

УДК 677.024

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СТРОЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТКАНИ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО СОКРАЩЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

**CALCULATION OF TECHNICAL FABRIC STRUCTURE PARAMETERS
FOR THE PRODUCTION OF THERMOPLASTIC
COMPOSITE MATERIALS BY ABBREVIATED TECHNOLOGY**

*С.Г. СТЕПАНОВ¹, В.М. ДЖАНПАИЗОВА², Ж.У. МЫРХАЛЫКОВ³,
Г.С. КЕНЖИБАЕВА², Б.С. ТУРАКУЛОВ²*

*S.G. STEPANOV, V.M. JANPAIZOVA, ZH.U. MYRKHALYKOV,
G.S. KENZHIBAEVA, B.S. TURAKULOV*

¹Ивановский государственный политехнический университет,
²Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан,
³Международный университет SILKWAY, Республика Казахстан)

¹Ivanovo State Polytechnical University,
²M. Auezov South Kazakhstan State University, Republic of Kazakhstan,
³Silk Way International University, Republic of Kazakhstan)

E-mail: step-sg@mail.ru

Выполнен расчет параметров строения технической ткани из термопластичных полиамидных нитей и термостойких стеклонитей для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной технологии.

The calculation of the parameters of the structure of technical fabric made of hot-melt polyamide yarns and heat-resistant glass fibers for the production of thermoplastic composite materials by abbreviated technology.

Ключевые слова: техническая ткань, термопластичные композиционные материалы, полиамидные нити, стеклонити, параметры строения ткани.

Keywords: technical fabric, thermoplastic composite materials, polyamide filaments, glass fiber, fabric structure parameters.

В [1] исследована структура технической ткани ТОПАС-2 из термопластичных полиамидных нитей и термостойких стеклонитей для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной (беспропиточной) технологии, получены расчетная и математическая модель ее строения.

Для расчета параметров строения ткани типа ТОПАС-2, характеризующейся низкой плотностью по основе, математическая модель (1)...(13) [1] может быть существенно упрощена. Вследствие низкой плотности по основе этой ткани прогибы и углы поворота поперечных сечений уточной стеклонити и уточной капроновой нити являются малыми величинами. В этом случае из уравнений (5), (6) для уточной стеклонити

и уравнений (8), (9) для уточной капроновой нити системы (1)...(13) [1] следует:

$$\frac{dV}{dZ} = \operatorname{tg}\alpha \approx \alpha, \quad (1)$$

$$\frac{dU}{dW} = \operatorname{tg}\beta \approx \beta, \quad (2)$$

Кроме того, имеем $\ell \approx Z$, $r \approx W$.

Отбрасывая в уравнениях (4) и (7) системы (1)...(13) [1] нелинейные члены ввиду их малости и учитывая, что $\ell \approx Z$, $r \approx W$, после преобразований получим:

$$-A_y^c \frac{d^4 V}{dZ^4} + N_{O_2} \frac{d^2 V}{dZ^2} = T_y(Z), \quad (3)$$

$$-A_y^k \frac{d^4 U}{dW^4} + N_{O_3} \frac{d^2 U}{dW^2} = T_y(W), \quad (4)$$

где

$$T_y(Z) = q_1^y [1 - H(Z - Z_1) - H(Z - Z_2) + H(Z - Z_3) + H(Z - Z_4)], \quad (5)$$

$$T_y(W) = q_1^y [1 - H(W - W_1) - H(W - W_2) + H(W - W_3) + H(W - W_4)].$$

В выражениях (5) $Z_i (i=1,2,\dots,4)$ и $W_i (i=1,2,\dots,4)$ являются координатами по

осям Z и W , определяющими действие распределенных нагрузок (рис. 4.7) из [1].

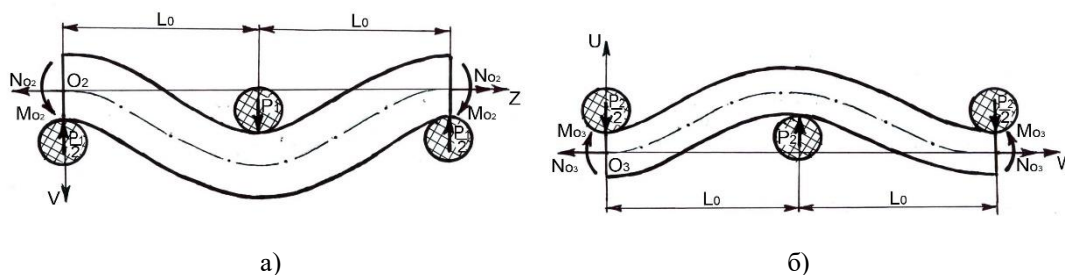


Рис. 1

Дальнейшее упрощение система получит, если распределенные нагрузки, приложенные к уточным нитям, заменить сосредоточенными силами (рис. 1). В этом случае функции внешних нагрузок принимают вид:

$$T_y(Z) = -P_1 \delta(Z - L_0), \quad (6)$$

$$T_y(W) = -P_2 \delta(W - L_0), \quad (7)$$

где $\delta(Z - L_0)$, $\delta(W - L_0)$ – дельта-функции Дирака [2].

С учетом выполненных преобразований система (1)...(13) [1] принимает следующий упрощенный вид [3]:

$$A_0 \left\{ \frac{d^3\varphi}{ds^3} - 0,5 \left[\left(\frac{d\varphi}{ds} \right)_{|s=0}^2 - \left(\frac{d\varphi}{ds} \right)^2 \right] \frac{d\varphi}{ds} \right\} - N_{01} \frac{d\varphi}{ds} + T_0(s) = 0, \quad (8)$$

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}\varphi, \quad (9)$$

$$-A_y^c \frac{d^4V}{dZ^4} N_{O_2} \frac{d^2V}{dZ^2} = T_y(Z), \quad (10)$$

$$-A_y^k \frac{d^4U}{dW^4} N_{O_3} \frac{d^2U}{dW^2} = T_y(W), \quad (11)$$

$$q_1^0 d_y^c = q_1^y d_0, \quad (12)$$

$$q_2^0 d_y^k = q_2^y d_0, \quad (13)$$

$$Y|_{x=3L_y} + V|_{Z=L_0} = \eta_{об} d_0 + \eta_{yb}^c d_y^c, \quad (14)$$

$$U|_{W=L_0} + Y|_{Z=L_y} - Y|_{x=2L_y} = \eta_{об} d_0 + \eta_{yb}^k d_y^k, \quad (15)$$

Полученная система уравнений (8)...(15) может быть использована для расчета параметров строения тканей типа ТОПАС-2 в любой зоне на станке (в опущке, в шпартках, у грудницы и т.д.). Однако

ограничимся исследованием строения ткани ТОПАС-2 в свободном состоянии, то есть ткани, снятой со станка. В этом случае $N_{O_1} = 0$, $N_{O_2} = 0$, $N_{O_3} = 0$. Решая для этого случая уравнения (10), (11) приближенным способом, выражая через полученные решения высоты волн изгиба точной стеклонити $V|_{Z=L_0}$, точной капроновой нити $U|_{W=L_0}$, принимая допущение о том, что длины дуг контакта между основой и уточинами равны диаметрам контактирующих с ней уточных нитей, выполнив замену переменной s на x , получим следующую математическую модель строения ткани ТОПАС-2 в свободном состоянии (подробный вывод этой математической модели приводится на с. 267...270 [3]):

$$A_0 \left[\frac{d^3\varphi}{dx^3} \cos^2 \varphi - 2 \frac{d^2\varphi}{dx^2} \frac{d\varphi}{dx} \sin 2\varphi - \left(\frac{d\varphi}{dx} \right)^3 (1,5 \cos^2 \varphi - 1) \right] - 0,5 A_0 \left(\frac{d\varphi}{dx} \right)_{x=0}^2 \frac{d\varphi}{dx} + \frac{1}{\cos \varphi} T_0(x) = 0, \quad (16)$$

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}\varphi, \quad (17)$$

$$Y|_{x=3L_y} + \frac{4q_1^0 d_y^c}{A_y^c \alpha_y^4 L_0} = \eta_{об} d_0 + \eta_{yb}^c d_y^c, \quad (18)$$

$$\frac{4q_2^0 d_y^k}{A_y^k \alpha_y^4 L_0} + Y|_{Z=L_y} - Y|_{x=2L_y} = \eta_{об} d_0 + \eta_{yb}^k d_y^k, \quad (19)$$

где

$$T_0(x) = q_1^0 [1 - H(x - x_1)] - q_2^0 [H(x - x_2) - H(x - x_3)] + q_2^0 [H(x - x_4)] - H(x - x_5)] - q_1^0 H(x - x_6), \quad (20)$$

$H(x - x_i)$ – функции Хевисайда [2].

Итак, имеем систему четырех уравнений с таким же числом неизвестных: φ , y , q_1^0 , q_2^0 .

Граничные условия для решения системы (16)...(19) имеют вид

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0; \quad \varphi = 0; \quad y = 0, \\ \text{при } x = 3L_y; \quad \varphi = 0; \quad y = y|_{x=3L_y}. \end{aligned} \quad (21)$$

Воспользуемся для решения системы

(16)...(19) методом конечных разностей, для чего введем конечно-разностную сетку на отрезке $3L_y$ по оси x основной капроновой нити ([1], рис. 4.7-а), разделив этот отрезок на n равных частей (рис. 2). Аппроксимируя производные уравнений (16), (17) центральными разностями [4] и выражая $Y|_{x=3L_y}$, $Y|_{x=2L_y}$, $Y|_{x=L_y}$ через углы φ_j в узлах сетки, получим [3]:

$$A_0 \left[\frac{(\varphi_{i+2} - 2\varphi_{i+1} + 2\varphi_{i-1} - \varphi_{i-2})}{2h_1^3} \cos^2 \varphi_i - \frac{(\varphi_{i+1} - 2\varphi_i + \varphi_{i-1})(\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1})}{h_1^3} \sin 2\varphi_i - \frac{(\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1})^3}{8h_1^3} (1,5 \cos^2 \varphi_i - 1) \right] - \quad (22)$$

$$-0,5A_0 \frac{(\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1})^2}{4h_1^2} \Big|_{x=0} \cdot \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1}}{2h_1} + \frac{1}{\cos \varphi_i} T_0(x) = 0, \quad (23)$$

$$\frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2h_1} = \operatorname{tg} \varphi_i,$$

$$2h_1 \sum_{j=1,3,5\dots}^{j=n-1} \operatorname{tg} \varphi_j + \frac{4q_1^0 d_y^c}{A_y^c \alpha_y^4 L_0} = \eta_{\text{об}} d_0 + \eta_{\text{уб}}^c d_y^c, \quad (24)$$

$$\frac{4q_2^0 d_y^k}{A_y^k \alpha_y^4 L_0} + 2h_1 \sum_{j=1,3,5\dots}^{j=n-1} \operatorname{tg} \varphi_j - 2h_1 \sum_{j=1,3,5\dots}^{j=m-1} \operatorname{tg} \varphi_j = \eta_{\text{об}} d_0 + \eta_{\text{уб}}^k d_y^k, \quad (25)$$

где k, m – номера узлов, совпадающих с плоскостями, перпендикулярными оси x и проведенными через центры сечений уточных капроновых нитей; n – номер последнего узла конечно-разностной сетки (при $x=3L_y$).

Граничные условия для решения конечно-разностного аналога (22 ... 25) имеют вид:

$$\varphi_0 = x_0 = y_0 = 0; \quad \varphi_{-1} = -\varphi_1; \varphi_n = 0; \quad x_n = 3L_y; \quad y_n = 2h_1 \sum_{j=1,3,5\dots}^{j=n-1} \operatorname{tg} \varphi_j; \quad y_{n+1} = -y_{n-1}. \quad (26)$$

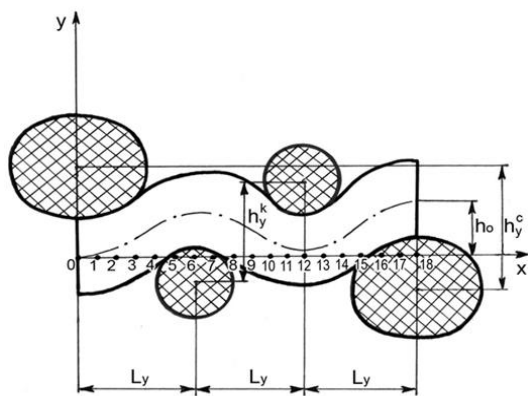


Рис. 2

Воспользуемся полученным конечно-разностным аналогом для расчета параметров строения ткани ТОПАС-2 [5]. С этой целью зададимся конкретным числом элементов конечно-разностной сетки $n=18$, на которое разобьем весь интервал по оси X от 0 до $3L_y$ (рис. 2 – конечно-разностная

сетка для отрезка капроновой нити ткани ТОПАС - 2). Номера узлов, совпадающих с плоскостями, перпендикулярными оси X , и проведенными через центры сечений уточных капроновых нитей, получают значения: $k=6$; $m=12$. При этом номер последнего узла сетки $n=18$.

Расчет параметров строения ткани ТОПАС - 2 выполнялся при следующих исходных данных:

геометрические плотности по основе $L_0=2$ мм; по утку $L_y=0,154$ мм; диаметры поперечных сечений основной капроновой $d_0=0,13$ мм; уточной стеклонити $d_y^c=0,23$ мм; уточной капроновой $d_y^k=0,13$ мм; коэффициенты вертикального смятия основной капроновой $\eta_{\text{об}}=1$; уточной стеклонити $\eta_{\text{уб}}^c=0,75$; уточной капроновой $\eta_{\text{уб}}^k=1$; жесткости при изгибе основной капроновой $A_0=0,0124$ Н·мм²; уточной стеклонити $A_y^c=0,006$ Н·мм²; уточной капроновой

$A^c_y=0,0124 \text{ Н}\cdot\text{мм}^2$; число узлов конечно-разностной сетки для отрезка основы – 19; шаг конечно-разностной сетки для основы

$$h_o = \frac{3L_y}{18} = \frac{3 \cdot 0,154}{18} = 0,0257 \text{ мм}.$$

В результате численного решения с использованием пакета программ MathCAD11 конечно-разностного аналога (22)...(25) при перечисленных выше исходных данных и граничных условиях (26) определены следующие параметры строения ткани ТОПАС-2 [5]:

координаты деформированной оси основной нити, в том числе высота ее волны изгиба $U_{|x=3L_y} = 0,057 \text{ мм}$; отношение высоты волны изгиба основы к высоте волны

изгиба уточной стеклонити 0,236; силы взаимного давления между основной и уточной стеклонитью 0,437 сН; между основной и уточной капроновой нитью 1,1 сН; длины деформированных осей отрезка основной нити 0,467 мм; уточной стеклонити в элементе ткани 2,022 мм; уточной капроновой нити в элементе ткани 2,029 мм (расчет длин деформированных осей уточных нитей в элементе ткани выполнен с использованием формулы Симпсона); уработки основной нити 1,071%; уточной стеклонити 1,088 %; уточной капроновой нити 1,429 %; толщина ткани 0,416 мм; коэффициент наполнения ткани 0,375.

В табл. 1 сведены расчетные значения уработки нитей, толщины ткани ТОПАС-2 и фактические значения этих параметров, вычислена относительная ошибка.

Т а б л и ц а 1

Параметры ткани ТОПАС-2	Расчетное значение параметра, %	Фактическое значение параметра, %	Относительная ошибка, %
Уработка основной капроновой нити	1,071	1,04	3,0
Уработка уточной стеклонити	1,088	1,05	3,6
Уработка уточной капроновой нити	1,429	1,38	3,6
Толщина ткани	0,416 мм	0,40 мм	4

Сравнение расчетных и фактических значений уработки нитей и толщины ткани ТОПАС-2 показывает, что эти параметры достаточно близки.

ВЫВОДЫ

1. Получены упрощенная математическая модель строения технической ткани ТОПАС-2 для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной (беспропиточной) технологии и ее конечно-разностный аналог.

2. Выполнен расчет параметров строения ткани ТОПАС-2, в том числе уработки нитей и толщины этой ткани, расчетные значения которых оказались близки к экспериментальным значениям, что подтверждает достоверность разработанной теории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов С.Г., Джаннапаузова В.М., Кенжибаева Г.С., Туракулов Б.С. Математическая модель строения технических тканей для производства термопластичных композиционных материалов по сокращенной технологии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, № 4. С.79...83.
2. Светлицкий В.А. Механика гибких стержней и нитей. – М.: Машиностроение, 1978.
3. Степанов С.Г. Развитие теории формирования и строения ткани на основе нелинейной механики гибких нитей: Дис.... докт. техн. наук. – Иваново: ИГТА, 2007.
4. Годунов С.К., Рябенкий В.С. Разностные схемы. – М.: Наука, 1973.
5. Пат. 2040606 Российская Федерация. Техническая ткань / Степанов Г.В., Ерохин Ю.Ф., Синицын В.А., Степанов С.Г., Рыбкина Е.Г. – Оpubл. 27.07.1995, Бюл. № 21.

REFERENCES

1. Stepanov S.G., Dzhanpaizova V.M., Kenzhibaeva G.S., Turakulov B.S. Matematicheskaya model' stroeniya tekhnicheskikh tkaney dlya proizvodstva termoplastichnykh kompozitsionnykh materialov po sokrashchenoy tekhnologii // Izv. vuzov. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti. – 2020, № 4. S.79...83.

2. Svetlitskiy V.A. Mekhanika gibkikh sterzhney i nitey. – M.: Mashinostroyeniye, 1978.

3. Stepanov S.G. Razvitie teorii formirovaniya i stroeniya tkani na osnove nelineynoy mekhaniki gibkikh nitey: Dis.... dokt. tekhn. nauk. – Ivanovo: IGTA, 2007.

4. Godunov S.K., Ryaben'kiy V.S. Raznostnye skhemy. – M.: Nauka, 1973.

5. 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.

Рекомендована кафедрой технологии и проектирования текстильных материалов ЮГУ. Поступила 22.01.20.
