

УДК 677.024
DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_124

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ
ДЛЯ АРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ЗАДАНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРОЧНОСТИ**

**PROCEDURE FOR CALCULATION AND DESIGN OF TECHNICAL FABRICS
FOR REINFORCEMENT OF POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS
WITH GIVEN STRENGTH CHARACTERISTICS**

*С.Г. СТЕПАНОВ, Д.А. БУЛАНОВ, В.М. ДЖАНПАИЗОВА, Г.Ф. САГИТОВА,
Б.С. ТУРАКУЛОВ, С.Ж. АБДИКЕРИМОВ*

*S.G. STEPANOV, D.A. BULANOV, V.M. JANPAIZOVA, G.F. SAGITOVA,
B.S. TURAKULOV, S.ZH. ABDIKERIMOV*

**(Ивановский государственный политехнический университет, Российская Федерация,
Ивановский государственный энергетический университет, Российская Федерация,
Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, Республика Казахстан)**

**(Ivanovo State Polytechnical University, Russia,
Ivanovo State Power Engineering University, Russia,
M. Auezov South Kazakhstan University, Republic of Kazakhstan)**

E-mail: step-sg@mail.ru

*Разработана методика расчета и проектирования технических тканей
полотняного переплетения из сверхвысокомодульных термостойких нитей
для армирования полимерных композиционных материалов с заданными ха-
рактеристиками прочности.*

A method for calculating and designing technical fabrics of plain weave from ultra-high modulus heat-resistant yarns for reinforcing polymer composite materials with specified strength characteristics has been developed.

Ключевые слова: расчет и проектирование технических тканей, сверхвысокомодульные термостойкие нити, армирование полимерных композиционных материалов.

Keywords: calculation and design of technical fabrics, ultra-high modulus heat-resistant yarns, reinforcement of polymer composite materials.

Производство композиционных материалов (КМ) и изделий является одним из бурно развивающихся направлений. Особое место среди разнообразных видов КМ занимают полимерные композиционные материалы (ПКМ) с наполнителями в виде тканей из высокопрочных волокон, связующими в которых выступают полимеры. В сравнении с традиционными конструкционными материалами ПКМ обладают высокими прочностью (удельная прочность, то есть предел прочности материала, отнесенный к его плотности, многих ПКМ превосходит этот показатель для стали), коррозионной стойкостью, сопротивляемостью усталостному и ударному разрушению, малым удельным весом и т.д., благодаря чему они нашли широкое применение в различных отраслях промышленности.

Одной из основных характеристик ПКМ с наполнителем в виде тканей является относительное объемное содержание волокон, или что то же самое, коэффициент армирования. Он представляет собой отношение объема, занятого волокнами, к объему материала и теоретически может достигать значения 0,9 (наиболее плотная упаковка волокон), а доля воспринимаемой этими волокнами нагрузки может даже превышать это значение. Механические характеристики ПКМ зависят от объемного содержания, прочности, жесткости волокон и связующего, совместимости волокон с матричным материалом, обуславливающим прочность связи на границе между ними, и ряда других факторов. Если проблема совместимости волокон с матричным материалом в большинстве случаев решается путем их подбора, в результате чего обеспечивается необходимая прочность связи на границе

между ними, то проблема обеспечения прочности ПКМ на тканевой основе в целом может быть решена путем расчета и проектирования технической ткани, от которой в определяющей степени будет зависеть прочность ПКМ.

В связи с вышеизложенным актуальной становится проблема разработки методики расчета и проектирования технических тканей для армирования полимерных композиционных материалов с заданными характеристиками прочности.

Изложим методику на примере расчета и проектирования технических тканей из сверхвысокомодульных термостойких нитей для армирования пластмасс. Полоска ткани шириной 50 мм должна выдерживать нагрузку 3000 Н как вдоль основы, так и вдоль утка.

В качестве исходного материала принимаем сверхвысокомодульную нить (СВМ) линейной плотности 29,4 текс (нить техническая СВМ, полученная с применением водного осадителя, с числом элементарных нитей 200) согласно ГОСТ 28007–88 Нить и жгут СВМ высококомодульные технические. Технические условия. Эта нить выдерживает нагрузку до 30 Н.

Определим количество нитей, которое должна содержать полоска ткани, чтобы выдержать нагрузку в 3000 Н:

$$n = \frac{P}{\eta P_{cp}} = \frac{3000}{0,78 \cdot 30} = 128,2, \quad (1)$$

где n – количество нитей в полоске ткани шириной 50 мм; P – заданная нагрузка на полоску ткани, Н; P_{cp} – средняя разрывная нагрузка одной нити, Н; η – усредненный

коэффициент, учитывающий уменьшение разрывных нагрузок нитей при заработке последних в ткань, обусловленный повреждаемостью волокон (выполненный комплекс экспериментальных исследований по определению разрывной нагрузки технической нити СВМ линейной плотности 29,4 текс с числом элементарных нитей 200 до и после заработки в ткань подтвердил значение этого коэффициента $\eta = 0,78$).

Окончательно принимаем $n = 129$ нитей в полоске ткани шириной 50 мм.

Отсюда для плотностей ткани по основе и утку получим $P_o = P_y = 258 \text{ Н/дм}$.

Для продолжения решения задачи необходимо знать уработку основы и утка. Проектируемая ткань относится к тканям повышенной плотности, поэтому использование для расчета уработки положений линейной теории изгиба нитей [2...4] здесь неприемлемо, так как приведет к существенной погрешности [5]. Для расчета уработки нитей воспользуемся конечно-разностным аналогом (9) [6] математической модели строения ткани (1...6) [6], полученной на основе нелинейной теории изгиба гибких нитей и позволяющей рассчитать параметры строения любых однослойных тканей полотняного переплетения, в том числе и особо уплотненных как по основе, так и по утку.

Расчет уработки нитей выполнялся на основе расчетной модели ткани полотняного переплетения (рис. 3-а, б) из [6] конечно-разностного аналога (9) [6] (конечно-разностные сетки для отрезков основы и утка представлены на рис. 4-а, б из [6]) математической модели строения ткани полотняного переплетения (1...6) [6] при следующих исходных данных:

геометрические плотности ткани по основе и утку $L_o = L_y = 0,388 \text{ мм}$;

диаметры поперечных сечений нитей основы и утка $d_{об} = d_{уб} = 0,257 \text{ мм}$;

коэффициенты вертикального смятия нитей $\eta_{об} = \eta_{уб} = 0,8$;

жесткости при изгибе нитей $A_o = A_y = 0,006 \text{ Н} \cdot \text{мм}^2$;

число узлов конечно-разностной сетки для отрезков основы и утка – 13;

шаг конечно-разностной сетки:

$$h_o = h_y = \frac{2L_o}{12} = \frac{2L_y}{12} = 0,065 \text{ мм} \quad (2)$$

В результате численного решения с использованием пакета программ MathCAD 11 конечно-разностного аналога (9) [6] при перечисленных выше исходных данных, помимо прочих параметров, определены следующие значения уработки нитей основы a_o и утка a_y :

$$a_o = a_y = 13,469 \% .$$

Прежде чем перейти к заправочному расчету ткани, необходимо уточнить, на каких ткацких станках можно выработать проектируемую ткань и выбрать марку станка. Для этого определим коэффициент связности. Для этого воспользуемся общепринятыми формулами строения ткани [7], [8].

Находим среднюю линейную плотность пряжи, текс:

$$T_{cp} = \frac{T_o + T_y}{2} = \frac{29,4 + 29,4}{2} = 29,4 \quad (3)$$

Определяем средний коэффициент переплетения ткани:

$$F = \frac{2n_o n_y}{t_o + t_y} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 2}{2 + 2} = 2, \quad (4)$$

где $n_o = n_y$ – число основных и уточных нитей в раппорте переплетения (в нашем случае $n_o = n_y = 2$); t_o – число связей основы и утка в направлении основы (в нашем случае $t_o = 2$); t_y – число связей основы и утка в направлении утка (в нашем случае $t_y = 2$).

Значения t_o и t_y подсчитываются в пределах раппорта переплетения ткани.

Коэффициент связности C зависит от T_{cp} , F и плотностей ткани по основе P_o и утку $P_y \left(\frac{\text{Н}}{\text{см}} \right)$ и рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{P_o P_y T_{cp}}{1000 F} = \frac{25,8 \cdot 25,8 \cdot 29,4}{1000 \cdot 2} = 9,78 \quad (5)$$

Технологический процесс выработки ткани на станке СТБ будет проходить нормально, если коэффициент связности равен или меньше 11 [9]. Следовательно, станок СТБ по этому показателю подходит.

Выработку ткани будем осуществлять на станке СТБ 2-180, используя полностью его заправочную ширину:

$$\ell_{\text{тк}} = \ell_{\text{б}} \left(1 - \frac{a_y}{100} \right) = 180 \left(1 - \frac{13,469}{100} \right) = 155,8 \text{ см}, \quad (6)$$

где $\ell_{\text{тк}}$ – ширина суровой ткани, см; $\ell_{\text{б}}$ – заправочная ширина станка, см.

Число нитей основы определяем по формуле:

$$m_o = m_{\phi} + m_{\text{кр}}, \quad (7)$$

где m_o – количество нитей основы; m_{ϕ} – количество нитей фона; $m_{\text{кр}}$ – количество нитей кромок.

Находим количество нитей фона, принимая ширину одной кромки $\ell_{\text{кр}} = 1,5$ см:

$$m_{\phi} = P_o(\ell_{\text{тк}} - \ell_{\text{кр}}) = 25,8(155,8 - 2 \cdot 1,5) = 3942. \quad (8)$$

$$G_y = P_y T_y (\ell_{\text{б}} + \ell_{\text{кр}}) \cdot 10^{-3} = 258 \cdot 29,4(1,8 + 0,03) \cdot 10^{-3} = 13,881 \text{ кг}. \quad (13)$$

Масса утка в 1 метре ткани:

$$G_{y_1} = \frac{G_y}{100} = \frac{13,881}{100} = 0,13881 = 138,81 \text{ г}. \quad (14)$$

Линейная плотность ткани, г:

$$G = G_{o_1} + G_{y_1} = 136,59 + 138,81 = 275,4. \quad (15)$$

Поверхностная плотность ткани:

$$b = \eta_{\text{ов}} d_{\text{ов}} + \eta_{\text{уб}} d_{\text{уб}} = 0,8 \cdot 0,257 + 0,8 \cdot 0,257 = 0,411 \text{ мм}. \quad (17)$$

Поскольку проектируемая ткань имеет нити утка и основы одинакового волокнистого состава, то для определения объем-

ного наполнения ткани воспользуемся формулой (8.93) [4]:

$$m_{\text{кр}} = P_o \ell_{\text{кр}} = 25,8 \cdot 2 \cdot 1,5 = 77,4 \text{ нити}. \quad (9)$$

Принимаем $m_{\text{кр}} = 78$ нитей.

Находим число нитей основы:

$$m_o = m_{\phi} + m_{\text{кр}} = 3942 + 78 = 4020 \text{ нитей}. \quad (10)$$

Определяем массу нитей основы в 100 метрах ткани:

$$G_o = \frac{m_o T_o}{\left(1 - \frac{a_o}{100}\right) \cdot 10^4} = \frac{4020 \cdot 29,4}{\left(1 - \frac{13,469}{100}\right) \cdot 10^4} = 13,659 \text{ кг}. \quad (11)$$

Масса основной нити в 1 метре ткани:

$$G_{o_1} = \frac{G_o}{100} = \frac{13,659}{100} = 0,13659 = 136,59 \text{ г}. \quad (12)$$

Масса уточной нити в 100 метрах ткани:

$$g'_c = \frac{G}{\ell_{\text{тк}}} = \frac{275,4}{1,558} = 176,765 \text{ г/м}^2. \quad (16)$$

Определим толщину ткани. Так как проектируемая ткань относится к ткани V порядка фазы строения с одинаковыми диаметрами нитей основы и утка, то ее толщина b согласно [7] подсчитывается по формуле:

ного наполнения ткани воспользуемся формулой (8.93) [4]:

$$N_{\text{тк}} = \frac{7,85 \cdot 10^{-6} \cdot C^2}{b} \left[T_o P_o \left(1 + \frac{a_o}{100} \right) + T_y P_y \left(1 + \frac{a_y}{100} \right) \right] = \quad (18)$$

$$= \frac{7,85 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5^2}{0,411} \left[29,4 \cdot 258 \left(1 + \frac{13,469}{100} \right) + 29,4 \cdot 258 \left(1 + \frac{13,469}{100} \right) \right] = 0,74,$$

где C – коэффициент, зависящий от плотности материала нити, который согласно [4] для нитей СВМ составляет 1,5.

Найденный коэффициент объемного наполнения ткани характеризует степень напряженности процесса формирования ткани.

ВЫВОДЫ

Разработана методика расчета и проектирования технических тканей для армирования полимерных композиционных материалов с заданными характеристиками прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Румянцев Е.В., Матрохин А.Ю., Киселев М.В., Степанов С.Г. Полимерные композиционные материалы на волокнистой основе: характеристики, тенденции развития производства, научные направления и технологии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, № 5.
2. Салихова А.Х. Аналитические системы и соотношения для прогнозирования строения, анализа и расчета тканей заданных характеристик: Дис.... канд. техн. наук.- Иваново, 2003.
3. Карева Т.Ю. Определение величины изгиба нитей основы в тканях новых структур на основе линейной теории изгиба // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2002, № 3. С. 48...51.
4. Степанов Г.В., Степанов С.Г. Теория строения ткани.–Иваново: ИГТА, 2004.
5. Степанов С.Г. Развитие теории формирования и строения ткани на основе нелинейной механики гибких нитей: Дис. ... докт. техн. наук. – Иваново, 2007.
6. Степанов С.Г., Маслов Л.Б. Математическая модель строения технической ткани для армирования полимерных композиционных материалов и конечно-разностный аналог для расчета ее параметров// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2021, № 5.

7. Мартынова А.А., Слостина Г.Л., Власова Н.А. Строеение и проектирование тканей. – М.: РИО МГТА, 1999.

8. Дамьянов Г.Б., Бачев И.З., Сурнина Н.Ф. Строеение ткани и современные методы ее проектирования. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984.

9. Оников Э.А. Проектирование ткацких фабрик. – М.: Изд-во ГОУВПО ЗИТЛП, 2006.

REFERENCES

1. Rumyantsev E.V., Matrokhin A.Yu., Kiselev M.V., Stepanov S.G. Polymer composite materials on a fibrous basis: characteristics, production development trends, scientific directions and technologies // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2021, No.5.
2. Salikhova A.Kh. Analytical systems and relations for predicting the structure, analysis and calculation of tissues of given characteristics: Dis. ... cand. tech. Sciences. - Ivanovo, 2003.
3. Kareva T.Yu. Determination of the bending value of the warp threads in the tissues of new structures based on the linear theory of bending // Izv. universities. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2002, No. 3. S. 48 ... 51.
4. Stepanov G.V., Stepanov S.G. Theory of tissue structure.–Ivanovo: IGTA, 2004.
5. Stepanov S.G. Development of the theory of formation and structure of tissue based on the nonlinear mechanics of flexible threads: Dis. ... doc. tech. Sciences. – Ivanovo, 2007.
6. Stepanov S.G., Maslov L.B. Mathematical model of the structure of technical fabric for reinforcing polymer composite materials and a finite-difference analogue for calculating its parameters // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2021, No. 5.
7. Martynova A.A., Slostina G.L., Vlasova N.A. Structure and design of fabrics. – М.: RIO MGTA, 1999.
8. Damyanov G.B., Bachev I.Z., Surnina N.F. Fabric structure and modern methods of its design. - М.: Light and food industry, 1984.
9. Onikov E.A. Design of weaving factories. - М.: Publishing house of GOUVPO ZITLP, 2006.

Поступила 29.12.21.