} = \frac{\sigma_{\epsilon_{ZKM}}^{+(-)}}{E_{ZKM}^{+(-)}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\epsilon_{ZKM}}^{+(-)}$, $E_{ZKM}^{+(-)}$ - предел прочности и модуль упругости КМ в направлении оси Z КМ трубки с присоединенной к ней КМ обшивки при растяжении (сжатии).

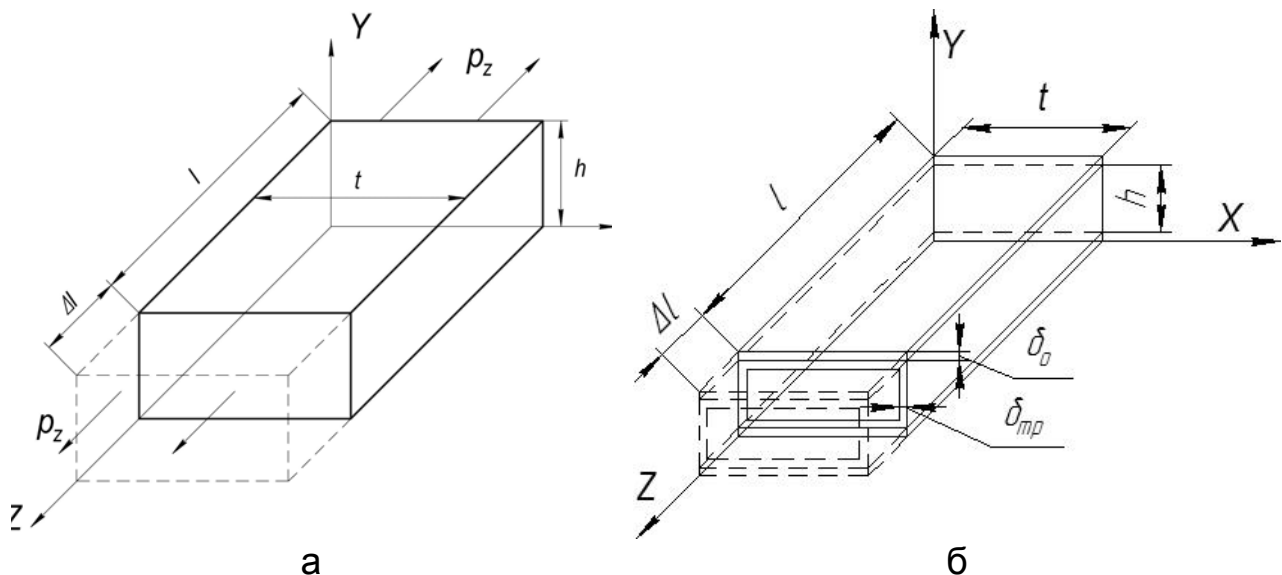


Рисунок 1 – Типовой трубчатый элемент КМ с присоединенной обшивкой при нагружении вдоль оси Z: а – сплошной элемент; б – реальный трубчатый элемент с несущими обшивками

Приравнявая (1) и (2) с учетом значений приведенного модуля упругости в направлении оси Z, определенного в работе [5], получаем:

- в случае растяжения

$$\sigma_{\epsilon_{привZ}}^{+} = \frac{2\sigma_{\epsilon_{KM}}^{+} h \delta_{mp}}{(h + 2\delta_o) t} \cdot \left(1 + \frac{t}{h} + \frac{t \delta_o}{\delta_{mp}} \frac{E_{Z_o}^{+}}{E_{Z_{mp}}^{+}} \right), \quad (3)$$

здесь $E_{Z_o}^{+}$, $E_{Z_{mp}}^{+}$ - модули упругости КМ обшивки и трубки;

- в случае сжатия без потери устойчивости

$$\sigma_{\text{вприв}Z}^- = \frac{2\sigma_{\text{в}KM}^- h \delta_{mp}}{(h + 2\delta_o)t} \cdot \left(1 + \frac{t}{h} + \frac{t\delta_o}{\delta_{mp}} \frac{E_{Z_o}^-}{E_{Z_{mp}}^-} \right); \quad (4)$$

- в случае потери устойчивости пластинчатого элемента трубки

$$\sigma_{\text{вприв}Z}^- = \sigma_{\text{кр}mpZ}, \quad (5)$$

где критические напряжения $\sigma_{\text{кр}mpZ}$ зависят от того, в каком из пластинчатых элементах трубки раньше наступит потеря устойчивости. Однако, как показано в [2], пластинчатый элемент трубки шириной t и достаточно большой длины l ($l \gg t$) в панели подкреплён её обшивкой и сжимается совместно с ней. Поэтому потеря устойчивости этого элемента практически невозможна вследствие значительной жесткости обшивки. Для пластинчатого элемента шириной h с учетом того, что устойчивость может терять только трубка толщиной $2\delta_{mp}$, в соответствии с работой [6], получим:

$$\sigma_{\text{кр}mpZ} \Big|_h = \frac{\pi^2 \sqrt{D_Z D_X}}{2h^2 \delta_{mp}} \left(1 + \frac{D}{\sqrt{D_Z D_X}} \right). \quad (6)$$

Здесь D_Z , D_X , D - цилиндрические жесткости ортотропной пластины:

$$D_Z = \frac{E_{ZKM}^- \delta_{mp}^3}{12(1 - \nu_{ZXKM} \nu_{XZKM})}; \quad (7)$$

$$D_X = \frac{E_{XKM}^- \delta_{mp}^3}{12(1 - \nu_{ZXKM} \nu_{XZKM})}; \quad (8)$$

$$D = D_Z \nu_{XZKM} + 2 \frac{G_{XZKM} \delta_{mp}^3}{12} = \left(\frac{E_{ZKM}^- \nu_{XZKM}}{1 - \nu_{XZKM} \nu_{ZXKM}} + 2G_{XZKM} \right) \cdot \frac{\delta_{mp}^3}{12}, \quad (9)$$

где ν_{ZXKM} , ν_{XZKM} - коэффициенты Пуассона материала трубки; G_{XZKM} - модуль сдвига материала трубки в плоскости XOZ.

Таким образом, в случае сжатия

$$\sigma_{\text{вприв}Z}^- = \min \left[\frac{2\sigma_{\text{в}KM}^- h \delta_{mp}}{(h + 2\delta_o)t} \cdot \left(1 + \frac{t}{h} + \frac{t\delta_o}{\delta_{mp}} \frac{E_{Z_o}^-}{E_{Z_{mp}}^-} \right), \sigma_{\text{кр}mpZ} \Big|_h \right], \quad (10)$$

где $\sigma_{\text{кр}mpZ} \Big|_h$ определяется по формуле (6).

1.2. Приведенный предел прочности КМ в направлении оси X $\sigma_{\epsilon_{\text{прив}X}}^{+(-)}$ определяется из таких условий.

Рассмотрим тот же типовой элемент КМ, что и в случае определения $E_{\text{прив}X}^{+(-)}$ в [5] (рис. 2). Принимая, как и ранее, что КМ деформируется упруго вплоть до разрушения, получаем предельную относительную деформацию

$$\epsilon_{\epsilon_{\text{прив}X}}^{+(-)} = \frac{\sigma_{\epsilon_{\text{прив}X}}^{+(-)}}{E_{\text{прив}X}^{+(-)}}. \quad (11)$$

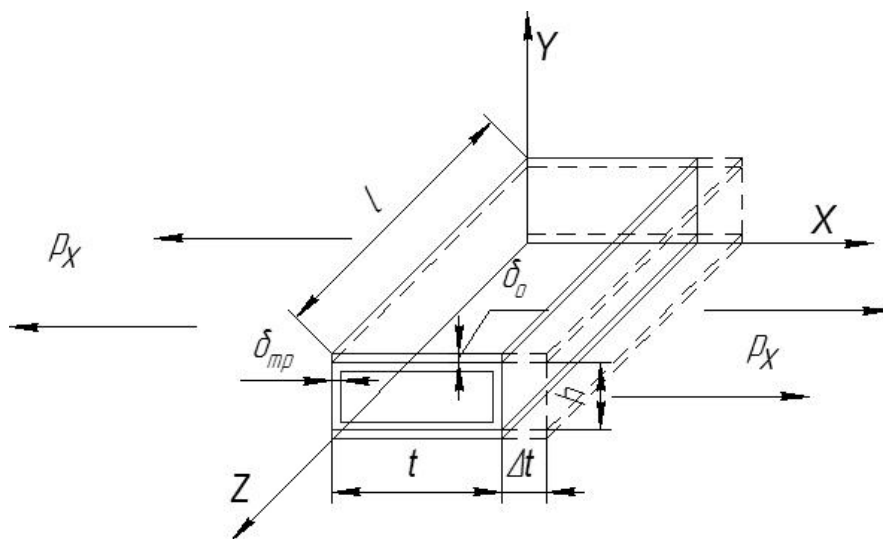


Рисунок 2 – Типовой трубчатый элемент КМ при нагружении в направлении оси X

При нагружении элемента растягивающей нагрузкой p_X его несущая способность без присоединенной обшивки определялась лишь пределом прочности клея – связующего $\sigma_{\epsilon_{\text{кл}}}$ [5]. Предельное относительное удлинение этого элемента при учете материала трубки с присоединенной обшивкой будет равно

$$\epsilon_{\text{тр}X}^{+(-)} = \epsilon_{\text{пред}0}^{+(-)} \frac{\sigma_{\epsilon_0}^{+(-)}}{E_{0X}^{+(-)}}, \quad (12)$$

где $\epsilon_{\text{пред}0}^{+(-)}$ – предельное относительное удлинение КМ обшивки;

$\sigma_{\epsilon_0}^{+(-)}$ – предел прочности КМ обшивки при растяжении (сжатии).

Формула (12) требует дополнительного пояснения. При рассмотрении в [5] КМ как трубчатого элемента трехслойной панели

$\varepsilon_{трХ}$ определялось как

$$\varepsilon_{трХ} = \frac{\sigma_{вкл}}{E_{ХКМ}^+}. \quad (13)$$

Использование в [5] формулы (13) приводит к несколько завышенному предельному значению $\varepsilon_{трХ}$, так как в момент

достижения $\varepsilon_{трХ}$ напряжения в клее составляют величину $\sigma_{кл}^* < \sigma_{вкл}$.

Однако вследствие высокой степени нелинейности диаграммы $\sigma - \varepsilon$ для клея вблизи его предела прочности формула (13) вносит малую погрешность (рис. 3). В то же время КМ обшивки, как правило, имеет более высокий предел прочности, чем КМ трубки, наматываемой на оправку нитью или лентой под углами $\pm\varphi^*$.

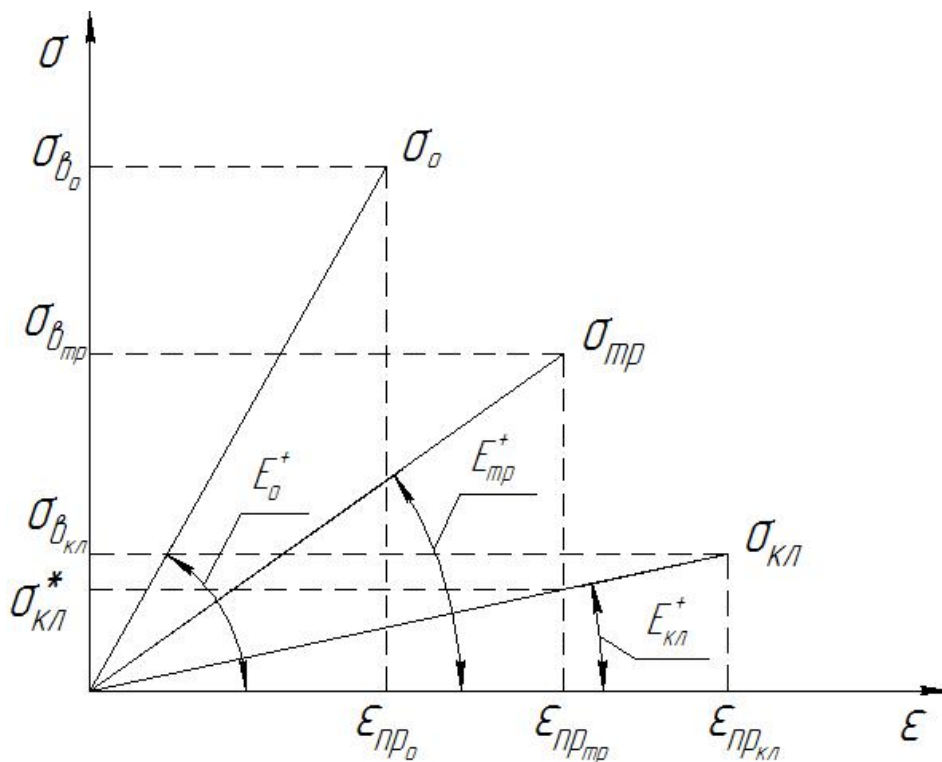


Рисунок 3 – Диаграмма растяжения КМ обшивки, трубки и клея при допущении о линейном физическом законе до разрушения всех элементов, $\sigma_{кл}^*$ – напряжение в клеевом соединении при $\varepsilon_{пр_{тр}}$

* Чаще всего $\varphi=45^\circ$ к оси трубки

Поэтому отнесение σ_{ϵ_0} к модулю упругости КМ трубки $E_{X_{KM}}^+$ внесло бы существенную погрешность в предельное значение относительной деформации приведенного КМ (рис. 3).

Приравнявая (11) и (12), с учетом значений приведенного модуля упругости КМ в направлении оси X , определенного в работе [5], равного

$$E_{\text{прив}X}^+ = \frac{2\delta_{\text{тр}} E_{X_{KM}}^{+(-)}}{(h + 2\delta_0)} \cdot \left(1 + \frac{\delta_0}{\delta_{\text{тр}}} \frac{E_{oX}^{+(-)}}{E_{X_{KM}}^{+(-)}} + \frac{h}{\delta_{\text{тр}}} \frac{E_{\text{тКМ}}}{E_{KM}^{+(-)}} \right), \quad (14)$$

где $E_{\text{тКМ}}$ - модуль упругости КМ трубчатого элемента в нормальном к его толщине направлении, получим:

- в случае растяжения

$$\sigma_{\epsilon_{\text{прив}X}}^+ = 2\sigma_{\epsilon_0}^+ \frac{E_{X_{KM}}^+}{E_{oX}^+} \frac{\delta_{\text{тр}}}{(h + 2\delta_0)} \cdot \left(1 + \frac{\delta_0}{\delta_{\text{тр}}} \frac{E_{oX}^+}{E_{X_{KM}}^+} + \frac{h}{\delta_{\text{тр}}} \frac{E_{\text{тКМ}}}{E_{KM}^+} \right); \quad (15)$$

- в случае сжатия без потери устойчивости элемента трубки-пластины с присоединенной к ней обшивкой шириной l и длиной t его прочность определяется не прочностью клея – связующего как при растяжении, а пределом прочности КМ обшивки в направлении оси X $\sigma_{\epsilon_{oX}}^-$. Тогда

$$\frac{\sigma_{\epsilon_{\text{прив}X}}^-}{E_{\text{прив}X}^-} = \frac{\sigma_{\epsilon_{oX}}^-}{E_{oX}^-} \quad (16)$$

или с учетом значения $E_{\text{прив}X}^-$, определенного по формуле (14) при значениях $E_{X_{KM}}^-$ и E_{oX}^- аналогично (15), получим:

$$\sigma_{\epsilon_{\text{прив}X}}^- = 2\sigma_{\epsilon_0}^- \frac{E_{X_{KM}}^-}{E_{oX}^-} \frac{\delta_{\text{тр}}}{(h + 2\delta_0)} \cdot \left(1 + \frac{\delta_0}{\delta_{\text{тр}}} \frac{E_{oX}^-}{E_{X_{KM}}^-} + \frac{h}{\delta_{\text{тр}}} \frac{E_{\text{тКМ}}}{E_{KM}^-} \right). \quad (17)$$

Как уже отмечалось в п.1.1, сжатый конструктивный элемент трубки шириной l и длиной t подкреплен жесткой обшивкой панели, вследствие чего потеря его устойчивости исключается и приведенный предел прочности КМ в направлении оси X определяется по формуле (17).

1.3. Приведенный предел прочности КМ в направлении оси Y $\sigma_{\text{прив}Y}^{+(-)}$ определяется из таких условий.

Типовой элемент КМ в плоскости XOY принимается таким же, что и в случае определения $E_{\text{прив}Y}^{+(-)}$ (рис. 4). Как и ранее, считается, что приведенный КМ деформируется упруго вплоть до разрушения.

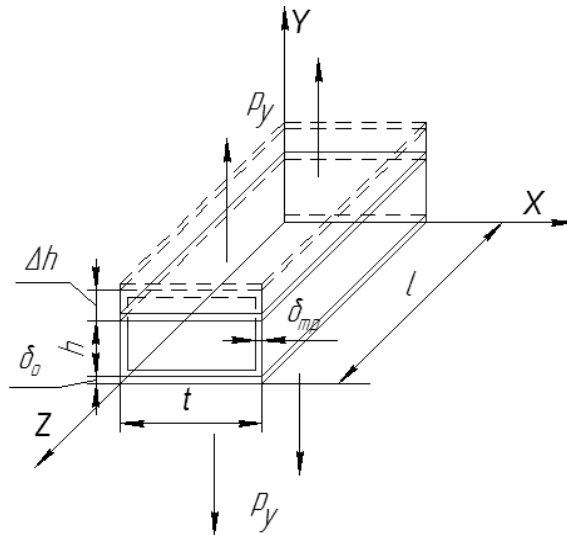


Рисунок 4 – Типовой конструктивный элемент ТЗ при нагружении в направлении оси Y

Тогда получим предельную относительную деформацию

$$\varepsilon_{\text{прив}}^{+(-)} = \frac{\sigma_{\text{прив}Y}^{+(-)}}{E_{\text{прив}Y}^{+(-)}}, \quad (18)$$

где

$$E_{\text{прив}Y}^{+(-)} = \frac{2}{t} \delta_{mp} E_{Y_{KM}}^{+(-)} \cdot \left(1 + \frac{t}{\delta_{mp}} \frac{E_{m_o}}{E_{Y_{KM}}^{+(-)}} + \frac{t}{\delta_{mp}} \frac{E_{m_{KM}}}{E_{Y_{KM}}^{+(-)}} \right). \quad (19)$$

В то же время предельная относительная деформация этого элемента при учете только материала трубки и обшивки

$$\varepsilon_{mpY}^{+(-)} = \frac{\sigma_{\text{кМ}Y}^{+(-)}}{E_{Y_{KM}}^{+(-)}}. \quad (20)$$

Приравнявая (18) и (20), с учетом значений приведенного модуля упругости $E_{\text{прив}Y}^{+(-)}$, определенного в работе [5], получаем:

- в случае растяжения

$$\sigma_{\text{прив}Y}^+ = \frac{2}{t} \delta_{mp} \sigma_{\text{вкМ}Y}^+ \cdot \left(1 + \frac{t}{\delta_{mp}} \frac{E_{m0}}{E_{Y_{KM}}^+} + \frac{t}{\delta_{mp}} \frac{E_{mKM}}{E_{Y_{KM}}^+} \right); \quad (21)$$

- в случае сжатия без потери устойчивости элемента трубки с присоединенной обшивкой

$$\sigma_{\text{прив}Y}^- = \frac{2}{t} \delta_{mp} \sigma_{\text{вкМ}Y}^- \cdot \left(1 + \frac{t}{\delta_{mp}} \frac{E_{m0}}{E_{Y_{KM}}^-} + \frac{t}{\delta_{mp}} \frac{E_{mKM}}{E_{Y_{KM}}^-} \right); \quad (22)$$

- в случае сжатия с потерей устойчивости пластинчатого элемента трубки шириной h и толщиной $2\delta_{mp}$ и ($l \gg h$) из формулы (5) при $h/l \rightarrow 0$

$$\sigma_{\text{кр}mpY} = \frac{\pi^2 D_Z}{2h^2 \delta_{mp}}, \quad (23)$$

где D_Z - цилиндрическая жесткость трубчатого элемента в направлении оси Z

$$D_Z = \frac{2E_{Z_{KM}}^- \delta_{mp}^3}{3(1 - \nu_{YZ_{KM}} \nu_{ZY_{KM}})}. \quad (24)$$

Таким образом, в случае сжатия

$$\sigma_{\text{прив}Y}^- = \min \left[\frac{2\delta_{mp}}{t} \sigma_{\text{вкМ}Y}^-, \sigma_{\text{кр}mpY} \right], \quad (25)$$

где $\sigma_{\text{кр}mpY}$ определяется по формуле (23), а $\sigma_{\text{вкМ}Y}^-$ - по формуле (22).

2. Приведенные пределы прочности КМ при сдвиге

Приведенные пределы прочности КМ при сдвиге определим при условии упругого деформирования КМ трубчатого элемента с присоединенной обшивкой до разрушения.

2.1. Предел прочности $\tau_{\text{прив}XZ}$ определим из условия равенства относительных углов сдвига $\gamma_{\text{прив}XZ}$ и $\gamma_{\text{кМ}XZ}$ (рис. 5):

$$\frac{\tau_{\text{прив}XZ}}{G_{\text{прив}XZ}} = \frac{\tau_{\text{кМ}XZ}}{G_{\text{кМ}XZ}}, \quad (26)$$

откуда с учетом значения $G_{\text{прив}XZ}$, полученного в [5] и равного

$$G_{\text{привХЗ}} = \frac{2\delta_{\text{mp}}}{(h + 2\delta_o)} \sigma_{\text{кМХЗ}} \cdot \left(1 + \frac{\delta_o}{\delta_{\text{mp}}} \frac{G_{\text{ХЗ}o}}{G_{\text{ХЗкМ}}} + \frac{h}{t} \right), \quad (27)$$

имеем

$$\tau_{\text{впривХЗ}} = \tau_{\text{вкМХЗ}} \frac{2\delta_{\text{mp}}}{(h + 2\delta_o)} \cdot \left(1 + \frac{\delta_o}{\delta_{\text{mp}}} \frac{G_{\text{ХЗ}o}}{G_{\text{ХЗкМ}}} + \frac{h}{t} \right). \quad (28)$$

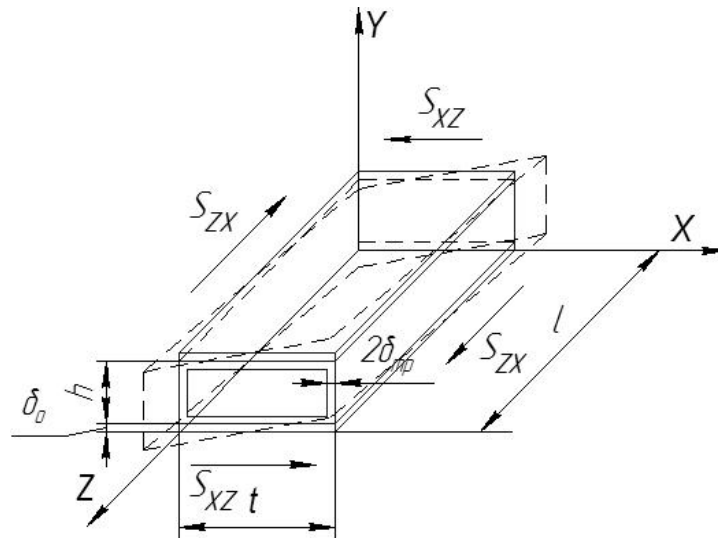


Рисунок 5 – Типовой трубчатый элемент КМ с присоединенной обшивкой при нагружении сдвигом в плоскости XOZ

В случае потери устойчивости конструктивного элемента критическое напряжения определим по формуле [6]

$$\tau_{\text{крХЗ}} = \frac{\pi^2 \sqrt{D_X D_Z}}{t^2 \left(\delta_{\text{mp}} + \delta_o \frac{G_{o\text{ХЗ}}}{G_{\text{mp}\text{ХЗ}}} \right)} \sqrt{4 + 3 \frac{\sqrt{D_X D_Z}}{D} + \frac{D}{\sqrt{D_X D_Z}}}, \quad (29)$$

где цилиндрические жесткости D и D_Y , D_X находим по формулам из работы [6]:

С учетом (28) и (29)

$$\tau_{\text{впривХЗ}} = \min\{(28), (29)\}. \quad (30)$$

Конструктивный элемент трубки в плоскости XOZ подкреплен жесткой на сдвиг обшивкой панели, поэтому потеря его устойчивости не реализуется.

2.2. Предел прочности приведенного КМ при сдвиге $\tau_{\text{прив}YZ}$ (рисунок 6) при отсутствии потери устойчивости пластинчатого элемента с присоединенной обшивкой, определяется аналогично п.2.1 из соотношения

$$\frac{\tau_{\text{прив}YZ}}{G_{\text{прив}YZ}} = \frac{\tau_{\text{мп}YZ}}{G_{\text{км}YZ}}. \quad (31)$$

где $G_{\text{прив}YZ}$ согласно [5] имеет вид

$$G_{\text{прив}YZ} = \frac{2\delta_{\text{мп}}}{(h + 2\delta_o)} G_{\text{км}YZ} \cdot \left(1 + \frac{\delta_o}{\delta_{\text{мп}}} \frac{G_{YZo}}{G_{\text{мп}YZ}} + \frac{h}{t} \right). \quad (32)$$

Тогда

$$\tau_{\text{прив}YZ} = \tau_{\text{мп}YZ} \frac{2\delta_{\text{мп}}}{(h + 2\delta_o)} \cdot \left(1 + \frac{\delta_o}{\delta_{\text{мп}}} \frac{G_{YZo}}{G_{\text{мп}YZ}} + \frac{h}{t} \right). \quad (33)$$

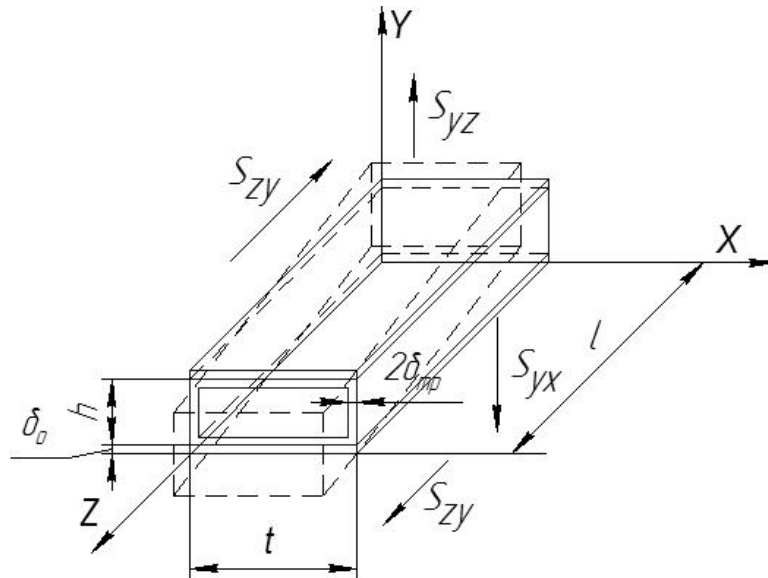


Рисунок 6 – Типовой трубчатый элемент КМ с присоединенной обшивкой при нагружении в плоскости YOZ

В случае потери устойчивости рассматриваемого элемента, $\tau_{\text{кр}YZ}$ определится по формуле аналогичной (29)

$$\tau_{крYZ} = \frac{\pi^2 \sqrt{D_Y D_Z}}{t \cdot \left(\delta_{mp} + \delta_o \frac{G_{oYZ}}{G_{mpYZ}} \right)^2} \sqrt{4 + 3 \frac{\sqrt{D_Y D_Z}}{D} + \frac{D}{\sqrt{D_Y D_Z}}}, \quad (34)$$

где цилиндрические жесткости D и D_Y находим по формулам из работы [6]

$$D_Y = \frac{2E_{YKM}^- \left(\delta_{mp} + \delta_o \frac{E_{oY}^-}{E_{YKM}^-} \right)^3}{3(1 - \nu_{привYZKM} \nu_{привZYKM})}, \quad (35)$$

$$D = D_Y \nu_{YZKM} + 2 \frac{G_{KMZY} \left(\delta_{mp} + \delta_o \frac{G_{YZo}}{G_{mpYZ}} \right)^3}{12}. \quad (36)$$

Теоретически возможна потеря устойчивости и элемента, объединяющего сдвоенные стенки соседних трубок (рис. 7)

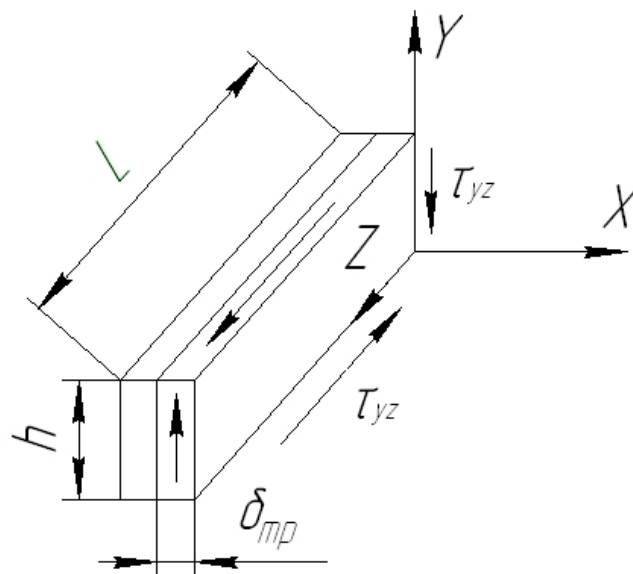


Рисунок 7 – Устойчивость элемента трубки при сдвиге в плоскости YOZ

В этом случае

$$\tau_{крYZ} = \frac{\pi^2 \sqrt{D_Y D_Z}}{4h\delta_{mp}^2} \sqrt{4 + 3 \frac{\sqrt{D_Y D_Z}}{D} + \frac{D}{\sqrt{D_Y D_Z}}}. \quad (37)$$

Таким образом, предел прочности при сдвиге в плоскости YOZ $\tau_{впривYZ}$ должен приниматься в соответствии с минимальным значением согласно формулам (33), (34) и (37):

$$\tau_{впривYZ} = \min[(33), (34), (37)]. \quad (38)$$

2.3. Предел прочности $\tau_{впривXY}$ (рис. 8) определяется по аналогии с п. 2.1 и п. 2.2 с учетом значения модуля сдвига $G_{привXY}$, полученного в работе [5]:

- при отсутствии потери устойчивости

$$\frac{\tau_{впривXY}}{G_{привXY}} = \frac{\tau_{вкмXY}}{G_{кмXY}}, \quad (39)$$

где

$$G_{привXZ} = \frac{2\delta_{mp}}{(h + 2\delta_o)} G_{кмXY} \cdot \left(1 + \frac{\delta_o}{\delta_{mp}} \frac{G_{XYo}}{G_{mpXY}} + \frac{h}{t} \right); \quad (40)$$

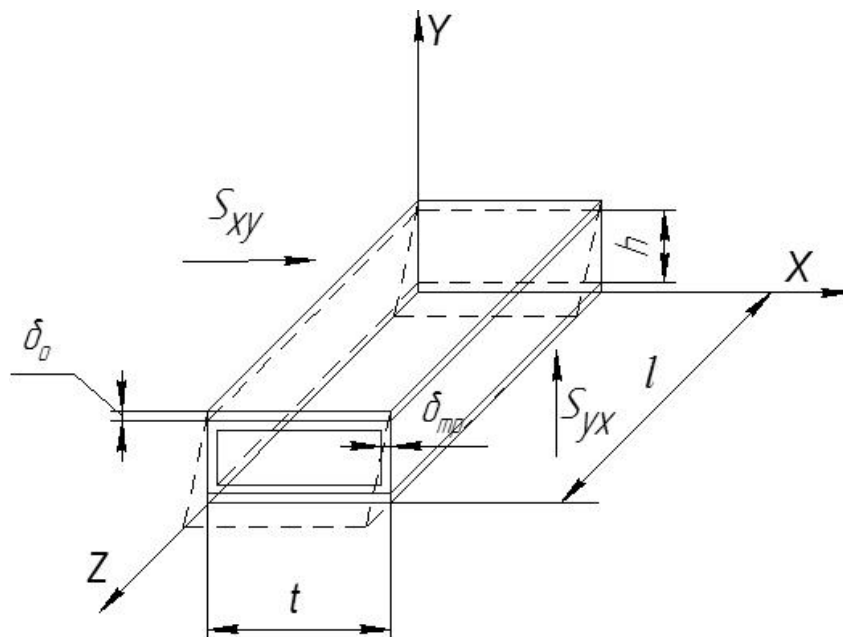


Рисунок 8 – Типовой трубчатый элемент КМ с присоединенной обшивкой при нагружении в плоскости XOY

С учетом (40)

$$\tau_{впривXY} = 2\tau_{вкмXY} \frac{\delta_{mp}}{(h + 2\delta_o)} \cdot \left(1 + \frac{\delta_o}{\delta_{mp}} \frac{G_{XYo}}{G_{mpYZ}} + \frac{h}{t} \right); \quad (41)$$

- в случае потери устойчивости грань, шарнирно закрепленная в элементе КМ и сдвигаемая в плоскости XOZ, обретает критические напряжения, находим по приближенной формуле

$$\tau_{крXY} = \frac{2\pi^2}{\left(\delta_{mp} + \delta_o \frac{G_{oXZ}}{G_{mpXZ}} \right)} \sqrt{(\sqrt{D_X D_Z} + D)(3D_Z + D \sqrt{\frac{D_Z}{D_X}})}, \quad (42)$$

где цилиндрические жесткости D и D_Z , D_X определяются зависимостями работы [6];

- в случае потери устойчивости шарнирно закрепленная грань элемента КМ, сдвигаемая в плоскости XOY и имеющая толщину двух склеенных толщин трубок и длину h , обретает критические напряжения с учетом того, что $2\delta_{mp} \ll h$ [6], определяемые приближенной формулой

$$\tau_{крXY} = \frac{\pi^2 \sqrt{D_X D_Y}}{4\delta_{mp}^2 h} \sqrt{4 + 3 \frac{\sqrt{D_Y D_X}}{D} + \frac{D}{\sqrt{D_Y D_X}}}. \quad (43)$$

Таким образом $\tau_{впривXY}$ необходимо принять в соответствии с наименьшим значением, определяемым по формулам (41), (42) и (43):

$$\tau_{впривYZ} = \min[(41), (42), (43)]. \quad (44)$$

Список использованных источников

1. Гайдачук В.Е. Приведенные физико-механические характеристики трубчатого заполнителя для трехслойных конструкций летательных аппаратов / В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, Е.В. Омельченко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2009. – Вып. 44. – С.67 – 78.

2. Омельченко Е.В. Приведенные пределы прочности трубчатых заполнителей для композитных трехслойных панелей летательных

аппаратов / Вопросы проектирования и производства конструкции летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2009. – Вып. 4 (60). – С. 34 – 42.

3. Ендогур А.И. Сотовые конструкции. Выбор параметров и проектирование / А.И. Ендогур, М.В. Вайнберг, К.М. Иерусалимский. – М.: Машиностроение, 1986. – 200 с.

4. Панин В.Ф. Конструкции с заполнителем: справочник / В.Ф. Панин, Ю.А. Гладков. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.

5. Кириченко В.В. Приведенные физико-механические характеристики композиционного материала с трубчатыми элементами / В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев, Е.В. Омельченко, А.В. Губа // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2010. – Вып. 48. – С. 154 – 166.

6. Бажанов В.Л. Пластинки и оболочки из стеклопластиков: учеб. пособие / В.Л. Бажанов, И.И. Гольденблат, В.А. Копнов и др. – М.: Высш. шк., 1970. – 408 с.

Поступила в редакцию 10.03.2011.

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