

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-115-125

## ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ВЫСОКОПРОЧНОГО УГЛЕРОДНОГО ВОЛОКНА СО СТАНДАРТНЫМ МОДУЛЕМ УПРУГОСТИ ПРОИЗВОДСТВА КНР

А.И. Старков<sup>1</sup>, К.Е. Куцевич<sup>1</sup>, А.Ю. Исаев<sup>1</sup>, Я.А. Вахрушева<sup>1</sup>, П.М. Путилина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Для волокна исследованы геометрические параметры сечения, кристаллическая структура, массовая доля аппрета, линейная плотность и плотность, геометрические параметры сечения микропластика, прочность и модуль упругости при растяжении, удлинение при разрыве в микропластике. Для углепластика определены предел прочности и модуль упругости при растяжении и изгибе, прочность при сжатии, пределы прочности при сдвиге в плоскости листа и межслойном сдвиге, прочность криволинейной балки, трансверсальная прочность, остаточная прочность при сжатии после удара, удельная работа расслоения в условиях отрыва и сдвига, исследована микроструктура углепластиков.

**Ключевые слова:** углеродное волокно, углепластик, клеевой препрег, параметры углеродных волокон, параметры углепластика

**Для цитирования:** Старков А.И., Куцевич К.Е., Исаев А.Ю., Вахрушева Я.А., Путилина П.М. Исследования свойств высокопрочного углеродного волокна со стандартным модулем упругости производства КНР // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-115-125.

Scientific article

## INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH STANDARD MODULUS CARBON FIBER PRODUCED IN CHINA

A.I. Starkov<sup>1</sup>, K.E. Kutsevich<sup>1</sup>, A.Yu. Isaev<sup>1</sup>, Ya.A. Vahrusheva<sup>1</sup>, P.M. Putilina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The article presents the results of investigation of the following properties of fiber: geometric cross-sectional characteristics, crystal structure, mass fraction of the dressing, linear density and fiber density, geometric cross-sectional characteristics of microplastics, tensile strength, modulus of elasticity and elongation at break of the microplastics. For carbon fiber reinforced plastic (CFRP) the following properties were determined: ultimate strength and modulus of elasticity under tension and bending, compressive strength, in-plane and interlaminar shear strength, curved beam strength, transversal strength, residual compressive strength after impact, specific interlaminar fracture toughness under Mode I and Mode II loading conditions. At the same time the microstructures of carbon fiber plastics were studied.

**Keywords:** carbon fiber, carbon fiber reinforced plastic (CFRP), adhesive prepreg, characteristics of carbon fibers, characteristics of carbon

*For citation:* Starkov A.I., Kutsevich K.E., Isaev A.Yu., Vahrusheva Ya.A., Putilina P.M. Investigation of the properties of high-strength standard modulus carbon fiber produced in China. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-115-125.

### Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются в силовых конструкциях авиакосмической и других видов техники, что позволяет усовершенствовать аэродинамические характеристики планера летательных аппаратов с одновременным обеспечением весовой эффективности [1]. В последнее время при создании ПКМ широко используют клеевые препреги, в которых пропитка тканевого наполнителя (стекло- и углеродной ткани) осуществляется расплавом эпоксидного связующего по расплавной технологии [2–14].

Углеродные волокна получают путем контролируемого пиролиза волокон-прекурсоров: полиакрилонитрильных, из изотропного и мезофазного пека, вискозы и фенолформальдегидных смол. Перед пиролизом волокна вытягивают и стабилизируют на воздухе при температуре 100–400 °С (точная температура зависит от природы прекурсора).

Значения прочности и модуля упругости зависят как от исходного вещества, из которого получают углеродные волокна, так и от условий их термообработки на всех стадиях получения. При увеличении температуры термообработки с температуры карбонизации (1300 °С) до температуры графитизации (2800 °С) происходит увеличение объемной плотности углеродного волокна. Одновременно с этим уменьшается прочность при растяжении и увеличивается модуль упругости углеродного волокна. После термообработки при температуре 2800 °С значения прочности и модуля упругости углеродных волокон на основе изотропного пека составляют соответственно 600 МПа и 30 ГПа, углеродного волокна на основе мезофазного пека: 2100 и 520 МПа, углеродного волокна из полиакрилонитрила: 2500 МПа и 300 ГПа [15–18].

Существенный рост использования ПКМ за последние 20 лет привел к увеличению в КНР предприятий-производителей углеродных волокон различных номиналов с разным уровнем прочностных характеристик.

В НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан углепластик марки ВКУ-30К.УВ из клеевого препрега марки КМКУ-3м.150.УВ на основе высокопрочного углеродного жгутового наполнителя производства КНР и безрастворного клеевого связующего ВСК-14-3. В процессе работы всесторонне исследовано высокопрочное углеродное волокно марки УВ-12К со стандартным модулем упругости и углепластик на его основе. Полученные данные представляют большой интерес для конструкторов авиационной техники для оценки применения данного материала в высоконагруженных элементах летательного аппарата и прогнозирования их поведения.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Материалы и методы

Объектом исследования является разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ углепластик ВКУ-30К.УВ на основе углеродного волокна производства КНР.

С целью изучения однородности свойств углеродного волокна производства КНР и оценки его влияния на свойства углепластика марки ВКУ-30К.УВ проведены исследования, включающие следующие основные методики и виды испытаний:

*для углеродного волокна*

– определение геометрических параметров сечения элементарного волокна (ГОСТ 32666–2014);

– исследование кристаллической структуры – межплоскостного расстояния и размеров кристаллитов – методом рентгеноструктурного анализа (МИ 1.2.017–2010);

- определение массовой доли аппрета на волокне (ГОСТ Р ИСО 10548–2012);
- определение линейной плотности волокна (ГОСТ 6943.1–2015 (ISO 1889:2009));
- определение плотности волокна (ГОСТ Р ИСО 10119–2012 метод А);
- определение геометрических параметров сечения микропластика (ГОСТ 32666–2014 метод С);
- определение в микропластике прочности и модуля упругости при растяжении, а также удлинения при разрыве по ГОСТ Р ИСО 10618–2012;
- исследование термической деструкции в инертной среде углеродного наполнителя с нанесенным аппретом методом термогравиметрического анализа (ГОСТ Р 56721–2015);
- определение удельной разрывной нагрузки при разрыве петель углеродного волокна (ГОСТ 28008–88) по длине бобины;
- определение предела прочности при растяжении нити в «сухом пучке» (ГОСТ 6611.2–73) по длине бобины;  
*для углепластика*
- определение предела прочности и модуля упругости при растяжении на образцах со схемами армирования [0], [90] и [0/–45/90/+45] (ГОСТ Р 56785–2015);
- определение прочности при сжатии на образцах со схемами армирования [0], [90] и [0/–45/90/+45] (ГОСТ Р 56812–2015);
- определение предела прочности и модуля упругости при изгибе на образцах со схемами армирования [0] и [0/–45/90/+45] (ГОСТ 25.604–82);
- определение предела прочности при сдвиге в плоскости листа на образцах со схемой армирования [±45] (ГОСТ 32658–2014);
- определение предела прочности при межслойном сдвиге на образцах со схемой армирования [0] (ГОСТ Р 57745–2017);
- определение прочности криволинейной балки на образцах со схемой армирования [0] (ГОСТ Р 57041–2016);
- определение трансверсальной прочности по методике НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ на образцах со схемой армирования [±45] (СТО 1-595-30-639–2022);
- определение остаточной прочности при сжатии после удара с удельной энергией 6,67 Дж/мм на образцах со схемой армирования [+45/0/–45/90] (ГОСТ 33495–2015);
- определение удельной работы расслоения в условиях отрыва на образцах со схемой армирования [0] (ГОСТ Р 56815–2015);
- определение удельной работы расслоения в условиях сдвига на образцах со схемой армирования [0] (ГОСТ Р 33685–2015);
- исследование микроструктуры углепластиков методом сканирующей электронной микроскопии (МИ 1.2.035–2011).

### Результаты и обсуждение

Для изучения свойств углеродного волокна производства КНР проведены исследования его сечения (рис. 1) – отобрано по одному образцу через каждые 25 м на протяжении всей длины волокна (1250 м).

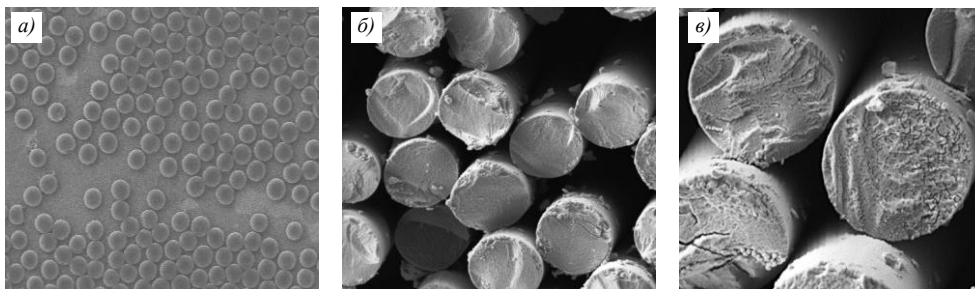


Рис. 1. Микроструктура ( $\times 2000$  (а);  $\times 10000$  (б);  $\times 20000$  (в)) сечения углеродного волокна УВ-12К производства КНР

Усредненные значения геометрических параметров сечения волокна УВ-12К производства КНР по 50-ти образцам с бобины следующие:

Диаметр, мкм	6,7±0,02
Длина, мкм	6,9±0,02
Ширина, мкм	6,4±0,03
Вытянутость, мкм	1,1±0,004

Форма поперечного сечения исследованных образцов углеродного волокна УВ-12К производства КНР – круглая с фибрилизованной поверхностью. Подобные элементы рельефа поверхности являются концентраторами напряжений и в зависимости от условий нагружения приводят к неоднородному напряженному состоянию в волокне, снижая его прочность и деформативность, в том числе в составе ПКМ.

Методом рентгеноструктурного анализа проведено исследование кристаллической структуры углеродного волокна производства КНР. Определены межплоскостные расстояния и размеры кристаллитов в моноволокнах (рис. 2, табл. 1).

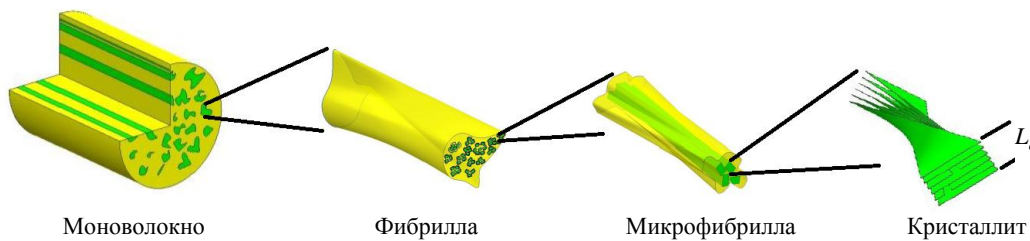


Рис. 2. Схема кристаллической структуры углеродного волокна

Таблица 1

Значения структурных параметров образцов углеродного волокна

Угловое положение рефлексов 2θ, градус	Межплоскостное расстояние, нм	Длина кристаллита, нм	Площадь сечения кристаллита, нм <sup>2</sup>
$d_{0002}$	25,42	0,350	2,33
$d_{0100}$	43,84	0,207	
$d_{0004}$	53,30	0,172	

Проведены испытания по определению температуры деструкции углеродного волокна марки УВ-12К производства КНР (рис. 3). Установлено, что средняя температура деструкции составила 715,24 °С.

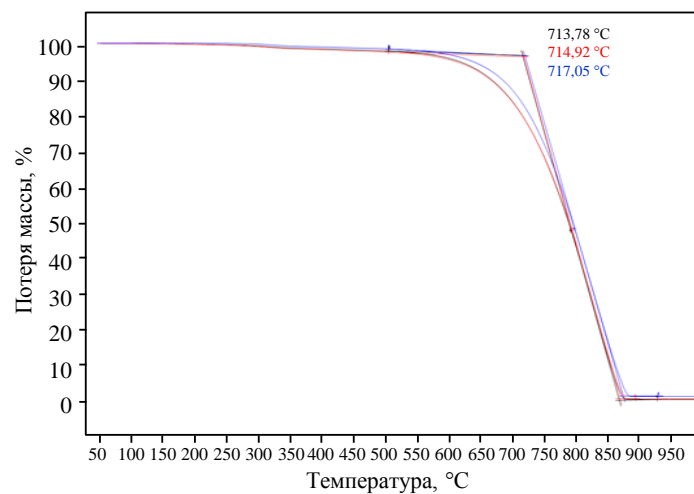


Рис. 3. Температура деструкции углеродного волокна марки УВ-12К производства КНР в среде инертного газа

С использованием связующего ВСЭ-30 изготовлены образцы микропластиков из углеродного волокна УВ-12К и определены геометрические параметры сечения полученных микропластиков (рис. 4).

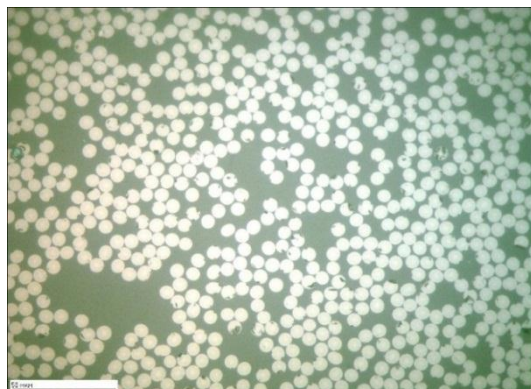


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 500$ ) сечения микропластика из углеродного волокна производства КНР

Усредненные значения геометрических параметров сечения микропластика из углеродного волокна производства КНР следующие:

Диаметр, мкм	$6,8 \pm 0,02$
Длина, мкм	$7,1 \pm 0,02$
Ширина, мкм	$6,5 \pm 0,02$
Вытянутость, мкм	$1,09 \pm 0,002$

Проведено исследование характеристик углеродного волокна производства КНР при растяжении в микропластике, линейной плотности и массовой доли аппрета на волокнах в десяти точках на участке 900 м по длине бобины с интервалом отбора образцов 100 м. Образцы микропластиков изготовлены с использованием связующего ВСЭ-30. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты определения физико-механических характеристик по длине бобины углеродного волокна производства КНР при растяжении в микропластике и массовой доли аппрета**

Условный номер точки	Линейная плотность, текс	Объемная плотность, $\text{кг/м}^3$	Прочность при растяжении, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Удлинение при разрыве, %	Массовая доля аппрета, %
1	810	1,82	4,77	235	2,02	1,1
2	801	1,78	4,56	233	1,94	1,1
3	823	1,82	4,84	230	2,10	1,1
4	807	1,81	4,88	230	2,10	1,2
5	811	1,83	4,87	238	2,04	1,1
6	809	1,80	4,64	237	1,90	1,1
7	805	1,79	4,63	235	1,94	1,1
8	803	1,78	4,90	234	2,10	1,1
9	810	1,80	4,82	234	2,06	1,1
10	819	1,81	4,67	227	2,00	1,1

Исходя из анализа результатов испытаний углеродного волокна УВ-12К производства КНР, представленных в табл. 2, установлено, что среднее значение линейной плотности составляет 810 текс (*вариация* 0,83 %), объемная плотность 1,80 кг/м<sup>3</sup> (*вариация* 0,86 %), прочность при растяжении микропластика 4,76 ГПа (*вариация* 2,58 %), модуль упругости при растяжении комплексной нити в микропластике 233,3 ГПа (*вариация* 1,46 %).

Проведены испытания углеродного волокна производства КНР по определению показателей линейной плотности, удельной разрывной нагрузки при разрыве петель и прочности при растяжении нити в «сухом пучке» по всей длине бобины (5000 м). Результаты испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты определения характеристик по длине бобины углеродного волокна производства КНР**

Характеристика	Значения характеристик*
Линейная плотность, текс	$\frac{732-791}{764}$
Удельная разрывная нагрузка, сН/текс: – при разрыве нити петель	$\frac{48,1-75,7}{65,8}$
<i>Вариация, %</i>	5,9
– при растяжении нити в «сухом пучке»	$\frac{113,6-136,5}{124,8}$
<i>Вариация, %</i>	3,2
* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.	

Для проведения исследования волокна на определение линейной плотности отобрано по 2000 образцов в тысяче точек по всей длине волокна в бобине – через каждые 5 м (по два образца на одну точку). Минимальное допустимое значение линейной плотности для волокна производства КНР, согласно ТУ 1-595-11-1407–2021, составляет 780 текс, максимальное: 820 текс.

По результатам анализа полученных данных по показателю удельной разрывной нагрузки при разрыве петель установлено, что среднее значение показателя для углеродного волокна производства КНР составило 65,8 сН/текс.

Для исследования свойств углепластика марки ВКУ-30К.УВ изготовлены образцы клеевых препрегов (на основе углеродного наполнителя из волокна производства КНР) путем нанесения расплава клеевого связующего на антиадгезионную бумагу (подложку) из верхнего и нижнего клеенаносящих узлов с использованием систем обогреваемых валов, последующего двухстороннего дублирования угленаполнителей с пленками клеевого связующего в узлах обогреваемых каландров и смотки клеевых препрегов через антиадгезионную прокладку в рулон.

Автоклавным методом формования из клеевого препрега марки КМКУ-3м.150.УВ.37 изготовлены образцы углепластика марки ВКУ-30К.УВ и проведены исследования их механических свойств при растяжении, сжатии, изгибе и межслойном сдвиге со схемами армирования [0], [90] и [0/–45/90/+45], результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Основные свойства образцов углепластика марки ВКУ-30К.УВ  
при растяжении, сжатии, изгибе и межслойном сдвиге**

Схема армирования (толщина образца)	Значения свойств при						межслойном сдвиге $F_{сдв}$ , МПа
	растяжении		сжатии		изгибе		
	$\sigma_{в}$ , МПа	$E$ , ГПа	$\sigma_{в,сж}$ , МПа	$E_{сж}$ , ГПа	$\sigma_{в,и}$ , МПа	$E_{и}$ , ГПа	
[0]	1604	123	978	123	2002	117,9	90,1
[90] (2,5 мм)	61	9	216	11	–	–	–
[90] (4,5 мм)	55	9	–	–	–	–	–
[0/–45/90/+45]	618	56	444	45	1176	71,8	–

Проведены исследования механических свойств образцов углепластика марки ВКУ-30К.УВ при сдвиге в плоскости армирования, сжатии после удара, изгибе изогнутой балки со схемами армирования  $[\pm 45]$ ,  $[+45/0/-45/90]$  и  $[0]$ , результаты которых представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Основные свойства образцов углепластика марки ВКУ-30К.УВ  
при сдвиге в плоскости листа, сжатии после удара и изгибе криволинейной балки  
( $r$  – радиус изгиба)**

Схема армирования	Значения свойств при			
	сдвиге в плоскости листа		сжатии после удара $\sigma_{в,спу}$ , МПа	изгибе криволинейной балки $\sigma_r$ , Н/м <sup>2</sup>
	$\tau_{12}$ , МПа	$G_{12}$ , ГПа		
$[\pm 45]$	80,8	5,69	–	–
$[+45/0/-45/90]$	–	–	136	–
[0]	–	–	–	57,7

Проведены исследования механических свойств образцов углепластика марки ВКУ-30К.УВ при работе расслоения в условиях сдвига и отрыва, а также при трансверсальном отрыве со схемами армирования  $[\pm 45]$  и  $[0]$ , результаты представлены в табл. 6.

Таблица 6

**Основные свойства образцов углепластика марки ВКУ-30К.УВ  
при работе расслоения в условиях сдвига и отрыва, а также трансверсальном отрыве**

Схема армирования	Удельная работа расслоения в условиях, кДж/м <sup>2</sup>		Трансверсальная прочность, МПа
	отрыва $G_{Ic}$	сдвига $G_{IIc}$	
[0]	0,22	0,65	–
$[\pm 45]$	–	–	6,5

Проведено исследование микроструктуры углепластика марки ВКУ-30К.УВ: форма поперечного сечения волокон – круглая, поверхность волокон – гладкая. Волокна характеризуются структурой «ядро–оболочка» (рис. 5).

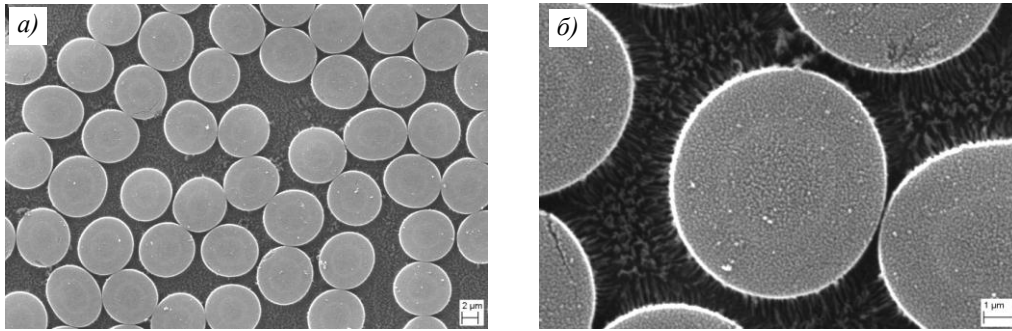


Рис. 5. Микроструктура ( $\times 5000$  (а);  $\times 20000$  (б)) углеродного волокна производства КНР в углепластике марки ВКУ-30К.УВ

### Заключения

Проведено исследование свойств углеродного волокна производства КНР с целью оценки влияния волокон на свойства углепластика марки ВКУ-30К.УВ. В десяти точках на протяжении 900 м по длине бобины (одна точка на каждые 100 м) определены следующие свойства углеродного волокна: линейная и объемная плотность, массовая доля аппрета, а также прочность, модуль упругости и относительное удлинение при растяжении микропластика. Так, линейная плотность исследуемого углеродного волокна составляет  $815 \pm 8$  текс (среднее значение 810 текс), объемная плотность  $1,80 \pm 0,02$  кг/м<sup>3</sup> (среднее значение 1,80 кг/м<sup>3</sup>), прочность при растяжении микропластика  $4,72 \pm 0,16$  ГПа (среднее значение 4,76 ГПа), модуль упругости при растяжении комплексной нити в микропластике  $232,5 \pm 5,5$  ГПа (среднее значение 233,3 ГПа).

Удельные разрывные нагрузки при растяжении в «сухом пучке» и при разрыве петлей определены по всей длине волокна в бобине: значения измеряли в тысяче точек (одна точка на каждые 5 м). Так, удельная разрывная нагрузка при разрыве петлей составляет  $61,9 \pm 13,8$  сН/текс (среднее значение 65,8 сН/текс), прочность при растяжении в «сухом пучке»  $125 \pm 11,5$  сН/текс (среднее значение 124,8 сН/текс).

Проведены микроскопические исследования структуры волокон, а также их кристаллической структуры и термической деструкции в инертной среде. Форма поперечного сечения исследованных образцов углеродного волокна УВ-12К производства КНР – круглая с фибрилизованной поверхностью. При этом средний диаметр монофиламента составляет  $6,7 \pm 0,02$  мкм, средняя ширина  $6,4 \pm 0,03$  мкм, площадь сечения кристаллита в составе монофиламента  $2,33$  нм<sup>2</sup>, а температура деструкции в среде инертного газа  $715,24$  °С.

На основе волокон производства КНР получена партия клеевого препрега углепластика марки КМКУ-3м.150.УВ.37. Автоклавным методом формования из клеевого препрега изготовлены образцы углепластика марки ВКУ-30К.УВ.

Проведены испытания образцов углепластика марки ВКУ-30К.УВ с различными видами укладки при растяжении, сжатии, изгибе, сдвиге в плоскости армирования, межслойном сдвиге, сжатии после удара, изгибе изогнутой балки; определены прочность при трансверсальном отрыве, удельная работа расслоения в условиях отрыва и сдвига. Полученные результаты свидетельствуют о принадлежности материала к категории высокопрочных конструкционных углепластиков.

Полученные данные представляют интерес для конструкторов авиационной техники, так как могут использоваться для оценки применения данного материала в высоконагруженных элементах летательного аппарата и прогнозирования их поведения.

*Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Министерство) в рамках Соглашения № 075-11-2025-011 между Министерством и Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» на основании Распоряжения Правительства Российской Федерации № 1789-р от 04 июля 2023 г. об утверждении комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства».*

#### Список источников

1. Малаховский С.С., Панафидникова А.Н., Костромина Н.В., Осипчик В.С. Углепластики в современном мире: их свойства и применения // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. XXXIII. № 6. С. 62–64.
2. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учеб. пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
3. Исаев А.Ю., Рубцова Е.В., Котова Е.В., Сутягин М.Н. Исследование свойств клеев и клеевых связующих, изготовленных с использованием современной отечественной компонентной базы // Труды ВИАМ. 2021. № 3 (97). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
4. Большаков В.А., Антюфеева Н.В. Оценка модели процесса отверждения клеевого связующего в препреге // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
5. Перов Н.С. Конструирование полимерных материалов на молекулярных принципах. II. Молекулярная подвижность в сложных сшитых системах // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 30–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-30-36.
6. Старков А.И., Куцевич К.Е., Тюменева Т.Ю., Петрова А.П. Клеевые препреги пониженной горючести, предназначенные для изготовления интегральных и трехслойных сотовых конструкций авиационной техники // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-41-52.
7. Малышева Г.В., Гращенков Д.В., Гузева Т.А. Оценка технологичности использования клеев и клеевых препрегов при изготовлении трехслойных панелей // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 4 (53). С. 26–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-26-30.
8. Мишкин С.И. Применение углепластиков в конструкциях беспилотных аппаратов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 5 (111). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
9. Способ изготовления пленочных клеев и клеевых препрегов с терморезактивным полимерным связующим и устройство для его осуществления: пат. 2254172С1 Рос. Федерация; заявл. 31.05.04; опубл. 20.06.05.
10. Garcia F.G., Soares B.G., Pita V.J.R.R. et al. Mechanical properties of epoxy networks based on DGEBA and aliphatic amines // Journal of Applied Polymer Science. 2007. No. 3. P. 2047–2055. DOI: 10.1002/app.24895.
11. Brostow W., Goodman S.H., Wahrmund J. Handbook of Thermoset Plastics. 3rd ed. Plastics Design Library, 2014. P. 191–252. DOI: 10.1016/978-1455731077.
12. Zhao X., Huang Z., Song P. et al. Curing kinetics and mechanical properties of fast curing epoxy resins with isophorone diamine and N-(3 aminopropyl)-imidazole // Journal of Applied Polymer Science. 2019. Vol. 136. P. 1–10. DOI: 10.1002/APP.47950.
13. Zhao X., Huang Z., Song P. et al. Curing kinetics and mechanical properties of epoxy resin /1-benzyl-2-methylimidazole / isophorone diamine system // Thermochemica Acta. 2020. Vol. 690. P. 178657. DOI: 10.1016/j.tca.2020.178657.

14. Aufray M. Physico-chemical characterization of epoxy-amine / metal interphases, characterization of their constituents: Dissertation PhD. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005. 186 p. URL: <https://www.researchgate.net/publication/281600273> (дата обращения: 18.05.2025).
15. Сидорина А.И., Сафронов А.М. Исследование устойчивости углеродных волокон к окислению // Труды ВИАМ. 2022. № 7 (113). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-63-73.
16. Варшавский В.Я. Углеродные волокна. М.: Варшавский В.Я., 2005. 496 с.
17. Углеродные волокна и углекомпозиаты / под ред. Э. Фитцера. М.: Мир, 1988. 338 с.
18. Tagawa M., Ohmae N., Umeno M. et al. Surface Characterization of Carbon Fibers Exposed to 5 eV Energetic Atomic Oxygen Beam Studied by Wetting Force Measurements // Japanese Journal of Applied Physics. 1991. Vol. 30. P. 2134–2138.

### References

1. Malakhovsky S.S., Panafidnikova A.N., Kostromina N.V., Osipchik V.S. Carbon fiber reinforced plastics in the modern world: their properties and applications. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2019, vol. XXXIII, no. 6, pp. 62–64.
2. Petrova A.P., Malysheva G.V. *Adhesives, adhesive binders, and adhesive prepregs: a textbook*. Ed. by E.N. Kablov. Moscow: VIAM, 2017, 472 p.
3. Isaev A.Yu., Rubtsova E.V., Kotova E.V., Sutyagin M.N. Research of properties of glues and glue binding, made with use of modern domestic component base. *Trudy VIAM*, 2021, no. 3 (97), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 18, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-58-67.
4. Bolshakov V.A., Antyufeeva N.V. Evaluation of the curing process model of the adhesive binder in prepreg. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-66-77.
5. Perov N.S. Design of polymeric materials on the molecular principles. II. The molecular mobility in the cross-linked complex systems. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. 4 (49), pp. 30–36. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-30-36.
6. Starkov A.I., Kutsevich K.E., Tyumeneva T.Yu., Petrova A.P. Low-combustibility adhesive prepregs designed for the manufacture of integral and three-layer honeycomb structures aircraft technology. *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 18, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-41-52.
7. Malysheva G.V., Grashchenkov D.V., Guzeva T.A. Evaluation of technological use efficiency of adhesives and glue prepregs in the manufacture of three-layer panels. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 26–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-26-30.
8. Mishkin S.I. Application of carbon fiber plastics in constructions of pilotless devices (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 5 (111), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
9. *Method for producing film adhesives and adhesive prepregs with a thermosetting polymer binder and a device for implementing it*: pat. 2254172C1 Rus. Federation; appl. 31.05.04; publ. 20.06.05.
10. Garcia F.G., Soares B.G., Pita V.J.R.R. et al. Mechanical properties of epoxy networks based on DGEBA and aliphatic amines. *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, no. 3, pp. 2047–2055. DOI: 10.1002/app.24895.
11. Brostow W., Goodman S.H., Wahrmund J. *Handbook of Thermoset Plastics*. 3rd ed. Plastics Design Library, 2014, pp. 191–252. DOI: 10.1016/978-1455731077.
12. Zhao X., Huang Z., Song P. et al. Curing kinetics and mechanical properties of fast curing epoxy resins with isophorone diamine and N-(3 aminopropyl)-imidazole. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, vol. 136, pp. 1–10. DOI: 10.1002/APP.47950.
13. Zhao X., Huang Z., Song P. et al. Curing kinetics and mechanical properties of epoxy resin / 1-benzyl-2-methylimidazole / isophorone diamine system. *Thermochimica Acta*, 2020, vol. 690, p. 178657. DOI: 10.1016/j.tca.2020.178657.

14. Aufray M. *Physico-chemical characterization of epoxy-amine / metal interphases, characterization of their constituents*: Dissertation PhD. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2005, 186 p. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/281600273> (accessed: May 18, 2025).
15. Sidorina A.I., Safronov A.M. Study of the resistance of carbon fibers to oxidation. *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 20, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-63-73.
16. Varshavsky V.Ya. *Carbon Fibers*. Moscow: Varshavsky V.Ya., 2005, 496 p.
17. *Carbon Fibers and Carbon Composites*. Ed. E. Fitzer. Moscow: Mir, 1988, 338 p.
18. Tagawa M., Ohmae N., Umeno M. et al. Surface Characterization of Carbon Fibers Exposed to 5 eV Energetic Atomic Oxygen Beam Studied by Wetting Force Measurements. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1991, vol. 30, pp. 2134–2138.

#### Информация об авторах

**Старков Алексей Игоревич**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Куцевич Кирилл Евгеньевич**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Исаев Алексей Юрьевич**, заместитель начальника лаборатории по науке, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Вахрушева Яна Андреевна**, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Путилина Полина Максимовна** инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Alexey I. Starkov**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Kirill E. Kutsevich**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Alexey Yu. Isaev**, Deputy Head of Laboratory of Science, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Yana A. Vahruccheva**, Deputy Head of Science-Research Bureau, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Polina M. Putilina**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 01.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.08.2025.  
The article was submitted 01.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 06.08.2025.