

УДК 677.017.31:678.029.46

**АНИЗОТРОПИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
НИТОЧНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ КОМПОЗИТОВ**

Г.В. БАШКОВА, Г.И. ЧИСТОБОРОДОВ, А.П. БАШКОВ, Д.А. АЛЕШИНА, И.Ю. НАТЕРТЫШЕВ

(Ивановская государственная текстильная академия)

E-mail: milena55@yandex.ru

В статье обосновывается целесообразность применения основовязаного трикотажа (тамбурного способа петлеобразования) как армирующего наполнителя композиционных материалов. Имея практически равную растяжимость при многоосевых деформациях, такая трикотажная структура технологичнее при формовании объемных деталей.

The article proves the expediency of the application of the warp knitted fabric (tambour method of looping) as the reinforcement for the composite materials. Possessing almost the equal elongation under the multi-axial deformations, such knitting structure is more beneficial from the technological point of view when the three-dimensional details are formed.

Ключевые слова: анизотропия механических свойств, многоосевые нагрузки, армирующий трикотаж, волокнистый композит.

При формовании композитных материалов объемных форм важно, чтобы текстильный армирующий слой получал минимальные и равномерные деформации во всех направлениях, с сохранением целостности и стабильности структуры. Этим требованиям, на наш взгляд, более всего отвечает основовязаный трикотаж. В настоящей работе предлагается использовать изнаночный производный трикотаж тамбурного петлеобразования из льняной

пряжи, полученной из короткого волокна или отходов. Свойства трикотажа легко варьируются за счет введения дополнительных протяжек, набросков, сдваивания петель и прокладывания каркасных уточных нитей. Эти решения позволяют вырабатывать трикотаж широкого диапазона свойств и материалоемкости: от анизотропных до почти изотропных [1]. Использование льняных отходов позволит удешевить продукт и обеспечить хорошую адег-

зию текстильного каркаса с полимерной матрицей композита.

При объемной деформации можно считать, что элементарный участок полотна испытывает двунаправленные напряжения в плоскости (рис. 1). Двухосное напряженное состояние составляет 60...70 % общего напряженного состояния и требует учета деформируемости материала в двух направлениях [2].

В материалах с упорядоченной структурой, например в ткани, прослеживается анизотропность в двух направлениях: по основе и по утку [3]. В основовязаном трикотаже анизотропность будет сложнее, поскольку имеющиеся связи между нитями направлены во многих направлениях, а растяжимость структуры обеспечивается работой нитей не только на растяжение, но и на изгиб. Существенное влияние на деформационные свойства трикотажа оказывает трение между нитями при их взаимном смещении в узлах ячейки [4]. Кроме этого в трикотаже при снятии нагрузок значительно заметнее релаксационные процессы и явления гистерезиса. Все это дает основание со значительной долей вероятности считать, что в макрообъемах полотно будет однородно упруговязким, испытывающим упругие деформации от сил сжатия-растяжения R_{ij} , по нормали к поверхности элементарной площадки и частично необратимые касательные деформации сдвига, определяемые силами трения T_{ij} (рис. 1 – элементарные силы: а) – действующие на нити в текстильной структуре; б) – действующие на элементарную площадку полотна).

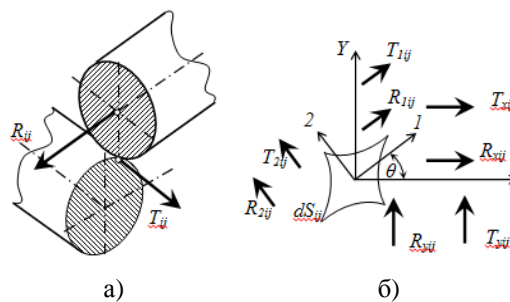


Рис. 1

При изменении направления деформации на угол θ относительно координатных осей необходимо вести оси ортотропии площадки 1-2. Тогда упруговязкое состояние полотна в соответствии с законом Гука можно записать в векторно-матричном виде:

$$\{\varepsilon\} = [C]\{\sigma, \tau\},$$

или

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1x} & C_{2x} \\ C_{1y} & C_{2y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x, \tau_x \\ \sigma_y, \tau_y \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\{\varepsilon\}$ – относительные деформации полотна; $[C]$ – матрица податливости; $\{\sigma\}$ – нормальная компонента напряжения; $\{\tau\}$ – касательная компонента напряжения.

Для расчета деформационных характеристик при изменении направления нагрузки на угол θ можно пользоваться тригонометрическими зависимостями, обозначая их $l = \cos\theta$, $m = \sin\theta$:

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l^2 & m^2 \\ m^2 & l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_X \\ R_Y \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l^2 & m^2 \\ m^2 & l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l^2 & m^2 \\ m^2 & l^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для областей развития упругих дефор-

маций сумма проекций сил на ось X имеет вид [5]:

$$\left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) dy - \sigma_x dy + \eta \left(\tau_{xy} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} dy \right) dx + dG_x = \rho dx dy \frac{dv_x}{dt}, \quad (3)$$

где dG – проекция внешней силы на ось x ; ρ – плотность волокнистой среды; η – коэффициент внутренней вязкости (внутреннего трения); dv_x/dt – проекция на ось x полной производной вектора скорости по времени с учетом локального и конвектив-

ного изменения вектора скорости, записывается в виде:

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y}. \quad (4)$$

После подстановки (4) в уравнение (3) и приведения членов уравнения к единице объема с учетом $\rho g = \gamma$ и преобразований получим:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \gamma + \eta \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial^2 y} + \frac{1}{3 \partial x} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) \right] = \frac{\gamma}{g} \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right). \quad (5)$$

Аналогично находятся уравнение, суммы проекций сил на ось y .

Решение дифференциальных уравнений (5) позволяет составить уравнения со-

стояния линейнодеформируемого тела с вязкопластическими свойствами для зоны упругих и линейных деформаций:

$$\sigma_x = \lambda \varepsilon + 2G_1 \varepsilon_x; \quad \sigma_y = \lambda \varepsilon + 2G_1 \varepsilon_y; \quad \tau_x = G_1 \gamma_x; \quad \tau_y = G_1 \gamma_y, \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{E}{3(1-2\mu)} - \frac{2}{3} G_1; \quad G_1 = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad (7)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_x + \varepsilon_y, \quad \varepsilon_x = \frac{\partial U_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_y = \frac{\partial U_y}{\partial y}, \quad (8)$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; $\partial U_x, \partial U_y$ – проекции линейного перемещения при деформации по осям координат.

Для области предельного состояния среды, после которого деформации необратимы, предполагается существование общей зависимости для выражения интенсивности касательных напряжений

$$T = (H_0 + \sigma_1) \operatorname{tg} \psi + \eta S, \quad (9)$$

где H_0 – связность; σ_1 – среднее нормальное напряжение; $\operatorname{tg} \psi$ – коэффициент тре-

ния; S – интенсивность скоростей деформации сдвига.

Тогда из уравнения (9) получаются механические уравнения состояния вязкопластической деформации полотна в первом приближении:

$$\left. \begin{aligned} H_0 &\cong C_\omega \operatorname{ctg} \rho; \quad \operatorname{tg} \psi \cong \operatorname{tg} \rho, \\ \sigma_1 &= k_1 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где k – модуль объемной вязкости.

Интенсивность скоростей деформации сдвига определяется зависимостями вида:

$$S = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\phi_{xy}^2 + \frac{3}{2} \eta_{1xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad \phi_{xy}^2 = \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2; \quad \eta_{1xy} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x}. \quad (11)$$

Величина η_{1xy} – определяет угловые скорости деформации сдвига.

Таким образом, используя зависимости (1), (2), а также (6)...(8), можно рассчитать деформации трикотажного полотна при

многоосевых нагрузках. Задача сводится к корректному определению величин коэффициента Пуассона μ , модуля упругости E и удлинения образца $\partial U_x, \partial U_y$.

Значения удлинения и модуля упругости для экспериментального образца основовязаного тамбурного трикотажа были получены при его испытаниях на универсальной измерительной установке Инстрон 1122 при скорости деформирования 200 мм/мин и базовой длине образцов $L=100$ мм. В ходе испытаний была получена зависимость удлинения $\epsilon, \%$, от нагрузки P, H , представленная на рис. 2, в табл. 1 (значения растяжимости, удлинения и усилия при разрыве основовязаного полотна) и в табл. 2 (средние значения коэффициента деформационной жесткости E_n).

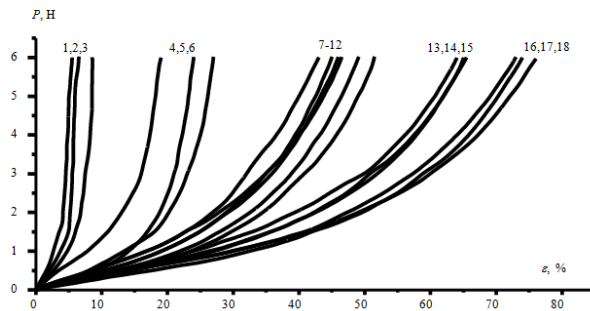


Рис. 2

Эксперимент показал, что для зон не усиленного утком полотна отношение растяжимостей вдоль и поперек основы стабильно для всех образцов и находится в пределах 1,3...1,7, что дает возможность утверждать о равномерности распределения нагрузки на все элементы структуры. Для сравнения – у ткани этот показатель в пределах 1,9...3,1 [1].

Таблица 1

Перечень образцов (направление растягивающих усилий)	Растяжимость ϵ_2 при нагрузке $3H$, %			Среднее значение ϵ_2 , %	Удлинение при разрыве ϵ_{max} , %			Среднее значение ϵ_{max} , %	Усилие при разрыве P_p, H			Среднее значение P_p, H
	образец 1	образец 2	образец 3		образец 1	образец 2	образец 3		образец 1	образец 2	образец 3	
Полотно без утка (вдоль основы)	57,0	58,0	60,1	58,7	139,0	155,0	163,0	152,3	140,0	155,0	110,0	135,0
Полотно без утка (поперек основы)	32,5	35,1	35,1	34,2	111,0	114,0	116,0	114	215,0	225,0	225,0	221,7
Полотно с утком из акрила (вдоль основы)	50,6	51,6	52,6	51,6	122,0	138,0	138,0	132,7	180,0	170,0	160,0	170,0
Полотно с утком из акрила (поперек основы)	16,0	21,0	23,0	20,0	62,0	79,0	71,0	70,7	260,0	180,0	215,0	218,0
Полотно с утком из льна (вдоль основы)	35,0	37,8	42,6	38,5	122,0	132,0	130,0	128	160,0	165,0	165,0	163,0
Полотно с утком из льна (поперек основы)	4,5	5,5	7,5	5,8	15,0	23,0	18,0	18,7	790,0	490,0	650,0	643,0

Диаграмма растяжимости основовязаного полотна (рис. 2 – 1, 2, 3 – зона повышенного усиления поперек основы; 4, 5, 6

– зона среднего усиления поперек основы; 7, 8, 9 – зона без усиления утком поперек основы; 10, 11, 12 – зона повышенного

усиления вдоль основы; 13, 14, 15 – зона среднего усиления вдоль основы; 16, 17, 18 – зона без усиления утком вдоль основы) показывает, что пока нагрузка на образец не достигла известного предела, растяжимость ε прямо пропорциональна растягивающей силе P и обратно пропорциональ-

на площади поперечного сечения F образца, то есть соответствует закону Гука:

$$\varepsilon = \frac{P}{FE}. \quad (12)$$

По этой зависимости были рассчитаны значения E (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Перечень образцов (направление растягивающих усилий)	Среднее значе- ние $\varepsilon_1, \%$	Значе- ние E_1 при на- грузке 1,5 Н, Н/м	Среднее значение $\varepsilon_2, \%$	Значе- ние E_2 при на- грузке 3 Н, Н/м	Среднее значение $\varepsilon_3, \%$	Значение E_3 при нагрузке 6 Н, Н/м
Полотно без утка (вдоль основы)	42,7	140,52	58,7	102,21	74,2	80,86
Полотно без утка (поперек основы)	23,7	253,16	34,2	175,44	44,7	134,23
Полотно с утком из акрила (вдоль основы)	35,4	169,49	51,6	116,28	64,7	92,74
Полотно с утком из акрила (попе- рек основы)	15,4	389,61	20,0	300,00	23,0	260,87
Полотно с утком изо льна (вдоль основы)	27,8	215,83	38,5	155,84	49,0	122,45
Полотно с утком изо льна (поперек основы)	3,6	1666,67	5,8	1034,48	6,8	882,35

В Ы В О Д Ы

1. Предложена методика расчета деформаций трикотажного полотна при многоосевых нагрузках, позволяющая прогнозировать его деформационные свойства.

2. Теоретический анализ и экспериментальные исследования показали, что растяжимость основовязаного трикотажа при многоосевых нагрузках почти одинакова в разных направлениях. Это создает преимущества при формировании композитных материалов сложной формы.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Баикова Г.В.* Трикотажная структура как интегрированная волокнистая система, армирующая композиты // *Соврем. наукоемкие технологии*

и перспект. мат. текст. и легк. пром-сти // *Сб. мат. Междунар. научн.-техн. конф.: ПРОГРЕСС-2010.* – Иваново: ИГТА, 2010. С. 61.

2. *Тканые конструкционные композиты / Под ред. Т.-В. Чу и Ф. Ко.; пер. с англ./ под ред. Ю.М. Тарнопольского и В.Д. Протасова.* – М.: Мир, 1991.

3. *Zheng J.* Measuring Technology of the Anisotropic Tensile Properties of Woven Fabrics // *Text. Res. Journal.* – v.78, 2008, №12. P.1116...1123.

4. *Баикова, Г.В., Баиков А.П., Алешина Д.А., Натертышев И.Ю.* // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* – 2009, №2. С. 77...81.

5. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1972.

Рекомендована кафедрой механической технологии текстильных материалов. Поступила 25.11.10.