

Я.С. Карпов, докт. техн. наук,
Д.С. Кива, докт. техн. наук,
В.М. Фролов.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, АРМИРОВАННЫХ ТРАНСВЕРСАЛЬНЫМИ СТЕРЖНЯМИ.

Перспективным и доступным конструктивно-технологическим решением для повышения межслоевой прочности и жесткости композиционных материалов (КМ) является их дополнительное армирование трансверсальными композитными или металлическими стержнями малого диаметра (рис.1).

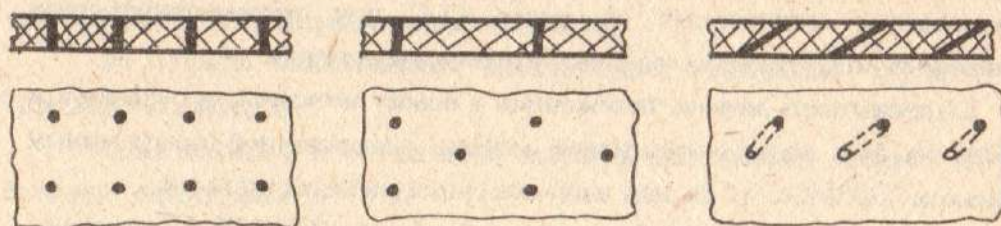


Рис. 1.

В работе /1/ построена модель взаимодействия компонентов и слоев КМ с трансверсальным армирующим элементом и получены формулы для определения изменившихся углов армирования и значений объемного содержания волокон. В статье /2/ разработана методика определения упругих констант слоистого КМ в трех направлениях, по которой можно вычислить модули упругости, коэффициенты Пуассона, взаимного влияния и линейного температурного расширения в произвольной точке в окрестности армирующего элемента.

Практическая реализация современных численных методов определения напряженно-деформированного состояния конструкций основана на использовании физико-механических свойств конечно-размерного объема КМ. В связи с этим актуальной является задача осреднения характеристик неоднородных сред с переменной анизотропией, формирующихся в результате заформовки стержней, внедренных в препрег КМ при выкладке изделий.

Инженерное исследование деформирования выделенного объема КМ (рис. 2) проводится на основе допущений о постоянстве напряжений по полоске ширины δy (см. рис. 2, а) и деформаций по полоске dx (см. рис. 2, б), что соответствует гипотезам плоских напряжений и плоских деформаций.

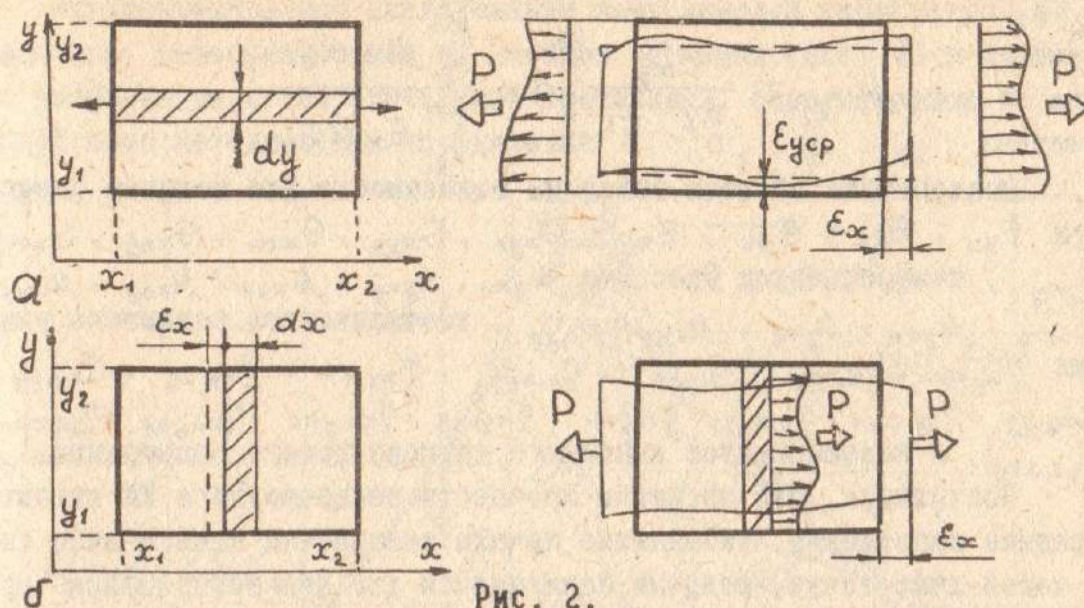


Рис. 2.

После определения напряжений $\sigma_x(y)$, обеспечивающих одинаковые деформации ϵ_x всех полосок (см. рис. 2, а), и их среднего значения по торцу параллелепипеда $\sigma_{xcр}$ получим следующую формулу для модуля упругости $E_{xн}$:

$$E_{xн} = \frac{\sigma_{xcр}}{\epsilon_x} = \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} \int_{y_1}^{y_2} \frac{dy}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{E_x}} \quad (1)$$

Нахождение напряжений, обеспечивающих постоянство деформаций каждой полоски dx (см. рис. 2, б), суммирование деформаций по оси x и определение среднего напряжения приводит к следующей зависимости для модуля упругости $E_{xг}$:

$$\frac{1}{E_{xг}} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\int_{y_1}^{y_2} E_{xc} dy}, \quad (2)$$

где x_1 , x_2 , y_1 , y_2 - координаты сторон рассматриваемого объема КМ (см. рис. 2).

Суммирование и осреднение деформаций по координатным осям x и y приводит к следующим формулам для определения коэффициентов Пуассона согласно двум расчетным схемам:

$$\mu_{xyn} = \frac{1}{y_2 - y_1} \int_{x_1}^{x_2} dx \int_{y_1}^{y_2} \frac{\mu_{xy} dy}{E_x \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{E_x}}; \quad (3)$$

$$\mu_{xyg} = \frac{E_{xg}}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} dx \frac{\int_{y_1}^{y_2} \mu_{xy} dy}{\int_{y_1}^{y_2} E_x dy}. \quad (4)$$

Аналогичным образом выведены зависимости для модулей упругости $E_{yn}, E_{yg}, E_{zn}, E_{zg}, G_{xyn}, G_{xyg}, G_{xzn}, G_{xzg}, G_{yzn}, G_{yzg}$, коэффициентов Пуассона $\mu_{xyn}, \mu_{xyg}, \mu_{xzn}, \mu_{xzg}, \mu_{zyn}, \mu_{zxyg}, \mu_{zxn}, \mu_{zng}$, коэффициентов взаимного влияния $\eta_{x,xyn}, \eta_{x,xyg}, \eta_{y,xyn}, \eta_{y,xyg}, \eta_{xy,xyn}, \eta_{xy,xyg}, \eta_{xy,yn}, \eta_{xy,yg}, \eta_{x,xyn}, \eta_{z,xyg}, \eta_{xy,zn}, \eta_{xy,zg}, \eta_{xz,yzn}, \eta_{xz,yzg}, \eta_{yz,xzn}, \eta_{yz,xzg}$, и коэффициентов линейного температурного расширения.

Постулируя, что пределом прочности неоднородного КМ являются средние напряжения, вызывающие начало разрушения какого-либо слоя в какой-либо точке, получим зависимости для прогнозирования пределов прочности конечно-размерного объема КМ, имеющие вид:

$$F_{xn} = \min_{\substack{1 \leq i \leq n \\ x_1 \leq x \leq x_2 \\ y_1 \leq y \leq y_2}} \left[\frac{E_{xn}}{\Phi_{xn}} \left(\frac{A_{x1i}^2}{F_{1i}^2} - \frac{A_{x1i} A_{x2i}}{F_{1i}^2} + \frac{A_{x2i}^2}{F_{2i}^2} + \frac{A_{x12i}^2}{F_{12i}^2} \right)^{0,5} \right]; \quad (5)$$

$$F_{xg} = \min_{\substack{1 \leq i \leq 1 \\ x_1 \leq x \leq x_2 \\ y_1 \leq y \leq y_2}} \left[\frac{1}{\Phi_{xg}} \left(\frac{A_{x1i}^2}{F_{1i}^2} - \frac{A_{x1i} A_{x2i}}{F_{1i}^2} + \frac{A_{x2i}^2}{F_{2i}^2} + \frac{A_{x12i}^2}{F_{12i}^2} \right)^{0,5} \right],$$

где:

$$\Phi_{xn} = \frac{x_2 - x_1}{E_x \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{E_x}}; \quad \Phi_{xg} = \frac{y_2 - y_1}{\int_{y_1}^{y_2} E_x dy}; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} A_{x1i} &= \bar{E}_{1i} \left[(1 - \mu_{z1i} \mu_{xy}) \cos^2 \varphi_i + (\mu_{z1i} - \mu_{xy}) \sin^2 \varphi_i + \right. \\ &\quad \left. + \eta_{xy,x} (1 - \mu_{z1i}) \sin \varphi_i \cos \varphi_i \right]; \\ A_{x2i} &= \bar{E}_{2i} \left[(\mu_{12i} - \mu_{xy}) \cos^2 \varphi_i + (1 - \mu_{12i} \mu_{xy}) \sin^2 \varphi_i + \right. \\ &\quad \left. + \eta_{xy,x} (\mu_{12i} - 1) \sin \varphi_i \cos \varphi_i \right]; \end{aligned} \quad (7)$$

$$A_{x12i} = G_{12i} \left[\eta_{xy,z} \cos 2\varphi_i - (1 + \mu_{xy}) \sin 2\varphi_i \right].$$

Такого типа формулы получены для пределов прочности по осям y и z , а также на сдвиг в плоскостях xy, xz, yz .

Разработанная методика реализована в программном комплексе, с помощью которого проведено параметрическое исследование зависимости средних упругих и прочностных свойств от параметров трансверсального армирования. Некоторые результаты показаны на рис. 3.

Экспериментальное исследование поля модулей упругости E_x и E_y с помощью тензорезисторов на плоских образцах (рис. 4) и сравнение результатов с теоретическими значениями, определенными по описанной выше методике при координатах x_1, x_2, y_1, y_2 , соответ-

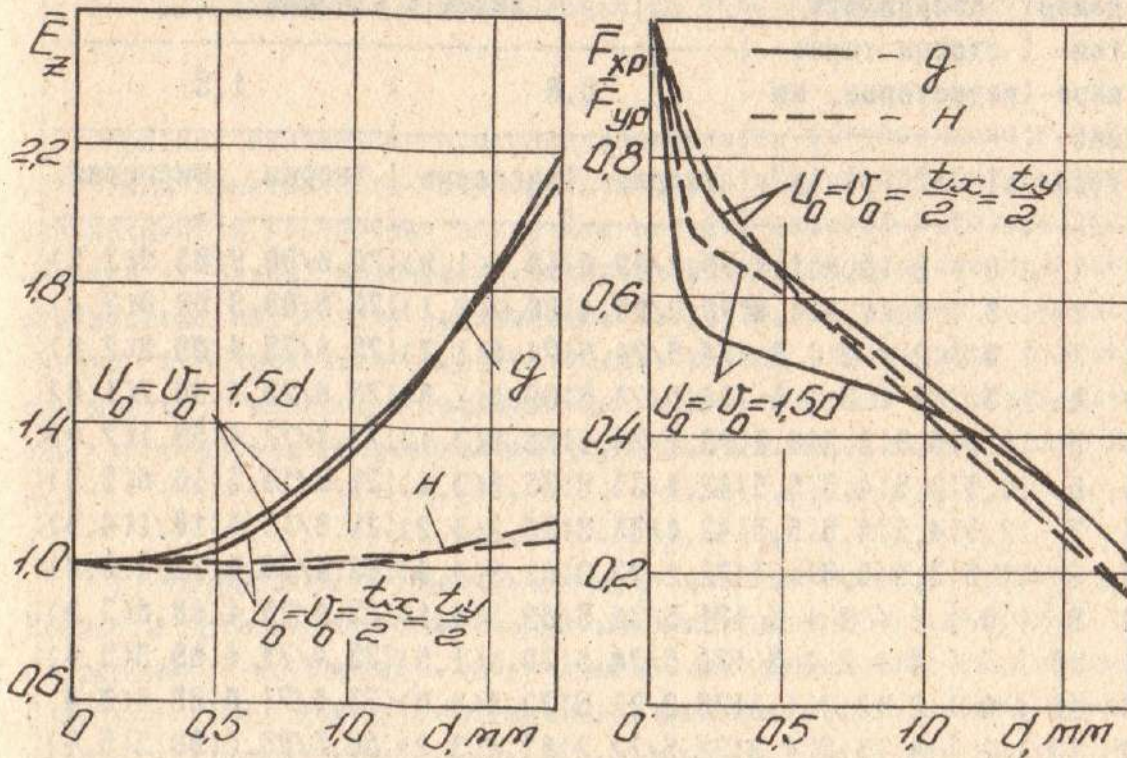


Рис. 3.

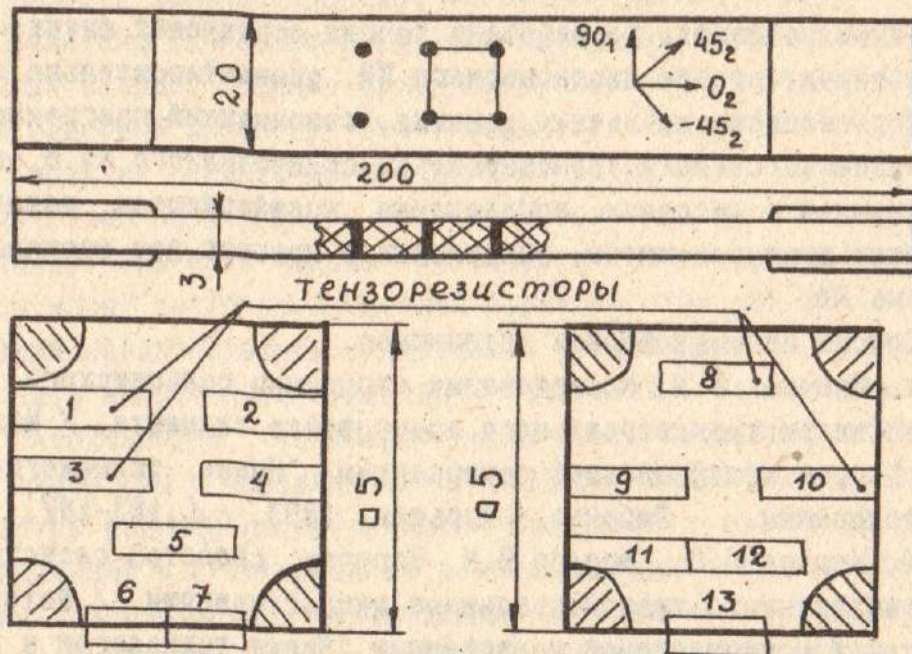


Рис. 4.

ствующих сторонам тензорезистора, подтверждают достаточную точность модели и вытекающих из нее методик (таблица).

Таблица.

Номер тензорезистора	Координаты сторон тензорезисторов, мм				Диаметр стержня			
	x1	x2	y1	y2	теория	эксперим.	теория	эксперим.
1	0	2	0,4	1,4	70,2/69,4	68,1(1,8)	70,6/68,9	65,9(2,5)
2	3	5	0,4	1,4	70,2/69,4	66,7(2,1)	70,6/68,9	68,0(2,4)
3	0	2	2	3	74,5/74,5	71,6(1,7)	75,4/75,4	69,2(2,0)
4	3	5	2	3	74,5/74,5	69,0(1,8)	75,4/75,4	68,7(1,6)
5	1,5	3,5	3,2	4,2	73,1/73,1	68,8(3,1)	72,4/72,4	69,1(7,0)
6	0,5	2,5	4,5	5,5	42,0/33,9	35,8(3,4)	21,8/19,3	16,6(5,9)
7	2,5	4,5	4,5	5,5	42,0/33,9	30,2(5,2)	21,8/19,3	18,1(4,9)
8	1,5	3,5	0,5	1,5	72,2/72,2	61,9(4,0)	82,4/70,9	72,3(3,6)
9	0	2	2	3	74,5/74,5	69,5(2,1)	25,4/75,4	68,8(3,9)
10	3	5	2	3	74,5/74,5	70,1(1,5)	75,4/75,4	69,3(5,0)
11	0	2	3,2	4,2	78,2/77,5	72,5(4,6)	73,6/71,6	65,4(6,4)
12	2	4	3,2	4,2	72,5/72,2	67,6(3,2)	66,5/65,6	60,3(5,8)
13	1,5	3,5	4,5	5,5	67,2/65,0	58,5(2,9)	58,9/53,4	56,3(2,9)

Таким образом, разработаны теория осреднения физико-механических характеристик неоднородного КМ, удовлетворительно согласующаяся с экспериментальными данными, современный программный комплекс расчета свойств трансверсально-армированного КМ в окрестности стержней и методика определения коэффициентов податливости крепежных микроэлементов, внедряемых в препрег при формировании изделий из КМ.

Список использованных источников.

1. Фролов В.М. Исследование структуры волокнистого КМ в окрестности трансверсального армирующего элемента. / Материалы Второй международной конференции "Новые технологии в машиностроении". - Рыбачье - Харьков, 1993. - С.183-187.

4. Карпов Я.С., Фролов В.М. Упругие свойства слоистого КМ, армированного трансверсальными микростержнями. / Материалы Второй международной конференции "Новые технологии в машиностроении". - Рыбачье - Харьков, 1993. - С.255-259.