

УДК 677.46.06:620.16:054

DOI 10.47367/0021-3497_2021_6_37

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ НИТЕЙ
И ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА**

**DEVELOPMENT OF METHODS
FOR ASSESSING TECHNOLOGICAL PROPERTIES
OF HIGH MODULE YARNS AND EXPERIMENTAL STAND PARAMETERS**

С.Н. ТИТОВ, М.В. КИСЕЛЕВ, П.А. ХИЛОВ, В.В. РОМАНОВ

S.N. TITOV, M.V. KISELEV, P.A. KHILOV, V.V. ROMANOV

**(ООО НПО "Программируемые Композиты", Россия
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева, Россия)**

**(ООО NPO "Programmable Composites" LLC, Russia,
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Russia)**

E-mail: sotings@yandex.ru; kisselev50@mail.ru; khilov_p@mail.ru; wwr52@rambler.ru

Статья посвящена разработке методов оценки технологических свойств высокомодульных нитей, а также определению параметров для разработки экспериментального стенда. Обоснована актуальность поставленной задачи, связанной с отсутствием стандартных методик и сертифицированного оборудования для определения остаточной технологической прочности углеродных волокон после их переработки на оборудовании в готовое изделие. Целями работы является разработка методик и экспериментального стенда для решения задач оптимизации процесса подготовки высокомодульных нитей для дальнейшей переработки и оценки влияния технологических режимов обработки и конструктивных элементов оборудования на них. Предложена система испытаний высокомодульных нитей с закреплением их концов, гарантирующая отсутствие разрушения нити в зажимах установки. Разработаны приспособления для имитации воздействия оснастки ткацкого оборудования с углеродной нитью в ходе технологического процесса. Приведен расчет элементов приспособлений для испытательного стенда. Получены численные значения основных технических требований к экспериментальной установке. Сделаны выводы по работе.

The article under review is devoted to the development of methods for assessing of the technological properties of high-module yarns, as well as the determination of parameters for the development of an experimental stand. The urgency of the task, associated with the lack of standard methods and certified equipment for determining the residual technological strength of carbon fibers after their processing on equipment into a finished product, has been substantiated. The objectives of the

work are to develop methods and an experimental stand for solving problems of optimizing the process of preparing high-module yarns for further processing and assessing the effect of technological processing modes and structural elements of equipment on them. A system of testing high-module yarns with fixing their ends is proposed, which guarantees the absence of destruction of the yarn in the clamps of the installation. Devices have been developed to simulate the impact of the tooling of weaving equipment with carbon thread in the course of the technological process. The calculation of the elements of devices for the test bench is presented. Numerical values of the main technical requirements for the experimental setup are obtained. Conclusions on the work are made.

Ключевые слова: высокомодульные нити, методы испытаний, измерительное оборудование, технология ткачества.

Keywords: high module yarns, test methods, measuring equipment, weaving technology.

Современным направлением развития области использования композиционных материалов является изготовление армирующих текстильных каркасов с геометрией, близкой к конечной детали. Одним из таких методов является технология переработки нитей методом 3D-ткачества, но наряду с преимуществами у данного метода имеются недостатки. Текстильные нити подвергаются более интенсивному механическому воздействию со стороны технологической оснастки оборудования при переработке, что приводит к снижению их механических характеристик в готовом изделии. Особенно существенно в процессе переработки снижаются свойства углеродных волокон и нитей вследствие низкой прочности углеродных филаментов на изгиб. Таким образом, свойства высокомодульных нитей после их переработки в изделие будут существенно отличаться от исходных. Для высокомодульных нитей более корректно было бы использовать термин "остаточной технологической прочности" нитей после переработки на оборудовании. Эта характеристика будет зависеть от режимов ткачества и параметров оснастки оборудования. Операции по предварительной подготовке нитей для текстильной переработки, такие как аппретирование, трощение, кручение и др., также оказывают непосредственное влияние на стойкость нити при ткачестве. Таким образом, разработка методов оценки данной характеристики для

нити позволит подобрать оптимальный состав и параметры подготовительных операций.

Для углеродных нитей вопрос определения остаточной технологической прочности нитей еще более актуален, особенно для технологии 3D-ткачества, в которой операции приобоя нити основы повторяются многократно в одном сечении ткани. Если для обычных синтетических нитей существует ГОСТ 23364–2001 [1], который предусматривает возможность определения разрывной нагрузки и удлинения нити при разрыве, то для углеродных нитей существует ГОСТ 32667–2014 [2], который предназначен для определения свойств элементарной нити при растяжении. Совершенно очевидно, что механические свойства элементарной нити (филаментов) существенно отличаются от свойств углеродного ровинга. Установка для оценки остаточной технологической прочности должна имитировать взаимодействие исследуемой нити с различными устройствами технологической оснастки ткацкого станка, после чего выполняется исследование ее остаточной прочности. На рынке существует значительное разнообразие разрывных машин, однако углеродные волокна требуют особых условий зажима нити в связи с ломкостью филаментов при традиционных способах консольного сжатия образца. Нет стандартных методик и нет сертифицирован-

ного оборудования для определения остаточной технологической прочности углеродных волокон, что и определило актуальность задачи.

В основе экспериментальной измерительной установки заложена разрывная машина для текстильных нитей, рабочая зона которой оснащена дополнительными приспособлениями, позволяющими имитировать основные технологические нагрузки, характерные для процесса ткачества. Из анализа существующих средств измерения механических характеристик нитей следует, что ни одна из серийных разрывных машин не может быть использована в качестве базовой модели из-за того, что высоко-модульные нити, будучи хрупкими на изгиб, не могут быть закреплены в стандартных зажимах разрывных машин, а использование пасьмы в качестве объекта испытаний не может быть совмещено с имитаторами технологических воздействий. Применение других стандартных методик, основанных на выделении из нитей отдельных волокон или намачивании нитей перед испытаниями, не позволит оценить технологические свойства нитей из-за несоответствия их формы или состояния существующими при переработке на ткацком станке. Поэтому главной задачей проектирования испытательной установки является определение способа закрепления испытуемого образца и, следовательно, его базовой длины.

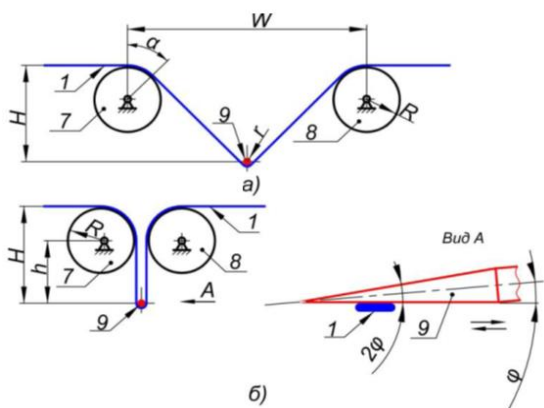


Рис. 1

Разработанная система испытания нити состоит из двух свободно вращающихся ро-

ликов 7 и 8 и наклонно установленного конуса (иглы) 9, радиус которого в месте охвата нитью настраивается за счет осевого перемещения конуса (рис. 1 – схема зоны имитаторов: а) – при определении критических углов охвата и имитации динамических воздействий; б) – при определении критического радиуса изгиба). Изменяя расстояние W между осями роликов, можно менять угол охвата нитью 1 иглы 9, который будет равен 2α .

Чтобы исключить проскальзывание нити вдоль оси конуса, последняя установлена под углом φ к нормали к плоскости размещения нити. Угол φ должен быть меньше минимального угла трения нити по закаленной полированной стали.

Выполним проектные расчеты конуса на прочность и жесткость согласно схемам, представленным на рис. 2 (схемы нагружения конуса: а) коническая игла, б) эпюра изгибающих моментов, в) эпюра моментов сопротивления сечения, г) эпюра напряжений изгиба, д) эпюра угловых прогибов, е) схема иглы с ребром).

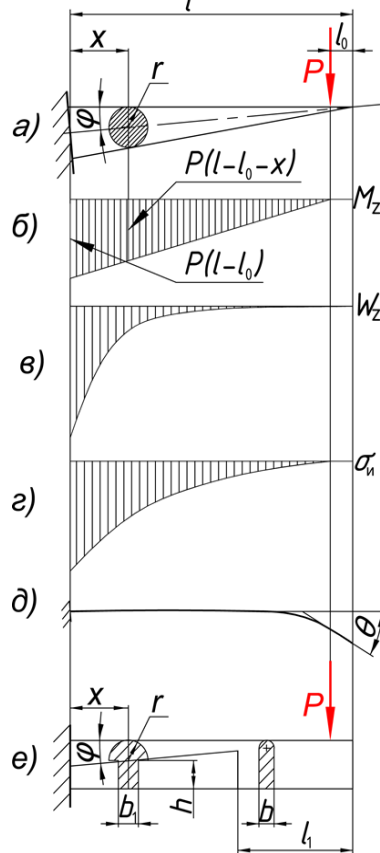


Рис. 2

$$r = r_{\max} - \frac{r_{\max}}{\ell} x = \frac{r_{\max}}{\ell} (\ell - x) = r_{\max} \left(1 - \frac{x}{\ell}\right); \quad (1)$$

$$W_z = \frac{\pi r^3}{4} = \frac{\pi r_{\max}^3}{4} \left(1 - \frac{x}{\ell}\right)^3; \quad (2)$$

$$M_z = P(\ell - \ell_0 - x); \quad \sigma_{II} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{P(\ell - \ell_0 - x)}{\frac{\pi r^3}{4}} = \frac{4P(\ell - \ell_0 - x)^3}{\pi r_{\max}^3 \left(1 - \frac{x}{\ell}\right)^3} \leq [\sigma_{II}]; \quad (3)$$

$$\sigma_{II} = \frac{4P\ell^3(\ell - \ell_0 - x)^3}{\pi r_{\max}^3(\ell - x)^3} = \frac{4P\ell^3}{\pi r_{\max}^3} \left(1 - \frac{\ell_0}{\ell - x}\right) = \frac{4P\ell^3}{\pi r_{\max}^3} \left(1 + \frac{\ell_0}{x - \ell}\right)^3 \leq [\sigma_{II}]; \quad (4)$$

$$\sigma_{II} = \frac{4P\ell^3}{\pi r_{\max}^3} \left[1 + 3\frac{\ell_0}{x - \ell} + 3\frac{\ell_0^2}{(x - \ell)^2} + \frac{\ell_0^3}{(x - \ell)^3}\right], \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{II}}{dx} &= \frac{4P\ell^3}{\pi r_{\max}^3} \left[-3\frac{\ell_0}{(x - \ell)^2} - 6\frac{\ell_0^2}{(x - \ell)^3} - 3\frac{\ell_0^3}{(x - \ell)^4}\right] = \\ &= \frac{-12P\ell^3\ell_0}{\pi r_{\max}^3(x - \ell)} \left(1 + \frac{\ell_0}{x - \ell}\right)^2 = \\ &= \frac{-12P\ell^3\ell_0(x - \ell + \ell_0)^2}{\pi r_{\max}^3(x - \ell)^4} = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

$$x = \ell - \ell_0; \quad \text{при } x = \ell - \ell_0 \quad \sigma_{II} = 0 \quad (7)$$

$$f = 0,1 \div 0,16; \quad \varphi \leq \arctg(f_{\min}); \quad \varphi \leq \arctg(0,1); \quad \varphi \leq 5,71^\circ; \quad \varphi = 5^\circ, \quad (8)$$

$$r_{\max} = \ell \cdot \operatorname{tg}\varphi = \ell \cdot \operatorname{tg}5^\circ = 0,0875 \cdot \ell; \quad \text{при } \ell = 100 \text{ мм} \quad r_{\max} = 8,75 \text{ мм}, \quad (9)$$

$$d_H = \sqrt{\frac{T}{250\pi\rho k}}; \quad r_H = \sqrt{\frac{T}{1000\pi\rho k}}; \quad S_H = \frac{T}{1000\rho}; \quad P = 2\sigma_b S_H; \quad \ell_0 = \ell \frac{r_H}{r_{\max}}, \quad (10)$$

где T – линейная плотность нити, текс; $\rho = 1,8 \text{ мг/мм}^3$ – объемная плотность волокна;

$k = 0,907$ – максимальный коэффициент заполнения нити волокнами (сотовая структура).

$$T = 1040 \text{ текс}; \quad s_H = \frac{1040}{1000 \cdot 1,8} = 0,578 \text{ мм}^2; \quad r_H = 0,45 \text{ мм}; \quad \ell_0 = 5,14 \text{ мм}; \quad P = 6358 \text{ Н}; \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{II} &= \frac{4P\ell^3}{\pi r_{\max}^3} \left(1 + \frac{\ell_0}{x - \ell}\right)^3 = \frac{4 \cdot 6358 \cdot 100^3}{\pi 8,75^3} \left(1 + \frac{5,14}{x - 100}\right)^3 = 12,08 \left(1 + \frac{5,14}{100 - x}\right)^3 \text{ МПа}; \\ \sigma_{II\max} &= 10,311 \text{ МПа} \ll [\sigma_{II}] = 75 \text{ МПа}. \end{aligned} \quad (12)$$

В результате получено, что конус, изготовленный даже из стали 10 без термообработки, выдерживает все требования по прочностным показателям.

Однако требованиям по жесткости при $x \approx \ell - \ell_0$ он не соответствует даже при изготовлении из инструментальной стали.

$$\theta = \int_0^\ell \frac{-P(\ell - x)(-1)}{E\pi\frac{r^4}{4}} dx = \frac{4P}{E\pi} \int_0^\ell \frac{\ell - x}{r^4} dx, \quad (13)$$

где E – модуль упругости материала стержня; r – текущий радиус стержня, вы-

числяемый по формуле:

$$r = r_{\max} - \frac{r_{\max}}{\ell + \ell_0} x = \frac{r_{\max}}{\ell + \ell_0} (\ell + \ell_0 - x). \quad (14)$$

После подстановки (14) в (13) и соответ-

ствующих преобразований имеем:

$$\theta = -\frac{4P(\ell + \ell_0)^4}{E\pi r_{\max}^4} \left[\int_0^\ell \frac{d(\ell + \ell_0 - x)}{(\ell + \ell_0 - x)^3} - \ell_0 \int_0^\ell \frac{d(\ell + \ell_0 - x)}{(\ell + \ell_0 - x)^4} \right]. \quad (15)$$

После интегрирования и приведения к общему знаменателю (15) получает вид:

$$\theta = \frac{2Pl^2(\ell + \ell_0)(\ell + 3\ell_0)}{3\pi\ell_0^2 E r_{\max}^4}. \quad (16)$$

Учтем, что изгибающая нагрузка P приложена в том месте стержня, где диаметр последнего $2r$ равен условному диаметру нити d_H , минимальное значение которого равно $d_H = \sqrt{\frac{T}{250\pi\rho k}}$, где T – линейная плотность нити, текс, $\rho = 1,8 \text{ мг/мм}^3$ – объемная плотность волокна, $k = 0,907$ – максимальный коэффициент заполнения нити волокнами (отношение площади круга к площади описанного около него правильного шестиугольника). Чтобы обеспечить необходимую жесткость, игла оснащена ребром переменной толщины и формы (рис. 2е). В этом случае при постоянной высоте ребра 28 мм деталь может быть изготовлена из стали У8М с закалкой.

Для решения задачи крепления нити на установке предлагается закреплять образец на поверхности цилиндра путем навивания конца образца на цилиндр со стандартным предварительным натяжением (рис. 3-в). В этом случае образец будет удерживаться на цилиндре за счет силы трения, определяемой формулой Эйлера. Применительно к рис. 1-а формула Эйлера выглядит следующим образом:

$$F = F_0 e^{\alpha f}, \quad (17)$$

где F_0 – предварительное натяжение конца нити, Н; F – натяжение нити, Н; α – угол охвата цилиндра нитью, рад; f – коэффициент трения нити по цилиндру.

При постоянном сечении S нити напряжения в ней определяются путем деления действующей силы на площадь поперечного сечения нити, а их распределение определяется следующим образом:

$$\sigma = \sigma_0 e^{\alpha f}, \quad (18)$$

$$\delta_H = r \int_0^\alpha \varepsilon d\alpha = r\varepsilon_0 \int_0^\alpha e^{\alpha f} d\alpha = \frac{r\varepsilon_0}{f} (e^{\alpha f} - 1) = \frac{r}{f} (\varepsilon - \varepsilon_0), \quad (21)$$

где r – радиус цилиндра, мм.

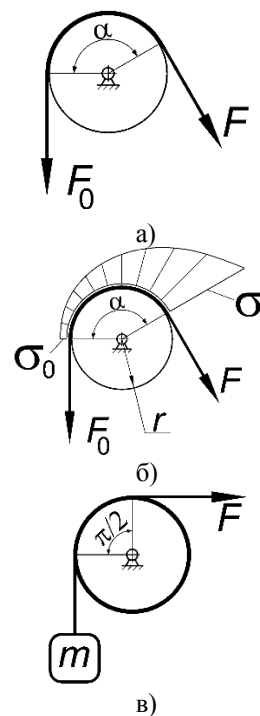


Рис. 3

На рис. 3-б представлена эпюра распределения напряжений по дуге охвата (рис. 3 – схема взаимодействия нити с цилиндром). При постоянном модуле упругости E нити относительная деформация будет пропорциональна напряжению:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{\alpha f}, \quad (19)$$

Для проектирования параметров испытательной установки относительная деформация нити ε может быть приравнена к относительному удлинению при разрыве, известному из технических требований к нитям. Тогда минимальное относительное удлинение свободного конца образца ε_0 будет равно:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon e^{-\alpha f}. \quad (20)$$

Приведенная абсолютная деформация нити (в миллиметрах) на дуге охвата определится следующим образом:

Для определения минимально допустимого радиуса цилиндра необходимо знать максимальные диаметры испытуемых нитей. Поэтому необходимо воспользоваться техническими требованиями к нитям, из которых выбираем нити наибольшей линейной плотности, параметры которых сводим в табл. 1 [6...15]. Так как технические требования на различные виды нитей регламентируют свои параметры различным образом, необходимо их унифицировать для заполнения табл. 1, используя следующие зависимости:

$$S = \frac{T}{1000\rho}, \quad (22)$$

$$d = \sqrt{\frac{T}{250\pi\rho k}} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{S}{k}}, \quad (23)$$

где S – площадь поперечного сечения нити, мм^2 ; T – линейная плотность нити, текс; ρ – объемная плотность материала нити, $\text{г}/\text{см}^3$; d – диаметр нити, мм ; k – коэффициент заполнения поперечника нити волокнами.

С учетом данных, приведенных в табл. 1, имеем.

При $S = 0,58 \text{ мм}^2$ $d = 0,54 \text{ мм}$.

Тогда $r \geq 0,27 \times 100 = 27 \text{ мм}$. Принимаем $r = 30 \text{ мм}$.

Пренебрегая в (21) ε_0 ввиду малости, имеем $\delta_n = (187,5 \div 300)\varepsilon$.

Т а б л и ц а 1

Параметр	Вид нити			
	Углеродная	"Урал"	Арамид	Полиамид
Объемная плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	1,80	–	1,45	1,15
Линейная плотность, текс	1040	800	840	800
Диаметр нити, мм	0,54	–	–	–
Площадь сечения нити, мм^2	0,58	–	–	–
Разрывное напряжение, МПа	5500	–	–	–
Относительное разрывное удлинение, %	2,0	0,5	18	18
Разрывная нагрузка, сН/текс	3190	176	1827	75

Кроме того, с учетом данных табл. 1 имеем:

$F \leq 1827 \text{ Н}$ (параамид) $m = 400 \text{ г}$

$F \leq 3190 \text{ Н}$ (углерод) $m = 500 \text{ г}$

$F \leq 176 \text{ Н}$ ("Урал") $m = 400 \text{ г}$

$F \leq 600 \text{ Н}$ (полиамид) $m = 400 \text{ г}$

Тогда: $\Delta\delta_n = 112,5\varepsilon$ и $\delta = \varepsilon\ell$. В результате имеем, что для $\frac{\Delta\delta_n}{\delta} \leq 1,5\%$ требуется базовая длина $\ell \geq 7,5 \text{ м}$.

Учитывая, что $F_0 = mg$ и $\alpha = \frac{1}{f}\ell n \frac{F}{mg}$, получаем:

$$\alpha_{\max} = \frac{1}{f}\ell n \frac{3190}{5} = \frac{6,46}{f},$$

откуда $\alpha_{\max} = 64,6$ при $f = 0,1$, или $40,4$ при $f = 0,16$.

В результате минимальное количество витков нити на ролике, достаточное для надежного закрепления нити: $n = \frac{=\alpha_{\max} - \pi/2}{2\pi} = 10$.

Выполненные расчеты дают численные значения основных технических требований к экспериментальной установке, как прибору класса 1,5, которые сведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Параметр	Базовая длина	Расстояние между осями роликов	Диаметр роликов	Предельное усилие разрыва	Количество витков канавки на ролике	Количество витков нити на ролике
Значение	7,5 м	7020 мм	60 мм	5 кН	20	12

ВЫВОДЫ

1. Разработаны концептуальные подходы к проектированию экспериментальной установки для определения остаточной технологической прочности высокомодульных нитей.

2. В результате выполненных расчетов определены схема экспериментального стенда, данные для технического задания на его проектирование и параметры его основных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 23364–2001. Нити синтетические текстурированные. Метод определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве.

2. ГОСТ 32667–2014. Волокно углеродное. Определение свойств при растяжении элементарной нити.

3. Кузина Т.А. Напряженно-деформированное состояние нитей при взаимодействии с механизмами нерегулярного нагружения: Дис. ... канд. техн. наук. – Кострома: КГТУ, 2007.

4. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. В 3-х т. Т. 1 – 8-е изд., перераб. и доп. / Под ред. И. Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001.

5. Handbook of Analytical Methods for Textile Composites: NASA Contractor Report 478 / Brian N. Cox, Gerry Flanagan – Prepared for Langley Research Center under Contract NAS1-19243, March 1997.

6. Общероссийский классификатор стандартов. Материалы для усиления композитов / <http://www.internet-law.ru/gosts/972/>

7. ГОСТ 8325–2015. Стекловолокно. Нити крученые комплексные. Технические условия.

8. ГОСТ 10727–2015. Нити стеклянные одноплетенные. Технические условия.

9. ГОСТ 17139–2000. Стекловолокно. Ровинги. Технические условия.

10. ГОСТ Р 52581–2006. Ровинг из стеклянных нитей. Технические условия.

11. ГОСТ 28007–88. Нить и жгут СВМ высокомодульные технические. Технические условия.

12. ГОСТ 33842–2016 (EN 13003-1:1999, EN 13003-2:1999, EN 13003-3:1999). Волокно параамидное. Общие технические требования и методы испытаний.

13. ГОСТ 28008–88. Нить углеродная конструкционная. Технические условия.

14. ГОСТ 6943.10–2015. Материалы текстильные стеклянные. Метод определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве.

15. ГОСТ 6943.5–79. Материалы текстильные стеклянные. Метод определения разрывного напряжения элементарной нити.

REFERENCES

1. GOST 23364–2001. Synthetic textured threads. The method of determining the breaking load and elongation at break.

2. GOST 32667-2014. Carbon fiber. Determination of properties during the stretching of an elementary thread.

3. Kuzina T. A. The stress-strain state of threads in interaction with mechanisms of irregular loading: Dis. ... candidate of Technical Sciences. - Kostroma: KSTU, 2007.

4. Anuryev V. I. Handbook of a machine-building designer. In 3 vols. Vol. 1 - 8th ed., reprint. and add. Edited by I. N. Zhestkova. - M.: Mechanical Engineering, 2001.

5. Handbook of Analytical Methods for Textile Composites: NASA Contractor Report 478 / Brian N. Cox, Gerry Flanagan - Prepared for Langley Research Center under Contract NAS1-19243, March 1997.

6. All-Russian Classifier of Standards. Materials for reinforcing composites / <http://www.internet-law.ru/gosts/972/>

7. GOST 8325-2015. Fiberglass. The threads are twisted complex. Technical conditions.

8. GOST 10727-2015. The glass threads are unidirectional. Technical conditions.

9. GOST 17139-2000. Fiberglass. Roving. Technical conditions.

10. GOST R 52581-2006. Roving made of glass threads. Technical conditions.

11. GOST 28007-88. The SVM thread and harness are high-modulus technical. Technical conditions.

12. GOST 33842-2016 (EN 13003-1:1999, EN 13003-2:1999, EN 13003-3:1999). The fiber is paraamide. General technical requirements and test methods.

13. GOST 28008-88. The thread is carbon structural. Technical conditions.

14. GOST 6943.10-2015. Glass textile materials. The method of determining the breaking load and elongation at break.

15. GOST 6943.5-79. Glass textile materials. Method for determining the breaking voltage of an elementary thread.

Рекомендована кафедрой научно-техническим советом ООО НПО "ПК". Поступила 20.10.21.