

**РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНОЙ ТКАНИ  
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ СВОЙСТВ  
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ЕЕ ОСНОВЕ  
ПРИ РАЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ ЕГО ПРОИЗВОДСТВА\***

**DEVELOPMENT OF A MULTILAYER FABRIC STRUCTURE  
AND EXPERIMENTAL STUDY OF ELASTIC PROPERTIES  
OF COMPOSITE MATERIAL BASED  
ON IT WITH DIFFERENT PRODUCTION TECHNOLOGIES**

*Д.А. ПИРОГОВ<sup>1,2</sup>, Д.А. МИРОШНИЧЕНКО<sup>1</sup>, Л.Б. МАСЛОВ<sup>3,4</sup>, Т.Ю. КАРЕВА<sup>1</sup>, Г.В. ДОЛУНЦ<sup>3</sup>  
D.A. PIROGOV<sup>1,2</sup>, D.A. MIROSHNICHENKO<sup>1</sup>, L.B. MASLOV<sup>3,4</sup>, T.YU. KAREVA<sup>1</sup>, G.V. DOLUNTS<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Ивановский государственный политехнический университет,  
<sup>2</sup>ООО «Текмал»,

<sup>3</sup>Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина,

<sup>4</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

(<sup>1</sup>Ivanovo State Polytechnic University,

<sup>2</sup>LLC «Tekmal»,

<sup>3</sup>Ivanovo State Power Engineering University n.a. V.I. Lenin,

<sup>4</sup>Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University)

E-mail: pirogov81@mail.ru

*В настоящей работе показан процесс получения композиционного материала на основе многослойной ткани. С использованием методов трехмерного моделирования спроектирована многослойная тканая структура. Методом ткачества из углеродных нитей получен образец многослойной ткани. Различными методами получены образцы композиционных материалов. Изготовлены экспериментальные образцы и проведены экспериментальные исследования по определению их модуля Юнга (модуля упругости) в направлении ориентации волокон.*

*This work shows the process of producing a composite material based on multilayer fabric. Using three-dimensional modeling methods, a multilayer woven structure was designed. Using the method of weaving from carbon threads, a sample of multilayer fabric was obtained. Samples of composite materials were obtained using various methods. Experimental samples were manufactured and experimental studies were carried out to determine their Young's modulus (elasticity modulus). The elastic modules of the samples in different directions of fiber orientation were determined. The results obtained were analyzed and conclusions were formulated.*

**Ключевые слова:** многослойная тканая структура, углеродная нить, эпоксидная смола, композиционный материал, модуль Юнга, прикладная механика.

**Keywords:** multilayer woven structure, carbon thread, epoxy resin, composite material, Young's modulus, applied mechanics.

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Ивановской области в рамках научного проекта № 20-41-370002.

## *Введение*

В современном мире без композиционных материалов (КМ) не обходится ни одна отрасль промышленности. Полимерные композиты, армированные углеродными волокнами, активно применяются в авиа- и ракетостроении, судостроении, электронике, медицине [1].

Существующие технологии автоматизированного проектирования и платформы моделирования открыли новые возможности для прогнозирования структуры и свойств однослойных (2D) и многослойных (3D) текстильных материалов [2]. Несмотря на то, что концепция 3D-ткачества рассматривается как новая концепция, она существует уже давно.

Принципиальное отличие 3D-ткачества от 2D состоит в том, что в двумерных тканях нити основы и утка переплетаются под прямым углом друг относительно друга условно в одной плоскости, в трехмерных же тканях эти системы нитей переплетаются в трех ортогональных направлениях  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Несмотря на то, что композиты на основе 2D-тканых материалов находят широкое применение в судостроении, авиации и автомобилестроении, все же такие недостатки, как низкая устойчивость к растрескиванию и расслаиванию полимерных материалов при ударной нагрузке, сдерживают их широкое применение.

Чтобы повысить низкую устойчивость к расслаиванию при ударных повреждениях, композиты можно армировать по всей толщине с помощью нитей, стержней или штифтов (Z-армирование). Композиционные материалы, армированные трехмерным тканым материалом, т. е. с армированием по толщине, обеспечивают лучшее поглощение энергии удара и сопротивление расслаиванию [3].

Текстильная основа предотвращает смещение армирующего компонента – нитей, снижает трудозатраты и увеличивает производительность процесса производства композитов [4].

В работах [5, 6] авторы отмечают, что наилучшие качественные показатели дают

объемно-армирующие преформы, созданные методом 3D-ткачества с сочетанием различных переплетений. Они позволяют целенаправленно управлять расположением армирующих элементов (нитей) в композите для обеспечения заданных упруго-деформационных свойств.

Для успешного проектирования, разработки и применения КМ на основе объемных тканых структур необходимо проведение различного рода теоретических и прикладных исследований [7], а для подтверждения достоверности их результатов – проведение опытно-экспериментальных работ по определению физико-механических характеристик проектируемого материала [8, 9].

Целью настоящей работы является создание опытных образцов КМ, полученных различными технологическими методами на основе оптимальной структуры многослойной ткани, и проведение испытаний по определению их упругих свойств.

## *Материалы и методы*

Как известно, для производства любого тканого материала необходимо создание его полного заправочного рисунка, включающего непосредственно рисунок переплетения ткани, схему проборки нитей основы в бердо и ремизки, в случае использования кулачкового и кареточного зевобразовательных механизмов – картон и разрезы ткани вдоль нитей основы и утка. При формировании многослойных тканей, как правило, переплетение строится по разрезу вдоль основы или утка проектируемой ткани с учетом способа соединения слоев. При этом в случае использования тканого материала в качестве армирующей составляющей композита при проектировании его структуры, наряду с прогнозированием физико-механических свойств текстильного материала, необходимо учитывать требуемые физико-механические свойства, назначение и условия эксплуатации композиционного материала на его основе [10].

Для решения поставленной задачи нами при выборе структуры многослойного тканого материала (переплетения и способа соединения слоев ткани) учтены

особенности переработки высокомодульных волокон и нитей, заключающиеся в возможной потере до 50% их первоначальной прочности из-за низкого сопротивления контактным, сжимающим и изгибающим напряжениям [11].

Использование полотняного переплетения в слоях многослойной ткани обеспечило бы наиболее связанную и материалоемкую структуру материала, а следовательно, и получение композиционного материала с наибольшим вложением армирующего компонента, однако при этом нити имели бы наибольшую потерю прочности в связи с максимальной их извитостью. Использование в слоях наименее связанного переплетения из главного класса – атласного – значительно снизило бы внутренние напряжения в нитях от процесса их взаимного переплетения, но, как известно, привело бы к снижению стабильности переплетений в слоях и увеличению асимметрии расположения нитей, что негативно сказалось бы на равномерности заполнения композиционного материала армирующим компонентом. Принимая во внимание вышесказанное, в качестве переплетения нитей в слоях выбрали саржевое как более связанное по сравнению с атласным и менее напряженное по сравнению с полотняным в силу меньшей величины изгиба нитей от их взаимного переплетения.

Многослойная тканая структура может быть образована различными известными способами соединения слоев – как нитями

самых же слоев, так и дополнительными нитями. При проектировании многослойной тканой структуры в качестве основы для композита следует использовать такой способ соединения слоев, при котором нити имели бы наименьший дополнительный изгиб от процесса соединения слоев между собой. Классическая структура многослойного тканого полотна при способе соединения слоев нитями слоев, как правило, для обеспечения наибольшей связанности слоев ткани включает переплетение каждой нити базового переплетения в слоях с предыдущим или последующим слоем ткани. И так на всю ее глубину. При этом дополнительный изгиб от соединения слоев имеет каждая нить базового переплетения.

С целью уменьшения возможной потери прочности нами предложена структура трехслойного тканого материала с базовым переплетением в слоях саржа 1/4 и соединением слоев способом сверху вниз одной нитью каждого слоя базового раппорта. В этом случае соединение слоев происходит только по пятой нити каждого из слоев, что обеспечивает связанность материала в целом и снижение внутренних напряжений в нитях, а следовательно, и в материале по сравнению с соединением слоев каждой нитью базового раппорта. Кроме этого такое строение многослойного материала обеспечивает более легкое проникновение связующего в структуру тканого полотна при создании композита.

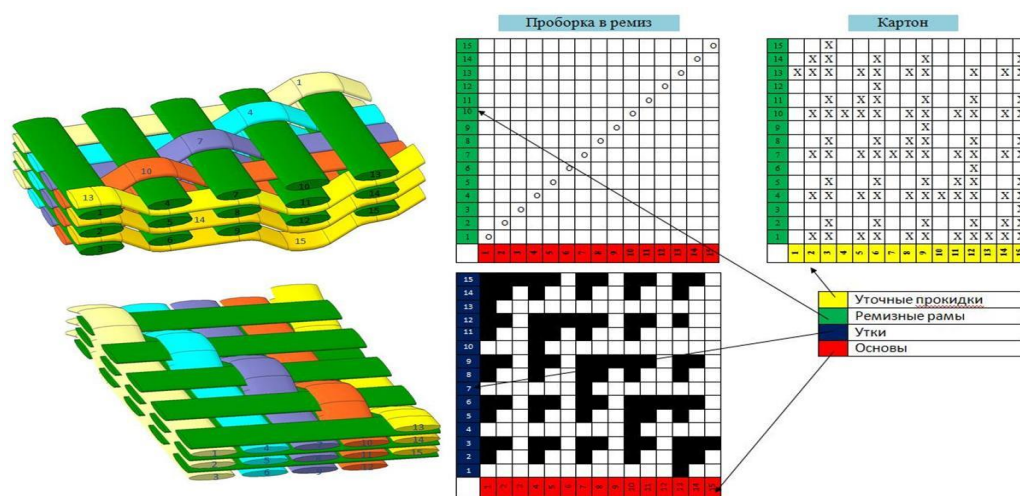


Рис. 1

С использованием инструментов трехмерного моделирования [12] спроектирована объемная тканая структура для производства многослойной ткани. Трехмерная геометрическая модель и ее заправочный рисунок представлены на рис. 1.

Для производства композита в качестве материала для тканой основы использовался ровинг из углеродного волокна, а в качестве связующего – эпоксидная смола. Физико-механические свойства компонентов разрабатываемого КМ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование компонента композита					
Объемная тканая структура			Матрица		
Наименование структурной единицы компонента					
Нити основы		Нити утка	Эпоксидная смола		Отвердитель
Наименование материала компонента					
Углеродное волокно UMT45-12K-EP		LG-700		HG-737	
Характеристики материала					
Предел прочности при растяжении, ГПа	4,5	Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,18–1,23	Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,94
Модуль упругости при растяжении, ГПа	260	Вязкость, мПа/с	500–700	Вязкость, мПа/с	10–15
Удлинение при разрыве, %	1,7	Эквивалент эпоксиды, мол/кг	156–165	Аминовое число, мг КОН/г	
Линейная плотность, текс	780	Индекс эпоксиды	0,6–0,64	Водородный эквивалент	48
Объемная плотность, г/см <sup>3</sup>	1,78	Цвет, гарднер	макс. 3	Цвет, гарднер	макс. 3
Содержание углерода, %	95				
Тип аппрета	EP				
Массовая доля аппрета, %	0,8–1,5				

Ткацкий и приготовительный процессы организованы и проведены в лаборатории текстильных технологий на базе инжинирингового центра ФГБОУ ВО «ИВГПУ».

Для формирования ткани использовался полуавтоматический ткацкий станок (рис. 2) [13].



Рис. 2



Рис. 3

Процесс снования заключался в создании ткацкого навоя, содержащего 400 нитей из катушки с ровингом длиной 10 км. В результате на основе разработанной многослойной тканой структуры получен образец ткани (рис. 3).

Для получения композитов использовались технологии свободного открытого

ручного формования и вакуумной инфузии [14]. При первом методе образцы укладывались в специально изготовленные формы, заливались связующим и при комнатной температуре выдерживались более 24 часов. При реализации технологии вакуумной инфузии под действием избыточного давления, возникающего в зоне

расположения тканых образцов, подавалась смола и осуществлялась их пропитка. После окончания подачи смолы при комнатной температуре и под давлением образцы выдерживались более 24 часов. Эпоксидная смола и отвердитель подбирались из условия наименьшей вязкости получаемого связующего, чтобы его можно было использовать в обоих способах.

Испытания на трехточечный изгиб [15] проводились в лаборатории сопротивления материалов кафедры теоретической и прикладной механики ФГБОУ ВО «ИГЭУ» на разработанной экспериментальной установке (рис. 4).

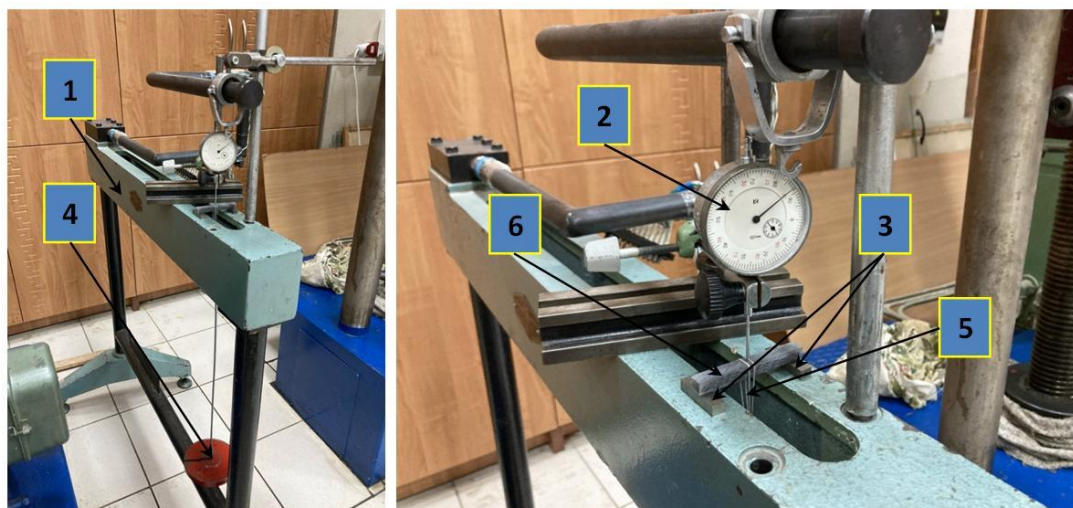


Рис. 4

Испытания проводились следующим образом. Образец 6 устанавливался на опоры 3 и нагружался усилием наборного груза 4 посредством капроновой нити 5. При этом индикатором 5 фиксировалось перемещение (прогиб) сечения образца посередине между опорами. Эксперимент с каждым образцом проводился 5 раз с изменением величины груза с разницей в 1 килограмм от 1 до 5 кг. Определялись средние величины приращения силы  $\Delta P$  и перемещения  $\Delta z$ , моменты инерций поперечных сечений образцов  $Y_z$ . Модуль упругости образцов вычислялся по формуле:

$$E = \frac{\Delta P L^3}{48 \Delta z Y_z}. \quad (1)$$

При обработке результатов учитывалась также деформация капроновой нити длиной 10 см и ее модуль Юнга. Ввиду упругости капроновой нити результирующий модуль упругости образца вычислялся по формулам жесткости при после-

довательном соединении упругих элементов [16].

Оценка модуля упругости для испытываемых образцов также проводилась по трехмерной теории упругости с помощью технологий компьютерного моделирования [17] в конечно-элементном комплексе ANSYS.

#### *Результаты и их обсуждение*

Результаты экспериментальных исследований приведены в табл.2.

Как видно из табл.2, модуль упругости в направлении нитей основы для обоих методов получения КМ имеет значения, меньшие, чем в направлении утка: в случае открытого формования на 42%, при вакуумной инфузии на 18%. Это может быть объяснено тем, что плотность по утку выше (23 нит./см), чем по основе (20 нит./см), а также разной степенью изогнутости нитей основы и утка в данном многослойном переплетении (на рис. 1 видно, что некоторые нити основы изгибаются больше, чем нити утка).

<b>Экспериментальное определение модуля Юнга композиционных материалов (исследование образцов на изгиб, измерения микрометром)</b>											
<b>Базовое (открытое формование) вдоль основы</b>			<b>Базовое (открытое формование) вдоль утка</b>			<b>Базовое (вакуумная инфузия) вдоль основы</b>			<b>Базовое (вакуумная инфузия) вдоль утка</b>		
Размеры образца, мм	L=64; L <sub>δ</sub> =50; b=9.1; h=7.3		Размеры образца, мм	L=69; L <sub>δ</sub> =50; b=9.2; h=7.1		Размеры образца, мм	L=62.7; L <sub>δ</sub> =40; b=15.2; h=4.9		Размеры образца, мм	L=56; L <sub>δ</sub> =40; b=15.2; h=4.8	
Масса образца, г	5.3		Масса образца, г	5.6		Масса образца, г	6.24		Масса образца, г	5.42	
Объемная плотность образца, г/см <sup>3</sup>	1,25		Объемная плотность образца, г/см <sup>3</sup>	1,25		Объемная плотность образца, г/см <sup>3</sup>	1,33		Объемная плотность образца, г/см <sup>3</sup>	1,58	
Переменные величины			Переменные величины			Переменные величины			Переменные величины		
№	Нагружение «Р», Н	Прогиб «z», мм	№	Нагружение «Р», Н	Прогиб «z», мм	№	Нагружение «Р», Н	Прогиб «z», мм	№	Нагружение «Р», Н	Прогиб «z», мм
1	9.81	0.012	1	9.81	0.01	1	9.81	0.008	1	9.81	0.007
2	19.62	0.030	2	19.62	0.02	2	19.62	0.0016	2	19.62	0.014
3	29.43	0.050	3	29.43	0.03	3	29.43	0.024	3	29.43	0.021
4	39.24	0.068	4	39.24	0.04	4	39.24	0.032	4	39.24	0.028
5	49.5	0.082	5	49.5	0.05	5	49.5	0.04	5	49.5	0.035
Среднее приращение			Среднее приращение			Среднее приращение			Среднее приращение		
ΔР, Н		Δz, мм	ΔР, Н		Δz, мм	ΔР, Н		Δz, мм	ΔР, Н		Δz, мм
<b>9.81</b>		<b>0.0164</b>	<b>9.81</b>		<b>0.01</b>	<b>9.81</b>		<b>0.0008</b>	<b>9.81</b>		<b>0.007</b>
Модуль упругости, ГПа						Модуль упругости, ГПа					
<b>7.2</b>			<b>12.3</b>			<b>14.4</b>			<b>17.5</b>		

Из табл. 2 следует, что КМ, выполненные по технологии открытого формования, в сравнении с КМ, выполненными по технологии вакуумной инфузии, имеют модуль упругости ниже вдоль нитей основы на 5,1 ГПа и вдоль нитей утка на 3,1 ГПа, что может быть связано с недостатками данной технологии получения КМ. Метод вакуумной инфузии требует использования специальной оснастки, но это оправдывает достигаемый результат.

В отличие от результатов компьютерного моделирования в ANSYS, которые дают значение модуля Юнга для испытуемых образцов в 16 ГПа, результаты экспериментальных вычислений модуля упругости имеют значения несколько ниже, что объясняется неполным соответствием параметров уравнений теории изгиба ба-

лок геометрическим характеристикам образца. Ввиду относительной небольшой длины образца применение трехмерной теории упругости дает более точный результат.

Для достижения равного значения модуля упругости относительно обеих систем нитей необходимо выравнивать плотность нитей по утку и по основе и добиваться равной степени изогнутости нитей, для чего необходимы дополнительные исследования в областях проектирования объемной тканой структуры и технологии 3D ткачества.

## ВЫВОДЫ

1. Спроектирована многослойная тканая структура и на ее основе получен образец многослойной ткани.

2. Установлено, что для рассматриваемого переплетения модуль упругости вдоль нитей утка превышает модуль упругости вдоль нитей основы в среднем на 30%.

3. Определено, что модуль упругости возрастает в том направлении, в котором происходит увеличение плотности нитей.

4. Установлено, что значения модуля упругости при получении КМ по методу вакуумной инфузии выше в среднем на 40%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Пирогов Д.А., Маслов Л.Б., Клопова К.В.* Композиционные материалы на основе трехмерных тканых многослойных армирующих структур – конструкционные материалы настоящего и будущего // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021. № 6(396). С. 61...71.

2. *Vassiliadis S., Kallivretaki A., Domvoglou D., Provatidis C.* Mechanical analysis of woven fabrics: The State of the Art // Advances in modern woven fabrics technology. 2011.

3. *Zhang D., Sun Y., Chen L., Pan N.* A comparative study on low-velocity impact response of fabric composite laminates // Materials & Design. 2019. V. 50. P. 750...756.

4. *Kim K.-Y., Curiskis J. I., Ye, L., Fu S.-Y.* Mode-I Interlaminar Fracture Behaviour of Weft-knitted Fabric Reinforced Composites // Composites: Part A. 2005. V. 36. P. 954...964.

5. *Николаев С.Д., Сергеев В.Т.* Особенности 3D-тканей и способов их изготовления // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2018. № 4 (376). С. 79...84.

6. *Lomov S.V., Bogdanovich A.E., Ivanov D.S.* A comparative study of tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites // Materials, methods and principal results: Part 1 2009. V. 40 (8). P 1134...1143.

7. *Хеин З.М., Йе Т.Х., Куреев В.А.* Сравнение методик определения упругих и прочностных характеристик полимерных композиционных материалов // Труды МФТИ. 2018. Т. 10, № 2(38). С. 136...145.

8. *Жернаков В.С., Первушин Ю.С., Соловьев П.В.* Исследование упругих характеристик углепластика с 3D структурой // Письма о материалах. 2019. Т.9, №2. С.185...190.

9. *Муйземнек А.Ю., Иванова Т.Н., Карташова Е.Д.* Сопоставление результатов экспериментального и расчетного определения эффективных характеристики упругих свойств полимерных слоистых композитов из угле- и стеклотканей // Вестник Пермского национального исследовательского

политехнического университета. Механика. 2021. № 2. С. 88...105.

10. *Пирогов Д.А. Маслов Л. Б., Тимофеев И.А., Поляничко Е.А.* Моделирование фаз строения объемной тканой структуры и их влияние на упругие свойства композиционного материала на ее основе // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 5(401). С. 223...228.

11. *Карева Т.Ю. Барабанищикова И.С., Смирнова Т.В.* Однослойные тканые структуры ортогонального и неортогонального строения для производства композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2020. № 5(401). С. 52...56.

12. *Муратов Д.В., Пирогов Д.А.* Трехмерное моделирование при проектировании объемной тканой структуры и разработке ее заправочного рисунка // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК-2023). Иваново: ИВГПУ, 2023. С. 123...126.

13. Официальный сайт компании Hefei Fanyuan Instrument Co., Ltd. <https://fyitester.com/for-sale/rapier-sample-loom-dw298/> (дата обращения: 18.11.2023).

14. Официальный сайт ООО "Фирма "Композит ЛТД". – <https://composite.ru/> (дата обращения: 10.11.2023).

15. *Лантев М.Ю., Адамов А.А.* Моделирование процессов деформирования полимерных композиционных материалов на основе тканого препрега при испытаниях на изгиб и межслоевой сдвиг методом короткой балки // Вычислительная механика сплошных сред. 2015. Т. 8, № 3. С. 264...272.

16. *Чаюн И.М.* Жесткость конструкций и их элементов // Труды Одесского политехнического университета. 2010. № 1-2. С. 11...16.

17. *Соловьев А.Н., Зиборов Е.Н., Шевцов С.Н.* Определение упругих свойств армированных композиционных материалов на основе конечно-элементного моделирования // Наука Юга России (Вестник Южного научного центра). 2016. Т. 12, № 2. С. 3...10.

#### REFERENCES

1. *Pirogov D.A., Maslov L.B., Klopova K.V.* Composite materials based on three-dimensional woven multilayer reinforcing structures - structural materials present and future // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2021. No. 6(396). P. 61...71.

2. *Vassiliadis S., Kallivretaki A., Domvoglou D., Provatidis C.* Mechanical analysis of woven fabrics: The State of the Art. // Advances in modern woven fabrics technology. 2011.

3. *Zhang D., Sun Y., Chen L., Pan N.* A comparative study on low-velocity impact response of fabric composite laminates // Materials & Design. 2019. V. 50. P. 750...756.

4. Kim K.-Y., Curiskis J. I., Ye, L., Fu S.-Y. Mode-I Interlaminar Fracture Behavior of Weft-knitted Fabric Reinforced Composites // *Composites: Part A*. 2005. V. 36. P. 954...964.
5. Nikolaev S.D., Sergeev V.T. Features of 3d-fabrics and methods for their manufacture // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2018 No. 4 (376). P. 79...84.
6. Lomov S.V., Bogdanovich A.E., Ivanov D.S. A study of comparative tensile properties of non-crimp 3D orthogonal weave and multi-layer plain weave E-glass composites // *Materials, methods and principal results: Part 1* 2009. V. 40 (8). P. 1134...1143.
7. Hein Z.M., Ye T.H., Kireev V.A. Comparison of methods for determining the elastic and strength characteristics of polymer composite materials // *Proceedings of MIPT*. 2018. T. 10, No. 2(38). P. 136...145.
8. Zhernakov V.S., Pervushin Yu.S., Soloviev P.V. Study of the elastic characteristics of carbon fiber reinforced plastic with a 3D structure // *Letters on materials*. 2019. Vol.9. No. 2. P.185...190.
9. Muizemnek A.Yu., Ivanova T.N., Kartashova E.D. Comparison of the results of experimental and computational determination of the effective characteristics of the elastic properties of polymer layered composites made of carbon and glass fabrics // *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*. – 2021. – No. 2. P. 88...105.
10. Pirogov D.A. Maslov L.B., Timofeev I.A., Polyanichko E.A. Simulation of the structure phases of a volume woven structure and their influence on the elastic properties of the composite material based on // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2022. No. 5(401). P. 223...228.
11. Kareva T.U. Barabanshchikova I.S., Smirnova T.V. Single-layer wovens of orthogonal and non-orthogonal structure for the production of composite materials // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2020. No. 5(401). P. 52...56.
12. Muratov D.V., Pirogov D.A. Three-dimensional modeling in the design of a three-dimensional woven structure and the development of its filling pattern // *Young scientists – development of the National Technology Initiative (POISK-2023)*. Ivanovo: IVGPU, 2023. P. 123...126.
13. Official website of Hefei Fanyuan Instrument Co., Ltd. – <https://fyitester.com/for-sale/rapier-sample-loom-dw298/> (access date: 11/18/2023).
14. Official website of LLC "Firm "Composite LTD". – <https://composite.ru/> (access date: 11/10/2023).
15. Laptev M. Yu., Adamov A. A. Modeling of deformation processes of polymer composite materials based on woven prepreg during bending and interlayer shear tests using the short beam method // *Computational mechanics of continuous media*. 2015. T. 8, No. 3. P. 264...272.
16. Chayun I.M. Rigidity of structures and their elements // *Proceedings of the Odessa Polytechnic University*. 2010. No. 1-2. P. 11...16.
17. Soloviev A.N., Ziborov E.N., Shevtsov S.N. Determination of elastic properties of reinforced composite materials based on finite element modeling // *Science of the South of Russia (Bulletin of the Southern Scientific Center)*. 2016. T. 12, No. 2. P. 3...10.

Рекомендована кафедрой мехатроники и радиоэлектроники ИВГПУ. Поступила 21.11.23.