

УДК 677.024

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРОЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ  
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ПО СОКРАЩЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

**MATHEMATICAL MODEL OF THE STRUCTURE OF TECHNICAL FABRICS  
FOR THE PRODUCTION OF THERMOPLASTIC  
COMPOSITE MATERIALS BY ABBREVIATED TECHNOLOGY**

*С.Г. СТЕПАНОВ<sup>1</sup>, В.М. ДЖАНПАИЗОВА<sup>2</sup>, Ж.У. МЫРХАЛЫКОВ<sup>3</sup>,  
Г.С. КЕНЖИБАЕВА<sup>2</sup>, Б.С. ТУРАКУЛОВ<sup>2</sup>*

*S.G. STEPANOV<sup>1</sup>, V.M. JANPAIZOVA<sup>2</sup>, ZH.U. MYRKHALYKOV<sup>3</sup>,  
G.S. KENZHIBAYEVA<sup>2</sup>, B.S. TURAKULOV<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Ивановский государственный политехнический университет, Россия,  
<sup>2</sup>Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан,  
<sup>3</sup>Международного университета Silkway, Шымкент, Республика Казахстан)

<sup>1</sup>Ivanovo State Polytechnical University, Russia,  
<sup>2</sup>M. Auezov South Kazakhstan State University, Republic of Kazakhstan,  
<sup>3</sup>SilkWay International University, Republic of Kazakhstan)

E-mail: step-sg@mail.ru

*Исследована структура технической ткани из термоплавких полиамидных нитей и термостойких стеклонитей для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной технологии, получены расчетная и математическая модель ее строения.*

*The structure of technical fabric made of hot-melt polyamide filaments and heat-resistant glass fibers for the production of thermoplastic composite materials by abbreviated technology, and a computational and mathematical model of its structure is obtained.*

**Ключевые слова:** техническая ткань, термопластичные композиционные материалы, полиамидные нити, стеклонити, математическая модель строения ткани.

**Keywords:** technical fabric, thermoplastic composite materials, polyamide filaments, glass fiber, mathematical model of fabric structure.

К настоящему времени разработан целый класс технических тканей, нашедших применение в авиа- и ракетостроении для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной (беспропиточной) технологии. К таким тканям относятся ткани типа ТОПАФ (ткань ориентированная, полиамидная, армированная фенолоном) и ТОПАС (ткань ориентированная, полиамидная, армированная стеклонитями) [1], [2]. Основным отличием представленных тканей от большинства других технических тканей является то, что в качестве одной из систем нитей (как правило, уточных) выступают чередующиеся термопластичные полиамидные (капроновые) нити и термостойкие нити (фенилон или комплексные скрученные стеклонити), имеющие различные линейную плотность, прочностные и прочие характеристики, а в качестве другой системы нитей (как правило, основных) представлены капроновые нити одной и той же линейной плотности.

Суть сокращенной (беспропиточной) технологии получения термопластичных композиционных материалов и изделий состоит в следующем: на ткацком станке производится специальная техническая ткань из термопластичных и термостойких нитей (например, ткань типа ТОПАФ или ТОПАС), затем, минуя операцию пропитки связующим, характерную для традиционного способа получения композитов, несколько слоев данной ткани помещаются под термопресс нужной формы, в результате чего термопластичные нити расплавляются, заполняя все пространство между тугоплавкими нитями, и образуется после затвердевания композиционный материал или изделие, состоящие из затвердевшей матрицы и тугоплавких армирующих нитей. Сокращенная технология резко повышает производительность труда и способствует созданию композиционных материалов с новыми свойствами. Испытания многослойных тканых пластиков, полученных по беспропиточной технологии на основе тканей ТОПАФ и ТОПАС, в лаборатории Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (г. Москва) показали их высокую проч-

ность и сопротивляемость усталостному разрушению, что подтвердило целесообразность их использования для изготовления различных изделий, к которым предъявляются требования высокой прочности и сопротивляемости усталостному разрушению. В связи с этим актуальным становится вопрос разработки методов расчета параметров строения данных тканей.

Рассмотрим техническую ткань ТОПАС – 2 [2], выполненную из взаимно переплетенных полотняным переплетением нитей основы, представляющих собой термопластичные капроновые нити, и нитей утка, включающих термопластичные капроновые нити и термостойкие комплексные скрученные стеклонити (рис. 1). Термостойкие и термопластичные нити утка чередуются в соотношении 1:2. Плотность ткани по основе составляет 5 нитей/см, по утку 65 нитей/см. Линейная плотность комплексных скрученных стеклонитей  $T_c = 65$  текс, капроновых  $T_k = 20$  текс (диаметр поперечного сечения  $d = 13$  мм). Составляющие ткань ТОПАС-2 уточные капроновые нити и чередующиеся с ними уточные стеклонити обладают разной линейной плотностью, жесткостными и прочими характеристиками, вследствие чего их деформированные оси в ткани не совпадают, а значит эти нити будут иметь разную уработку.

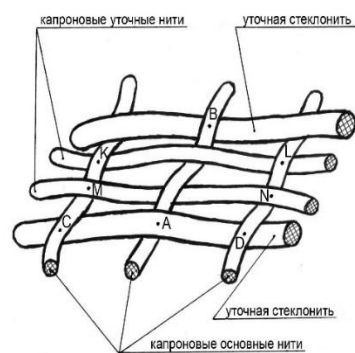


Рис. 1

Проанализировав взаимодействие нитей в ткани ТОПАС-2, приходим к выводу, что в качестве расчетной модели для основной нити может быть принят ее отрезок АВ между двумя уточными стеклонитями (рис. 1). Для уточных нитей имеем две рас-

четные модели: отрезок СД уточной стеклонити и любой из отрезков KL или MN (рис. 1).

Выделим из ткани отрезки основы АВ, утка СД и KL со всеми действующими на них силами. Покажем внутренние усилия,

действующие в краевых сечениях отрезков, и введем системы координат. В итоге получим следующие расчетные модели строения для основных (рис. 2-а) и уточных нитей (рис. 2-б, в) ткани ТОПАС-2 [3].

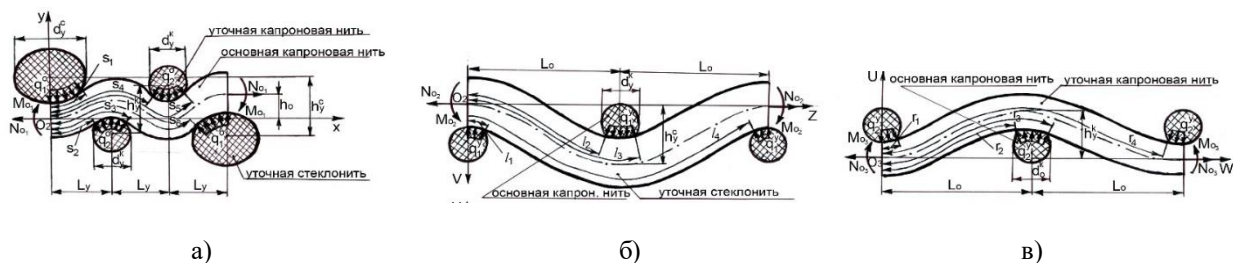


Рис. 2

Получим математическую модель строения ткани ТОПАС-2 на основе расчетных моделей ее строения (рис. 2). Представленные на рис. 2 отрезки нитей взаимно переплетены и взаимодействуют друг с другом. Со стороны нитей одной системы на нити другой системы воздействуют распределенные нагрузки интенсивности  $q_i^o, q_i^y$ , ( $i = 1, 2$ ), возникающие в зонах контакта между нитями, которые считаем равномерно распределенными и направленными по нормальям к осям нитей. Кроме нагрузок на нити обеих систем в краевых сечениях действуют внутренние изгибающие моменты  $M_{o1}, M_{o2}, M_{o3}$  и внутренние продольные силы  $N_{o1}, N_{o2}, N_{o3}$  (рис. 2).

Системы координат  $YO_1X, VO_2Z, UO_3W$  введены таким образом, что их начала  $O_1, O_2, O_3$  совпадают с точками пересечения осевых линий нитей с плоскостями, проходящими через центры соответственно уточной стеклонити (рис. 2-а) и основной капроновой нити (рис. 2-б, в).

Наряду с введенными выше обозначениями на рис. 2 показаны:  $s_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ ,

$l_j, r_j (j=1, 2, 3, 4)$  – координаты, определяющие действие распределенных нагрузок на отрезки соответственно основной капроновой нити, уточной стеклонити и уточной капроновой нити;  $L_o, L_y$  – геометрические плотности соответственно по основе и утку;  $d_o, q_y^c, q_y^k$  – диаметры соответственно основной нити, уточной стеклонити и уточной капроновой нити;  $h_o, h_y^c, h_y^c$  – соответственно прогиб основной стеклонити в правом торцевом сечении (рис. 2-а), высоты волн изгиба уточной стеклонити (рис. 2-б) и уточной капроновой нити (рис. 2-в).

Вывод математической модели строения ткани ТОПАС-2 на основе представленных расчетных моделей ее строения (рис. 2), положений нелинейной механики гибких нитей и нелинейной теории тканей полотняного переплетения приводится в [3] (с. 251...261), и ввиду ограниченности объема данной статьи не может быть здесь представлен. Поэтому приведем данную математическую модель без вывода:

$$A_o \left\{ \frac{d^3 \varphi}{ds^3} - 0,5 \left[ \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)_{s=0}^2 - \left( \frac{d\varphi}{ds} \right)^2 \right] \frac{d\varphi}{ds} \right\} - N_{o1} \frac{d\varphi}{ds} + T_o(s) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dy}{ds} = \sin \varphi, \quad (2)$$

$$\frac{dx}{ds} = \cos \varphi, \quad (3)$$

$$A_y^c \left\{ \frac{d^3 \alpha}{d\ell^3} - 0,5 \left[ \left( \frac{d\alpha}{d\ell} \right)_{|\ell=0}^2 - \left( \frac{d\alpha}{d\ell} \right)^2 \right] \frac{d\alpha}{d\ell} \right\} - N_{O_2} \frac{d\alpha}{d\ell} + T_y(\ell) = 0, \quad (4)$$

$$\frac{dV}{d\ell} = \sin \alpha, \quad (5)$$

$$\frac{dZ}{d\ell} = \cos \alpha, \quad (6)$$

$$A_y^k \left\{ \frac{d^3 \beta}{dr^3} - 0,5 \left[ \left( \frac{d\beta}{dr} \right)_{|r=0}^2 - \left( \frac{d\beta}{dr} \right)^2 \right] \frac{d\beta}{dr} \right\} - N_{O_3} \frac{d\beta}{dr} + T_y(r) = 0, \quad (7)$$

$$\frac{dU}{dr} = \sin \beta, \quad (8)$$

$$\frac{dW}{dr} = \cos \beta, \quad (9)$$

$$q_1^o d_y^c = q_1^y d_o, \quad (10)$$

$$q_2^o d_y^k = q_2^y d_o, \quad (11)$$

$$y_{|x=3L_y} + V_{|z=L_o} = \eta_{об} d_o + \eta_{yb}^c d_y^c, \quad (12)$$

$$U_{|w=L_o} + y_{|x=2L_y} = \eta_{об} d_o + \eta_{yb}^k d_y^k, \quad (13)$$

где  $\varphi$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  – текущие значения углов поворота поперечных сечений соответственно основной капроновой, уточной стеклонити и уточной капроновой нити;  $Y$ ,  $X$ ,  $V$ ,  $Z$ ,  $U$ ,  $W$  – координаты произвольных точек осевых линии тех же нитей в системах координат  $YO_1X$ ,  $VO_2Z$ ,  $UO_3W$ ;  $A_o$ ,  $A_y^c$ ,  $A_y^k$  – соответственно изгибные жесткости тех же нитей;  $s$ ,  $\ell$ ,  $r$  – соответственно текущие ко-

ординаты изогнутых осей тех же нитей;  $\eta_{об}$ ,  $\eta_{yb}^c$ ,  $\eta_{yb}^k$  – соответственно коэффициенты вертикального смятия тех же нитей.

Функции внешних нагрузок на основную капроновую нить  $T_o(s)$ , на уточную стеклонить  $T_y(\ell)$ , на уточную капроновую нить  $T_y(r)$  имеют вид [3]:

$$T_o(s) = q_1^o [1 - H(s - s_1)] - q_2^o [H(s - s_2) - H(s - s_3)] + q_2^o [H(s - s_4) - H(s - s_5)] - q_1^o H(s - s_6), \quad (14)$$

$$T_y(\ell) = q_1^y [1 - H(\ell - \ell_1) - H(\ell - \ell_2) + H(\ell - \ell_3) + H(\ell - \ell_4)], \quad (15)$$

$$T_y(r) = q_2^y [1 - H(r - r_1) - H(r - r_2) + H(r - r_3) + H(r - r_4)], \quad (16)$$

где  $H(s - s_1)$ ,  $H(\ell - \ell_1)$ ,  $H(r - r_1)$  – функции Хевисайда [4].

Полученная система включает 13 уравнений относительно такого же количества неизвестных:  $\varphi$ ,  $Y$ ,  $X$ ,  $\alpha$ ,  $V$ ,  $Z$ ,  $\beta$ ,  $U$ ,  $W$ ,  $q_1^o$ ,  $q_1^y$ ,  $q_2^o$ ,  $q_2^y$ . При этом величины левой части

уравнений (12), (13), представляющие собой прогибы упругих линий нитей в соответствующих точках, не являются новыми неизвестными, так как могут быть выражены через искомые значения  $\varphi$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ .

При получении математической модели строения ткани (1)...(13) не накладывались никакие ограничения на величины прогибов. Поэтому данная нелинейная математическая модель может быть использована не только для расчета параметров строения ткани ТОПАС-2, но и для исследования строения других аналогичных тканей, отличающихся более высокими плотностями по основе и утку. На ее основе могут быть определены такие параметры строения ткани, как формы осевых линий нитей в элементе ткани, их длины, высоты волн изгиба нитей основы и утка и их отношение, силы давления между нитями и их смятие, уработки нитей, толщину и наполнение ткани волокнистым материалом и т. д. Перечисленные параметры строения ткани могут быть вычислены в зависимости от технологических плотностей ткани по основе и утку, жесткостных характеристик нитей и ряда других показателей.

## ВЫВОДЫ

Исследована структура технической ткани ТОПАС-2 для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной технологии, получены ее расчетная и математическая модели строения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Степанов Г.В.* Создание и технология получения технических тканей для производства композиционных материалов: Дис. ... докт. техн. наук. – М., 1990.
2. Пат. 2040606 Российская Федерация. Техническая ткань. Степанов Г.В., Ерохин Ю.Ф., Сеницын В.А., Степанов С.Г., Рыбкина Е.Г. – Оpubл. 27.07.1995, Бюл. № 21.
3. *Степанов С.Г.* Развитие теории формирования и строения ткани на основе нелинейной механики гибких нитей: Дис.... докт. техн. наук. – Иваново: ИГТА, 2007.
4. *Светлицкий В.А.* Механика гибких стержней и нитей. – М.: Машиностроение, 1978.

## REFERENCES

1. Stepanov G.V. Sozdanie i tekhnologiya polucheniya tekhnicheskikh tkaney dlya proizvodstva kompozitsionnykh materialov: Dis. ... dokt. tekhn. nauk. – M., 1990.
2. Pat. 2040606 Rossiyskaya Federatsiya. Tekhnicheskaya tkan'. Stepanov G.V., Erokhin Yu.F., Sinitsyn V.A., Stepanov S.G., Rybkina E.G. – Opubl. 27.07.1995, Byul. № 21.
3. Stepanov S.G. Razvitie teorii formirovaniya i stroeniya tkani na osnove nelineynoy mekhaniki gibkikh nitey: Dis.... dokt. tekhn. nauk. – Ivanovo: IGTA, 2007.
4. Svetlitskiy V.A. Mekhanika gibkikh sterzhney i nitey. – M.: Mashinostroenie, 1978.

Рекомендована кафедрой технологии и проектирования текстильных материалов ЮКГУ им. М. Ауэзова. Поступила 22.01.20.