

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

DEFORMATION PROPERTIES MODELING OF FIBROUS POLYMERIC COMPOSITES

А.П. Башков, Г.В. Башкова, Е.Н. Никифорова
A. Bashkov, G. Bashkova, E. Nikiforova

Ивановский государственный политехнический университет
Ivanovo State Polytechnic University
E-mail: apb303@yandex.ru, milena55@yandex.ru

В статье предложена стержневая модель структурного элемента полимерного композита, армированного основовязаным трикотажным полотном и аналитически рассматриваются ее внутренние напряжения и деформации под действием внешней нагрузки. На базе этой модели разработана методика прогнозирования деформаций композита при воздействии внешних растягивающих нагрузок.

Ключевые слова: композитный материал, льносодержащий основовязаный трикотаж, кривая растяжения, деформационные свойства, полимолочная кислота, стержневая модель, структурный элемент.

The article discusses a core model of structural element of polymer composite reinforced with a warp-knitted fabric under the action of external loads. On the basis of this model a technique for predicting deformations of a composite under the influence of external tensile loads has been developed.

Key words: composites, warp-knitted fabric on the flax base, extension curve, deformation properties, polylactic acid, a core model, a structural element.

Деформационные свойства композиционного материала не могут определяться простым сложением прочностей полимерной матрицы и волокнистого наполнителя, поскольку механизм деформации каждого компонента при нагружении будет различным. На рис. 1 представлен структурный элемент основовязаного трикотажа, помещенный в

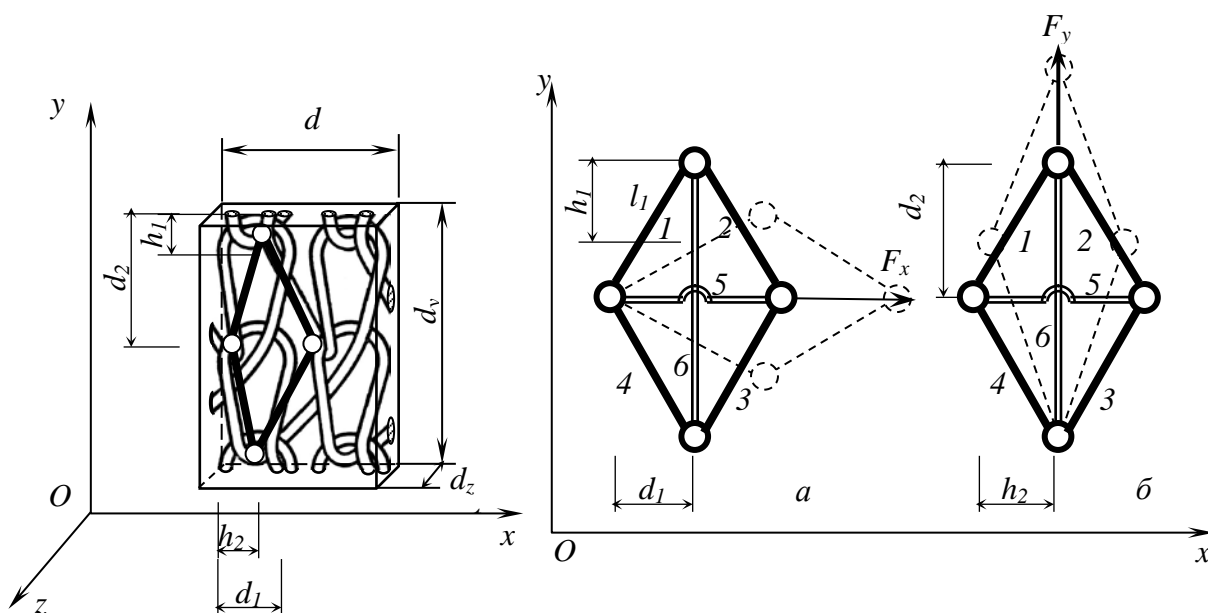


Рис. 1. Структурный элемент армирующего основовязаного трикотажа

Рис. 2. Шарнирно-стержневая модель структурного элемента основовязаного трикотажа.

полимерную матрицу, в виде элемента со сторонами d_x , d_y , d_z . На рис. 2 показана шарнирно-

стержневая модель структурного элемента волокнистого полимерного композита. При приложении растягивающей нагрузки в любом направлении в координатной плоскости xOy растягивающие усилия пытаются не только растянуть нить, но и выдернуть ее из тела полимерной матрицы. Вместе с тем, структурный элемент трикотажа начинает деформироваться, и нити (стержни на модели) сжимают заключенный между ними элемент полимерной матрицы. За счет сжатия элемента матрицы происходит упрочнение самого элемента, увеличение сил сцепления между полимером и нитью, в дополнение к естественной адгезии, и упрочнение самой нити за счет лучшего сцепления между волокнами, как за счет адгезии, так и за счет увеличения сил трения в результате сжатия. Такой сложный механизм совместной деформации матрицы и текстильной структуры, особенно характерный для трикотажной армирующей основы, создает нелинейность и трудную предсказуемость внутренних напряжений элемента композита σ_x и σ_y .

При нагрузках меньше разрушающих можно пренебречь сдвиговыми деформациями, т.е. исключить послойный отрыв полимера от армирующих нитей. Тогда, средние деформации элемента композита e_x и e_y в общем виде можно получить, используя первую теорему Кастильяно [1]:

$$F_{xi} = \frac{2\partial U}{\partial b_i}; F_{yi} = \frac{2\partial U}{\partial b_i}; F_{zi} = \frac{2\partial U}{\partial b_i}; \quad (1)$$

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N k_i b_i^2, \quad (2)$$

где U – энергия деформирования системы, b_i и k_i – соответственно осевая деформация и осевая жесткость i -го стержня (рис. 2); F_{xi} , F_{yi} , F_{zi} – проекции на координатные оси силы F_i , которая является результирующей сил трения (вязкости) в узлах и упругих сил в стержнях, возникших в результате деформаций от внешней силы P_i .

Совместный упрочняющий эффект от взаимодействия матрицы и наполнителя можно имитировать в модели (рис. 2) дополнительными стержнями с деформацией b_5 и b_6 , создающими треугольники жесткости внутри структурного элемента. Кроме этого, за счет упрочняющего эффекта прочность стержней, имитирующих нити трикотажа, также необходимо принимать с большим значением модуля упругости, чем в нити.

При рассмотрении плоской задачи в осях xOy можно записать

$$F_x = d_x t \sum_{i=1}^8 \sigma_{xi}; F_y = d_y t \sum_{i=1}^8 \sigma_{yi}, \quad (3)$$

где $t=d_z$ – толщина полимерной матрицы; σ_{xi} и σ_{yi} – внутренние напряжения.

Применяя уравнения совместности деформации для стержневой системы (рис. 2), можно выразить осевые деформации стержней при нагрузке вдоль оси Ox и Oy соответственно

$$b_1 = b_2 = \frac{2}{l_1 + l_2} \left[\frac{d_1^2}{4} \left(\frac{2b_5}{d_1} + \frac{b_5^2}{d_1^2} \right) + (b_6^2 - 2h_1 b_6) \right]; \quad (4)$$

$$b_1 = b_4 = \frac{1}{l_1 + l_4} \left[\frac{d_2^2}{4} \left(\frac{2b_6}{d_2} + \frac{b_6^2}{d_2^2} \right) + (b_5^2 - 2h_2 b_5) \right]. \quad (5)$$

где d_1 , d_2 и h_1 , h_2 – геометрические параметры трикотажной структуры, характеризующие размер петли и изгиб нити, l_1 , l_2, \dots, l_6 – длины стержней.

Учитывая связь внутренних напряжений с узловыми нагрузками (3) и, принимая во внимание условия, связывающие деформации e_x и e_y с удлинениями композитного материала d_x , d_y

$$e_x = \frac{b_5}{d_1} = \frac{b_x}{d_x}; e_y = \frac{b_6}{d_2} = \frac{b_y}{d_y}, \quad (6)$$

а также на основе трех уравнений равновесия для дискретной системы (1), (2), запишем

эквивалентную систему уравнений композита как сплошной среды, связывающих эффективные нормальные деформации с напряжениями в материале:

$$\sigma_x = \left[2k_x \left(\frac{2d_x}{l_1 + l_2} \right)^2 \left(\frac{1 + e_x}{d_x d_y t} \right) \right] \cdot \left[\left(\frac{d_x}{2} \right)^2 (2e_x + e_x^2) + (b_6^2 - h_2 b_6) \right] + \frac{k_5 d_x^2 e_x}{d_x d_y t}; \quad (7)$$

$$\sigma_y = \left[2k_x \left(\frac{d_y}{l_1 + l_4} \right)^2 \left(\frac{1 + e_y}{d_x d_y t} \right) \right] \cdot \left[\left(\frac{d_y}{2} \right)^2 (2e_y + e_y^2) + (b_5^2 - h_1 b_5) \right] + \frac{k_6 d_y^2 e_y}{d_x d_y t}; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{k_x}{(l_1 + l_2)^2} \right) (2b_5 - h_2) \left[\left(\frac{d_x}{2} \right)^2 (2e_x + e_x^2) - (b_5^2 + h_2 b_5) \right] + \\ & \left(\frac{2k_y}{(l_1 + l_4)^2} \right) (2b_6 - h_1) \left[\left(\frac{d_y}{2} \right)^2 (2e_y + e_y^2) + (b_6^2 + h_1 b_6) \right] = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $d_x d_y t = V$ – объем элементарной ячейки композита, k_5 и k_6 – жесткость стержней, имитирующих полимерную матрицу. Можно принять их $k_5 = \frac{ES}{l_5}$; $k_6 = \frac{ES}{l_6}$; E – модуль

Юнга (упругости) для выбранного полимера, S – эквивалентная площадь сечения стержня, определяется по геометрическим характеристикам пространства внутри структурного элемента, для стержней, имитирующих нить, берется реальная площадь сечения нити и ее модуль Юнга. Следует учесть, что стержни 1 и 4 имитируют сразу две нити в петле.

При нагружении композита возникает две области деформаций: упругих – в начале цикла и пластических – в поздней фазе. Пластичность материала определяется: неупругим поведением полимера матрицы, пластичностью текстильного каркаса (проскальзывание нитей в точках контакта в петлях, проскальзывание волокон внутри нити), проскальзывание и даже отслоение по границе контакта матрицы и нити. Зона упругих деформаций вполне может быть описана уравнениями (7) и (8).

Пластичность композита можно моделировать, задаваясь соответствующими свойствами материала стержней 1-6 (рис. 2).

Для упрощения рассуждений можно не учитывать нелинейное поведение нитей. Тогда, композиционный материал характеризуется начальной жесткостью k_a , жесткостью за пределами текучести k_b и деформацией текучести l_p , которая служит показателем, характеризующим неупругое поведение. Если обозначить деформации текучести стержней 5 и 6 как e_{px} и e_{py} и учесть, что $e_x \geq e_{px}$, а $k_5 = k_{px}$, а $e_y \geq e_{py}$, а $k_6 = k_{py}$, то уравнения (7) и (8) можно модифицировать в следующем виде:

$$\sigma_x = \sigma_{fx} + \sigma_{cx}; \quad \sigma_y = \sigma_{fy} + \sigma_{cy}. \quad (10)$$

Здесь индексы “ f ” и “ c ” обозначают вклад в напряженное состояние соответственно текстильного каркаса и полимерной матрицы [2]. Если силы, действующие на каркас и матрицу, сосредоточены в пределах структурного элемента (при небольших размерах элемента это так и будет), то из уравнения (7) напряжение в матрице определяется как

$$\sigma_{cx} = \frac{k_5 d_x^2 e_x}{d_x d_y t}. \quad (11)$$

Если напряжение в матрице превышает начальный предел текучести, то

$$\sigma_{cx} = \frac{k_5 d_x^2 e_x}{d_x d_y t} + \frac{k_{p5} d_x^2 (e_x - e_{px})}{d_x d_y t}. \quad (12)$$

Тогда неупругие уравнения вдоль оси Ox и Oy будут выглядеть следующим образом

$$\sigma_x = \left[2k_x \left(\frac{2d_x}{l_1 + l_2} \right)^2 \left(\frac{1 + e_x}{d_x d_y t} \right) \right] \cdot \left[\left(\frac{d_x}{2} \right)^2 (2e_x + e_x^2) + (b_6^2 - h_2 b_6) \right] + \frac{k_5 d_x^2 e_x}{d_x d_y t} + \frac{k_{p5} d_x^2 (e_x - e_{px})}{d_x d_y t}; \quad (13)$$

$$\sigma_x = \left[2k_x \left(\frac{2d_y}{l_1 + l_4} \right)^2 \left(\frac{1 + e_y}{d_x d_y t} \right) \right] \cdot \left[\left(\frac{d_y}{2} \right)^2 (2e_y + e_y^2) + (b_5^2 - h_1 b_5) \right] + \frac{k_6 d_y^2 e_y}{d_x d_y t} + \frac{k_{p6} d_y^2 (e_y - e_{py})}{d_x d_y t}. \quad (14)$$

Поскольку механические свойства полимерной матрицы изотропны, а также одинаковы при сжатии и растяжении, то можно считать относительные деформации вдоль координатных осей равными, т.е. при малых размерах можно допустить, что $b_5 = b_6 = b_c$. Тогда, этот показатель, являющийся функцией от e_x и e_y , определяется как корень уравнения (9) и находится в пределах

$$-\frac{h_1}{2} \leq b_c \leq \frac{h_2}{2}. \quad (15)$$

Для расчетов по данной модели необходимо задаться геометрическими параметрами $d_1, d_2, d_x, d_y, t, h_1, h_2, l_1, l_2, \dots, l_6, S_i$, которые определяются обычным замером по сканированному изображению образца материала. Значения модуля упругости E и удлинений, как в упругой, так и в пластической зоне становятся известны после испытаний образцов трикотажа на растяжение [3], модуль упругости и удлинения полимерного материала также определяются по справочной литературе [4]. Для полимолочной кислоты $E = 3,5$ ГПа, предел текучести 53 МПа, разрушающая нагрузка 60 МПа при относительном удлинении 6,0 %. После подстановки этих значений в уравнения (13) и (14) с помощью программы *Origin 6.1* были получены прогнозируемые кривые удлинения композитного материала на основе льносодержащего трикотажного полотна и полимолочной кислоты. На рис. 3 представлена кривая 1 удлинения вдоль оси Ox . Можно отметить, что в упругой зоне она соответствует экспериментальной кривой 2, полученной в работе [5] для композита на основе кулирного трикотажа из хлопковой пряжи.

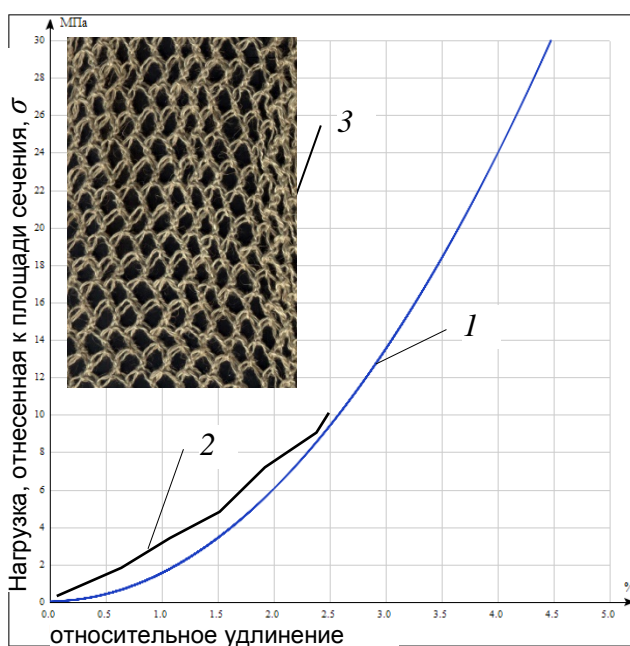


Рис. 3. Кривая удлинения композитного материала:
1 – полученная расчетным путем, 2 – экспериментальная [3],
3 – структура трикотажа, используемая для расчета.

Разработанная методика прогнозирования механических свойств с использованием стержневой модели композиционного материала, армированного основовязанным трикотажем, позволяет достаточно объективно определять деформации материала в зависимости от приложенных нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопротивление материалов: Учебное пособие. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
2. Трецалин Ю.М. Анализ внутренних напряжений в волокнах, возникающих в процессе полимеризации связующего при изготовлении композиционных материалов на основе нетканых полотен. Изв. вузов. Технол. текст. пром-сти. – 2012. – № 4 – С. 37-40.
3. Башкова, Г.В. Анизотропия структуры и свойств ниточных наполнителей композитов/ Г.В. Башкова, Г.И. Чистобородов, А.П. Башков, Д.А. Алешина, И.Ю. Натертышев// Изв. вузов. Технол. текст. пром-сти. – 2010. – № 7 – С. 80-84.
4. Энциклопедия полимеров. Т. 3. Под общ. ред. В. А. Кабанова. – М.: Советская Энциклопедия, 1977. – 1152 с.
5. Kononova, O. Mechanical properties of composites reinforced by cotton knitted fabric/ O. Kononova, A. Krasnikovs, K. Dzelzitis, G. Kharkova, A. Vagel, M. Eiduks, 7th International DAAAM Baltic Conference "INDUSTRIAL ENGINEERING" 22-24 April 2010, Tallinn, Estonia, PP. 47-53.

УДК 678

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ ТКАНИ НА КИНЕТИКУ ПРОЦЕССА ЕЕ ПРОПИТЫВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКОВ

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF FABRIC ON KINETICS OF THE PROCESS OF ITS PROTECTION AT THE MANUFACTURE OF DETAILS FROM UGLYOPLASTICS

А.Н. Марычева, В.А. Нелюб, Г.В. Мальшева
A.N. Maricheva, V.A. Neluyb, G.V. Malysheva

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Moscow State Technical University named after Bauman
E-mail: man@emtc.ru, admin@emtc.ru, malyin@mail.ru

Приведены данные по экспериментальной оценке пористости углеродных тканей и кинетики их пропитки при изготовлении деталей из углепластиков с использованием эпоксидного связующего по технологии вакуумной инфузии. Приведены результаты численного моделирования общей продолжительности процесса пропитывания в зависимости от пористости тканей и проведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов. Приведены результаты определения фазового состава углепластика в зависимости от технологии пропитывания и технологии отверждения.

Ключевые слова: углеродная ткань, вакуумная инфузия, кинетики процесса пропитывания, структура элементарной ячейки ткани.

The data on the experimental evaluation of the porosity of carbon fabrics and the kinetics of their impregnation in the manufacture of carbon fiber reinforced plastic components using an epoxy binder using vacuum infusion technology are presented. The results of numerical simulation of the total duration of the impregnation process as a function of tissue porosity are presented, and a comparison of theoretical and experimental results is made. The results of the determination of the phase composition of CFRP depending on the impregnation technology and the curing technology are presented.

Key words: carbon tissue, vacuum infusion, kinetics of impregnation process, structure of unit cell of tissue.

Для изготовления деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) методом ручной выкладки в качестве наполнителей используются ткани, различной