УДК 629.7.023.2

Я.С. Карпов, д-р техн. наук,
О.В. Ивановская, канд. техн. наук,
М. Жаркан (Mohammed R. Gharkan)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАТИВНЫХ СВОЙСТВ КОНЕЧНО-РАЗМЕРНОГО ОБЪЕМА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ТРАНСВЕРСАЛЬНЫМ АРМИРОВАНИЕМ

Для повышения межслоевой прочности композиционного материала (КМ) применяют дополнительное трансверсальное армирование композитными или металлическими стержнями малого диаметра, внедряемыми в препрег.

При внедрении дополнительных армирующих элементов в незаполимеризованный препрег волокна искривляются и изменяется их объемное содержание. Такой КМ является неоднородным и обладает переменной анизотропией физико-механических характеристик. Для количественной оценки характеристик материала необходим математический аппарат для их расчета.

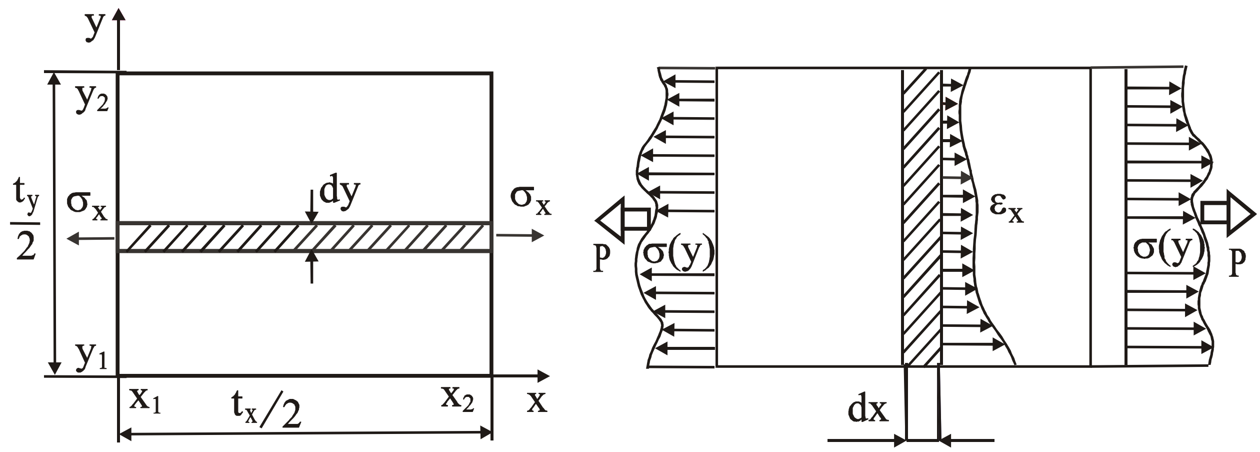
В работе [1] была решена задача по определению физико-механических свойств слоистого материала как трехмерного тела на микроуровне. Второй важной задачей является вычисление осредненных характеристик материала на макроуровне (по наперед заданному представительному или произвольному объему), что необходимо для реализации дискретных расчетных схем и численного решения разрешающих дифференциальных уравнений при исследовании напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций и их элементов. Эта задача возникает в связи с зависимостью физико-механических свойств армированного КМ от координат. Пути и методы решения таких задач в литературе не обсуждаются, что связано, вероятно, с отсутствием до настоящего времени потребности в таких расчетах.

Осреднение упругих свойств КМ проводится для двух схем деформирования (см. рисунок), соответствующих плоским напряжениям (рисунок, а) и плоским деформациям (рисунок, б). Выделим полоску шириной dy (рисунок, а), а на ней элемент длиной dx.

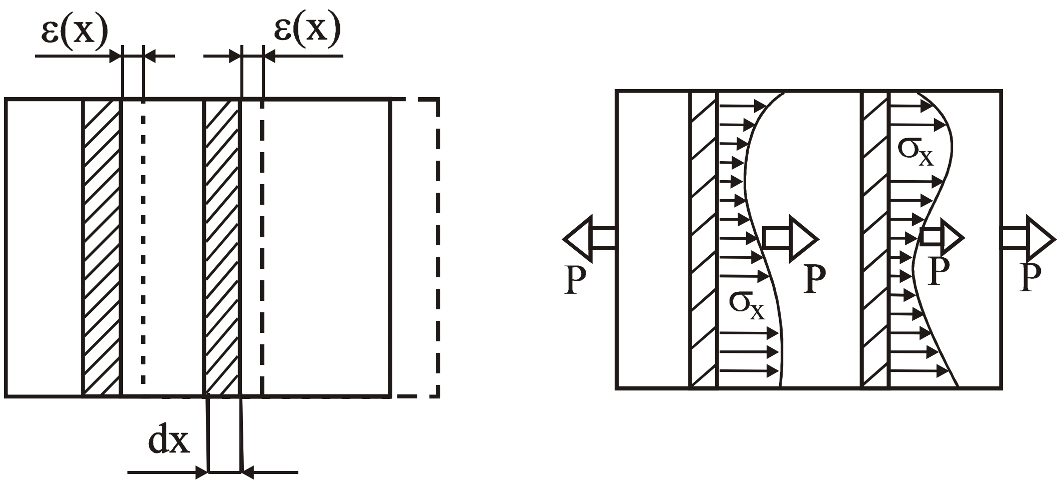
Напряжения σ_x являются постоянными по длине полоски. (Аналогичное допущение применено в монографии [2] для решения подобной задачи). Деформация элемента размером $dx\,dy$

$$\varepsilon_x^* = \sigma_x / E_x , \tag{1}$$

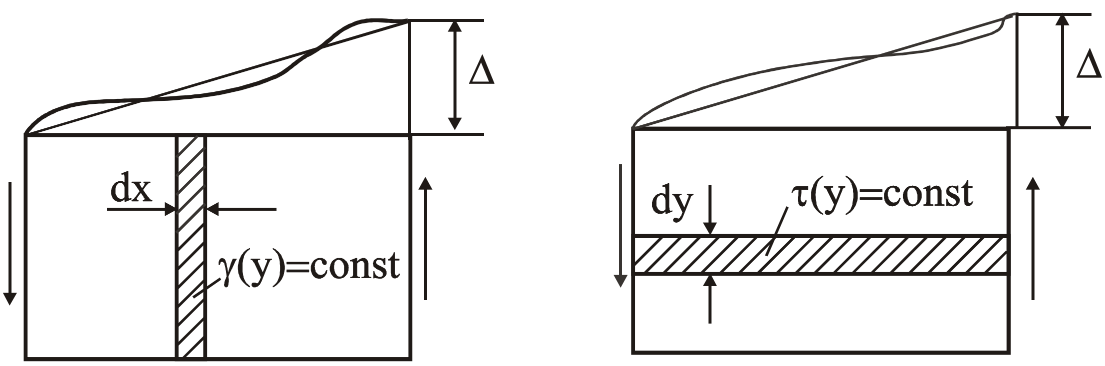
где E_x - модуль упругости пакета слоев по оси x.


y
y_2
$\frac{t_y}{2}$
σ_x
dy
σ_x
y_1
x_1
$t_x/2$
x_2
x
P
$\sigma(y)$
ε_x
$\sigma(y)$
P
dx

а


$\varepsilon(x)$
$\varepsilon(x)$
dx
σ_x
P
P
σ_x
P
P

б


Δ
dx
$\gamma(y)$=const
Δ
dy
$\tau(y)$=const

в

Суммарное удлинение выделенной полоски определяется выражением

$$\Delta_x = \int_{x_1}^{x_2} \varepsilon_x^* dx = \sigma_x \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{E_x}, \qquad (2)$$

а ее деформация по оси x

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta_x}{x_2 - x_1} = \frac{\sigma_x}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{E_x}. \qquad (3)$$

Найдем величину суммарного усилия, обеспечивающего одинаковые деформации всем полоскам:

$$P = \int_{y_1}^{y_2} \sigma_x dy = \varepsilon_x (x_2 - x_1) \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{E_x}} = \sigma_{xcp}(y_2 - y_1). \qquad (4)$$

Тогда средний модуль упругости по оси x определяем так:

$$E_{xн} = \frac{\sigma_{xcp}}{\varepsilon_x} = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{E_x}}. \qquad (5)$$

Допуская возможность плоского деформированного состояния (см. рисунок, б), выделим полоску длиной dx, а на ней элемент шириной dy, для которого имеет место зависимость

$$\sigma_x = \varepsilon_x^* E_x, \qquad (6)$$

где ε_x^* - деформация полоски.

Суммарное усилие, растягивающее полоску на величину ε_x^*, определяют следующим образом:

$$P = \int_{y_1}^{y_2} \sigma_x dy = \varepsilon_x^* \int_{y_1}^{y_2} E_x dy = \sigma_{xcp}(y_2 - y_1), \qquad (7)$$

откуда

$$\varepsilon_x^* = \sigma_{xcp}(y_2 - y_1) \frac{1}{\int_{y_1}^{y_2} E_x dy}. \qquad (8)$$

Удлинение рассматриваемого элемента вычисляют путем интегрирования по оси x деформаций всех полосок:

$$\Delta_x = \int_{x_1}^{x_2} \varepsilon_x^* dx = \sigma_{xcp}(y_2 - y_1) \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\int_{y_1}^{y_2} E_x dy} = \varepsilon_x (x_2 - x_1). \qquad (9)$$

Отсюда

$$\frac{1}{E_{xд}} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\int_{y_1}^{y_2} E_x dy}, \qquad (10)$$

где $E_{xд}$ - модуль упругости элемента КМ с размерами $(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)$ при плоских деформациях.

Аналогичным путем получим формулы для расчета упругих констант по оси y:

$$E_{yн} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{E_y}}; \quad \frac{1}{E_{yд}} = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{\int_{x_1}^{x_2} E_y dx}, \qquad (11)$$

где E_y - модуль упругости пакета слоев по оси y.

При определении коэффициента Пуассона $\mu_{xyн}$ примем, что под нагрузкой P торцы элемента $x = x_1$ и $x = x_2$ остаются плоскими и параллельными исходному положению. В качестве поперечной деформации принимается средняя деформация всех полосок ширины dy (см. рисунок, а).

Поперечную деформацию элемента с размерами $dx\,dy$ находят по определению коэффициента Пуассона:

$$\varepsilon_y = -\mu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x}, \qquad (12)$$

где μ_{xy} - коэффициент Пуассона пакета слоев.

Выразим из (3) напряжение σ_x и подставим его в (12). Тогда

$$\sigma_x = \frac{\varepsilon_x (x_2 - x_1)}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{E_x}}; \qquad (13)$$

$$\varepsilon_y = -\mu_{xy} \frac{\varepsilon_x}{E_x} \cdot \frac{x_2 - x_1}{\int\limits_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{E_x}}. \qquad (14)$$

Проинтегрировав эти деформации по оси y, получим суммарную деформацию полоски шириной dx

$$\varepsilon_y^* = -\frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \varepsilon_x \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{\mu_{xy} dy}{E_x \int\limits_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{E_x}}. \qquad (15)$$

Среднее значение поперечной деформации находят по формуле

$$\varepsilon_{y\text{ср}} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int\limits_{x_1}^{x_2} \varepsilon_y^* dx = -\frac{\varepsilon_x}{y_2 - y_1} \int\limits_{x_1}^{x_2} dx \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{\mu_{xy} dy}{E_x \int\limits_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{E_x}}. \qquad (16)$$

Отсюда с учетом (12) получим выражение для определения коэффициента Пуассона

$$\mu_{xy\text{н}} = \frac{1}{y_2 - y_1} \int\limits_{x_1}^{x_2} dx \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{\mu_{xy} dy}{E_x \int\limits_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{E_x}}. \qquad (17)$$

В случае плоской деформации (см. рисунок, б) суммарная деформация по оси x

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_{x\text{ср}}}{E_{x\text{д}}}. \qquad (18)$$

Деформация элемента $dx\,dy$ в поперечном направлении определяется зависимостью

$$\varepsilon_y = -\mu_{xy} \varepsilon_x^*. \qquad (19)$$

Поперечная деформация полоски длиной dx

$$\varepsilon_y^* = \frac{\varepsilon_x^*}{y_2 - y_1} \int\limits_{y_1}^{y_2} \mu_{xy} dy. \qquad (20)$$

Подставим выражение (8) в (20)

$$\varepsilon_y^* = -\sigma_{xcp} \frac{\int\limits_{y_1}^{y_2} \mu_{xy} dy}{\int\limits_{y_1}^{y_2} E_x dy}. \tag{21}$$

Среднее значение поперечной деформации всего элемента находят по формуле

$$\varepsilon_{ycp} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int\limits_{x_1}^{x_2} \varepsilon_y^* dx = -\frac{\sigma_{xcp}}{x_2 - x_1} \int\limits_{x_1}^{x_2} dx \frac{\int\limits_{y_1}^{y_2} \mu_{xy} dy}{\int\limits_{y_1}^{y_2} E_x dy}. \tag{22}$$

На основании определения коэффициента Пуассона и формул (18) и (22) находим

$$\mu_{xyд} = -\frac{\varepsilon_{ycp}}{\varepsilon_x} = \frac{E_{xд}}{x_2 - x_1} \int\limits_{x_1}^{x_2} dx \frac{\int\limits_{y_1}^{y_2} \mu_{xy} dy}{\int\limits_{y_1}^{y_2} E_x dy}. \tag{23}$$

Проведя аналогичные выкладки, получим формулы для коэффициентов Пуассона $\mu_{yxн}$ и $\mu_{yxд}$:

$$\mu_{yxн} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int\limits_{y_1}^{y_2} dy \int\limits_{x_1}^{x_2} \frac{\mu_{yx} dx}{E_y \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{E_y}};$$

$$\mu_{yxд} = \frac{E_{yд}}{y_2 - y_1} \int\limits_{y_1}^{y_2} dy \frac{\int\limits_{x_1}^{x_2} \mu_{yx} dx}{\int\limits_{x_1}^{x_2} E_y dx}. \tag{24}$$

Вопрос о применимости тех или иных формул следует решать совместно с расчетной схемой конструкции при исследовании ее НДС. По результатам вычислений следует оценить невязку упругого потенциала, хотя в строгом смысле его соблюдение для элемента конструкции (а исследуемая модель фактически является конструкцией) не обязательно.

Рассмотрим деформирование модели КМ под действием касательных усилий (см. рисунок, в).

Сдвигающие напряжения в элементарной ячейке

$$\tau = \gamma^{*} G_{xy},$$

где γ^{*} - сдвиговая деформация, не зависящая от координаты y.

Результирующее усилие определяется так:

$$Q = \int_{y_1}^{y_2} \tau dy = \gamma^{*} \int_{y_1}^{y_2} G_{xy} dy = \tau_{cp}(y_2 - y_1). \quad (25)$$

Среднюю сдвиговую деформацию находят по формуле

$$\gamma_{cp} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \gamma^{*} dx = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \tau_{cp} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\int_{y_1}^{y_2} G_{xy} dy}. \quad (26)$$

Отсюда для модуля сдвига получим следующее выражение:

$$\frac{1}{G_{xyд}} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\int_{y_1}^{y_2} G_{xy} dy}. \quad (27)$$

Вторым путем, основанным на постоянстве касательных напряжений по длине полоски шириной dy, получим зависимость

$$G_{xyн} = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{G_{xy}}}. \quad (28)$$

Для определения трансверсального модуля упругости примем, что модель нагружена напряжениями, обеспечивающими пакету деформацию $\varepsilon_z = const$. Тогда значение средних напряжений можно найти по формуле

$$\sigma_z = \frac{\varepsilon_z}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} E_z dx dy. \quad (29)$$

Из этой формулы

$$E_{z\text{д}} = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \int\limits_{y_1}^{y_2} \int\limits_{x_1}^{x_2} E_z dxdy. \tag{30}$$

При нагружении элемента постоянными напряжениями $\sigma_z = \text{const}$ получим следующее выражение для $E_{z\text{н}}$:

$$E_{z\text{н}} = \frac{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)}{\int\limits_{y_1}^{y_2} \int\limits_{x_1}^{x_2} \frac{dxdy}{E_z}}. \tag{31}$$

Опуская цепочку простых выкладок, ниже приведем формулы для поперечных модулей сдвига:

$$G_{xz\text{н}} = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{\int\limits_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{G_{xz}}};$$

$$G_{xz\text{д}} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \int\limits_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\int\limits_{y_1}^{y_2} G_{xz} dy}; \tag{32}$$

$$G_{xz}^{*} = \frac{1}{(y_2 - y_1)(x_2 - x_1)} \int\limits_{y_1}^{y_2} \int\limits_{x_1}^{x_2} G_{xz} dxdy;$$

$$G_{yz}^{*} = \frac{1}{(y_2 - y_1)(x_2 - x_1)} \int\limits_{y_1}^{y_2} \int\limits_{x_1}^{x_2} G_{yz} dxdy; \tag{33}$$

$$G_{yz\text{н}} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \int\limits_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{G_{yz}}};$$

$$G_{yz\text{д}} = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{\int\limits_{x_1}^{x_2} G_{xz} dx}. \tag{34}$$

Заметим, что формулы (33) получены из условия постоянства касательных напряжений по всему объему элемента КМ.

Рассматривая деформирование представительного элемента КМ под действием нормальных (σ_x, σ_y) и касательных (τ_{xy}) напряжений, получаем следующие выражения для осредненных коэффициентов взаимного влияния:

$$\eta_{x,xyн} = \frac{1}{y_2 - y_1} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\eta_{x,xy} dxdy}{G_{xy} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{G_{xy}}};$$

$$\eta_{y,xyн} = \frac{1}{y_2 - y_1} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\eta_{y,xy} dxdy}{G_{xy} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{G_{xy}}}; \qquad (35)$$

$$\eta_{z,xyн} = \frac{1}{y_2 - y_1} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\eta_{z,xy} dxdy}{G_{xy} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{G_{xy}}};$$

$$\eta_{x,xyд} = \frac{G_{xyд}}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\eta_{x,xy} dxdy}{\int_{y_1}^{y_2} G_{xy} dy};$$

$$\eta_{y,xyд} = \frac{G_{xyд}}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\eta_{y,xy} dxdy}{\int_{y_1}^{y_2} G_{xy} dy}; \qquad (36)$$

$$\eta_{z,xyд} = \frac{G_{xyд}}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\eta_{z,xy} dxdy}{\int_{y_1}^{y_2} G_{xy} dy};$$

$$\eta_{xy,x\text{н}} = \frac{1}{y_2 - y_1} \int\limits_{x_1}^{x_2} \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{\eta_{xy,x} dxdy}{E_x \int\limits_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{E_x}};$$

$$\eta_{xy,y\text{н}} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int\limits_{x_1}^{x_2} \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{\eta_{xy,y} dxdy}{E_y \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{E_y}}; \qquad (37)$$

$$\eta_{xy,z\text{н}} = \frac{E_{z\text{н}}}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \int\limits_{x_1}^{x_2} \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{\eta_{xy,z} dxdy}{E_z};$$

$$\eta_{xy,x\text{д}} = \frac{E_{x\text{д}}}{x_2 - x_1} \int\limits_{x_1}^{x_2} \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{\eta_{xy,x} dxdy}{\int\limits_{y_1}^{y_2} E_x dy};$$

$$\eta_{xy,y\text{д}} = \frac{E_{y\text{д}}}{y_2 - y_1} \int\limits_{x_1}^{x_2} \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{\eta_{xy,y} dxdy}{\int\limits_{y_1}^{y_2} E_y dy}; \qquad (38)$$

$$\eta_{xy,z\text{д}} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \int\limits_{x_1}^{x_2} \int\limits_{y_1}^{y_2} \eta_{xy,z} dxdy;$$

$$\eta_{yz,xzн} = \frac{1}{y_2 - y_1} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\eta_{yz,xz} dxdy}{G_{xz} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{G_{xz}}};$$

$$\eta_{xz,yzн} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\eta_{xz,yz} dxdy}{G_{yz} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{G_{yz}}};$$

$$\eta_{yz,xzд} = \frac{G_{xzд}}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\eta_{yz,xz} dxdy}{\int_{y_1}^{y_2} G_{xz} dy}; \qquad (39)$$

$$\eta_{xz,yzд} = \frac{G_{yzд}}{y_2 - y_1} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\eta_{xz,yz} dxdy}{\int_{x_1}^{x_2} G_{yz} dx}.$$

Аналогичным путем выведены следующие выражения для коэффициентов Пуассона:

$$\mu_{zxн} = \frac{E_{zн}}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\mu_{zx} dxdy}{E_z};$$

$$\mu_{zxд} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \mu_{zx} dxdy; \qquad (40)$$

$$\mu_{zyн} = \frac{E_{zн}}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\mu_{zy} dxdy}{E_z};$$

$$\mu_{zyд} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \mu_{zy} dxdy; \qquad (41)$$

$$\mu_{xz\text{н}} = \frac{1}{y_2 - y_1} \int\limits_{x_1}^{x_2} \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{\mu_{xz} dxdy}{E_x \int\limits_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{E_x}};$$

$$\mu_{xz\text{д}} = \frac{E_{z\text{д}}}{x_2 - x_1} \int\limits_{x_1}^{x_2} \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{\mu_{xz} dxdy}{\int\limits_{y_1}^{y_2} E_x dy}; \tag{42}$$

$$\mu_{yz\text{н}} = \frac{1}{x_2 - x_1} \int\limits_{x_1}^{x_2} \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{\mu_{yz} dxdy}{E_y \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{E_y}};$$

$$\mu_{yz\text{д}} = \frac{E_{y\text{д}}}{y_2 - y_1} \int\limits_{x_1}^{x_2} \int\limits_{y_1}^{y_2} \frac{\mu_{yz} dxdy}{\int\limits_{x_1}^{x_2} E_y dx}. \tag{43}$$

Описанная методика определения осредненных упругих констант КМ с переменной анизотропией и полученные результаты не являются достаточно строгими в смысле механики деформируемого твердого тела. Во-первых, формулы для модулей упругости, коэффициентов Пуассона и взаимного влияния существенно зависят от принятой модели деформирования, о чем свидетельствуют различные выражения для одного и того же параметра, во-вторых, определяемые величины являются не упругими константами в классическом понимании, а некими коэффициентами жесткости выделенного объема КМ, представляющего собой конструктивный элемент, и, в третьих, очевидно, что справедливость тех или иных формул непосредственно связана с расчетной схемой макроконструкции в целом.

Заметим также, что экспериментальные исследования, как правило, изучают представительные модели, т.е. такие, из которых можно сложить весь образец (конструкцию), поэтому физический закон для таких элементов аналогичен соотношениям для ортотропных тел и имеет вид

$$\varepsilon_x^* = \frac{\sigma_x^*}{E_x^*} - \mu_{yx}^* \frac{\sigma_y^*}{E_y^*} - \mu_{zx}^* \frac{\sigma_z^*}{E_z^*}; \tau_{xy}^* = G_{xy}^* \gamma_{xy}^*;$$

$$\varepsilon_y^* = -\mu_{xy}^* \frac{\sigma_x^*}{E_x^*} + \frac{\sigma_y^*}{E_y^*} - \mu_{zy}^* \frac{\sigma_z^*}{E_z^*}; \gamma_{yz}^* = \frac{\tau_{yz}^*}{G_{yz}^*}; \qquad (44)$$

$$\varepsilon_z^* = -\mu_{xz}^* \frac{\sigma_x^*}{E_x^*} - \mu_{yz}^* \frac{\sigma_y^*}{E_y^*} + \frac{\sigma_z^*}{E_z^*}; \gamma_{xz}^* = \frac{\tau_{xz}^*}{G_{xz}^*},$$

где $\sigma_x^*, \sigma_y^*, \sigma_z^*, \tau_{xy}^*, \tau_{xz}^*, \tau_{yz}^*$ - средние значения напряжений по соответствующим поверхностям, определяемые по следующей общей формуле:

$$\Phi^* = \frac{1}{(y_2 - y_1)(x_2 - x_1)} \int\limits_{x_1}^{x_2} \int\limits_{y_1}^{y_2} \Phi(x, y) dx dy; \qquad (45)$$

$\varepsilon_x^*, \varepsilon_y^*, \varepsilon_z^*, \gamma_{xy}^*, \gamma_{xz}^*, \gamma_{yz}^*$ - средние значения деформаций по соответствующим границам элемента;

$E_x^*, E_y^*, E_z^*, G_{xy}^*, G_{xz}^*, G_{yz}^*, \mu_{yx}^*, \mu_{xz}^*, \mu_{yz}^*$ - упругие константы элемента, вычисляемые по приведенным выше формулам для схемы деформирования, отвечающей расчетной схеме макроконструкции.

В дальнейшем планируется решить задачу достоверного прогнозирования прочности трансверсально-армированного слоистого КМ, которая является исключительно актуальной и важной из-за большого количества варьируемых параметров (углы армирования, последовательность укладки слоев, диаметр и пространственное положение стержней, тип КМ слоев и др.), что практически исключает формирование базы экспериментальных данных.

Вывод

Впервые обоснована и разработана теория осреднения свойств КМ с переменной анизотропией по наперед заданному объему, что имеет большое значение для расчета конструкций дискретными методами, а также для сопоставления экспериментальных и теоретических результатов (измерение деформаций, например, тензорезисторами проводится на базе датчика). За основу приняты модели плоских деформаций и плоских напряжений, которые наиболее часто используются в механике КМ.

Список использованных источников

1. Жаркан М. (Gharkan Mohammed R.) Упругие константы трехмерного тела трансверсально-армированного слоистого композиционного материала / М. Жаркан (Mohammed R. Gharkan) // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»: - Вып.2(58). – Х., 2009. – С. 16-24.

2. Елпатьевский А.Н., Васильев В.В. Прочность цилиндричесних оболочек из армированных материалов / А.Н. Елпатьевский, В.В. Васильев. - М.: Машиностроение, 1972. – 168 с.

Поступила в редакцию 5.09.09.
Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков