

**АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ДВУХСЛОЙНЫХ ТРИКОТАЖНЫХ ПОЛОТЕН  
С СОЕДИНИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ  
ИЗ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ НИТЕЙ**

**ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES  
OF TWO-LAYER KNITTED FABRICS  
WITH THE CONNECTING ELEMENT  
OF THE INDIVIDUAL FILAMENTS**

А.П. БАШКОВ, Г.В. БАШКОВА, Д.А. АЛЕШИНА, О.С. РУМЯНЦЕВА  
A.P. BASHKOV, G.V. BASHKOVA, D.A. ALESHINA, O.S. RUMIANTSEVA

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

*В статье на основе теории сжатых гибких стержней анализируется способность двухслойных трикотажных полотен с соединительными элементами из индивидуальных нитей сопротивляться поперечному сжатию. Это дает возможность прогнозировать механические свойства подобных структур.*

*On the basis of the compressed flexible rods theory the ability to resist lateral contraction of two-layer knitted fabrics with connecting elements of the individual filaments (yarns) is analyzed. It becomes possible to predict the mechanical properties of such a kind structures.*

**Ключевые слова:** двухслойные трикотажные полотна, соединительные элементы из индивидуальных нитей, "распорки", сопротивление сжатию, расчет устойчивости, стержневые элементы, угол перегиба.

**Keywords:** two-layer knitted fabrics, connecting elements of the individual filaments (yarns), spacer structures, resistance to lateral contraction, method of calculation of stability, flexible rods, angle of inflection.

В настоящее время на рынке технического текстиля появились новые перспективные структуры двухслойных трикотажных полотен с соединительными элементами из индивидуальных нитей, известными в иностранной литературе как "*knitted spacer fabrics*" (рис. 1).

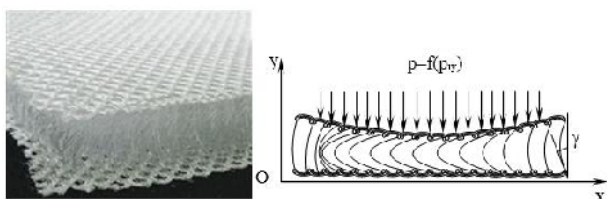


Рис. 1

Особенность их заключается в том, что между слоями имеются протяжки, играющие роль распорок [1]. Механические свойства таких структур обуславливаются способностью "распорок" сопротивляться продольному сжатию и изгибу, аналогично гибким стержням, что обеспечивает устойчивость полотна по отношению к деформациям, нормальным его поверхности. Такие механические свойства "распорчатых" структур позволяют применять их в качестве амортизирующего материала в сиденьях транспортных средств, в спортивной экипировке, в медицинских фиксирующих изделиях или ортопедических матрацах,

для частичной или полной замены вспененного полиуретана. Имеются перспективы использования таких структур и в качестве армирующей составляющей волокнистых полимерных композитов.

Вспененный полиуретан, имея однородную пористую структуру, воздухопроницаем и гигроскопичен. Однако упругость стенок пор невелика. Под действием сжатия пора складывается, резко уменьшаясь в объеме, а воздухопроницаемость слоя заметно ухудшается. Кроме этого, полиуретан обладает высокой хемо- и биостойкостью, при попадании на полигоны твердых отходов практически не разлагается, что вызывает определенные трудности при утилизации отслуживших свой срок изделий. Замена слоя вспененного полиуретана трикотажными "распорчатыми" структурами из натуральных волокон, в частности, льняными, позволит избежать указанных недостатков. Для проектирования подобных структур с оптимальными параметрами: по линейной плотности и прочности нити, плотности и взаимному расположению соединительных элементов, их начальному изгибу и размерам необходимо аналитически определить способность материала противостоять деформации при поперечном сжатии.

При сосредоточенной или распределенной по ограниченной площади материала нагрузке усилия внутри такой структуры перераспределяются на весь прилегающий массив "распорок", делая внутренние напряжения более равномерными. Сами "распорки" изгибаются в виде пространственной кривой, испытывая деформации сжатия, изгиба и кручения, а их сопротивление по мере нарастания деформации нелинейно и резко падает при больших углах изгиба. Однако соседние "распорки", изгибаясь, воздействуют друг на друга, создавая подобие вязкоупругой среды, ограничивая изгиб.

В теории упругих стержней есть понятие потери устойчивости стержня при превышении осевой нагрузки  $P$  некоего критического значения  $P_a$ . В этом случае деформация изгиба настолько велика, что стержень резко теряет несущую способ-

ность и разрушается. В нашем случае стержень (нить) обладает высокой гибкостью, способностью восстанавливать первоначальную форму при снятии нагрузки и не разрушается. Кроме того, при меньших размерах стержня (нити), равному толщине полотна 3...5 мм, он достаточно хорошо сопротивляется осевому сжатию. Тогда критической силой можно считать такое сжатие, при котором произойдет полный изгиб "распорки", то есть в этом случае оба слоя полотна максимально приближены друг к другу. При снятии нагрузки "распорка" распрямится за счет собственной упругости и упругости менее деформированных соседних "распорок".

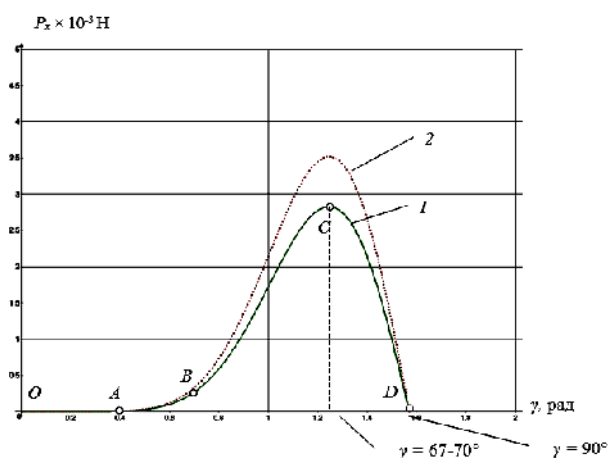


Рис. 2

Значение критической силы  $P_y$  для единичной "распорки" в проекции на ось  $Oy$  (рис. 2 – зависимость значения критической силы для одиночной "распорки" от угла перегиба: 1 – без взаимодействия с соседней нитью, 2 – при взаимодействии с соседней нитью) можно найти из известного уравнения Эйлера [2]:

$$P_y = \frac{\pi^2 EI}{\ell_y^2}, \quad (1)$$

где  $E$  – продольный модуль упругости стержня (для льняного волокна  $E = 50...70$  ГПа);  $I$  – минимальный момент инерции сечения стержня, для круглого сечения  $I = \pi r^4/4$ ;  $\ell_y$  – длина проекции стержня на ось  $y$  (определяется визуально при нагружении материала или принима-

ется с учетом диаметра  $d$  стержня. При полном сложении  $\ell_y \approx 2d$ .

В этом выражении произведение  $EI$  представляет собой изгибную жесткость нити. При сильном изгибе она будет функцией угла изгиба  $\gamma$  [3], то есть

$$EI = ER_0^4 \frac{\pi \cos \gamma (1 - 3 \cos^2 \gamma + 2 \cos^3 \gamma)}{3 \sin^4 \gamma}. \quad (2)$$

Граничные условия для угла  $\gamma$  находятся в пределах от  $0$  до  $90^\circ$ . При углах изгиба, близких к  $90^\circ$ , изгибная жесткость максимальна, затем она резко падает.

Нить состоит из взаимно скрученных волокон, поэтому целесообразней оценивать ее упругоэластические свойства, введя вместо геометрического радиуса  $r$  эффективный радиус нити  $R_0$ , зависящий от числа волокон в сечении  $N$ , коэффициента плотности укладки волокон  $\phi$  (для льняной пряжи 0,83):

$$R_0 = r_0 \sqrt{\frac{N}{\phi}}, \quad (3)$$

где  $r_0$  – радиус единичного волокна.

При минимальном изгибе в свободном участке ветви, то есть когда угол изгиба  $\gamma \rightarrow 0$ , можно считать, что

$$I = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi R_0^4}{4}. \quad (4)$$

С учетом всех подстановок можно записать:

$$P_y = E \frac{\pi^3}{\ell_y^2} r_0^4 \left( \frac{N}{\phi} \right)^2 \frac{\cos \gamma (1 - 3 \cos^2 \gamma + 2 \cos^3 \gamma)}{3 \sin^4 \gamma}. \quad (5)$$

Из формулы следует, что при полном сложении "распорок", когда  $\gamma = 90^\circ$ ,  $P_y = 0$ , то есть происходит потеря несущей способности "распорчатой" структуры. График формулы (5) показан на рис. 2. Зона О-А кривой 1 соответствует начальному изгибу, создаваемому в процессе вязания

полотна, зона А-В соответствует первой стадии нагружения при малых углах изгиба и небольших внутренних напряжениях, зона В-С максимального сопротивления при изгибе, зона С-Д – сложение ветвей "распорки" и потеря несущей способности.

При действии распределенных нагрузок  $p=f(p_{iy})$  центральная,  $(i)$ -я "распорка", на которую действует максимальная сила сжатия, изгибаясь, давит на соседнюю  $(i+1)$ -ю распорку, которая менее нагружена и изогнута, и, следовательно, может создать поддерживающий эффект (рис. 3 – схема взаимодействия двух изгибаемых стержней). Рассмотреть статику такой системы можно, представив единичную "распорку" в виде продольно-поперечно сжатого стержня. Поперечная нагрузка возникает в результате действия сил реакции от соседней "распорки" и распределена вдоль стержня в соответствии с функцией  $q=f(k\ell_x)$ , в которой  $k$  – жесткость соседней "распорки",  $\ell_x$  – ее деформация вдоль координатной оси  $Ox$ .

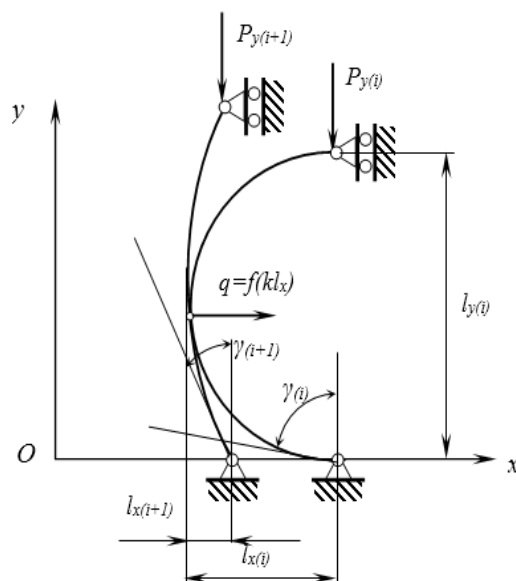


Рис. 3

Решая задачу с использованием теоремы Лагранжа – Дирихле о полной потенциальной энергии [2], можно получить следующее выражение для изгиба стержня в пределах одной полуволны синусоиды:

$$P_{y(i)} = \frac{\pi^3 EI_{(i)}}{\ell_{y(i)}^2} + \frac{k \ell_{x(i+1)}^2}{\pi^2} = \frac{\pi^3 EI_{(i)}}{\ell_{y(i)}^2} + \frac{k(0,5 \ell_{y(i+1)} \operatorname{tgy})^4}{\pi^2} = \frac{\pi^3 EI_{(i)}}{\ell_{y(i)}^2} + \frac{EI_{(i+1)}(0,5 \ell_{y(i+1)} \operatorname{tgy})^4}{\pi^2}. \quad (6)$$

В свою очередь,  $k = EI_{(i+1)}$  можно рассчитать по формуле (2), подставив значения углов изгиба  $\gamma$  для  $(i+1)$ -й "распорки". Эти действия можно повторять для следующей пары  $(i+1)$ -й и  $(i+2)$ -й "распорок" и т.д. до тех пор, пока распорки перестанут касаться друг друга. Затем расчет пошагово проводится для одиночных "распорок" по формуле (5). Число шагов по формулам (5) и (6) определяется длиной "распорок" и расстоянием между ними. Реализовать подобные расчеты пошагово можно в математической системе MatLab.

## ВЫВОДЫ

1. На основе теории сжатых гибких стержней проведен анализ несущей способности двухслойного трикотажа с соединительными элементами из индивидуальных нитей, используемого для опорного слоя сидений транспортных средств.

2. Показано, что несущая способность такой трикотажной структуры возрастает при уменьшении длины распорок и шага между ними, а также при увеличении модуля упругости нити за счет количества и плотности укладки волокон, сырьевого состава и крутки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шатникова Н.В., Строганов Б.Б. Методы проектирования основных параметров квазимногослойного трикотажа // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2007, №2. С.75...77.
2. Светлицкий В.А. Механика гибких стержней и нитей. – М.: Машиностроение, 1978.
3. Черноус Д.А., Шилько С.В., Чарковский А.В. Прогнозирование эффективных механических характеристик трикотажа // Физическая мезомеханика, т. 11. – 2008, №4. С. 107...114.

## REFERENCES

1. Shatnikova N.V., Stroganov B.B. Metody proektirovaniya osnovnyh parametrov kvazimnogoslojnogo trikotazha // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2007, №2. S.75...77.
2. Svetlickij V.A. Mehanika gibkih sterzhnej i nitej. – M.: Mashinostroenie, 1978.
3. Chernous D.A., Shil'ko S.V., Charkovskij A.V. Prognozirovanie jeffektivnyh mehanicheskikh harakteristik trikotazha // Fizicheskaja mezomehanika, t. 11. – 2008, №4. S. 107...114.

Рекомендована кафедрой технологии и проектирования текстильных изделий. Поступила 18.05.15.