

Научная статья

УДК 539.612

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-170-184

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ АДГЕЗИОННОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ РОССИЙСКИМИ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ И ЭПОКСИДНОЙ МАТРИЦЕЙ МЕТОДОМ ВЫТЯГИВАНИЯ ИЗ «УЗЛА»

Р.Р. Иваньков^{1,2}, А.И. Сидорина¹, С.В. Котомин²

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

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия; bauman@bmstu.ru

Аннотация. Рассмотрен усовершенствованный метод определения прочности адгезионной связи углеродных волокон с эпоксидной матрицей вытягиванием из «узла». С помощью данного метода испытания можно определять адгезионную прочность на образцах из волокон в виде жгутов и контролировать давление при формировании адгезионного контакта. Методом вытягивания из «узла» определена адгезионная прочность двух марок отечественных углеродных волокон с эпоксидным связующим. Зона адгезионного разрушения исследована с помощью оптического микроскопа.

Ключевые слова: адгезионная прочность, арамидное волокно, углеродное волокно, адгезионная зона контакта, испытания на определение прочности, эпоксидное связующее

Для цитирования: Иваньков Р.Р., Сидорина А.И., Котомин С.В. Определение прочности адгезионной связи между российскими углеродными волокнами и эпоксидной матрицей методом вытягивания из «узла» // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 14. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-170-184.

Scientific article

DETERMINATION OF THE STRENGTH OF THE ADHESIVE BOND BETWEEN RUSSIAN CARBON FIBERS AND AN EPOXY MATRIX USING THE «LOOP» PULL-OUT TEST

R.R. Ivankov^{1,2}, A.I. Sidorina¹, S.V. Kotomin²

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

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology)», Moscow, Russia; bauman@bmstu.ru

Abstract. An improved method for determining the adhesive bond strength between carbon fibers and an epoxy matrix using a loop pull-out test is considered. This modified test method makes it possible to determine the adhesive strength of fibers in the form of bundles and control the pressure during the formation of an adhesive contact. The adhesive strength of two grades of domestic carbon fibers with an epoxy binder was determined using the loop pull-out test. After the test, the failure zone was examined using an optical microscope.

Keywords: adhesive strength, aramid fiber, carbon fiber, adhesive contact zone, strength testing, epoxy binder

For citation: Ivankov R.R., Sidorina A.I., Kotomin S.V. Determination of the strength of the adhesive bond between Russian carbon fibers and an epoxy matrix using the «loop» pull-out test. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 14. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-170-184.

Введение

В XXI в. количество изделий и конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) для авиационной, космической, автомобильной и другой техники постоянно растет [1–5]. Стоит отметить, что исследованиям свойств деталей из ПКМ уделяется большое внимание. Методы физико-механических испытаний, обнаружения и определения дефектов постоянно совершенствуются. С целью уменьшения количества дефектов в готовых изделиях из ПКМ проводятся интенсивные работы в области определения оптимальных технологических параметров формования [6–10].

Для изготовления нагруженных конструкций из ПКМ применяют преимущественно эпоксидные смолы и углеродные волокна [5, 11]. Согласно данным работ [11, 12], такой тип полимерных связующих используется при изготовлении лакокрасочных материалов, клеев, компаундов и конструкционных материалов. Отметим, что углеродные волокна и эпоксидные матрицы существенно отличаются по химическим, упруго-прочностным, теплофизическим, деформационным и другим свойствам.

Одна из самых важных задач исследователей и ученых при разработке новых типов связующих – определение адгезионной прочности между матрицей и армирующим наполнителем. Это важный фактор при разработке ПКМ, так как именно от полимерного связующего будет зависеть получение эффективного распределения нагрузки на армирующие волокна в конструкционных материалах. Наиболее высокие упруго-прочностные показатели можно получить при ориентации волокна в направлении приложения растягивающих напряжений.

При взаимодействии армирующего наполнителя и полимерного связующего возникают физические и химические связи между двумя поверхностями, т. е. адгезия. Существуют несколько теоретических подходов к анализу адгезионных явлений: механический, электронный, диффузионный и адсорбционный. Улучшая прочность адгезионного контакта, можно повышать физико-механические свойства ПКМ [13].

Адгезионная прочность между терморезистивными связующими и углеродными волокнами зависит от напряженно-деформированного состояния соединения в контактной зоне. На определение данного показателя влияет качество изготовления испытываемых образцов, способ испытания, а также расчет.

Одна из важных практических задач современного материаловедения – разработка способов управления граничными слоями. Для увеличения показателей адгезионной прочности между эпоксидным связующим и углеродными волокнами с помощью различных способов модифицируют матрицы и поверхности армирующего наполнителя.

В случае правильно подобранного способа модификации поверхности армирующего наполнителя можно увеличить физико-механические свойства композиционного материала, а также повысить ударо- и трещиностойкость изделия.

При ударе сопротивление разрушению в ПКМ происходит со стороны полимерной матрицы, а не армирующего наполнителя. Следует отметить, что при испытаниях на ударо- и трещиностойкость прочность изделия определяется свойствами граничного слоя и отвержденного связующего [13].

Для того чтобы исследовать границы раздела фаз, пользуются современными микроскопическими и спектроскопическими методами [13].

Исследования адгезионной прочности углеродного волокна с полимерными связующими проводятся уже достаточно давно [14–18]. В настоящее время существует много методов для определения адгезионной прочности на границе «волокно–матрица», а также разработан широкий спектр специального оборудования для изготовления и испытания образцов.

Методы исследования адгезионной прочности подразделяются на прямые и косвенные [13]. К прямым методам относятся: *pull out* и *push out*, вытягивание волокна из полимерного блока и из капли полимера, а также фрагментация волокна (рис. 1).

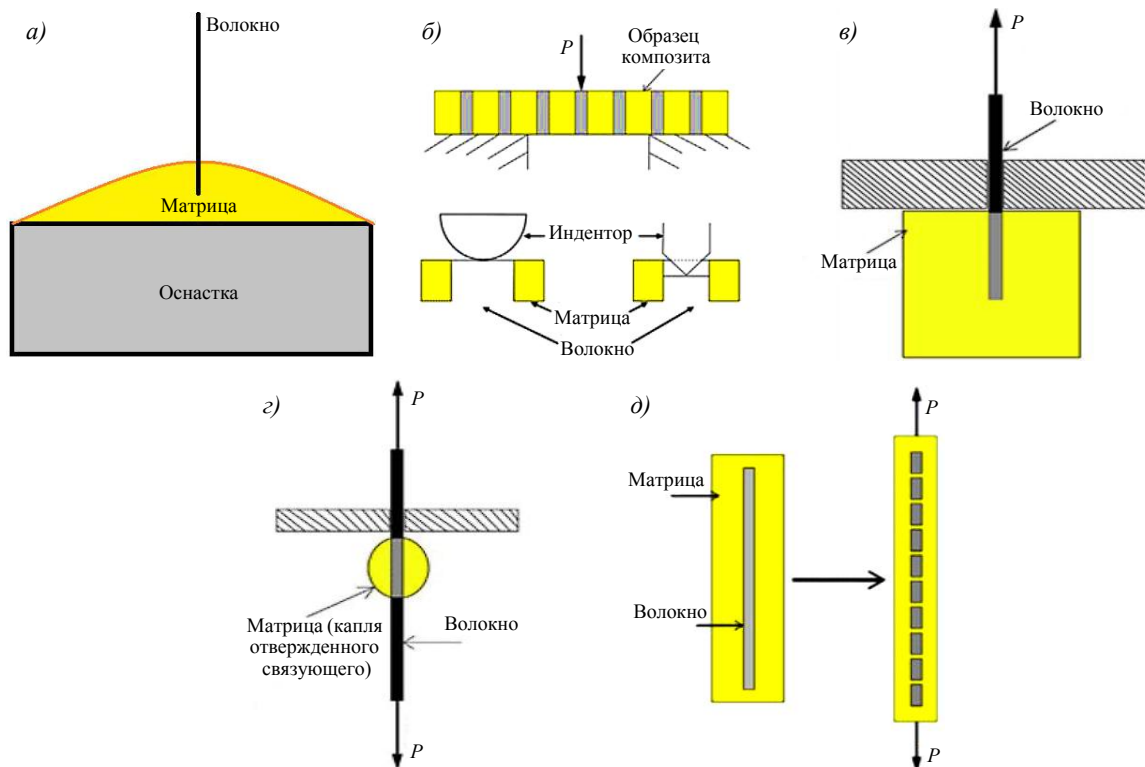


Рис. 1. Методы исследования адгезионной прочности: *pull out* (а), *push out* (б), вытягивание волокна из полимерного блока (в) и из капли полимера (г), фрагментация волокна (д) [13]

Наиболее распространенным методом для определения адгезионной прочности является метод *pull out*, который заключается в вытягивании филамента из микроблока отвержденного связующего (рис. 1, а) [15–20]. Однако, согласно работам [8, 21, 22], этот метод имеет существенный недостаток – разброс получаемых значений усложняет проведение статистической обработки данных и их интерпретацию, так как волокно имеет непостоянный диаметр, в результате чего площадь адгезионного контакта разная для каждого образца. Следует отметить, что изготовление образцов для испытания методом *pull out* – длительный и трудоемкий процесс [16–18]. Для проведения испытаний необходимо большое количество образцов, а подготовка одного образца занимает несколько часов. Кроме того, в большинстве случаев при испытании данным методом возможен как адгезионный, так и когезионный характер разрушения [18].

Для упрощения изготовления образцов и их испытаний в последнее время в Германии разработан специальный прибор, который действительно снижает трудоемкость процесса [16, 17]. Однако для проведения испытаний также требуется значительное количество образцов для набора статистических данных и их дальнейшей обработки. Отличительная особенность этого метода – формирование адгезионного контакта между углеродным волокном и полимерным связующим происходит без приложения давления, но определение площади контакта требует дополнительного анализа.

Углеродные волокна поставляются преимущественно в виде жгутов, поэтому для определения адгезионной прочности связи между матрицей и волокном применяют метод *full pull out*, в котором жгут из волокон вытягивают из блока связующего. Для

данного вида испытания требуется особая оснастка, а усилие вытягивания зависит от глубины погружения жгута из волокон в полимерное связующее [12].

Существует еще один широко распространенный метод исследования адгезионной прочности – *push out* (рис. 1, б) [13, 23], в котором при испытании происходит деформация моноволокна при сжатии. Подготовка образцов для испытаний сочетает несколько разных стадий, таких как изготовление образцов из ПКМ по заданному технологическому процессу, вырезка образцов определенного размера, шлифование образцов, а затем проведение испытаний на выдавливание моноволокна из блока связующего.

На стадии шлифования образцов можно повредить как матрицу, так и армирующий наполнитель, поэтому особое внимание уделяется позиционированию нанодентора – его необходимо располагать таким образом, чтобы он действовал на всю площадь филамента при его вдавливании из отвержденного связующего.

Методы вытягивания элементарной нити из полимерного блока (рис. 1, в), из капли связующего (рис. 1, г), а также дробления (фрагментации) волокна в матрице (рис. 1, д) не стандартизованы, однако широко используются во всем мире для определения адгезионной прочности.

К косвенным методам определения адгезионной прочности относят испытания [13] на межслойный сдвиг (рис. 2, а), межслоевую трещиностойкость по *модам* I (рис. 2, б) и II (рис. 2, в)

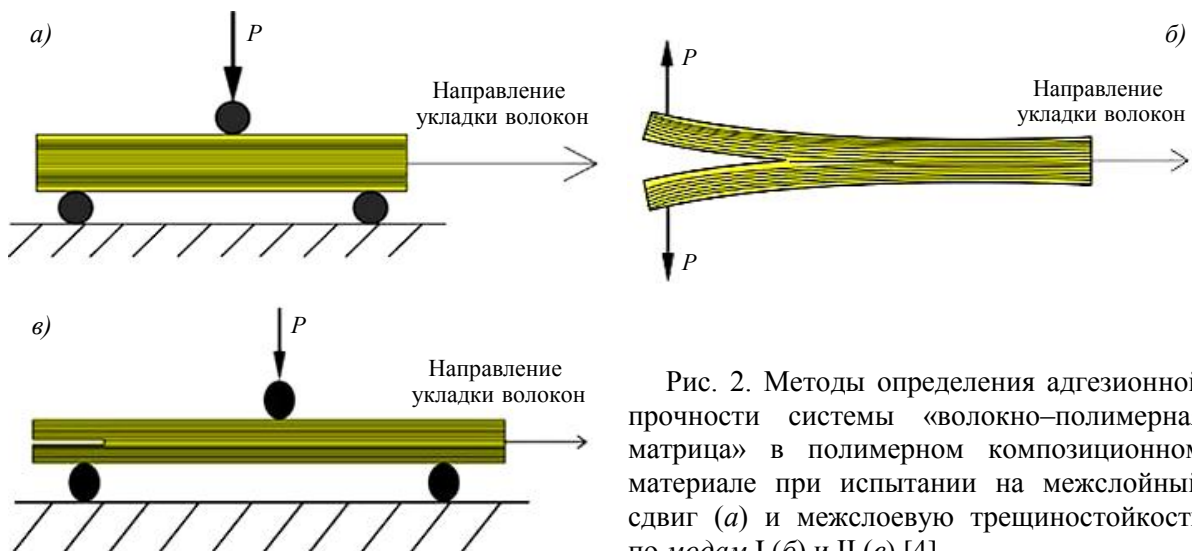


Рис. 2. Методы определения адгезионной прочности системы «волокно–полимерная матрица» в полимерном композиционном материале при испытании на межслойный сдвиг (а) и межслоевую трещиностойкость по *модам* I (б) и II (в) [4]

Метод определения свойств при испытании на межслойный сдвиг подразумевает изгиб образца с определенным соотношением длины и толщины. Однако данный метод не характеризует адгезионную прочность между волокном и матрицей в полной мере, потому что при испытании возникают и другие деформации помимо сдвига.

Испытание на межслоевую трещиностойкость заключается в исследовании распространения трещины по *модам* I (рис. 2, б) и II (рис. 2, в). При изготовлении образцов для данных методов испытания между слоями препрега закладывается дефект. Главное отличие между испытаниями по *модам* I и II – направление приложения нагрузки к образцам. При испытании по *моде* I происходит растяжение в разрывной машине. В случае испытания по *моде* II изгибающее напряжение прикладывается по центру образца, установленного на двух опорах. Следует отметить, что точка, в которой осуществляется приложение нагрузки, имеет важное значение, так как впоследствии необходимо правильно интерпретировать полученные данные.

Согласно работам [13, 22, 23], при испытаниях образцов основную нагрузку воспринимает матрица, а не армирующий наполнитель, поэтому данные методы определения адгезионной прочности системы «волокно–матрица» считаются косвенными.

Теоретические методы расчета адгезионной прочности постоянно совершенствуются [24, 25]. Так, процесс адгезионного разрушения анализируют с помощью метода конечных элементов [26], однако предпочтение всегда отдается экспериментальным данным.

Следует отметить, что применяются и другие методы определения адгезионной прочности между углеродным волокном и матрицей. Например, существует метод вытягивания углеродного волокна из «узла» [27, 28]. Данный метод использовался для испытания арамидных волокон. Показано, что адгезионная прочность для системы «эпоксидное связующее–арамидное волокно» (типа СВМ и Армос) приближается к когезионной прочности самих волокон, что позволяет использовать их для формирования узла при испытании других типов волокон. Однако в случае с углеродным волокном потребовалась модификация данного метода из-за особенностей свойств углеродного волокна. При испытании образцов согласно методу, приведенному в статьях [27, 28], происходит разрушение не адгезионной связи, а углеродного жгута из-за его высокого модуля упругости.

Цель данной работы:

- модификация существующего метода определения адгезионной прочности вытягиванием из «узла» с целью устранения существенных недостатков данного метода;
- определение адгезионной прочности между отечественными углеродными волокнами и эпоксидным связующим с помощью данного метода.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали отечественные углеродные волокна марок УМТ42S-3К-ЕР (далее – УВІ) и УМТ49S-12К-ЕР (далее – УВІІ) производства ООО «Алабуга-Волокно». В качестве эпоксидной матрицы использовано связующее ВСЭ-30, разработанное в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Основные свойства связующего и углеродных волокон приведены в табл. 1 и 2.

В качестве вспомогательного материала использован жгут Русар-НТ – волокно третьего поколения с рекордными показателями прочности среди современных арамидных нитей [29]. Основные свойства арамидного волокна приведены в табл. 3.

Таблица 1

**Основные свойства и характеристики связующего ВСЭ-30
(согласно ТУ 1-595-12-1451–2015)**

Свойства	Температура испытания, °С	Значения свойств
Время гелеобразования, мин	60	30
Кажущаяся вязкость по Брукфильду, Па·с:		
связующего	25±1	1,5–3,0
отвердителя	25±1	0,005–0,015
Температура стеклования отвержденного связующего, °С	–	Не менее 110
Время сохранения кажущейся вязкости связующего по Брукфильду менее 1 Па·с, мин	25±1	90
Температура отверждения, °С	–	120

Таблица 2

**Свойства углеродных волокон УВІ (согласно СТО-30371716-004–2017)
и УВІІ (согласно СТО-30371716-006–2017)**

Свойства	Номинальные значения для углеродного волокна	
	УВІ	УВІІ
Прочность при растяжении комплексной нити в микропластике, ГПа (не менее)	4,2	4,9
Модуль упругости при растяжении комплексной нити в микропластике, ГПа	240–270	250–270
Удлинение при разрыве комплексной нити в микропластике, % (не менее)	1,5	1,8
Номинальная линейная плотность нити с аппретом, текс	190	770
Плотность волокна, г/см ³	1,78±0,03	1,78±0,03
Массовая доля аппрета на нити, %	1,0–1,7	1,0–1,6

Таблица 3

**Основные свойства арамидного волокна Русар-НТ
(согласно ТУ 2272-014-18059169–2015)**

Свойства	Значения свойств
Плотность, г/см ³	1,45
Удельная разрывная нагрузка нити, сН/текс	290
Прочность при растяжении, ГПа	5,8–6
Модуль упругости, ГПа	165–175
Линейная плотность, текс	60

Для определения физико-механических свойств ПКМ использована стандартная разрывная машина с максимальным усилием 5 кН. Образцы испытывали в стандартных условиях по температуре и влажности.

Поверхность разрушения по границе раздела исследована с помощью оптического микроскопа.

Экспериментальная часть

Используемый метод испытания заключается в вытягивании углеродного жгута из адгезионной ячейки, которая формируется на испытываемом образце посредством затягивания на капле связующего, нанесенного на углеродное волокно, арамидного жгута с усилием 2,0 МПа. Одним из преимуществ данного метода является то, что в отличие от методов *pull out* и *push out* при испытании изготовленного образца происходит разрушение адгезионной связи между множеством элементарных волокон, что приближает данный метод к реальным условиям разрушения в ПКМ. Это позволяет сократить количество испытываемых образцов, необходимых для набора данных и проведения статистического расчета [28].

Схема формирования адгезионной ячейки представлена на рис. 3. Существующий метод вытягивания из «узла» усовершенствовали следующим образом:

– углеродный жгут пропускали через ванну с термореактивным эпоксидным связующим и наматывали на специальные рамки с заданной на пульте управления скоростью;

- для формирования адгезионной ячейки на пропитанный углеродный жгут, намотанный на рамку, наносили каплю того же связующего;
- далее затягивали узел из арамидного волокна согласно рекомендациям, которые приведены в научно-технической литературе [27, 28].

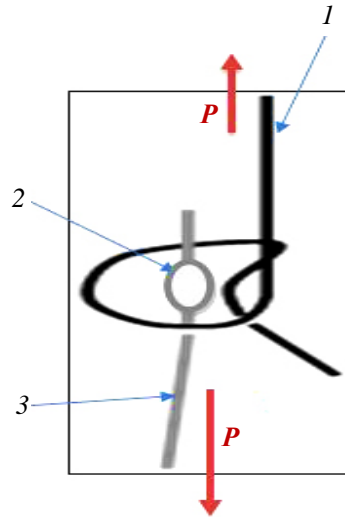


Рис. 3. Схема формирования адгезионной ячейки: 1 – арамидный жгут Русар-НТ; 2 – капля связующего; 3 – углеродное волокно

Для формирования узла использовали арамидное волокно Русар-НТ, так как оно имеет высокие прочностные показатели при растяжении, а в результате взаимодействия с эпоксидной смолой образцы на его основе демонстрируют когезионный характер разрушения вследствие диффузии связующего, как показано в работе [28]. Именно поэтому в случае применения модифицированного метода разрушение при испытании происходит на границе раздела «углеродное волокно–матрица». Для статистической обработки достаточно получения результатов испытаний выборки из 5–7 образцов.

Образцы отверждали в термошкафах согласно технологическому режиму для микропластиков на основе связующего ВСЭ-30.

По сравнению с методами *push out* и *pull out* усовершенствованный метод вытягивания из «узла» существенно проще, менее трудоемок, более технологичен. Следует отметить, что для испытания образцов требуются разрывные машины с усилием 1 кН, что также является преимуществом данного метода.

Площадь адгезионного контакта рассчитывали, исходя из объемной и линейной плотности используемых жгутов, согласно формуле (1), представленной в работе [25]:

$$S = \frac{2\pi}{\varphi} \sqrt{\frac{T_1 T_2}{\rho_1 \rho_2}}, \quad (1)$$

где ρ_1 и ρ_2 – объемные плотности углеродного жгута и арамидной нити соответственно; T_1 и T_2 – линейные плотности углеродного жгута и арамидной нити соответственно; степень наполнения (упаковки) – $\varphi = 0,81–0,87$ [27, 28, 30].

Значение степени упаковки φ принимали равным 0,87 в соответствии с данными, приведенными в источнике [18].

Согласно экспериментальным данным, линейная плотность углеродных волокон УВІ составила 182 текс, а УВІІ: 767 текс. Полученные результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Усилие затягивания и площадь контакта в узле для образцов с различной линейной плотностью жгутов

Параметр	Значения параметров для системы образцов							
	УВІ/Русар-НТ				УВІІ/Русар-НТ			
Условный номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
Соотношение линейной плотности волокон УВ/Русар-НТ, текс/текс	182/120	182/180	182/240	182/300	767/360	767/420	767/480	767/600
Усилие затягивания, Н	2,76	3,38	3,90	4,36	9,72	10,50	11,22	12,54
Площадь контакта в узле, мм ²	1,06	1,30	1,50	1,68	3,74	4,04	4,32	4,82

Полученные образцы с помощью клеевого состава закрепляют в накладки. На рис. 4 представлена фотография образца, помещенного в стандартную разрывную машину. Для фиксирования нагрузки использован датчик на усилие 1 кН.

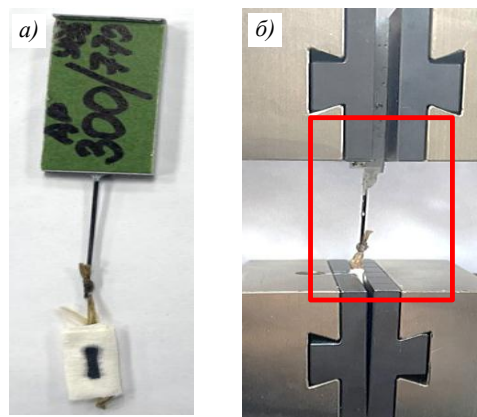


Рис. 4. Фотография образца из углеродного волокна УВІІ перед испытаниями (а) и в зажимах разрывной машины при испытании на растяжение (б)

Типичные кривые нагружения для образцов из углеродного волокна УВІ представлены на рис. 5.

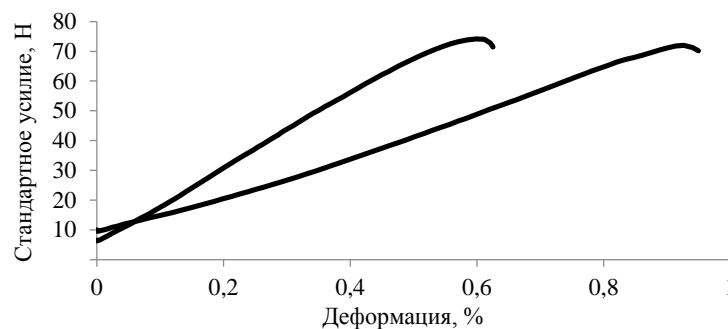


Рис. 5. Типичные кривые нагружения двух образцов из углеродного волокна УВІ с площадью контакта 1,06 мм² для системы УВІ/Русар-НТ (вариант 1, табл. 4)

Преднагрузка образца составляла 7–10 Н. По кривым нагружения отчетливо видно, что нагрузка при растяжении растет до максимального значения, затем происходит разрушение на границе адгезионного контакта и вытягивание из узла. Далее по формуле (2) рассчитывали адгезионную прочность:

$$\sigma = P/S, \quad (2)$$

где P – нагрузка, Н; S – площадь адгезионного контакта, мм².

Согласно работам [27, 28], значения деформации образцов разнятся из-за начального распрямления образца, который имеет некоторое отклонение относительно направления приложения нагрузки вследствие применения арамидного жгута для формирования узла. Деформацию образца не учитывают при расчете адгезионной прочности.

На рис. 6 представлены фотографии зоны адгезионного разрушения после испытания.

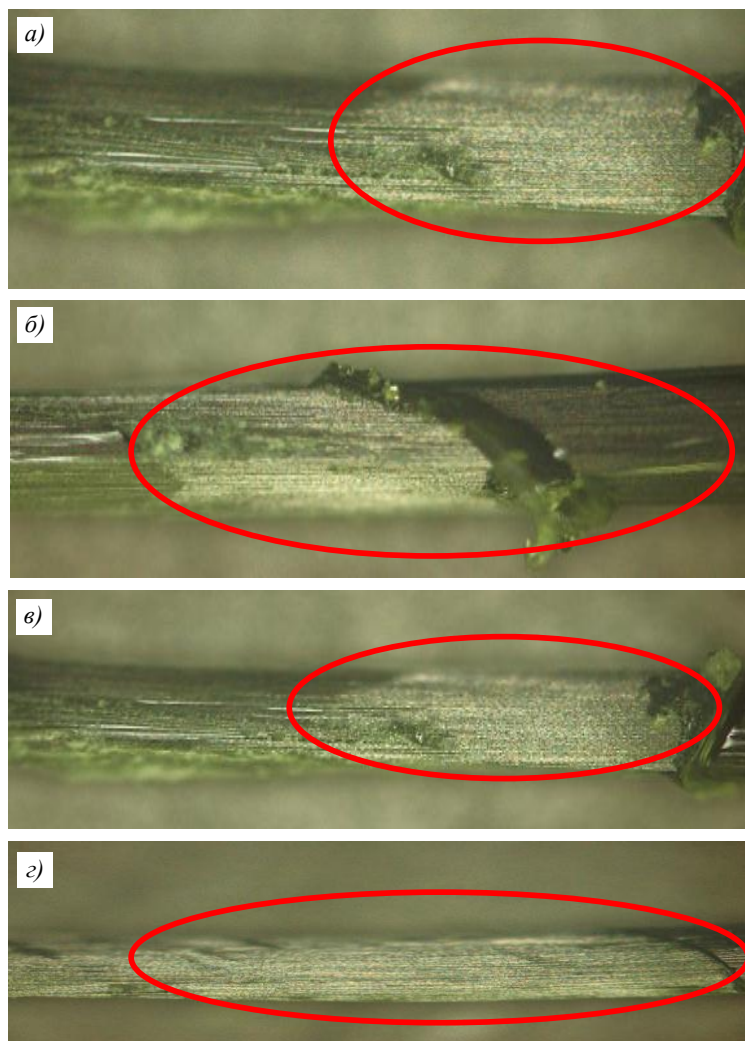


Рис. 6. Разрушение ($\times 50$) на границе раздела «углеродное волокно УВІ–матрица» с площадью контакта 1,06 (а); 1,30 (б); 1,50 (в) и 1,68 мм² (г)

Обсуждение и результаты

В табл. 5 и 6 приведены результаты испытаний углеродных волокон УВІ и УВІІ при различных схемах формирования адгезионной ячейки из арамидной нити.

Таблица 5

**Результаты определения адгезионной прочности углеродных волокон УВ1
с эпоксидным связующим ВСЭ-30**

Параметр	Значения параметра для системы УВ1/Русар-НТ			
	1	2	3	4
Условный номер варианта	1	2	3	4
Соотношение линейной плотности волокон УВ/Русар-НТ, текс/текс	180/120	180/180	180/240	180/300
Площадь контакта, мм ²	1,10	1,30	1,50	1,68
Адгезионная прочность*, МПа	$\frac{52,8-73,7}{63,3}$	$\frac{58,8-83,2}{73,3}$	$\frac{58,1-84,7}{73,4}$	$\frac{53,5-75,8}{66,1}$

*В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.

На рис. 7 представлена диаграмма значений адгезионной прочности углеродного волокна УВ1 с эпоксидным связующим ВСЭ-30 в зависимости от площади контакта.

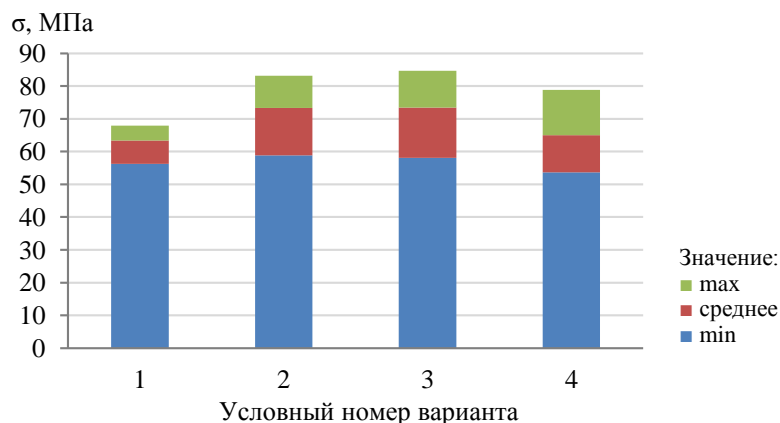


Рис. 7. Диаграмма значений адгезионной прочности углеродного волокна УВ1 с эпоксидным связующим ВСЭ-30 в зависимости от площади контакта

Отметим, что максимальные значения адгезионной прочности имеют образцы с близкими значениями линейной плотности. Разница между средними значениями адгезионной прочности для разных систем находится в пределах 15 %.

Таблица 6

**Результаты определения адгезионной прочности углеродных волокон УВ2
с эпоксидным связующим ВСЭ-30**

Параметр	Значения параметра для системы УВ2/Русар-НТ			
	5	6	7	8
Условный номер варианта	5	6	7	8
Соотношение линейной плотности волокон УВ/Русар-НТ, текс/текс	767/360	767/420	767/480	767/600
Площадь контакта, мм ²	3,74	4,04	4,32	5,18
Адгезионная прочность*, МПа	$\frac{55,5-73,1}{62,7}$	$\frac{52,6-71,4}{62,6}$	$\frac{57,7-67,4}{62,5}$	$\frac{47,5-78,6}{63,9}$

* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.

На рис. 8 представлена диаграмма значений адгезионной прочности углеродного волокна УВ2 с эпоксидным связующим ВСЭ-30 в зависимости от площади контакта.

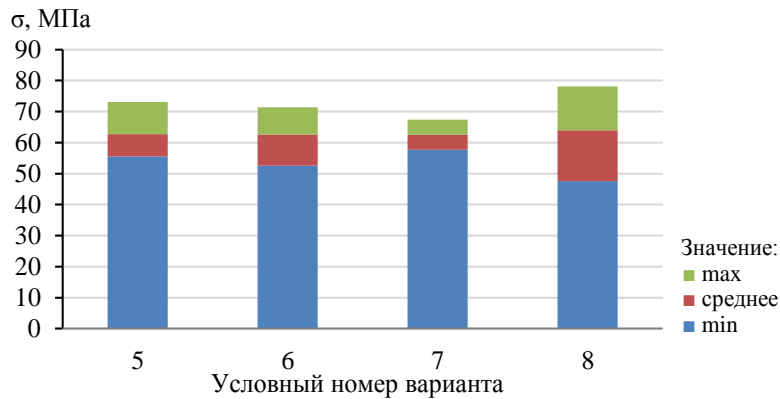


Рис. 8. Диаграмма адгезионной прочности углеродного волокна УВІ с эпоксидным связующим ВСЭ-30 в зависимости от площади контакта

Согласно полученным данным, можно сделать вывод, что средние значения адгезионной прочности отличаются для различных систем не более чем на 5 %.

Заключения

В данной работе усовершенствован метод определения адгезионной прочности вытягиванием из «узла» и получены образцы для испытаний с одновременным изготовлением микропластиков.

Для углеродного волокна УВІ среднее значение адгезионной прочности с эпоксидной матрицей находится в интервале от 63,3 до 74,4 МПа, для углеродного волокна УВІІ – в интервале от 62,6 до 66,2 МПа.

Авторами статей [19–21] проведены испытания методом выдергивания углеродного волокна из эпоксидной матрицы, отвержденной аминным отвердителем. Прочность адгезионного контакта между углеродным волокном и эпоксидной матрицей, определенная по методу *pull out*, составляет 48–81 МПа [19–21]. Согласно данным статьи [31], прочность при межслойном сдвиге образца углепластика на основе связующего ВСЭ-30 и российского углеродного волокна составляет 46 МПа. Данное значение меньше, чем результаты, полученные с помощью метода вытягивания из «узла». Это может быть связано с тем, что в процессе испытания в ПКМ действуют не только сдвиговые напряжения, но и изгибающие.

Таким образом, усовершенствованный метод вытягивания из «узла» можно использовать для определения адгезионной прочности системы «углеродное волокно–эпоксидная матрица».

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»). Работа выполнена при содействии ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Рудской А.И. Технологическая наследственность при производстве и эксплуатации конструкционных материалов // Технология металлов. 2019. № 2. С. 2–10.

3. Давыдова И.Ф., Каблов Е.Н., Кавун Н.С. Термостойкие негорючие полиимидные стеклотекстолиты для изделий авиационной и ракетной техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. № 7. С. 2–11.
4. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
5. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение терморезактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.08.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
6. Хрульков А.В., Донецкий К.И., Мельников Д.А., Клименко О.Н., Славин А.В. Липкость препрегов как функция различных параметров при выкладке заготовок деталей и образцов из полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2025. № 3 (145). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.04.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-33-46.
7. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2 (71). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
8. Ерасов В.С., Сibaев И.Г. Схема разработки и оценки свойств конструкционных авиационных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-61-81.
9. Вешкин Е.А. Технологии безавтоклавного формования низкопористых полимерных композиционных материалов и крупногабаритных конструкций из них: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 146 с.
10. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Панина Н.Н. и др. Перспективные полимерные материалы для конструкционных композиционных изделий с энергоэффективным режимом формования // Пластические массы. 2020. № 3–4. С. 52–54.
11. Ткачук А.И., Любимова А.С., Кузнецова П.А. Перспективы развития эпоксидных смол на растительной основе (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 8 (114). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-8-49-64.
12. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Терморезактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 3 (56). С. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
13. Гуляев А.И. Измерение адгезионной прочности «волокно–матрица» с применением нанометрирования (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-68-78.
14. Жандаров С.Ф., Писанова Е.В., Довгяло В.А. Измерение адгезии углеродных и стеклянных волокон к термопластичным полимерам методом растяжения композита с единичным волокном // Пластические массы. 1997. № 2. С. 6–8.
15. Нелюб В.А., Гуськов А.М., Белов П.А. К проектированию углепластиков на растяжение с учетом адгезии волокна к матрице // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. № 12-1. С. 62–66.
16. Нелюб В.А. Экспериментальная оценка модуля упругости адгезионной связи системы эпоксидная матрица – углеродное волокно с металлическим покрытием // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 6. С. 96–100.
17. Borodulin A.S., Nelyub V.A., Malysheva G.V. et al. Strength of the Polymer–Fiber Interface in Structural Composite Materials // Russian Metallurgy (Metally). 2023. Vol. 13. P. 2155–2159.
18. Горбаткина Ю.А. Адгезионная прочность в системах полимер-волокно. М.: Химия, 1987. 192 с.

19. Горбаткина Ю.А., Журавлева О.А., Иванова-Мумжиева В.Г., Чеботарев В.П. Влияние молекулярной массы полисульфона на адгезию эпоксиполисульфоновых связующих к волокнам // Пластические массы. 2017. № 5–6. С. 14–17.
20. Сергеев А.Ю., Турусов Р.А., Баурова Н.И. Определение адгезионной прочности соединений на примере испытаний образцов методом выдерживания волокон из матрицы // Композиты и наноструктуры. 2017. № 1. С. 52–62.
21. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Уткин Д.А. Методы определения механических характеристик материалов с помощью индентирования (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.
22. Ерасов В.С., Сибяев И.Г., Сутубалов А.И., Попкова Е.А., Горбовец М.А. Методики механических испытаний по определению прочности углеродных волокон // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 02.04.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-137-148.
23. Гуляев А.И., Ерасов В.С., Орешко Е.И., Уткин Д.А. Анализ разрушения углепластика при выталкивании мультифиламентного цилиндра // Клеи. Герметики. Технологии. 2021. № 1. С. 28–35.
24. Hardiman M., Vaughan T.J., McCarthy C.T. The effect of fibre constraint in the nanoindentation of fibrous composite microstructures: A finite element investigation // Computational Materials Science. 2012. Vol. 64. P. 162–167.
25. Hu Z., Farahikia M., Delfanian F. Fiber bias effect on characterization of carbon fiber-reinforced polymer composites by nanoindentation testing and modeling // Journal of Composite Materials. 2015. Vol. 49. P. 3359.
26. Bechel V.T., Sottos N.R. A comparison of calculated and measured debond lengths from fiber push-out tests // Composites Science and Technology. 1998. Vol. 58. P. 1727–1739.
27. Котомин С.В., Обидин И.М., Павлючкова Е.А. Расчет прочности адгезионной связи армирующих волокон с полимерами по методу «петли» // Механика композитных материалов. 2022. Т. 58. № 1. С. 197–212.
28. Котомин С.В., Обидин И.М., Павлючкова Е.А. Масштабный фактор при испытании адгезионно-клеевых соединений гетероарамидных нитей методом «петли» // Клеи. Герметики. Технологии. 2023. № 11. С. 35–40.
29. Железина Г.Ф., Тихонов И.В., Черных Т.Е. и др. Арамидные волокна третьего поколения Русар НТ для армирования органотекстолитов авиационного назначения // Пластические массы. 2019. № 3–4. С. 43–46.
30. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 380 с.
31. Донецкий К.И., Караваев Р.Ю., Раскутин А.Е., Дун В.А. Углепластик на основе объемно-армирующей триаксиальной плетеной преформы // Труды ВИАМ. 2019. № 1 (73). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-55-63.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Rudskoy A.I. Technological heredity in the production and operation of structural materials. *Tekhnologiya metallov*, 2019, no. 2, pp. 2–10.
3. Davydova I.F., Kablov E.N., Kavun N.S. Heat-resistant non-flammable polyimide fiberglass laminates for aviation and rocketry products. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2009, no. 7, pp. 2–11.
4. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Report of XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.

5. Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: August 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
6. Khrulkov A.V., Donetsky K.I., Melnikov D.A., Klimenko O.N., Slavin A.V. Prepreg tack as a function of various parameters during laying out blanks of parts and samples from polymer composite materials. *Trudy VIAM*, 2025, no. 3 (145), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 04, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-33-46.
7. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for aviation industry (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144.
8. Erasov V.S., Sibayev I.G. Scheme for the development and evaluation of properties of structural aviation composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-61-81.
9. Veshkin E.A. *Technologies for non-autoclave molding of low-porosity polymer composite materials and large-sized structures made from them*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2016, 146 p.
10. Kogan D.I., Chursova L.V., Panina N.N. et al. Promising polymer materials for structural composite products with energy-efficient molding mode. *Plasticheskie massy*, 2020, no. 3–4, pp. 52–54.
11. Tkachuk A.I., Lyubimova A.S., Kuznetcova P.A. Opportunities of the development of plant-based epoxy resins (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-8-49-64.
12. Mukhametov R.R., Petrova A.P. Thermosetting binders for polymer composites (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 3 (56), pp. 48–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58.
13. Gulyayev A.I. Fiber-matrix adhesion strength measurement using nanoindentation (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-68-78.
14. Zhandarov S.F., Pisanova E.V., Dovgyalo V.A. Measuring the adhesion of carbon and glass fibers to thermoplastic polymers by stretching a composite with a single fiber. *Plasticheskie massy*, 1997, no. 2, pp. 6–8.
15. Nelyub V.A., Guskov A.M., Belov P.A. Towards the design of carbon fiber reinforced plastics for tension taking into account the adhesion of the fiber to the matrix. *Aktualnye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*, 2014, no. 12-1, pp. 62–66.
16. Nelyub V.A. Experimental assessment of the modulus of elasticity of the adhesive bond of the epoxy matrix – carbon fiber with metal coating system. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2019, no. 6, pp. 96–100.
17. Borodulin A.S., Nelyub V.A., Malysheva G.V. et al. Strength of the Polymer–Fiber Interface in Structural Composite Materials. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, vol. 13, pp. 2155–2159.
18. Gorbatkina Yu.A. *Adhesive strength in polymer-fiber systems*. Moscow: Khimiya, 1987, 192 p.
19. Gorbatkina Yu.A., Zhuravleva O.A., Ivanova-Mumzhiyeva V.G., Chebotarev V.P. The influence of the molecular weight of polysulfone on the adhesion of epoxy polysulfone binders to fibers. *Plasticheskie massy*, 2017, no. 5–6, pp. 14–17.
20. Sergeev A.Yu., Turusov R.A., Baurova N.I. Determination of the adhesive strength of joints using the example of testing samples by pulling fibers out of the matrix. *Kompozity i nanostruktury*, 2017, no. 1, pp. 52–62.
21. Oreshko E.I., Erasov V.S., Yakovlev N.O., Utkin D.A. Methods for determining the mechanical characteristics of materials using indentation (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.

22. Erasov V.S., Sibayev I.G., Sutubalov A.I., Popkova E.A., Gorbovets M.A. Methods of mechanical testing to determine the strength of carbon fibers. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: April 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-137-148.
23. Gulyaev A.I., Erasov V.S., Oreshko E.I., Utkin D.A. Analysis of the destruction of carbon fiber when pushing out a multifilament cylinder. *Plasticheskie massy*, 2021, no. 1, pp. 28–35.
24. Hardiman M., Vaughan T.J., McCarthy C.T. The effect of fibre constraint in the nanoindentation of fibrous composite microstructures: A finite element investigation. *Computational Materials Science*, 2012, vol. 64, pp. 162–167.
25. Hu Z., Farahikia M., Delfanian F. Fiber bias effect on characterization of carbon fiber-reinforced polymer composites by nanoindentation testing and modeling. *Journal of Composite Materials*, 2015, vol. 49, p. 3359.
26. Bechel V.T., Sottos N.R. A comparison of calculated and measured debond lengths from fiber push-out tests. *Composites Science and Technology*, 1998, vol. 58, pp. 1727–1739.
27. Kotomin S.V., Obidin I.M., Pavlyuchkova E.A. Calculation of the strength of the adhesive bond of reinforcing fibers with polymers using the «loop» method. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2022, vol. 58, no. 1, pp. 197–212.
28. Kotomin S.V., Obidin I.M., Pavlyuchkova E.A. Scale factor when testing adhesive-adhesive joints of heteroaramid threads using the «loop» method. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2023, no. 11, pp. 35–40.
29. Zhelezina G.F., Tikhonov I.V., Chernykh T.E. et al. Third generation aramid fibers Rusar NT for reinforcing organotextolites for aviation purposes. *Plasticheskie massy*, 2019, no. 3–4, pp. 43–46.
30. Perepelkin K.E. *Reinforcing fibers and fibrous polymer composites*. St. Petersburg: Scientific principles and technologies, 2009, 380 p.
31. Donetskii K.I., Karavayev R.Yu., Raskutin A.Ye., Dun V.A. Carbon fibers composite material on the basis of volume reinforcing triax braiding preforms. *Trudy VIAM*, 2019, no. 1 (73), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 12, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-55-63.

Информация об авторах

Иваньков Роман Русланович, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru; аспирант, МГТУ им. Н.Э. Баумана, bauman@bmstu.ru

Сидорина Александра Игоревна, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Котомин Сергей Владимирович, профессор, д.х.н., МГТУ им. Н.Э. Баумана, bauman@bmstu.ru

Information about the authors

Roman R. Ivankov, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru; Graduate Student, Bauman Moscow State Technical University, bauman@bmstu.ru

Aleksandra I. Sidorina, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Sergey V. Kotomin, Professor, Doctor of Science (Chem.), Bauman Moscow State Technical University, bauman@bmstu.ru

Статья поступила в редакцию 05.08.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 01.09.2025.

The article was submitted 05.08.2025; approved and accepted for publication after reviewing 01.09.2025.