

ПРИВЕДЕННЫЕ ПРЕДЕЛЫ ПРОЧНОСТИ ТРУБЧАТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ КОМПОЗИТНЫХ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В работе [1] приведена методика предэскизного проектирования панельных композитных конструкций летательных аппаратов с трубчатым наполнителем, получившим широкое применение в агрегатах отечественных самолетов АНТК «Антонов» благодаря ряду преимуществ перед сотовыми и гофровыми наполнителями [2 - 3].

В работе [4] синтезированы физико-механические характеристики трубчатых наполнителей, необходимые для проектирования этого класса конструкций и их поверочного расчета с использованием современных компьютерных технологий на базе широко применяемых пакетов, реализующих конечноэлементные модели.

Если приведенные физико-механические характеристики трубчатого наполнителя (ТЗ) необходимы для определения напряженно-деформированного состояния в соответствующем слое сложной панели (компонент матрицы жесткости физического закона этого слоя) при заданных внешних нагрузках, то приведенные пределы прочности наполнителя позволяют проверить его прочность по принятому критерию прочности.

Ниже изложена методика синтеза приведенных характеристик пределов прочности ТЗ из полимерных композиционных материалов (КМ) при растяжении, сжатии и сдвиге.

Как и в работе [4], при получении приведенных характеристик использована идея о равенстве предельных относительных осевых и сдвиговых деформаций в типовом сплошном элементе ТЗ и равному ему по объему типовом элементе, учитывающем только содержащийся в нем материал ТЗ.

1. Приведенные пределы прочности ТЗ при растяжении и сжатии

1.1. Приведенный предел прочности ТЗ в направлении оси Z определится из следующих условий.

Рассматривая тот же типовой элемент ТЗ, что и в случае определения $E_{привZ}^{+(-)}$ в работе [4] (рис. 1), и принимая, что КМ ТЗ деформируется упруго вплоть до разрушения, получаем для приведенных относительных деформаций в направлении оси Z $\varepsilon_{привZ}^{+(-)}$:

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

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

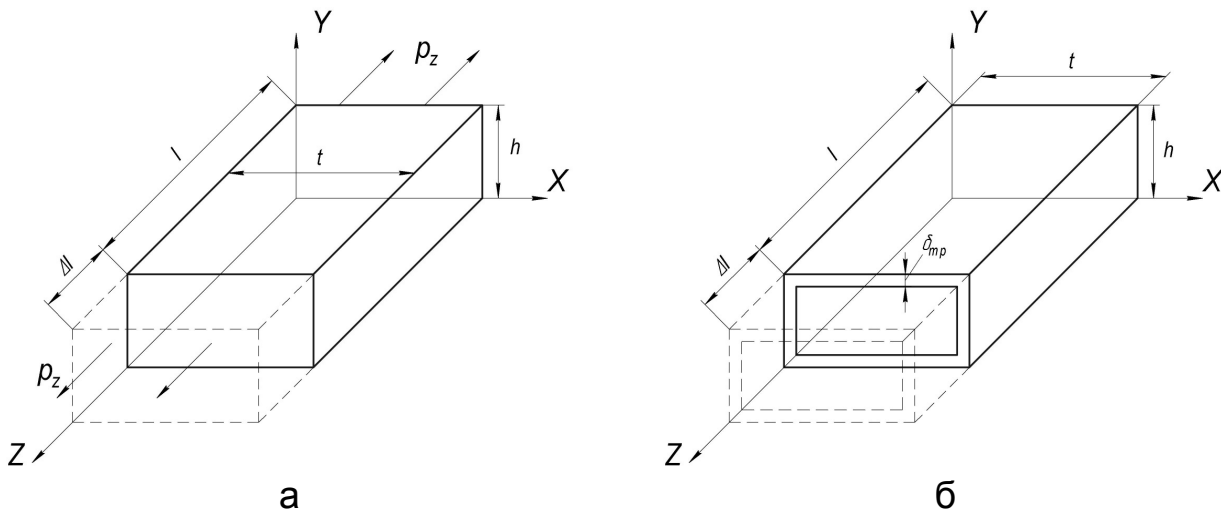


Рисунок 1 – Типовой элемент ТЗ для определения модуля упругости $E_{\text{прив}Z}^{+(-)}$:

а – сплошной элемент; б – реальный трубчатый элемент

В то же время предельное относительное удлинение этого элемента при учете только материала трубки

$$\varepsilon_{\text{пр}Z}^{+(-)} = \frac{\sigma_{\text{ЗКМ}}^{+(-)}}{E_{\text{ЗКМ}}^{+(-)}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{ЗКМ}}^{+(-)}$, $E_{\text{ЗКМ}}^{+(-)}$ - предел прочности и модуль упругости КМ в направлении оси Z.

Приравняв (1) и (2), с учетом значений приведенного модуля упругости в направлении оси Z, определенного в работе [4], получим:

- в случае растяжения

$$\sigma_{\text{прив}Z}^{+} = \frac{\sigma_{\text{ЗКМ}}^{+}}{E_{\text{ЗКМ}}^{+}} \cdot \frac{2(t+h)\delta_{\text{mp}}}{ht} \sigma_{\text{ЗКМ}}^{+}; \quad (3)$$

- в случае сжатия без потери устойчивости элемента трубки толщиной δ_{mp} и шириной t

$$\sigma_{\text{прив}Z}^{-} = \frac{2(t+h)\delta_{\text{mp}}}{ht} \sigma_{\text{ЗКМ}}^{-}; \quad (4)$$

- в случае потери устойчивости пластинчатого элемента трубки:

$$\sigma_{\epsilon_{привZ}}^- = \sigma_{крmpZ}, \quad (5)$$

где критические напряжения $\sigma_{крmpZ}$ зависят от того, в каком из пластинчатых элементах трубки раньше наступит потеря устойчивости.

Однако пластинчатый элемент трубки шириной t и достаточно большой длины l ($l \gg t$) в панели подкреплена ее 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 [5]

$$\sigma_{крmpZ} = \frac{\pi^2 \sqrt{D_Z D_X}}{2h^2 \delta_{mp}} \left(1 + \frac{D}{\sqrt{D_Z D_X}} \right). \quad (6)$$

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

$$\sigma_{\epsilon_{привZ}}^- = \min \left[\sigma_{\epsilon_{KMZ}}^- \frac{2(t+h)\delta_{mp}}{ht}, \sigma_{крmpZ} \Big|_h \right], \quad (10)$$

где $\sigma_{крmpZ} \Big|_h$ определяется формулой (6).

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

Рассмотрим тот же типовой элемент ТЗ, что и в случае определения $E_{\text{прив}X}^{+(-)}$ в [4] (рис. 2).

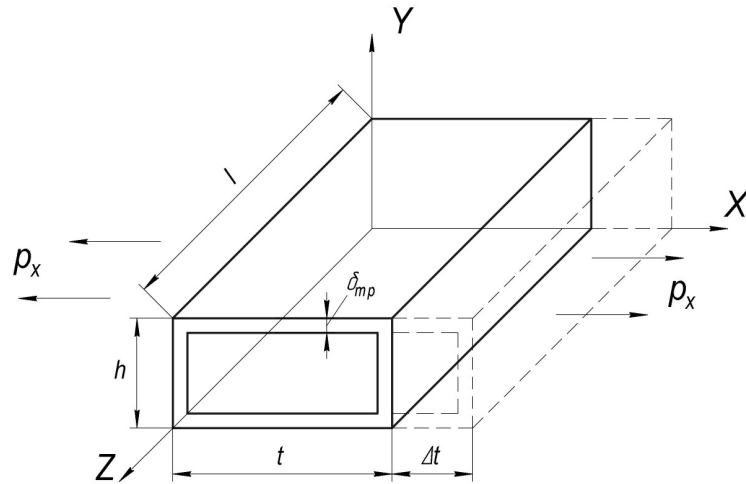


Рисунок 2 – Типовой конструктивный элемент ТЗ при нагружении в направлении оси X

Принимая, как и ранее, что КМ ТЗ деформируется упруго вплоть до разрушения, получаем предельную относительную деформацию

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

При нагружении элемента растягивающей нагрузкой P_X его несущая способность определится пределом прочности клея – связующего $\sigma_{\text{екл}}$. Так, предельное относительное удлинение этого элемента при учете только материала трубки

$$\epsilon_{\text{тр}X} = \frac{\sigma_{\text{екл}}}{E_{X\text{км}}^+}. \quad (12)$$

Приравнявая (11) и (12), с учетом значений приведенного модуля упругости в направлении оси X , определенного в работе [4], равного

$$E_{\text{прив}}^+ = \frac{2\delta_{\text{тр}}}{h} E_{X\text{км}}^+. \quad (13)$$

получаем:

- в случае растяжения

$$\sigma_{\text{прив}X}^+ = E_{\text{км}}^+ \frac{2\delta_{\text{тр}}}{h} \frac{\sigma_{\text{екл}}}{E_{\text{екл}}}; \quad (14)$$

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

$$\frac{\sigma_{впривХ}^-}{E_{привХ}^-} = \frac{\sigma_{вкмХ}^-}{E_{Хкм}^-} \quad (15)$$

или с учетом значения $E_{привХ}^-$, определенного в [4] и равного

$$E_{привХ}^- = \frac{2\delta_{mp}}{h} E_{Хкм}^-, \quad (16)$$

получим

$$\sigma_{впривХ}^- = \sigma_{вкмХ}^- \frac{2\delta_{mp}}{h}. \quad (17)$$

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 ТЗ в направлении оси X определяется формулой (17).

1.3. Приведенный предел прочности ТЗ в направлении оси Y $\sigma_{впривY}^{+(-)}$ определяется из следующих условий.

Типовой элемент ТЗ в плоскости XOY принимается таким же, что и в случае определения $E_{привY}^{+(-)}$ (рис. 3).

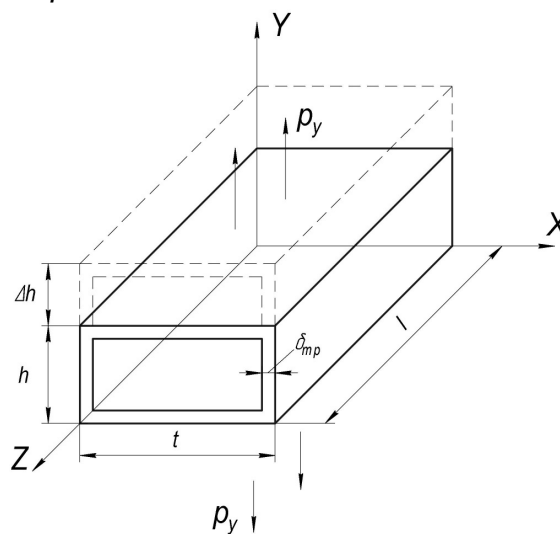


Рисунок 3 – Типовой конструктивный элемент ТЗ при нагружении в направлении оси Y

Как и ранее, считается, что КМ ТЗ деформируется упруго вплоть до разрушения.

Тогда получим предельную относительную деформацию

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

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

$$\varepsilon_{\text{тр}Y}^{+(-)} = \frac{\sigma_{\text{км}Y}^{+(-)}}{E_{Y\text{км}}^{+(-)}}. \quad (19)$$

Приравнявая (18) и (19), с учетом значений приведенного модуля упругости $E_{\text{прив}X}^{+(-)}$, определенного в работе [4], получаем:

- в случае растяжения

$$\frac{\sigma_{\text{прив}Y}^+}{E_{\text{прив}Y}^+} = \frac{\sigma_{\text{км}Y}^+}{E_{Y\text{км}}^+} \quad (20)$$

или

$$\sigma_{\text{прив}Y}^+ = \frac{2\delta_{\text{тр}}\sigma_{\text{км}Y}^+}{t}; \quad (21)$$

- в случае сжатия без потери устойчивости элемента трубки

$$\sigma_{\text{прив}Y}^- = \frac{2\delta_{\text{тр}}}{t} \sigma_{\text{км}Y}^-; \quad (22)$$

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

$$\sigma_{\text{кртр}Y} = \frac{\pi^2 D_Z}{2h^2 \delta_{\text{тр}}}, \quad (23)$$

где D_Z - цилиндрическая жесткость трубчатого элемента в направлении оси Z :

$$D_Z = \frac{2E_{Z\text{км}}^- \delta_{\text{тр}}^3}{3(1 - \nu_{YZ\text{км}} \nu_{ZY\text{км}})}. \quad (24)$$

Таким образом, в случае сжатия

$$\sigma_{\text{прив}Y}^- = \min \left[\frac{2\delta_{\text{тр}}}{t} \sigma_{\text{км}Y}^-, \sigma_{\text{кртр}Y} \right], \quad (25)$$

где $\sigma_{\text{кртр}Y}$ определяется формулой (23).

2. Приведенные пределы прочности при сдвиге ТЗ

Приведенные пределы прочности ТЗ при сдвиге определяются при условии упругого деформирования КМ ТЗ до разрушения.

2.1. Предел прочности $\tau_{\text{вХЗ}}$ определяется из условия равенства относительных углов сдвига $\gamma_{\text{привХЗ}}$ и $\gamma_{\text{трХЗ}}$:

$$\frac{\tau_{\text{впривХЗ}}}{G_{\text{привХЗ}}} = \frac{\tau_{\text{втрХЗ}}}{G_{\text{кмХЗ}}}. \quad (26)$$

Откуда с учетом значения $G_{\text{привХЗ}}$, полученного в [4]:

$$\tau_{\text{впривХЗ}} = \frac{2\delta_{\text{тр}}}{h} \tau_{\text{вкмХЗ}}. \quad (27)$$

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

2.2. Предел прочности при сдвиге $\tau_{\text{впривYZ}}$ определяется аналогичным образом с учетом значения модуля сдвига $G_{\text{привYZ}}$, полученного в работе [4]:

$$\tau_{\text{впривYZ}} = \frac{2\delta_{\text{тр}}}{h} \tau_{\text{вкмYZ}}. \quad (28)$$

В противном случае предел прочности в плоскости YOZ определяется формулой, приведенной в работе [5] для пластинчатого элемента (рис. 4).

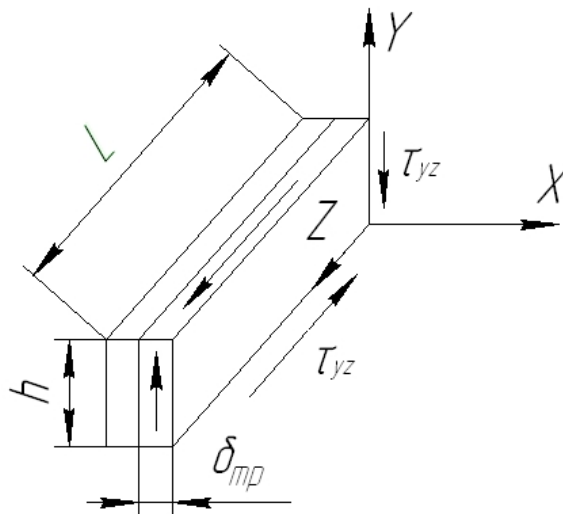


Рисунок 4 – Устойчивость элемента трубки при сдвиге в плоскости YOZ

Критическое напряжение $\tau_{крYZ}$ определяется формулой

$$\tau_{крYZ} = \frac{\pi^2 \sqrt{D_Y D_Z}}{h^2 \delta_{mp}} \sqrt{4 + 3 \frac{\sqrt{D_Y D_Z}}{D} + \frac{D}{\sqrt{D_Y D_Z}}}, \quad (29)$$

где D и D_Y определяются формулами из работы [5]:

$$D_Y = \frac{2E_{YKM}^- \delta_{mp}^3}{3(1 - \nu_{YZKM} \nu_{ZYKM})}, \quad (30)$$

$$D = D_Y \nu_{YZKM} + 2 \frac{G_{XZKM} \delta_{mp}^3}{12} = \left(\frac{E_{XKM} \nu_{ZYKM}}{1 - \nu_{YZKM} \nu_{ZYKM}} + 2G_{XZKM} \right) \cdot \frac{\delta_{mp}^3}{12}. \quad (31)$$

D_Z определяется зависимостью (24).

Таким образом, предел прочности при сдвиге в плоскости YOZ определяется как наименьшее из значений:

$$\tau_{\text{вприв}YZ} = \min \left[\frac{2\delta_{mp}}{h} \tau_{\text{вкм}YZ}, \tau_{крYZ} \right], \quad (32)$$

где $\tau_{крYZ}$ определяется формулой (29).

2.3. Предел прочности $\tau_{\text{вприв}XY}$ определяется также по аналогии с п. 2.1 и п. 2.2 с учетом значения модуля сдвига $G_{\text{прив}XY}$, полученного в работе [4]:

$$\tau_{\text{вприв}XY} = \frac{2\delta_{mp}}{h} \tau_{\text{вкм}XY}. \quad (33)$$

Потеря устойчивости элементов трубки при действии сдвигающих сил в плоскости XOY не реализуется вследствие подкрепления жесткой на сдвиг обшивкой панели.

Список использованных источников

1. Гайдачук В.Е. Методика предэскизного проектирования панельных композитных конструкций летательных аппаратов с трубчатым наполнителем / В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, Е.В. Омельченко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». - Х., 2009. - Вып.59 (3) – С. 73 - 84.

2. Цариковский В.И. АНТК «Антонов» – лидер в создании конструкций из композиционных материалов в авиастроении // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. – 2006. – №1 (27). – С. 25 - 31.

3. 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.

4. Гайдачук В.Е. Приведенные физико-механические характеристики трубчатого наполнителя 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.

5. 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 21.11.09.

*Рецензент: канд. техн. наук, проф. В.В. Кириченко
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*