DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-7

МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ ПРЕФОРМ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

П. В. Михеев[1], С. В. Бухаров[2], А. К. Лебедев[3], С. В. Тащилов[4]
[1] *ООО «Аквифер», г. Электросталь, Московская область, Российская Федерация*
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8146-8753, mipv@yandex.ru
[2] *Московский авиационный институт, г. Москва, Российская Федерация*
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3205-1190, bukharovsv@mail.ru
[3] *АО «НИИграфит», г. Москва, Российская Федерация*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0629-4575, alebedev.job@gmail.com
[4] *АО «Композит», г. Королев, Московская область, Российская Федерация, Khrom64@mail.ru*

Аннотация: для повышения эффективности работы энергетических установок нового поколения требуется совершенствование современных многослойных композиционных материалов с регулируемой схемой, плотностью армирования и межслоевой прочностью, гарантирующих устойчивость конструкций к действию высоких уровней термических и эрозионных нагрузок. Для эффективной разработки таких материалов требуется проводить моделирование их структуры с целью прогнозирования характеристик целевого изделия. В данной статье исследовано влияние параметров структуры материала и технологического процесса односторонней прошивки (тафтинга) многослойного пакета заготовки из углеродной ткани УТ-900 жгутом УКН-М-3К-ЭД на свойства композиционных материалов. В статье проводится моделирование технологии изготовления волокнистых преформ прошивкой тканого пакета углеродных тканей толщиной до 100 мм. Такой пакет является заготовкой для изготовления углерод-углеродного композита с требуемым уровнем теплофизических и конструкционных свойств.

Опытным путем проведено моделирование структуры прошивки волокнистой заготовки для получения преформ армированного композиционного материала. Свойства материала «Тафтинг», необходимые для моделирования работоспособности конструкций, определены экспериментально и с учетом анизотропии свойств. Полученные результаты сравниваются с материалами КИМФ, Ипресскон, АРМИР-П и МКУ4М-7.

Ключевые слова: пространственно-армированный композит, преформа, прошивка, моделирование, углеродные материалы.

Для цитирования: Михеев П. В., Бухаров С. В., Лебедев А. К., Тащилов С. В. Моделирование схем пространственного армирования многослойных волокнистых преформ углерод-углеродных композиционных материалов. *Успехи кибернетики*. 2022;3(3):63–73. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-7.

3D REINFORCEMENT ARRANGEMENTS FOR CARBON-CARBON COMPOSITE MULTILAYER FIBER PREFORMS

P. V. Mikheyev[1], S. V. Bukharov[2], A. K. Lebedev[3], S. V. Tashchilov[4]
[1] *Aquifer OOO, Electrosatal, Moscow region, Russian Federation*
ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8146-8753, mipv@yandex.ru
[2] *Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation*
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-3205-1190, bukharovsv@mail.ru
[3] *JSC "NIIgrafit", Moscow, Russian Federation*
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0629-4575, alebedev.job@gmail.com
[4] *JSC "Kompozit", Korolev, Moscow region, Russian Federation, Khrom64@mail.ru*

Abstract: to improve the efficiency of advanced powerplants, we need new multilayer composite materials with adjustable layup patterns, reinforcement density, and interlayer strength. They will ensure structural stability under high thermal loads and erosion. The structure of such materials should be modeled to forecast the properties of the final product. This paper studies the effects of composite structure and tufting (inserting a thread through a layered dry fabric with a needle that, after insertion, moves back along the same trajectory) of a multilayer UT-900 carbon fabric composite with the UKN-M-3K-ED thread on the properties of the composite. We simulated the tufting of layered carbon fabrics preforms up to 100 mm thick. These preforms are workpieces for making carbon-carbon composites with the required thermal, physical, and structural properties.

We experimentally modeled the tufting of a layered reinforced composite preform structure. The anisotropic tufting process variables required to assess the structural properties were estimated experimentally. The results were compared with the properties of KIMF, Ipresscon, ARMIR-P, and MKU4M-7 composites.

Keywords: 3D reinforced composite, preform, tufting, simulation, carbon materials.

Cite this article: Mikheyev P. V., Bukharov S. V., Lebedev A. K., Tashchilov S. V. 3D Reinforcement Arrangements for Carbon-Carbon Composite Multilayer Fiber Preforms. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(3):63–73. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-3-7.

Безавтоклавные методы формования на современном этапе развития технологий авиационных конструкций являются наиболее эффективными способами производства деталей сложной формы из ПКМ. При реализации таких методов используется пропитка жидким связующим пакета из нескольких слоев армирующей углеродной ткани. Этот пакет называется преформой [1].

На этапе пропитки волокнистой преформы разница в свойствах между термопластичным и термореактивным связующим незначительна. Традиционными недостатками слоистых композитов являются: низкая прочность при сдвиге, низкий модуль сдвига, малые прочность и модуль упругости в трансверсальном направлении. Отдельной проблемой являются межслоевые дефекты или расслоения, которые могут привести к потере сплошности материала.

Вышеуказанные проблемы могут быть в значительной мере решены формированием трансверсальных связей структуры между армирующими слоями. И в случае безавтоклавных технологий такие связи осуществить проще. В настоящее время используются два основных подхода к улучшению межслоевых свойств армированных ПКМ. К первому подходу относятся использование различных типов армирующих волокон и тканей и их сочетаний [2], а также модификация существующих и разработка новых типов термореактивных, термопластичных связующих [3] или их сочетания [4], имеющих высокую исходную технологичность и обеспечивающих требуемую функциональность матриц на их основе и требуемый уровень межфазного взаимодействия с волокнами армирующей системы композиционного материала.

Другим, более простым и эффективным подходом является объемное армирование материала, или трансверсальная прошивка волокнистой слоистой преформы, обеспечивающая требуемый уровень упруго-прочностных свойств композитов [5]. При этом прошивка может не только повышать межслоевую прочность ПКМ, но и аналогично клеевым соединениям [6] обеспечивать фиксацию слоев преформы и соединять отдельные элементы в единую структуру на стадии формирования, повышая интегральность будущей конструкции. Однако прошивка (тафтинг) осложняет пропитку пакета связующим. Пространственно-армированные каркасы, использующиеся в конструкциях на основе углеродных материалов, обеспечивают возможность производства многофункциональных изделий большой толщины и разнообразной формы. На примере полимерных композиционных материалов с пространственной схемой армирования экспериментально установлен рост сопротивления динамическим и ударным нагрузкам, повышение выносливости и трещиностойкости, теплопроводности и прочности в зонах отверстий [7–11].

Различают два вида технологий получения волокнистых пространственно-армированных заготовок композиционных материалов:

- текстильное армирование с помощью технологий 3D-ткачества, прошивки и иглопробивных методов. При этом достигается доля трансверсальной составляющей до 25%;
- пространственное армирование путем внедрения стержней и нитей в поперечном направлении, объемного плетения и объемного трикотажа.

Разнообразные технологии армирования пространственно-армированных композитов имеют свои ограничения, связанные со схемой армирования, применяемыми материалами, геометрией и толщиной заготовки. Так, технологии пространственных каркасов не позволяют достичь сопоставимой со слоистыми материалами плотности преформы, что ограничивает возможность их применения. Кроме того, появляется отдельная технологическая стадия подготовки стержней и часто используется ручной труд.

Основные параметры, характеризующие технический уровень различных способов производства объемных пространственно-армированных каркасов:

- максимальная плотность преформы;
- относительная доля пространственного армирования;
- шаг (плотность) армирования;
- прочность в плоскости слоя.

Ниже представлен краткий анализ отличительных особенностей существующих методов формирования пространственно-армированных композиционных материалов.

1. Иглопробивная технология позволяет получать преформы с достаточной для обеспечения требуемого уровня механических свойств частотой межслоевых связей. Однако недостатком данной технологии является тот факт, что эти связи имеют существенное ограничение по глубине, что отрицательно сказывается на теплопроводности материала при большой толщине. Также при иглопробивании может повреждаться армирующая ткань, что приводит к снижению прочностных характеристик в плоскости слоя [12].

2. В процессе создания волокнистых заготовок методом объемного ткачества армирующие нити многократно изгибаются и перетираются, снижая значения модуля упругости заготовки. Высокая степень истирания углеродной нити в процессе формирования трансверсальных связей этим методом обусловливает физическое ограничение по толщине заготовки [13].

3. Типовой процесс прошивки при помощи иглы в форме крючка или при помощи двух нитей имеет ограничение как по толщине заготовки, так и по используемым нитям по причине сложной траектории движения иглы, большого количества сложений нити с малым радиусом кривизны. Для снижения этого эффекта возможно применение только крученых углеродных нитей на основе полиакрилонитрила с большим количеством аппрета или нитей, полученных пиролизом из вискозного волокна.

4. Прошивка, известная как метод «тафтинг» (иногда KSL-tufting, по названию разработчика оборудования) (рис. 1), характеризуется созданием пространственно-армированной структуры путем введения с помощью специальных игл пучка армирующих волокон в виде жгутов или нитей, что позволяет реализовать заданную схему армирования с шагом от 3 мм для заготовок толщиной до 35 мм, а также обеспечивает возможность прошивки под углом до 45° [14].

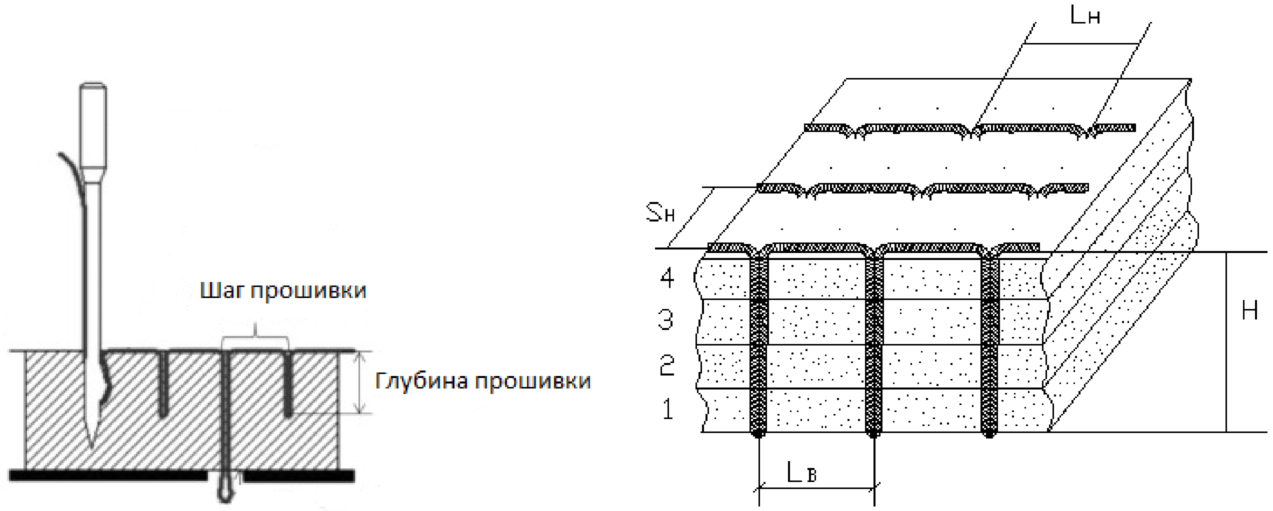

Рис. 1. *Схема реализации метода тафтинга*

Основные преимущества организации межслоевых связей методом тафтинга:

- нить фиксируется в натянутом виде, отсутствуют петли и перегибы;
- реализуется пространственная связь, проходящая через весь пакет, что не реализуется в межслоевых связях иглопробивных преформ;
- существует возможность создания сложной пространственной ориентации (прошивка одного

пакета с разным шагом под различными углами);

- возможно использование разнородных армирующих материалов [14].

По результатам исследований [15–18] отмечаются проблемы реализации технологии прошивки, связанные с истиранием как волокон прошивающей нити (жгута), так и волокна основы в процессе армирования. Истирание волокон при движении иглы является основной причиной снижения физико-механических характеристик и образования дефектов в виде структурных неоднородностей и концентраторов напряжений типа карманов [19, 20].

Целью данной работы является оценка эффективности использования способа прошивки жгутом из углеродных ПАН-волокон для создания пространственно-армированных заготовок углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) толщиной до 50 мм с использованием модифицированной технологии тафтинг. Условное название материала — УУКМ «Тафтинг».

В работе рассмотрено моделирование схемы пространственного армирования с шагом 3 и 5 мм (рис. 2).

В качестве объекта исследований изучена технология тафтинга, модифицированная для получения толстостенных высокоплотных заготовок УУКМ с массовой долей пространственной армирующей компоненты из углеродных ПАН-волокон УКН-М не менее 2 %.

Для выполнения программы исследования изготовлено три преформы размером 200х100 мм и толщиной 50 мм для последующего совмещения по технологии многократной пропитки расплавом каменноугольных пеков по технологии АО «Композит» с дальнейшей термообработкой при высокой температуре до получения УУКМ. Слоистый пакет сформирован из 150 слоев ткани УТ-900-3К-240-ЭД с поверхностной плотностью 240 г/м^2. Масса слоистого пакета составила 765 г с учетом припуска. Шаг прошивки 5 мм.

Такой шаг был выбран по результатам моделирования, целью которого было сбалансировать трудоемкость процесса, уменьшить потери прочности нити при истирании, а также улучшить механические и теплофизические свойства.

Введение армирующих нитей осуществлялось по модифицированной технологии, обеспечивающей их минимальное истирание. Отличие этой технологии от известной KSL-Tufting заключается в особой кинематике установки и оригинальной форме иглы [14]. Эти изменения позволяют сохранить прочность волокна в преформе после тафтинга.

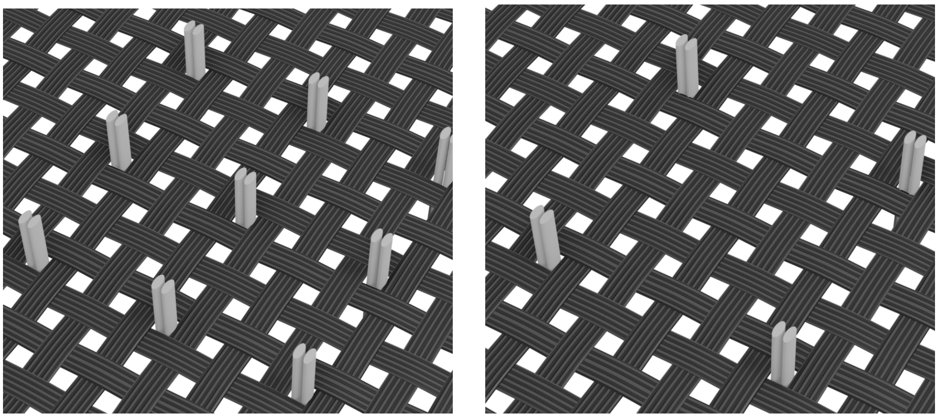

Рис. 2. *Схема армирования УУКМ «Тафтинг» с разным шагом*

Была разработана методика, по которой разрезали прошитый пакет, испытывали жгуты из него на растяжение. После прошивки по модифицированной технологии разрезали прошитую заготовку, испытывали жгуты из него на растяжение. Экспериментально установлено (рис. 3), что разрывная прочность жгута УКН-М-3К-ЭД из ПАН-волокна, изъятого из преформы, составляет в среднем 83 % от исходного, что является хорошим результатом для заготовки толщиной 50 мм. Этот результат лучше известного из литературных данных, так как анализ российской и зарубежной литературы показал, что использование традиционных методов прошивки преформы в трансверсальном направлении может приводить к снижению деформационно-прочностных свойств композиционного материала в плоскости слоя при растяжении и сжатии [17–19] более чем на 75%.

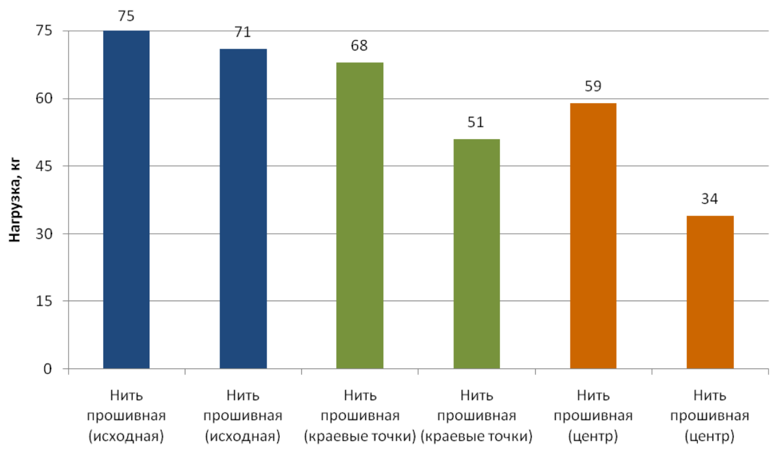

Рис. 3. *Определение влияния истирания прошивной нити на разрывную нагрузку*

Предлагаемая модифицированная технология тафтинга дает уникальную возможность увеличить плотность волокнистых заготовок композиционных материалов, обеспечивая допустимый уровень повреждения волокон при прошивке. Для этого при введении трансверсальных армирующих элементов слоистый пакет фиксируется в закрытой жесткой оснастке [14]. Для увеличения плотности материала важно было сохранить его объем при прошивке, так как имеется тенденция к увеличению толщины пакета в процессе тафтинга. Для решения этой проблемы армирующие нити вводятся через жесткую сетку-направляющую в закрытой жесткой оснастке. Такая конструкция не позволяет заготовке увеличиваться в объеме в дальнейшем, при пропитке расплавом пеков (матрицей) и многократной термообработке. Увеличение плотности подтверждается результатами взвешивания пакет-заготовки вместе с оснасткой.

При отработке и оптимизации параметров процесса показано, что возможно осуществлять прошивку слоистого пакета из углеродной ткани толщиной до 180 мм под углом 60° с минимальным истиранием армирующей нити.

Срез материала после термообработки показан на рис. 4, на рис. 5 представлен увеличенный образец материала после карбонизации с армирующей нитью.

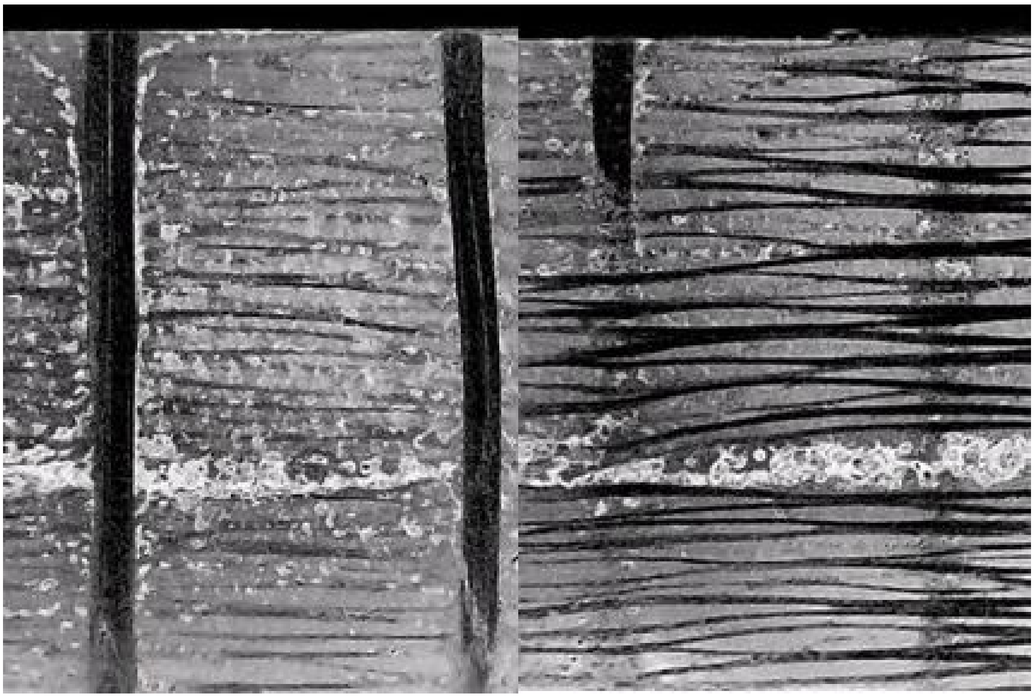

Рис. 4. *Микрофотографии образцов материала «Тафтинг» с армирующей нитью в направлении Z*

Массовые характеристики прошитых волокнистых заготовок, определенные взвешиванием оснастки с преформой, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры волокнистых заготовок вариантов материала «Тафтинг» [14]

	Материал	Масса, г	Плотность, г/см^3	Массовое содержание армирующего жгута, г	Относительное массовое содержание армирующего жгута, %
1	Исходный слоистый пакет	765	0,765	-	-
2	Армирование жгутом 3К, сложенным вдвое	779	0,779	14	1,8
3	Армирование жгутом 6К, сложенным вдвое	793	0,793	28	3,5

Пространственно-армированный каркас оснастки для прошивки изготавливался и в дальнейшем использовался для многократной пропитки матрицеобразующим расплавом пека и термообработки с целью получения УУКМ требуемой плотности.

Образцы углерод-углеродного композиционного материала были изготовлены АО «Композит» по отработанной технологии изготовления конструкционных материалов.

Образцы для проведения испытаний с целью определения физико-механических свойств были получены механической обработкой заготовки.

Для измерения теплопроводности «λ» (Вт/(м.К)) образцов использовался стационарный «метод пластины», вариант с симметричным расположением двух одинаковых пластин относительно плоского малоинерционного нагревателя из тонкой (0,12$\div$0,15 мм) нержавеющей стали. Этот вариант позволяет наиболее просто и точно определять проходящий через образец тепловой поток — по электрической мощности нагревателя:

$$q = \frac{\Delta UI}{2bl},$$

где U — падение напряжения на «рабочем» участке нагревателя (между потенциальными отводами — проволочками, приваренными к боковой кромке нагревателя); I — электрический ток в цепи нагревателя; l — расстояние между потенциальными отводами.

Коэффициент теплопроводности образца-пластины определяется по обычной для стационарного теплового режима формуле:

$$\lambda = \frac{q\delta}{\Delta T},$$

где δ — толщина пластины (расстояние между спаями термопар по нормали к поверхности); ΔT — перепад температур на толщине δ образца-пластины.

Печь расположена в специальном вытяжном шкафу и питается от промышленной сети переменного тока напряжением 220 В через автотрансформатор и понижающий трансформатор.

Между нагревателем и образцами-пластинами помещают по одному слою кварцевой ткани (электроизоляция). Ток в цепи нагревателя измеряют с помощью трансформатора тока и амперметра класса 0,2. Падение напряжения на потенциальных отводах измеряется цифровым вольтметром переменного тока.

Температуры измеряют с помощью термопар (ХА $d = 0{,}2$ мм), «горячие» спаи которых приваривают к пятачку из стальной фольги толщиной 0,05 $\div$ 0,07 мм. ЭДС термопар измеряется цифровым милливольтметром постоянного тока с точностью до 0,001 мВ.

Удобством метода, кроме простоты измерения теплового потока, является то, что одновременно испытываются два образца.

Погрешность измерения «λ» данным методом не превышает 15 % в районе 100°С и 7 % в районе 1 000°С.

Значения плотности, теплопроводности, КЛТР (коэффициента линейного термического расширения) приведены в таблице 2.

Таблица 2

Теплофизические свойства материала «Тафтинг»

	Характеристика	УУКМ «Тафтинг»	МКУ 4М-7	КИМФ	Инпресс-кон	FS240 [AC200] BAR (Япония)	FS320 (Япония)	Novolnex (SEP) Франция	Sepcarb 500 (США)
1	Средний коэффициент линейного температурного расширения в плоскости слоя $\alpha \cdot 10^6$ (1/К) 25–1500°С	1,76	2,5	2,7	2,0	0.7–8.6	1.4–8.5	0,9–1,15	
2	Плотность, кг/м^3	1,74	1,97	1,7	1,75			1,75	1,80
3	Теплопроводность трансверсальная, Вт/(м.К)	12,63±0,9	50	5,4	8				-
4	Теплопроводность в плоскости слоя, Вт/(м.К)	18,4	65	8,6	16	34–15	27–21		50

Результаты механических испытаний приведены в табл. 3. Испытания были проведены силами Института неметаллических материалов АО «Композит». Определены:

- прочность и модуль упругости при растяжении в плоскости слоя;
- растяжение в направлении Z на образцах в виде лопатки, размер 30х20х10 мм;
- прочность и модуль упругости при сжатии в плоскости слоя;
- прочность при сдвиге на образцах с надрезом;
- ударная вязкость с помощью копра КМ-5 (ГОСТ 9454-78) (типа Шарпи) вдоль X, сечение 10х10 мм.

Фотографии некоторых образцов после проведения испытаний представлены на рис. 6.

Результаты механических испытаний показали, что пространственно-армированный композиционный материал, изготовленный с использованием модифицированной технологии прошивки-тафтинга, превосходит по своим физико-механическим свойствам аналоги – конструкционные углерод-углеродные материалы:

- в 2 раза по показателю межслоевой сдвиговой прочности;
- на 50 % по теплопроводности в трансверсальном направлении;
- на 12 % по коэффициенту линейного температурного расширения в диапазоне 25-1500°С;
- в 4 раза по показателю ударной вязкости [14].

Наиболее важной характеристикой эксплуатационных свойств пространственно-армированных материалов является межслоевая сдвиговая прочность, увеличение которой чаще всего является целью создания межслоевых связей прошивкой [14]. Значения разрушающего напряжения $\tau_{\text{сд}}$ при межслоевом сдвиге УУКМ «Тафтинг» определялись по ОСТ 92-1472-78 «Пластмассы теплозащитного и конструкционного назначения. Метод испытания на сдвиг по слою». В таблице 4 приведены значения разрушающего напряжения $\tau_{\text{сд}}$ при межслоевом сдвиге для разработанного материала и некоторых известных углерод-углеродных материалов, классифицируемых как конструкционные.

Значения прочности межслоевого сдвига ТЕРМАР-АДФ, ТЕРМАР-ДФ, Графикит-2000, Графикит-2400 были определены по методике АО «НИИграфит». Испытания на сжатие проводили на образцах размером 18 × 10 × 10 мм с надрезами на противоположных гранях. Скорость движения подвижной опоры в процессе испытания — 2 мм/мин. [21].

Таблица 3

Сравнительные физико-механические свойства пространственно-армированных композиционных материалов

	Характеристика	Направление	Новый материал «Тафтинг»	МКУ 4М-7	КИМФ	Ипресскон	FS240 [AC200] BAR (Япония)	FS320 (Япония)	Novolnex (SEP) Франция	Sepcarb 500 (США)
1	Предел прочности при растяжении в продольном направлении в плоскости слоя, МПа	X	133	67	49	20	98,00	110,00	60–70	100
2	Модуль упругости при растяжении в продольном направлении в плоскости слоя, ГПа	X	65,3	34,0	-	-	52,00	30,00	20–25	-
3	Предел прочности при сжатии в продольном направлении в плоскости слоя, МПа	X	188±75	135	215	240	95,00	115,00	-	70–120
4	Модуль упругости при сжатии в поперечном направлении в плоскости слоя, ГПа	Z	33,9	49,6	-	-	-	-	-	-
5	Модуль упругости при сжатии в продольном направлении в плоскости слоя, ГПа	X	8.9±3.8	19,1	-	-	-	-	-	-
6	Предел прочности при растяжении в поперечном направлении в плоскости слоя, МПа	X	102	103	74	140	-	-	-	-
7	Модуль упругости при растяжении в поперечном направлении в плоскости слоя, ГПа	Z	55,7	51,9	-	-	-	-	10	-
8	Предел прочности при сжатии в поперечном направлении в плоскости слоя, МПа	Z	115	96	180	180	-	-	-	-
9	Ударная вязкость, КДж/м^2	X	44±7	-	10	-	-	-	-	-

Таким образом, моделирование структуры композиционного материала путем выбора шага прошивки дало возможность изготовить композиционный материал с необходимыми свойствами.

Сравнение с аналогами показывает преимущество материала по сдвиговой прочности и теплопроводности. Полученный материал «Тафтинг» сопоставим с материалом «Ипресскон» по трансверсальной прочности, прочнее при сдвиге в плоскости слоев [20], что позволяет отметить преимущество предлагаемого материала в области теплофизических свойств, обеспечиваемое повышенной плотностью преформы и наличием пространственных связей в виде натянутых жгутов. Пространственные каркасы существующих толстостенных пространственно-армированных материалов формируются на основе регулярных систем из пултрузионных высокоплотных стержней (МКУ4М-7) или из натянутых нитей (КИМФ), не позволяющих реализовать высокую плотность каркаса, что обусловливает заниженные теплофизические характеристики и повышенное значение коэффициента линейного температурного расширения. Материал «Ипресскон», основой которого служит преформа, изготовленная по модифицированной иглопробивной технологии, обладает достаточным для обеспечения высокой жесткости количеством трансверсальных связей, однако существенно теряет при этом в прочности в плоскости слоя. Предлагаемый новый материал лишен этих недостатков [14].

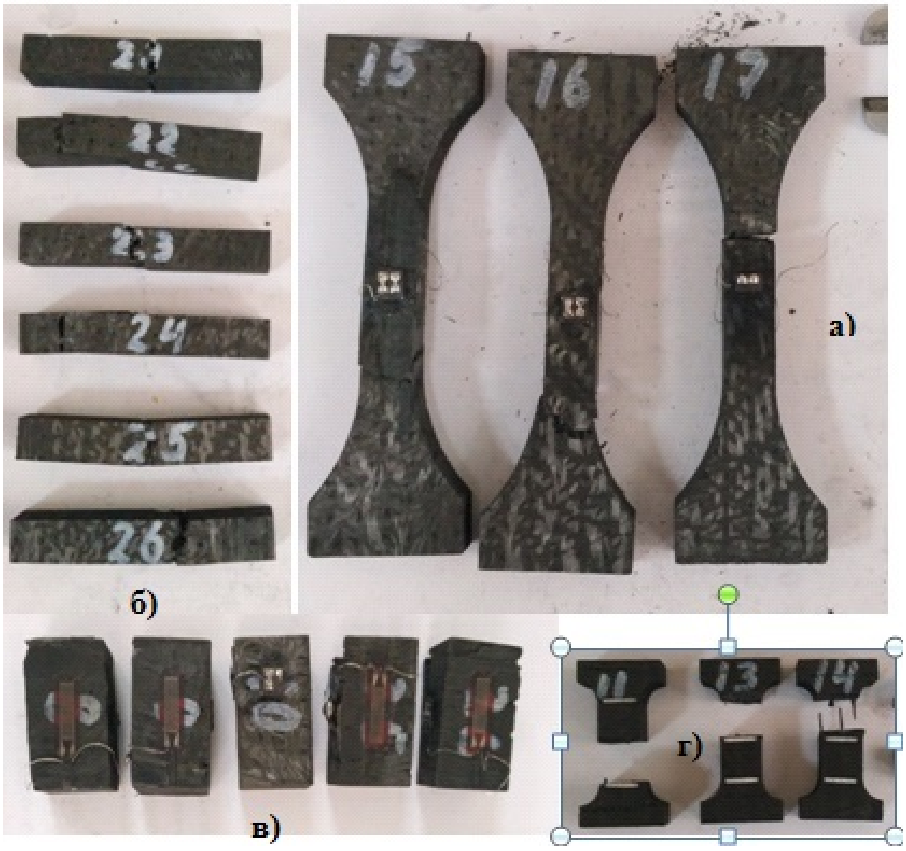

Рис. 5. *Фотографии некоторых образцов после проведения испытаний: а) растяжение в плоскости слоя, б) ударная вязкость по Шарпи, в) сжатие в плоскости слоя, г) растяжение в трансверсальном направлении*

Таблица 4

Характеристики сопротивления межслойному сдвигу разработанного материала УУКМ «Тафтинг» и аналогичных УУКМ

	Материал	Межслоевая сдвиговая прочность $\tau_{сд}$, МПа
1	УУКМ «Тафтинг»	17,4 ±0,7
2	ТЕРМАР-АДФ [20]	9,95±1,96
3	УУКМ [20] Yan, K.F.	30
4	ГРАФИКИТ-2000 [20]	6,58±0,71
5	ГРАФИКИТ-2400 [20]	5,72±2,56
6	Гравимол [22]	36-39
7	УУКМ на основе ткани ВГМ-4 и связующего ФН [22]	18
8	Novolnex (SEP, Франция) [23]	20
9	АРМИР-П [24]	9, 5±0,5

Моделирование свойств подтверждено экспериментом. Модифицированная технология прошивки дает возможности для увеличения плотности преформы путем увеличения линейной плотности прошивной нити и уменьшения шага прошивки. Анизотропия свойств материала, т. е. различные свойства в разных направлениях, легко управляется подбором плотности исходного пакета и содержания пространственной составляющей в объемной преформе.

Полученные результаты прогноза свойств и варианты структуры материала могут быть использованы в расчете теплоэрозионного и прочностного состояния конструкций энергетических установок из УУКМ в трехмерной постановке.

Подход к созданию УУКМ большой толщины с помощью автоматизированного оборудования для модифицированной прошивки хорошо укладывается в передовую концепцию безотходного аддитивного производства. При этом за счет снижения влияния человеческого фактора растет качество УУКМ, а формы изделий могут быть разными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смотрова С. А., Наумов С. М., Смотров А. В. *Технологии изготовления силовых агрегатов авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов*. М.: Техносфера, 2015. 216 с.
2. Перепелкин К. Е. *Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты*. СПб.: НОТ, 2009. 380 с.
3. Михайлин Ю. А. *Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы*. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
4. *Полимерные смеси* / Под ред. Д. Р. Пола и К. Б. Бакнелла / Пер. с англ. / Под ред. В. Н. Кулезнева. СПб., 2011. Том I. Систематика. 618 с. Том II. Функциональные свойства. 606 с.
5. Жернакова В. С., Первушина Ю. С., Соловьева П. В. Исследование упругих характеристик углепластика с 3D структурой. *Письма о материалах*. 2019;9(2)185–190.
6. Поциус А. Клеи, адгезия, технологии склеивания: пер. с нем. 3 изд. / Под ред. Г. В. Комарова. СПб.: ЦОП «Профессия», 216. 384 с.
7. Karuppannan D., Sivaraman V., Gaddikeri K. M., Sundaram R., Ramesh A. Effect of Tufting on Mechanical Properties of Laminated Composites. *ISAMPE National Conference on Composite Materials*. Conference Paper. November 2012. Pp. 2–3.
8. Masters John E. Improved Impact and Delamination Resistance through Interleafing. *Key Engineering Materials*. 1991;37:317-0. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.37.317.
9. Kinloch A. J., Masania K., Taylor A. C. et al. The Fracture of Glass-Fibre-Reinforced Epoxy Composites Using Nanoparticle-Modified Matrices. *J Mater Sci*. 2008;43:1151–1154. DOI: https://doi.org/10.1007/s10853-007-2390-3.
10. Hongyu Wang, Dongmei Zhu, Feng Wan, Wancheng Zhou, Fa Luo. Influence of the C/C Preform Density on Tribological Characteristics of C/C-SiC Composites under Different Conditions. *Ceramics International*. 2014;40(10)Part B:16641-16646. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.08.025.
11. Zhuan Li, Peng Xiao, Ben-gu Zhang, Yang Li, Yu-hai Lu. Preparation and Tribological Properties of C/C-SiC Brake Composites Modified by In Situ Grown Carbon Nanofibers. *Ceramics International*. 2015;41(9)Part B:11733–11740.
12. Tong Y., Bai S., Qin Q. H., Zhang H., Ye Y. Effect of Infiltration Time on the Microstructure and Mechanical Properties of C/C-SiC Composite Prepared by Si-Zr10 Alloyed Melt Infiltration. *Ceramics International*. 2015;41(3):4014–4020. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.11.088.
13. Wan F., Liu R., Wang Y., Cao Y., Zhang C., James Marrow T. In Situ Observation of Compression Damage in a 3D Needled-Punched Carbon Fiber-Silicon Carbide Ceramic Matrix Composite. *Composite Structures*. 2018;210:189–201. DOI: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.11.041.
14. Бухаров С. В., Лебедев А. К., Зинин А. В. Пространственное армирование прошивкой высокоплотных толстостенных заготовок слоистых композиционных материалов. *Авиамашиностроение и транспорт Сибири*: Сб. статей XII Междунар. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 27 мая — 1 июня 2019 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. 458 с. С. 107–115.
15. Zhang J., Luo R., Xiang Q., Yang C. Compressive Fracture Behavior of 3D Needle-Punched Carbon/Carbon Composites. *Materials Science and Engineering*. 2011;528(15):5002–5006.
16. Zhang D., Sun M., Liu X., Xiao X., Qian K. Off-Axis Bending Behaviors and Failure Characterization of 3D Woven Composites. *Composite Structures*. 2019;208(15):45–55. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.10.009.
17. Chen X., Zhang Y., Xie J., Du P., Chen L. Robot Needle-Punching Path Planning for Complex Surface Preforms. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2018;50(C):132–139. DOI: 10.1016/j.rcim.2017.09.008.
18. Mouritz A., Cox B. N. A Mechanistic Interpretation of the Comparative In-Plane Mechanical Properties of 3D Woven, Stitched and Pinned Composites. *Compos Part A: Appl Sci Manuf*. 2010;41(6):709–728. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.02.001.

19. Bigaud J., Aboura Z., Martins A. T., Verger S. Analysis of the Mechanical Behavior of Composite T-Joints Reinforced by One Side Stitching. *Composite Structures*. 2018;184:249–255. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.06.041.
20. Ожерелков Д. Ю. *Вязкость разрушения углерод-углеродных композиционных материалов фрикционного назначения*: Дис ... канд. техн. н. 2018.
21. Yan K. F., Zhang C. Y., Qiao S. R., Han D., Li M. In-Plane Shear Strength of a Carbon/Carbon Composite at Different Loading Rates and Temperatures. *Materials Science and Engineering: A*. 2011;528:1458–1462. DOI: 10.1016/j.msea.2010.10.047.
22. Гуняев Г. М., Гофин М. Я. Углерод-углеродные композиционные материалы. *Авиационные материалы и технологии*. 2013;спецвыпуск:62–90.
23. Бушуев Ю. Г., Персин М. И., Соколов В. А. *Углерод-углеродные композиционные материалы:* Справочник. М.: Металлургия, 1994.
24. ТУ 48-4807-237-90 *«Заготовки из армированного рекристаллизованного графита марки АРМИР-П»*.