

УДК 678.5.067

А. В. ГАЙДАЧУК, Е. В. МАЙОРОВА, А. А. ЧУМАК

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СЭНДВИЧЕВОЙ ТРУБЧАТОЙ СТРУКТУРЫ ИЗ ПКМ

Разработана экспериментально-теоретическая методика определения физико-механических характеристик (ФМХ) и прочностных свойств сэндвичевой трубчатой структуры из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Методика построена на классических зависимостях механики анизотропного твердого деформируемого тела и позволяет определить приведенные ФМХ и прочностные свойства в направлении всех трех осей координат и соответствующих им плоскостях по испытаниям трехслойных образцов, интегрально учитывающая все специфические особенности работы заполнителя в реальных условиях.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, трубчатый наполнитель, приведенные ФМХ и прочностные свойства

Если сотовый наполнитель (СЗ) относится к классу легких наполнителей, у которых физико-механические характеристики (ФМХ) и прочностные свойства в плоскости трехслойной панели в направлениях осей Z и X несоизмеримо малы по сравнению с их значениями вдоль оси Y, то трубчатый наполнитель относится к классу жестких, обладающих свойствами, близкими по величине в направлениях всех трех осей. Так, например, для трубчатого наполнителя (ТЗ) из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе стеклоткани Т-10-14 и связующего ЭДТ-69Н, у которого $E_{\pm 45^0} = 16,8 \text{ ГПа}$; $E = 32,4 \text{ ГПа}$ и $E_{90^0} = 26,3 \text{ ГПа}$, при намотке под углом $\pm 45^0$ к оси трубки размерами $\delta_{\text{тр}} = 1 \text{ мм}$ и высоте $h = 10 \text{ мм}$ и ширине $t = 20 \text{ мм}$ модули упругости равны $E_z = 5,04 \text{ ГПа}$; $E_x = 3,36 \text{ ГПа}$ и $E_y = 3,24 \text{ ГПа}$.

Это же касается и прочностных характеристик. Поэтому для расчета сэндвичевых конструкций с ТЗ необходимо располагать приведенными ФМХ и прочностными свойствами в направлении всех трех осей координат и соответствующих им плоскостях.

Ниже предложена расчетно-экспериментальная методика определения таких характеристик, реализующая при испытаниях трехслойных образцов с ТЗ с известными характеристиками несущих слоев.

Для определения приведенных модулей упругости $E_{\text{прив}Z}$, $E_{\text{прив}X}$ и коэффициента Пуассона $\nu_{\text{прив}ZX}$ считается, что уже проведены испытания трехслойного образца шириной b и толщиной t на растяжение силой P , при которой методами тензо-

метрии замерены деформации ϵ_z^x вдоль оси нагружения и ϵ_x^z - поперек оси нагружения, а также трехслойного образца на растяжение усилиями в ортогональном к первому направлению, при которой замерены деформации ϵ_x^y вдоль нагружения по оси X и ϵ_z^y - поперек нагружения (по оси Z).

В результате этих испытаний модуль упругости несущих слоев вдоль оси Z трубчатого трехслойного образца определяется по формуле

$$E_{Z\text{нс}} = \frac{P}{F_{\text{нс}} \epsilon_{Z\text{нс}}^z} = \frac{P}{2bt \cdot \epsilon_{Z\text{нс}}^z}, \quad (1)$$

где $F_{\text{нс}} = 2bt$ - удвоенная площадь поперечного сечения несущего слоя.

Коэффициент Пуассона при растяжении несущего слоя в направлении оси Z равен

$$\nu_{ZX\text{нс}} = \frac{\epsilon_{X\text{нс}}^z}{\epsilon_{Z\text{нс}}^z}. \quad (2)$$

В результате испытаний на растяжение этой же силой P в направлении оси X модуль упругости несущих слоев $E_{X\text{нс}}$ определяется по формуле

$$E_{X\text{нс}} = \frac{P}{F_{\text{нс}} \epsilon_{X\text{нс}}^x} = \frac{P}{2bt \cdot \epsilon_{X\text{нс}}^x}, \quad (3)$$

а коэффициент Пуассона при растяжении несущего слоя в направлении оси Z

$$\nu_{XZ\text{нс}} = \frac{\epsilon_{Z\text{нс}}^x}{\epsilon_{X\text{нс}}^x}. \quad (4)$$

Проверкой правильности ФМХ (1) – (4) служит равенство, вытекающее из условия существования упругого потенциала ортотропных ПКМ [1]

$$\nu_{XZ_{\text{Hnc}}} E_{X_{\text{Hnc}}} = \nu_{ZX_{\text{Hnc}}} E_{Z_{\text{Hnc}}} \quad (5)$$

Неравенство (5) корректируется известными способами [1].

На втором этапе реализации метода проводятся испытания трехслойного образца с ТЗ на растяжение вдоль оси Z прежней силой P, в результате которых замеряется относительная деформация трехслойного образца ϵ_z , которая состоит из двух составляющих $\epsilon_{Z_{\text{Hnc}}}^z$, определенной ранее и $\epsilon_{z\text{TЗ}}$, которая будет равна

$$\epsilon_{z\text{TЗ}} = \epsilon_z - \epsilon_{Z_{\text{Hnc}}}^z \quad (6)$$

Модуль упругости ТЗ в направлении оси Z равен

$$E_{Z\text{TЗ}} = \frac{P}{F_{\text{TЗ}} \epsilon_{z\text{TЗ}}}, \quad (7)$$

где $F_{\text{TЗ}}$ - редуцированная площадь трехслойного образца при растяжении вдоль оси Z, приведенная к материалам ТЗ.

$$F_{\text{TЗ}} = 2tb \frac{E_{Z_{\text{Hnc}}}}{E_{Z\text{TЗ}}} + bh, \quad (8)$$

где h – толщина ТЗ.

Подставив в (7) $\epsilon_{z\text{TЗ}}$ из (6) с учетом (8), получим

$$E_{Z\text{TЗ}} = \frac{P}{\left(2tb \frac{E_{Z_{\text{Hnc}}}}{E_{Z\text{TЗ}}} + bh \right) (\epsilon_z - \epsilon_{Z_{\text{Hnc}}}^z)} \quad (9)$$

Решая (9) относительно $E_{Z\text{TЗ}}$, определим его выражением

$$E_{Z\text{TЗ}} = \frac{P - 2tb E_{Z_{\text{Hnc}}} (\epsilon_z - \epsilon_{Z_{\text{Hnc}}}^z)}{(\epsilon_z - \epsilon_{Z_{\text{Hnc}}}^z) bh} \quad (10)$$

Определяется модуль упругости ТЗ $E_{X_{\text{TЗ}}}$ из испытания трехслойного образца, нагруженного силой P в направлении оси X по формуле, аналогичной (7)

$$E_{X_{\text{TЗ}}} = \frac{P}{F_{\text{ГХ}} \epsilon_{X_{\text{TЗ}}}}, \quad (11)$$

где $F_{\text{ГХ}}$ - редуцированная площадь трехслойного образца при растяжении вдоль оси X, приведенная к материалам ТЗ; $\epsilon_{X_{\text{TЗ}}}$ - составляющая замеренной деформации ϵ_x .

$$F_{\text{ГХ}} = 2tb \frac{E_{X_{\text{Hnc}}}}{E_{X_{\text{TЗ}}}} + bh, \quad (12)$$

$$\epsilon_{X_{\text{TЗ}}} = \epsilon_x - \epsilon_{X_{\text{Hnc}}}^x \quad (13)$$

Подставив в (11), (12) и (13) и разрешая (11) относительно $E_{X_{\text{TЗ}}}$, определим его выражением

аналогичным (10)

$$E_{X_{\text{TЗ}}} = \frac{P - 2tb E_{X_{\text{Hnc}}} (\epsilon_x - \epsilon_{X_{\text{Hnc}}}^x)}{(\epsilon_x - \epsilon_{X_{\text{Hnc}}}^x) \cdot bh} \quad (14)$$

При нагружении трехслойного образца вдоль оси X одновременно с замером продольной деформации ϵ_x , равной

$$\epsilon_x^x = \epsilon_{X_{\text{Hnc}}}^x - \epsilon_{x\text{TЗ}}^x \quad (15)$$

Откуда $\epsilon_{x\text{TЗ}}^x$ находится аналогично (6)

$$\epsilon_{x\text{TЗ}}^x = \epsilon_x^x - \epsilon_{X_{\text{Hnc}}}^x, \quad (16)$$

где $\epsilon_{X_{\text{Hnc}}}^x$ уже была замерена ранее.

Тогда коэффициент Пуассона $\nu_{ZX_{\text{TЗ}}}$ определится аналогично (2)

$$\nu_{ZX_{\text{TЗ}}} = \frac{\epsilon_{z\text{TЗ}}^x}{\epsilon_{x\text{TЗ}}^x}, \quad (17)$$

где $\epsilon_{z\text{TЗ}}^x$ вычислена по формуле (6).

Коэффициент Пуассона $\nu_{XZ_{\text{TЗ}}}$ определится аналогично (5)

$$\nu_{XZ_{\text{TЗ}}} E_{X_{\text{TЗ}}} = \nu_{ZX_{\text{TЗ}}} E_{Z_{\text{TЗ}}}$$

Откуда

$$\nu_{XZ_{\text{TЗ}}} = \nu_{ZX_{\text{TЗ}}} \frac{E_{Z_{\text{TЗ}}}}{E_{X_{\text{TЗ}}}}, \quad (18)$$

где все входящие параметры уже известны.

Для определения ФМХ ТЗ при растяжении образца в направлении оси Y $E_{Y_{\text{TЗ}}}$, $\nu_{YX_{\text{TЗ}}}$ и $\nu_{XY_{\text{TЗ}}}$ можно воспользоваться схемой стандартных испытаний для сотовых заполнителей (рис. 1) квадратной формы в плане размерами $b \times b$, растягиваемый с помощью нагружающих жестких стальных плит 2, приклеиваемых к несущим слоям образца [3].

На боковую поверхность ТЗ, на сторону, параллельную оси Z, наклеены малобазные тензорезисторы, фиксирующие при приложении силы P деформации вдоль оси Y $\epsilon_{Y_{\text{TЗ}}}^y$ [3]. Модуль упругости ТЗ $E_{Y_{\text{TЗ}}}$ определяется формулой.

Достаточно полная характеристика стандартов СССР, США и ФРГ (их шифр, наименование, размеры образца, наличие несущих слоев, допуски, скорость испытаний, точность измерения деформаций, а также минимальное количество образцов) СЗ на поперечное растяжение и сжатие приведена в публикации [3]

$$E_{Y_{\text{TЗ}}} = \frac{P}{a^2 \epsilon_{Y_{\text{TЗ}}}^y} \quad (19)$$

Одновременно определится коэффициент Пуассона $\nu_{ZY_{\text{TЗ}}}$

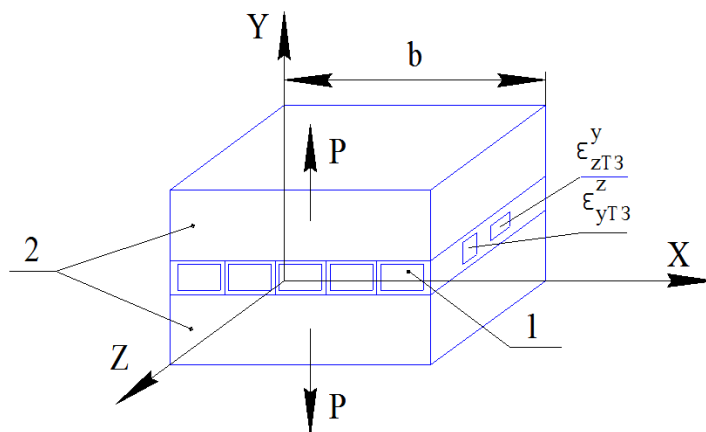


Рис. 1. Схема испытаний на растяжение трехслойных образцов с ТЗ в трансверсальном направлении к плоскости XZ: 1 – образец; 2 – нагружающие плиты

$$v_{ZY_{T3}} = \frac{\varepsilon_{zT3}^y}{\varepsilon_{yT3}^y} \quad (20)$$

Коэффициент Пуассона $v_{YZ_{T3}}$ определится из соотношения, аналогичного (5)

$$v_{ZY_{T3}} E_{Y_{T3}} = v_{YZ_{T3}} E_{Z_{T3}}, \quad (21)$$

откуда

$$v_{YZ_{T3}} = \frac{E_{Y_{T3}}}{E_{Z_{T3}}} v_{ZY_{T3}} \quad (22)$$

Коэффициент Пуассона $v_{XY_{T3}}$ можно определить из равенства

$$v_{XY_{T3}} = \frac{\varepsilon_{xT3}^y}{\varepsilon_{yT3}^y}, \quad (23)$$

а затем из равенства

$$v_{XY_{T3}} E_{Y_{T3}} = v_{YX_{T3}} E_{X_{T3}} \quad (24)$$

найти

$$v_{YX_{T3}} = \frac{E_{Y_{T3}}}{E_{X_{T3}}} v_{XY_{T3}} \quad (25)$$

Отметим, что все ФМХ ТЗ при сжатии определяются по прежней методике, в которой сила P , прикладываемая к трехслойным образцам должна быть сжимающей, что обеспечивается соответствующим конструктивным изменениям испытательного приспособления.

Для определения прочностных свойств ТЗ при растяжении $\sigma_{vX_{T3}}^+$, $\sigma_{vY_{T3}}^+$ и $\sigma_{vZ_{T3}}^+$ необходимо прикладывать силу $P=P_{разр.}$, при которой происходит разрушение образца, которая будет различной при нагружении образца вдоль осей Z , X и Y

$$\sigma_{vZ_{T3}}^+ = \frac{P_{разр.Z}}{F_{TZ_{T3}}} = \frac{P_{разр.Z}}{2tb \frac{E_{Z_{Hc}}}{E_{Z_{T3}}} + bh}, \quad (26)$$

$$\sigma_{vX_{T3}}^+ = \frac{P_{разр.X}}{F_{TX_{T3}}} = \frac{P_{разр.X}}{2tb \frac{E_{X_{Hc}}}{E_{X_{T3}}} + bh}, \quad (27)$$

$$\sigma_{vY_{T3}}^+ = \frac{P_{разр.Y}}{b^2}. \quad (28)$$

При определении пределов прочности $\sigma_{vZ_{T3}}^+$ и

$\sigma_{vX_{T3}}^+$ принято допущение о линейном характере деформирования трехслойных образцов с ТЗ вплоть до разрушения.

Определение пределов прочности ТЗ при сжатии $\sigma_{vX_{T3}}^-$, $\sigma_{vY_{T3}}^-$ и $\sigma_{vZ_{T3}}^-$ сопряжено с необходимостью фиксации характера исчерпания несущей способности ТЗ, который может реализовываться в форме разрушения или потери устойчивости ТЗ. В последнем случае этот вид исчерпания несущей способности должен быть документально оговорен для принятия решения о равнозначности потери устойчивости пределу прочности панели с ТЗ при анализе эксплуатационной возможности конкретной конструкции.

Перейдем к определению модулей G_{ZY} , G_{XY} и G_{XZ} и пределов прочности τ_{vZY} , τ_{vXY} и τ_{vXZ} при сдвиге (информация о методах механических испытаний сотовых заполнителей на сдвиг приведена в работе [4]).

Для определения модулей сдвига G_{ZY} , G_{XY} удобно воспользоваться двухобразцовой схемой стандартизированной для испытаний трехслойных образцов с сотовым заполнителем (рис. 2, рис.3).

Для определения модулей сдвига G_{ZY} и G_{XY} необходимо использовать малобазные тензорезисторы, которые при приложении сдвигающей силы $P_{сдв}$ позволяют зафиксировать деформации ε_z^z , ε_y^z

и $\varepsilon_x^x, \varepsilon_y^x$ (рис. 2 и рис. 3).

Модули сдвига G_{ZY} и G_{XY} определяются по формулам

$$G_{ZY} = \frac{P_{сдв}}{2hb\gamma_{zyT3}}, \quad (29)$$

$$G_{XY} = \frac{P_{сдв}}{2hb\gamma_{xyT3}}, \quad (30)$$

где относительные углы сдвига равны [5, 6]:

$$\gamma_{zyT3} = \left(\varepsilon_z^z - \varepsilon_y^z \right) + \frac{\left(\varepsilon_z^z \right)^2 - \left(\varepsilon_y^z \right)^2}{2} \approx \varepsilon_z^z - \varepsilon_y^z \quad (31)$$

$$\gamma_{xyT3} = \varepsilon_x^x - \varepsilon_y^x. \quad (32)$$

Пределы прочности при сдвиге τ_{vzy} и τ_{vxy} вычисляются по формулам:

$$\tau_{vzy} = \frac{P_{сдвZY}^p}{2bh}, \quad (33)$$

$$\tau_{vxy} = \frac{P_{сдвXY}^p}{2bh}, \quad (34)$$

где $P_{сдвZY}^p, P_{сдвXY}^p$ - сдвигающие силы $P_{сдвZY}$ и $P_{сдвXY}$ в момент разрушения образцов.

При этом, как и в случае определения пределов прочности ТЗ, при сжатии возможно исчерпание несущей способности ТЗ как его разрушением, так и местной потерей устойчивости его элементов.

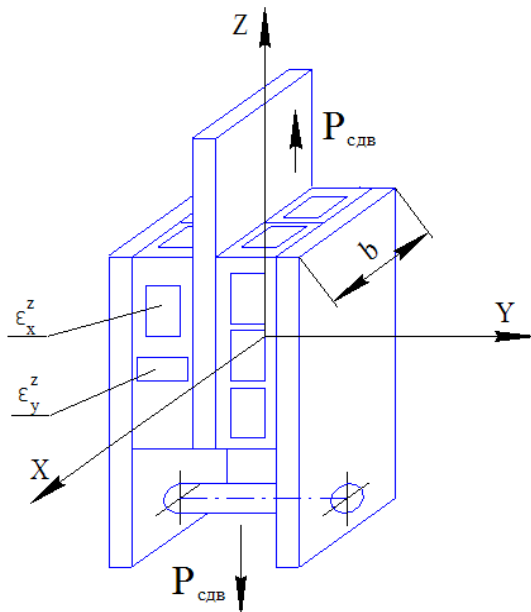


Рис. 2. Двухобразцовая схема для испытаний на сдвиг образцов с ТЗ в плоскости ZY

Оставшиеся характеристики ТЗ при сдвиге G_{XY} и τ_{vxy} можно определить по одной из стандартных схем: в шарнирном четырехзвеннике (рис. 4) или по схеме кручения квадратной пластины (рис. 5).

При определении модуля сдвига $G_{XZ_{T3}}$ используется формула

$$G_{XZ_{T3}} = \frac{\tau_{xz}}{F_{гxz}} = \frac{P_{сдв} \sqrt{2}}{2 \left(2bt \frac{G_{XZ_{nc}}}{G_{XZ_{T3}}} + bh \right) \gamma_{xzT3}}, \quad (35)$$

где $P_{сдв}$ - сила, прикладываемая вдоль растягиваемой диагонали четырехзвеннике; γ_{xzT3} - угол сдвига, определяемый с помощью тензорезисторов деформациями $\varepsilon_{p_{nc}}, \varepsilon_{c_{nc}}$ и $\varepsilon_p, \varepsilon_c$.

Аналогично методики, описанной выше для определения модулей упругости $E_{Z_{T3}}$ и $E_{X_{T3}}$, испытания проводятся в два этапа.

На первом этапе проводятся испытания нагружениям сдвоенных несущих слоев толщиной t каждый силой $P_{сдв}$, уровень которой выбирается ниже величины, при которой возникает потеря их устойчивости.

При этой силе фиксируются деформации $\varepsilon_{p_{nc}}$ и $\varepsilon_{c_{nc}}$ по показаниям тензорезисторов, наклеенных на несущий слой, а затем вычисляется угол сдвига $\gamma_{xz_{nc}}$ по формуле, аналогичной (32)

$$\gamma_{xz_{nc}} = \varepsilon_{p_{nc}} - \varepsilon_{c_{nc}}. \quad (36)$$

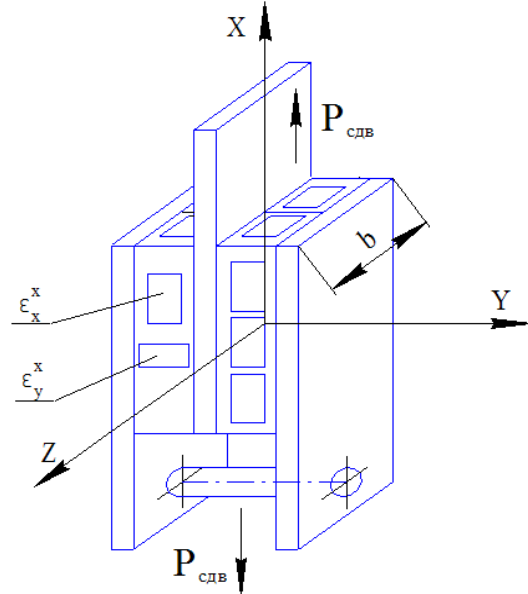


Рис. 3. Двухобразцовая схема для испытаний на сдвиг образцов с ТЗ в плоскости XY

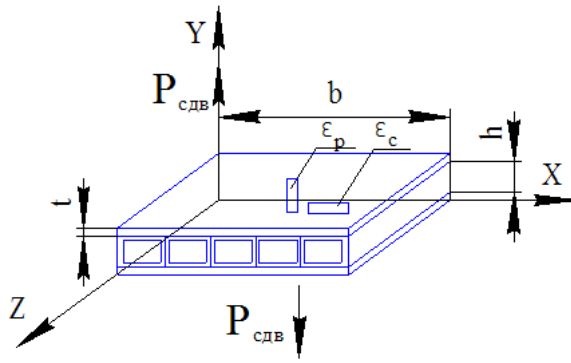


Рис. 4. Схема испытаний образцов с ТЗ в шарнирном четырехзвеннике в системе координат XZ

Затем при прежнем уровне силы $P_{сдв}$ проводится нагружение четырехзвенника с трехслойным образцом, на который наклеены тензорезисторы, фиксирующие деформации ϵ_p , ϵ_c , и определяется угол сдвига трехслойного образца γ_{xz} :

$$\gamma_{xz} = \epsilon_p - \epsilon_c. \quad (37)$$

Угол сдвига γ_{xzT3} определяется разностью γ_{xznc} и γ_{xz}

$$\gamma_{xzT3} = \gamma_{xznc} - \gamma_{xz}. \quad (38)$$

Это значение γ_{xzT3} необходимо подставить в формулу (34) разрешив затем ее относительно G_{XZT3} :

$$G_{XZT3} = \frac{\sqrt{2}P_{сдв} - 4btG_{XZnc}/\gamma_{xzT3}}{2bh\gamma_{xzT3}}, \quad (39)$$

где G_{XZnc} определяются формулой

$$G_{XZnc} = \frac{P_{сдв}\sqrt{2}}{4bt\gamma_{xznc}}. \quad (40)$$

С учетом (39) и (40) можно записать после преобразований, выраженную через деформации

$$G_{XZT3} = \frac{P_{сдв}\sqrt{2}}{2bh} \times \frac{(\epsilon_p - \epsilon_c)}{(\epsilon_{pnc} - \epsilon_{cnc})((\epsilon_{pnc} - \epsilon_{cnc}) - (\epsilon_p - \epsilon_c))}. \quad (41)$$

Предел прочности ТЗ при сдвиге в плоскости XZ определяется по формуле, аналогичной (32) – (33)

$$\tau_{вXZ} = \frac{P_{сдв}^p \sqrt{2}}{2b \left(2t \frac{G_{XZnc}}{G_{XZT3}} + h \right)}, \quad (42)$$

в предположении, что деформирование образца протекает по линейному закону вплоть до его разрушения, а исчерпание несущей способности ТЗ возмож-

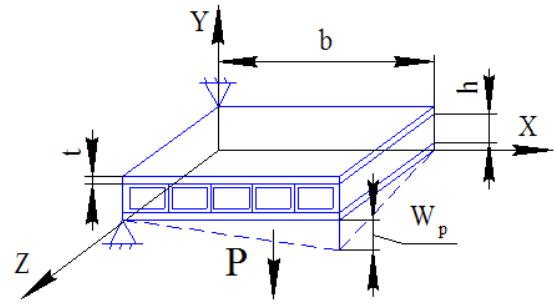


Рис. 5. Схема кручения квадратной пластины для испытания на сдвиг образцов с ТЗ в системе координат XZ

но как в форме разрушения, так и в виде местной потери устойчивости.

По поводу испытаний образцов с ТЗ в шарнирном четырехзвеннике представляется необходимым указать на его недостатки, отмеченные в [6]: неоднородность распределения деформаций в рабочей части образца, ограниченные возможности ориентации осей упругой симметрии материала относительно направления действия нагрузки, сильное обжатие кромок образца, возможность выпучивания тонких образцов, большие размеры образцов, зависимость от способа приложения сдвигающей нагрузки.

В стандартных приспособлениях с жесткой шарнирной рамой оси вращения шарниров не совпадают с угловыми точками рабочей части образца, что и является причиной неравномерности распределения и концентрации деформаций в рабочей части образца. Диагонали жесткой шарнирной рамы удлиняются и укорачиваются на одинаковую величину, вследствие чего при испытаниях неравновесных материалов, оси упругой симметрии которых совпадают с диагоналями приспособления, невозможно обеспечить состояние чистого сдвига.

Для устранения этих недостатков предложены приспособления, в которых оси вращения шарниров вынесены над поверхностью образца и совмещены с угловыми точками рабочей части образца; приспособления, в которых растягивающая нагрузка прилагается через систему взаимно несвязанных рычагов на некотором расстоянии от рабочей части образца; приспособления, в которых сдвигающие усилия на образец передаются через жесткую шарнирную раму и регулируемые тяги с шарнирами. Перечисленные недостатки и технические трудности привели к противоречивым оценкам метода и к постепенному отказу от него. Вместо метода перекашивания пластины в шарнирном четырехзвеннике стали применять метод кручения пластин (рис.4).

Однако в защиту метода испытаний в шарнирном четырехзвеннике можно указать следующие ар-

гументы. Во-первых, этот метод все еще является общепризнанным и широко применяемым для испытаний образцов из ПКМ и сэндвичевых образцов с различными видами заполнителей, а во-вторых, альтернативный ему метод кручения квадратной пластины для образца с ТЗ может оказаться не реализуемым вследствие необходимости проведения первого этапа испытаний пластины удвоенной толщины $2t$ с тем же размером b и силой $R_{\text{круч}}$, которую необходимо приложить при втором этапе испытаний: линейное перемещение под силой $R_{\text{круч}}$ пластины из сдвоенных несущих слоев может оказаться достаточно большим в силу малости $2t$ по сравнению с размером стороны b .

И, наконец, в-третьих, схема не позволяет определить предел прочности при сдвиге $\tau_{\text{вХЗТЗ}}$.

Модуль сдвига $G_{\text{ХЗТЗ}}$ по этой схеме определяется также после двух этапов испытаний.

На первом этапе определяется модуль сдвига пластины из сдвоенных несущих слоев $G_{\text{ХЗнс}}$ [7] после измерения прогиба под силой $R_{\text{круч}}$ $W_{\text{рнс}}$

$$G_{\text{ХЗнс}} = \frac{3P_{\text{круч}}}{2t3W_{\text{рнс}}} \quad (43)$$

На втором этапе при прежней силе $R_{\text{круч}}$ измеряется прогиб $W_{\text{р}}$ образца с ТЗ и вычисляется $W_{\text{рТЗ}}$

$$W_{\text{рТЗ}} = W_{\text{рнс}} - W_{\text{р}} \quad (44)$$

а затем по формуле

$$G_{\text{ХЗТЗ}} = \frac{3P_{\text{круч}}}{\left(2t \frac{G_{\text{ХЗнс}}}{G_{\text{ХЗТЗ}}} + h\right)^3} W_{\text{рТЗ}} \quad (45)$$

вычисляется модуль сдвига $G_{\text{ХЗТЗ}}$, путем решения кубического алгебраического уравнения

$$G_{\text{ХЗТЗ}}^3 + 3P_{\text{круч}}b^2 \left(\frac{3}{4t^2hW_{\text{рнс}}} - \frac{1}{h^3W_{\text{рТЗ}}} \right) \times \\ \times G_{\text{ХЗТЗ}}^2 + 12 \frac{t^2}{h^2} G_{\text{ХЗТЗ}} + 8 \frac{t^3}{h^3} G_{\text{нс}}^3 = 0 \quad (46)$$

В (45) толщина трехслойного образца приведена к материалу ТЗ по модулю сдвига $G_{\text{ХЗТЗ}}$.

Выводы

1. Предложена и разработана новая методика экспериментально-теоретического определения всех ФМХ и прочностных свойств ТЗ по испытаниям трехслойных образцов, интегрально учитывающая все специфические особенности работы заполнителя в реальных условиях.

2. Так как методика построена на классических зависимостях механики анизотропного твердого деформируемого тела, ее результаты могут служить надежной проверкой теоретических значений этих характеристик, полученных на базе аналитических математических моделей в [8-11], а также проверки и сравнения результатов с полученными в [12-13].

Литература

1. Лехницкий, С. Г. *Анизотропные пластинки [Текст] / С. Г. Лехницкий. - М. - Л.: ОГИЗ Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1947. - 356 с.*
2. Анкудинов, Д. Т. *Малобазные тензодатчики сопротивления [Текст] / Д. Т. Анкудинов, К. Н. Мамаев. - М.: Машиностроение, 1968. - 188 с.*
3. Сливинский, В. И. *Анализ стандартных методов механических испытаний сотовых заполнителей на поперечное растяжение и сжатие [Текст] / В. И. Сливинский // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». - Вып. 16(3). - Харьков: ГАКУ, 1999. - С. 25 - 37.*
4. Сливинский, В. И. *Анализ методов механических испытаний сотовых заполнителей на сдвиг [Текст] / В. И. Сливинский // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». - Вып. 18(1). - Харьков: ГАКУ, 2000. - С. 68 - 77.*
5. *Физико-механические свойства конструкционного стеклопластика холодного отверждения [Текст] / В. Е. Гайдачук, В. В. Кириченко, А. Ф. Пильник, В. И. Тимошенко // Самолетостроение и техника воздушного флота. - Харьков, 1972. - Вып. 28. - С. 84 - 92.*
6. *Физические и механические свойства стеклопластиков [Текст]: справочное пособие / под ред. Ю. М. Молчанова. - Рига «Зинатне», 1969. - 265 с.*
7. *Композиционные материалы [Текст]: справочник / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др. / под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. - М.: Машиностроение, 1990. - 512с.*
8. Гайдачук, В. Е. *Приведенные физико-механические характеристики трубчатого заполнителя для трехслойных конструкций летательных аппаратов [Текст] / 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». - Вып. 44. - X., 2009. - С. 67 - 78.*
9. Омельченко, Е. В. *Приведенные пределы прочности трубчатых заполнителей для композитных трехслойных панелей летательных аппаратов [Текст] / Е. В. Омельченко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных ап-*

паратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4(60). – X, 2009. – С. 34 – 42.

10. Приведенные физико-механические характеристики композиционного материала с трубчатыми элементами [Текст] / 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». – Вып. 48. – X., 2010. – С. 154 – 166.

11. Омельченко, Е. В. Приведенные пределы прочности квазиоднородного композиционного материала с трубчатыми элементами и обшивками [Текст] / Е. В. Омельченко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 1(65). – X,

2011. – С. 49 – 62.

12. Кондратьев, А. В. Численное определение приведенных упругих физико-механических характеристик трубчатого заполнителя [Текст] / А. В. Кондратьев, Е. В. Майорова, А. А. Чумак // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 69 (1). – X., 2012. – С. 70 – 79.

13. Кондратьев, А. В. Определение физико-механических характеристик композитной трубчатой структуры при помощи МКЭ-поддержки и сравнение их с аналитическими результатами [Текст] / А. В. Кондратьев, Е. В. Майорова, К. Д. Стэнлиэ // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 69(1). – X., 2012. – С. 124 – 131.

Поступила в редакцию 25.11.2013, рассмотрена на редколлегии 11.12.2013

Рецензент: канд. техн. наук, профессор, профессор кафедры проектирования ракетно-космических аппаратов В. В. Кириченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І МІЦНІСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СЕНДВІЧЕВОЇ ТРУБЧАСТОЇ СТРУКТУРИ З ПКМ

О. В. Гайдачук, К. В. Майорова, О. О. Чумак

Розроблено експериментально-теоретичну методику визначення фізико-механічних характеристик (ФМХ) і міцнісних властивостей сендвічевої трубчастої структури з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ). Методику побудовано на класичних залежностях механіки анізотропного твердого тіла, що деформується і дозволяє визначити наведені ФМХ і міцнісні властивості в напрямку всіх трьох осей координат і відповідних їм площинах з випробувань тришарових зразків, інтегрально враховує всі специфічні особливості роботи заповнювача в реальних умовах.

Ключові слова: полімерні композитні матеріали, трубчастий заповнювач, наведені ФМХ і міцнісні властивості.

EXPERIMENTAL-THEORETICAL METHOD OF DETERMINING PHYSICAL-MECHANICAL CHARACTERISTICS AND STRENGTH PROPERTIES OF SANDWICH TUBULAR STRUCTURES FROM PCM

A. V. Gaydachuk, E. V. Mayorova, A. A. Chumak

Developed experimental-theoretical method of determination of physical-mechanical characteristics (PMCh) and strength properties of sandwich tubular structures from polymeric compositions materials (PCM). Procedure is based on the classic dependencies mechanics anisotropic deformable of deformable body and allows to determine the PMCh and strength properties in the direction of all three coordinate axes and the corresponding planes of tests of three-layer samples, integral takes into account all specific features of the work of the placeholder in real conditions.

Key words: polymer composite materials, tubular placeholder, the PMCh and strength properties.

Гайдачук Александр Витальевич – д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе, зав. каф. ракетно-космических двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: a.gaydachuk@khai.edu.

Майорова Екатерина Владимировна – аспирант кафедры проектирования ракетно-космических аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: astra82@mail.ru.

Чумак Александр Александрович – аспирант кафедры проектирования ракетно-космических аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.