

Приведенные физико-механические характеристики трубчатого заполнителя для трехслойных конструкций летательных аппаратов

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Получены аналитические зависимости приведенных физико-механических характеристик трубчатого заполнителя из полимерных композиционных материалов для трехслойных конструкций, широко применяемых в агрегатах летательных аппаратов интегральной сборки. Идея синтеза приведенных физико-механических характеристик основана на реализации апробированного для сотовых конструкций принципа равенства относительных деформаций условного сплошного типового элемента трубки и одинакового с ним по объему элемента.

Ключевые слова: трубчатый заполнитель, трехслойные конструкции, полимерные композиционные материалы, приведенные физико-механические характеристики

Трубчатый заполнитель (ТЗ) применяют в трехслойных конструкциях отечественных самолетов АНТК «Антонов» взамен сотового [1-2]. Этот тип заполнителя обеспечивает более высокую жесткость по сравнению с сотовым в направлении расположения трубок, может использоваться как конструктивный элемент интегральной конструкции, изготавливаемой из полимерных композиционных материалов (ПКМ) за одну технологическую операцию. Эксплуатационным преимуществом конструкций с ТЗ является отсутствие накопления влаги во внутренних полостях, как это имеет место в сотовых конструкциях.

В нашей работе [3] изложена методика предэскизного проектирования панельных композитных конструкций из ПКМ с ТЗ, позволяющая выбрать проектные геометрические параметры изделия на ранних стадиях проектирования изделия.

Однако оптимальное проектирование и поверочный расчет таких конструкций, а также более широкого класса типа криволинейных панелей и оболочек современными методами, основанными на методе конечных элементов (МКЭ) [4-5], требуют использования приведенных физико-механических характеристик (ФМХ) ТЗ, в которых трубки заменены некоторым сплошным ортотропным материалом («размазаны»), аналогично характеристикам сотового и гофрового заполнителей, полученным А.Я. Александровым еще в 50-х годах прошлого века [6-8], в последующие годы обобщенные на более сложные конфигурации ячеек и гофров [6-8] и др.

В связи с этим ниже изложена методика синтеза приведенных физико-механических характеристик ТЗ. Идея методики определения приведенных ФМХ ТЗ принципиально аналогична реализованной в [6-8] для сотовых заполнителей. Она состоит в реализации требования равенства относительных деформаций условного сплошного типового элемента и реального, выделенного в пределах одной трубки, учитывающего только ее материал.

Приведенные ФМХ входят в соотношения физического закона, записанного для ТЗ как сплошного ортотропного материала, связывающие линейные

($\varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_Z$) и угловые ($\gamma_{XY}, \gamma_{YZ}, \gamma_{XZ}$) деформации с соответствующими нормальными ($\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$) и касательными ($\tau_{XY}, \tau_{YZ}, \tau_{XZ}$) напряжениями [9]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_X &= \frac{\sigma_X}{E_{\text{прив.}X}} - \nu_{YX} \frac{\sigma_Y}{E_{\text{прив.}Y}} - \nu_{ZX} \frac{\sigma_Z}{E_{\text{прив.}Z}}; \\ \varepsilon_Y &= -\nu_{XY} \frac{\sigma_X}{E_{\text{прив.}X}} + \frac{\sigma_Y}{E_{\text{прив.}Y}} - \nu_{ZY} \frac{\sigma_Z}{E_{\text{прив.}Z}}; \\ \varepsilon_Z &= -\nu_{XZ} \frac{\sigma_X}{E_{\text{прив.}X}} - \nu_{YZ} \frac{\sigma_Y}{E_{\text{прив.}Y}} + \frac{\sigma_Z}{E_{\text{прив.}Z}}; \\ \gamma_{XY} &= \frac{\tau_{XY}}{G_{\text{прив.}XY}}; \gamma_{YZ} = \frac{\tau_{YZ}}{G_{\text{прив.}YZ}}; \gamma_{XZ} = \frac{\tau_{XZ}}{G_{\text{прив.}XZ}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $E_{\text{прив.}X}^+$ ($E_{\text{прив.}X}^-$), $E_{\text{прив.}Y}^+$ ($E_{\text{прив.}Y}^-$), $E_{\text{прив.}Z}^+$ ($E_{\text{прив.}Z}^-$) – приведенные модули упругости при растяжении (сжатии) в направлении осей X , Y и Z ; $G_{\text{прив.}XY}$, $G_{\text{прив.}YZ}$, $G_{\text{прив.}XZ}$ – приведенные модули сдвига для плоскостей, параллельных координатным; ν_{XY} , ν_{YZ} , ν_{XZ} – коэффициенты Пуассона, характеризующие сжатие в направлении оси второго индекса при растяжении в направлении оси первого индекса.

1. Приведенные модули упругости ТЗ

1.1. Рассмотрим приведенные модули упругости ТЗ последовательно вдоль координатных осей Z , X и Y (рис. 1).

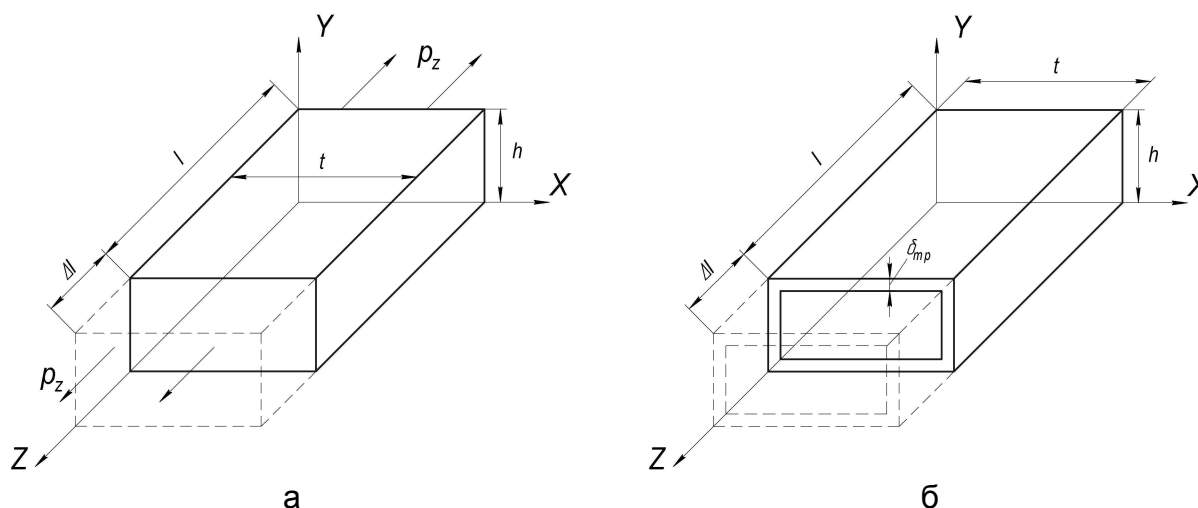


Рис.1. Типовой элемент ТЗ для определения модуля упругости $E_{\text{прив.}Z}$:
а – сплошной элемент; б – реальный трубчатый элемент

Приведенный модуль упругости $E_{\text{прив.}Z}^{+(-)}$ трубчатого заполнителя при растяжении (сжатии) в направлении оси Z можно определить из следующих условий.

Типовой элемент ТЗ в плоскости XOY имеет площадь $F_{элZ} = h \cdot t$. При приложении некоторой растягивающей или сжимающей нагрузки p_z , действующей на площадь $F_{элZ}$, будет иметь место относительное удлинение этого элемента

$$\frac{\Delta l_Z}{l} = \varepsilon_{элZ}^{+(-)} = \frac{p_z}{F_{элZ} \cdot E_{прив.Z}^{+(-)}} = \frac{p_z}{h \cdot t \cdot E_{прив.Z}^{+(-)}}. \quad (2)$$

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

$$\varepsilon_{mpZ}^{+(-)} = \frac{p_z}{F_{mpZ} \cdot E_{ZKM}^{+(-)}} = \frac{p_z}{2(h+t) \cdot \delta_{mp} \cdot E_{ZKM}^{+(-)}}. \quad (3)$$

Приравняв относительные удлинения по формулам (2) и (3), получим

$$\frac{p_z}{h \cdot t \cdot E_{прив.Z}^{+(-)}} = \frac{p_z}{2(h+t) \cdot \delta_{mp} \cdot E_{ZKM}^{+(-)}}.$$

Тогда

$$E_{прив.Z}^{+(-)} = \frac{2(h+t) \cdot \delta_{mp}}{h \cdot t} E_{ZKM}^{+(-)}. \quad (4)$$

Здесь $E_{ZKM}^{+(-)}$ – модуль упругости КМ трубчатого элемента при растяжении (сжатии).

Приведенные модули трубчатого заполнителя $E_{прив.Z}^-$ и $E_{прив.Z}^+$ будут различными, если установлено экспериментально различие в E_{ZKM}^- и E_{ZKM}^+ .

1.2. Приведенный модуль упругости ТЗ в направлении оси X (поперек трубки) определится из следующих условий.

Типовой элемент ТЗ в плоскости ZOX (рис. 2) имеет площадь $F_{элZ} = h \cdot l$, где l – некоторый размер (может быть принят равным единице).

При действии на эту площадь некоторой силы p_x будет иметь место относительное удлинение элемента в случае растяжения (сжатия):

$$\varepsilon_{элX}^{+(-)} = \frac{p_x}{h \cdot l \cdot E_{прив.X}^{+(-)}}. \quad (5)$$

* Точное значение $\varepsilon_{mpZ}^{+(-)} = \frac{p_z}{2(h+t-\delta_{mp}) \cdot \delta_{mp} \cdot E_{ZKM}^{+(-)}}$. Здесь и далее пренебрегаем величинами второго порядка малости: δ_{mp} в скобках знаменателя вследствие того, что $t > h \geq \delta_{mp}$.

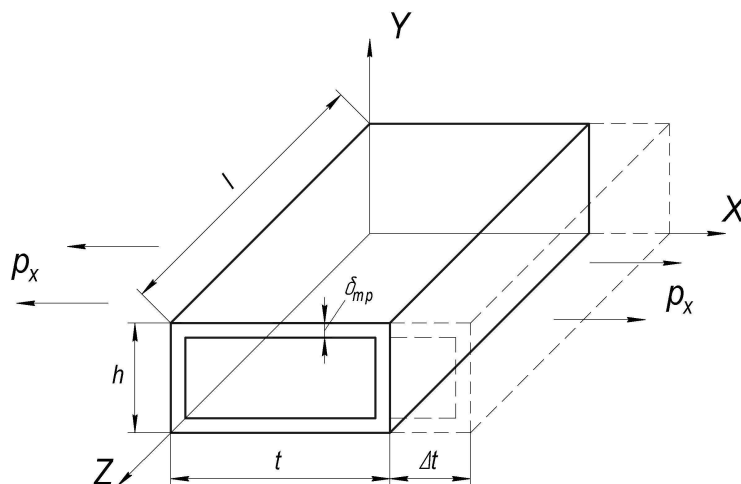


Рис.2. Типовой элемент ТЗ в направлении оси X

Точное удлинение этого элемента при учете только материала трубки определяется выражением

$$\varepsilon_{mp X}^{+(-)} = \frac{p_X}{l \cdot (t + \eta_{кл})} \left[\frac{2\delta_{mp}}{E_{Ткм} \cdot h} + \frac{t - 2\delta_{mp}}{2\delta_{mp} \cdot E_{Хкм}^{+(-)}} + \frac{\eta_{кл}}{E_{кл} \cdot h} \right], \quad (6)$$

где $\eta_{кл}$ – толщина клея-связующего между трубками; $E_{Ткм}$ – модуль упругости КМ в трансверсальном направлении (нормально к толщине трубки); $E_{кл}$ – модуль упругости клея.

Так как $t \gg 2\delta_{mp} \gg \eta_{кл}$, $h \gg \eta_{кл}$, то вместо (6) можно записать

$$\varepsilon_{mp X}^{+(-)} = \frac{p_X}{2l \cdot \delta_{mp} \cdot E_{Хкм}^{+(-)}}. \quad (7)$$

Приравняв удлинение $\varepsilon_{mp X}^{+(-)}$ и $\varepsilon_{эл X}^{+(-)}$, получим:

$$E_{прив.X}^{+(-)} = \frac{2\delta_{mp}}{h} E_{Хкм}^{+(-)}. \quad (8)$$

1.3. Приведенный модуль упругости ТЗ в направлении оси Y (рис. 3) (перпендикулярно к плоскости трубки) определится из следующих условий.

Типовой элемент ТЗ в плоскости XOZ имеет площадь $F_{элY} = l \cdot t$.

При действии на эту площадь некоторой силы p_Y будет иметь место удлинение элемента в случае растяжения (сжатия)

$$\varepsilon_{элY}^{+(-)} = \frac{p_Y}{t \cdot l \cdot E_{прив.Y}^{+(-)}}. \quad (9)$$

В то же время удлинение этого элемента при учете только материала трубки, занимающего площадь $F_{mpY} = 2\delta_{mp} \cdot l$, можно определить по формуле

$$\varepsilon_{mpY}^{+(-)} = \frac{P_Y}{2\delta_{mp} \cdot l \cdot E_{Y_{км}}^{+(-)}} \quad (10)$$

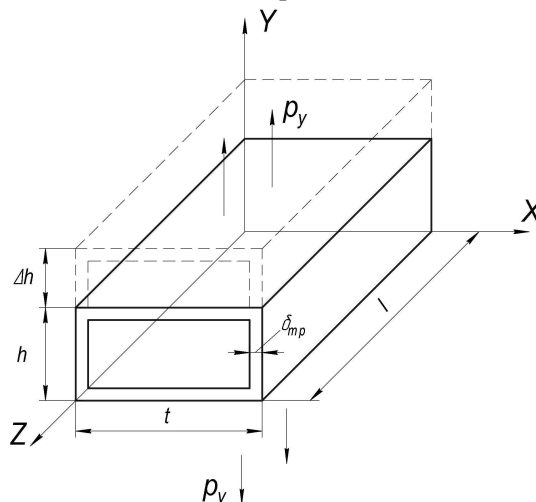


Рис. 3. Типовой элемент Т3 в направлении оси Y

Приравняв удлинения $\varepsilon_{элY}^{+(-)}$ и $\varepsilon_{mpY}^{+(-)}$, получим

$$E_{прив.Y}^{+(-)} = \frac{2\delta_{mp}}{t} E_{Y_{км}}^{+(-)} \quad (11)$$

2. Приведенные модули сдвига Т3

2.1. Приведенный модуль сдвига Т3 в плоскости XZ $G_{привXZ}$ определится из следующих условий.

При действии на типовой элемент Т3 (рис. 4) некоторой сдвигающей силы S_{XZ} на площадь $F_{элXZ} = h \cdot t$ будет иметь место относительный угол сдвига этого элемента

$$\gamma_{элXZ} = \frac{S_{XZ}}{G_{прив.XZ} \cdot t \cdot h} \quad (12)$$

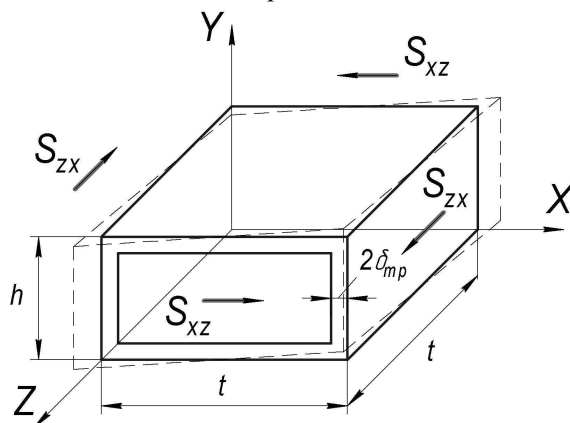


Рис. 4. Типовой элемент Т3 в плоскости XZ

В то же время при учете только материала трубки относительный угол сдвига этого элемента

$$\gamma_{mpXZ} = \frac{S_{XZ}}{2\delta_{mp} \cdot t \cdot G_{XZkm}}. \quad (13)$$

Приравняв углы сдвига $\gamma_{элXZ}$ (12) и γ_{mpXZ} (13), получим:

$$G_{прив.XZ} = \frac{2\delta_{mp}}{h} G_{XZkm}. \quad (14)$$

2.2. Приведенный модуль сдвига ТЗ в плоскости YZ $G_{прив.YZ}$ определится аналогично. Площадь сдвига типового элемента (рис. 5) $F_{элYZ} = t \cdot h$.

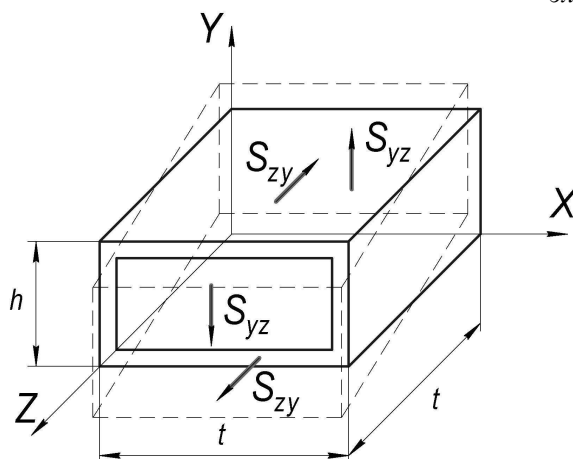


Рис. 5. Типовой элемент ТЗ в плоскости YZ

Площадь сдвига такого элемента при учете только материала трубки $F_{YZmp} = 2\delta_{mp} \cdot t$.

Из равенства относительных углов сдвига этого элемента

$$\gamma_{элYZ} = \frac{S_{YZ}}{G_{прив.YZ} F_{элYZ}} = \gamma_{mpYZ} = \frac{S_{YZ}}{G_{YZkm} F_{mpYZ}}$$

получим

$$G_{прив.YZ} = \frac{2\delta_{mp}}{h} G_{YZkm}. \quad (15)$$

2.3. Приведенный модуль сдвига ТЗ в плоскости XY $G_{прив.XY}$ определится из равенства относительных углов сдвига элемента ТЗ и элемента, учитывающего только материал трубки (рис. 6):

$$\gamma_{элXY} = \frac{S_{XY}}{G_{прив.XY} \cdot h \cdot t} = \gamma_{mpXY} = \frac{S_{XY}}{G_{XYkm} 2\delta_{mp} \cdot t},$$

откуда

$$G_{прив.XY} = \frac{2\delta_{mp}}{h} G_{XYkm}. \quad (16)$$

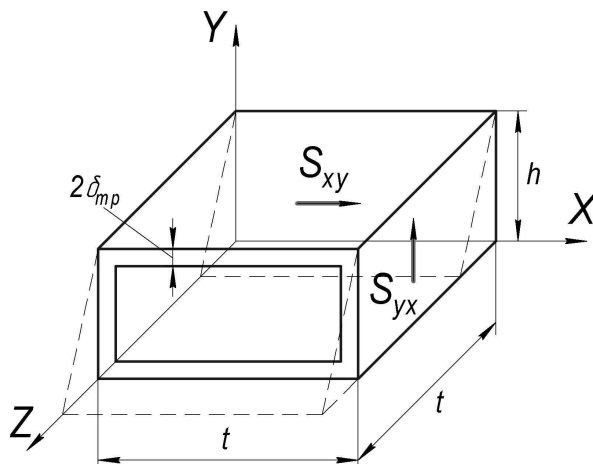


Рис. 6. Типовой элемент ТЗ в плоскости XY

3. Приведенные коэффициенты Пуассона трубчатого заполнителя

3.1. Приведенный коэффициент Пуассона, характеризующий сжатие в направлении оси X при растяжении элемента в направлении оси Z $V_{прив.ZX}$:

$$V_{прив.ZX} = -\frac{\epsilon_{прив.X}^-}{\epsilon_{прив.Z}^+}, \tag{17}$$

где $\epsilon_{прив.X}^-$ – приведенная относительная поперечная деформация сжатия трубчатого элемента в направлении оси X при его растяжении в направлении оси Z; $\epsilon_{прив.Z}^+$ – приведенная относительная продольная деформация трубчатого элемента при его растяжении в направлении оси Z некоторым усилием p_Z (рис. 1).

$$\epsilon_{прив.Z}^+ = \frac{p_Z}{F_{прив.Z} \cdot E_{прив.Z}^+} = \frac{p_Z}{h \cdot t \cdot E_{прив.Z}^+}. \tag{18}$$

Постулируем равенство приведенной деформации $\epsilon_{прив.X}^-$ и ϵ_{mpX}^- :

$$\epsilon_{прив.X}^- = \epsilon_{mpX}^-, \tag{19}$$

где ϵ_{mpX}^- – относительная поперечная деформация сжатия трубчатого элемента в направлении X при учете только материала трубки.

По определению коэффициента Пуассона

$$-\frac{\epsilon_{mpX}^-}{\epsilon_{mpZ}^+} = \nu_{ZXкм} \text{ или } \epsilon_{mpX}^- = -\nu_{ZXкм} \cdot \epsilon_{mpZ}^+. \tag{20}$$

Здесь ϵ_{mpZ}^+ – относительная продольная деформация трубчатого элемента в направлении его растяжения Z при учете только материала трубки.

$$\varepsilon_{mpZ}^+ = \frac{PZ}{F_{mpZ} \cdot E_{ZKM}^+} = \frac{PZ}{2(t+h)\delta_{mp} \cdot E_{ZKM}^+}. \quad (21)$$

Подставив ε_{mpZ}^+ из формулы (21) в формулу (20), получим

$$\varepsilon_{mpX}^- = -\frac{V_{ZXKM} \cdot PZ}{2(t+h) \cdot \delta_{mp} \cdot E_{ZKM}^+}. \quad (22)$$

Подставив ε_{mpX}^- из формулы (22) в формулу (19), а затем в (17), найдем:

$$V_{прив.ZX} = V_{ZXKM} \frac{E_{привZ}^+ \cdot h \cdot t}{2(t+h) \cdot \delta_{mp} \cdot E_{ZKM}^+}. \quad (23)$$

С учетом значения $E_{прив.Z}^+$, определяемого формулой (4), окончательно имеем

$$V_{прив.ZX} = V_{ZXKM}. \quad (24)$$

Этот результат вполне соответствует ожидаемому.

3.2. Приведенный коэффициент Пуассона, характеризующий сжатие в направлении оси Z при растяжении трубчатого элемента в направлении оси X $V_{прив.XZ}$ (рис. 2), определим из соотношения, вытекающего из условия симметрии матрицы правой части уравнений обобщенного закона Гука для ортотропного тела [9]:

$$E_{прив.Z}^+ \cdot V_{прив.XZ} = E_{прив.X}^- \cdot V_{прив.ZX} \quad (25)$$

или

$$V_{прив.XZ} = V_{прив.ZX} \frac{E_{прив.X}^-}{E_{прив.Z}^+}. \quad (26)$$

Подставив в (26) значения $E_{прив.Z}^+$ из (4) и $E_{прив.X}^-$ из (8), получим окончательно

$$V_{прив.XZ} = V_{ZXKM} \frac{t \cdot E_{XKM}^-}{(h+t) \cdot E_{ZKM}^+}. \quad (27)$$

3.3. Приведенный коэффициент Пуассона, характеризующий сжатие в направлении оси Y при растяжении трубчатого элемента в направлении оси Z (рис. 1) $V_{прив.ZY}$ аналогично п.3.1 запишем

$$V_{прив.ZY} = -\frac{\varepsilon_{прив.Y}^-}{\varepsilon_{прив.Z}^+}, \quad (28)$$

где $\varepsilon_{прив.Y}^-$ – приведенная относительная поперечная деформация сжатия трубчатого элемента при его растяжении в направлении Z ; $\varepsilon_{прив.Z}^+$, определяется формулой (18).

Как и в п.3.1 постулируем равенство приведенных деформаций ε_{mpY}^- и $\varepsilon_{прив.Y}^-$, где ε_{mpY}^- – относительная поперечная деформация сжатия трубчатого элемента при учете только материала трубки в направлении оси Y .

По определению коэффициента Пуассона

$$-\frac{\varepsilon_{mpY}^-}{\varepsilon_{mpZ}^+} = \nu_{ZY_{км}} \text{ или } \varepsilon_{mpY}^- = -\nu_{ZY_{км}} \cdot \varepsilon_{mpZ}^+ \quad (29)$$

Подставив ε_{mpZ}^+ из (21) в (29), получим

$$\varepsilon_{mpY}^- = \frac{\nu_{ZY_{км}} \cdot PZ}{2(t+h)\delta_{mp} \cdot E_{Z_{км}}^+} \quad (30)$$

Далее подставив ε_{mpY}^- из (30) в (28), с учетом того, что $\varepsilon_{прив.Y}^- = \varepsilon_{mpY}^-$ и $\varepsilon_{прив.Z}^+$ из (18), запишем окончательно ожидаемый результат

$$\nu_{прив.ZY} = \nu_{YZ_{км}} \quad (31)$$

3.4. Приведенный коэффициент Пуассона, характеризующий сжатие в направлении оси Z при растяжении трубчатого элемента в направлении оси Y (рис. 3) $\nu_{прив.YZ}$, определим аналогично п. 3.2:

$$E_{прив.Y}^+ \cdot \nu_{прив.ZY} = E_{прив.Z}^- \cdot \nu_{прив.YZ} \quad (32)$$

или с учетом (31), (4) и (11):

$$\nu_{прив.YZ} = \frac{h}{(t+h)} \frac{E_{Y_{км}}^+}{E_{Z_{км}}^-} \nu_{ZY_{км}} \quad (33)$$

3.5. Приведенный коэффициент Пуассона, характеризующий сжатие в направлении оси X при растяжении трубчатого элемента в направлении оси Y (рис. 3) $\nu_{прив.YX}$, находим аналогично пп.3.1 и 3.3:

$$\nu_{прив.YX} = -\frac{\varepsilon_{прив.X}^-}{\varepsilon_{прив.Y}^+} \quad (34)$$

где $\varepsilon_{прив.Y}^+$ определяется формулой (9). Постулируем равенство (19).

По определению коэффициента Пуассона:

$$\frac{\varepsilon_{mpX}^-}{\varepsilon_{mpY}^+} = -\nu_{YX_{км}} \text{ или } \varepsilon_{mpX}^- = -\nu_{YX_{км}} \cdot \varepsilon_{mpY}^+ \quad (35)$$

где ε_{mpY}^+ определяется формулой (10).

Подставив в формулу (34) ε_{mpX}^- из (35) с учетом постулируемого равенства $\varepsilon_{прив.X}^- = \varepsilon_{mpX}^-$, а ε_{mpY}^+ – из (10) с учетом (11), получим после преобразований ожидаемый результат:

$$V_{прив.YX} = V_{YXкм} \quad (36)$$

3.6. Приведенный коэффициент Пуассона, характеризующий сжатие в направлении оси Y при растяжении трубчатого элемента в направлении оси X (рис. 2) $V_{прив.XY}$, определим из соотношения [9]

$$E_{прив.X}^+ \cdot V_{прив.YX} = E_{прив.Y}^- \cdot V_{прив.XY} \quad (37)$$

или с учетом (8),(11) и (36):

$$V_{прив.XY} = V_{кмYX} \frac{t \cdot E_{Xкм}^+}{h \cdot E_{Yкм}^-} \quad (51)$$

Таким образом, все приведенные физико-механические характеристики трубчатого заполнителя определены. Для наглядности сведем полученные данные в таблицу.

Физико-механические и прочностные характеристики ТЗ

№ п/п	Характеристика	Формула
1	2	3
1	Модуль упругости вдоль оси Z при растяжении (сжатии)	$E_{прив.Z}^{+(-)} = \frac{2(h+t) \cdot \delta_{mp}}{h \cdot t} E_{Zкм}^{+(-)}$
2	Модуль упругости вдоль оси X при растяжении (сжатии)	$E_{прив.X}^{+(-)} = \frac{2\delta_{mp}}{h} E_{Xкм}^{+(-)}$
3	Модуль упругости вдоль оси Y при растяжении (сжатии)	$E_{прив.Y}^{+(-)} = \frac{2\delta_{mp}}{t} E_{Yкм}^{+(-)}$
4	Модуль сдвига в плоскости XOY	$G_{прив.XY} = \frac{2\delta_{mp}}{h} G_{XYкм}$
5	Модуль сдвига в плоскости YOZ	$G_{прив.YZ} = \frac{2\delta_{mp}}{h} G_{YZкм}$

1	2	3
6	Модуль сдвига в плоскости XOZ	$G_{прив.XZ} = \frac{2\delta_{mp}}{h} G_{XZKM}$
7	Коэффициент Пуассона при сжатии по оси X при растяжении по оси Z	$\nu_{прив.ZX} = \nu_{ZXKM}$
8	Коэффициент Пуассона при сжатии по оси Z при растяжении по оси X	$\nu_{прив.XZ} = \frac{t}{(t+h)} \frac{E_{XKM}^-}{E_{ZKM}^+} \nu_{ZXKM}$
9	Коэффициент Пуассона при сжатии по оси Y при растяжении по оси Z	$\nu_{прив.ZY} = \nu_{ZYKM}$
10	Коэффициент Пуассона при сжатии по оси Z при растяжении по оси Y	$\nu_{прив.YZ} = \frac{h}{(t+h)} \frac{E_{YKM}^+}{E_{ZKM}^-} \nu_{ZYKM}$
11	Коэффициент Пуассона при сжатии по оси X при растяжении по оси Y	$\nu_{прив.YX} = \nu_{YXKM}$
12	Коэффициент Пуассона при сжатии по оси Y при растяжении по оси X	$\nu_{прив.XY} = \frac{t \cdot E_{XKM}^+}{h \cdot E_{YKM}^-} \nu_{YXKM}$

Список литературы

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. 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». – Вып. 59 (3).– Х., 2009. – С.73-84.

4. 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.

5. 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.

6. Вопросы расчета элементов авиационных конструкций. Расчет трехслойных панелей и оболочек: сб. статей / под ред. А.Я. Александрова, Л.М. Куршина. – М. : Машиностроение, 1959. – 169 с.

7. Вопросы расчета элементов авиационных конструкций. Расчет трехслойных панелей и оболочек: сб. статей / под ред. А.Я. Александрова, Л.М. Куршина. – М. : Машиностроение, 1960. – 146 с.

8. Прочность, устойчивость, колебания: справочник: в 3 т. / под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. –Т.2. – 463 с.

9. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела / С.Г. Лехницкий. – М.: Наука, 1977. – 416 с.

Рецензент: к.т.н., проф., В.В. Кириченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 04.12.09.

Зведені фізико-механічні характеристики трубчастого заповнювача для тришарових конструкцій літальних апаратів

Отримано аналітичні залежності зведених фізико-механічних характеристик трубчастого заповнювача з полімерних композиційних матеріалів для тришарових конструкцій, що широко застосовуються в агрегатах літальних апаратів інтегрального складання. Ідея синтезу зведених фізико-механічних характеристик основана на реалізації апробованого для стільникових конструкцій принципу рівності відносних деформацій умовного суцільного типового елемента трубки і однакового з ним за об'ємом елемента.

Ключові слова: трубчастий заповнювач, тришарові конструкції, полімерні композиційні матеріали, зведені фізико-механічні характеристики.

Reduced physicommechanical characteristics of tubular filler for aircraft sandwich structures.

Analytical relationships of reduced physicommechanical characteristics of tubular filler made of polymeric composite materials are obtained for sandwich structures which are commonly used in aircrafts' assemblies of integral assemblage. The idea of reduced physicommechanical characteristics synthesis is grounded on implementation of the principle of equality of strain for a conventional solid standard tube element and an element of the same volume, which was approved on sandwich structures.

Keywords: tubular filler, sandwich, polymeric composite materials, reduced physicommechanical characteristics