

Научная статья

УДК 539.612

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-181-194

ПОДХОДЫ К АНАЛИЗУ ПЛОЩАДИ АДГЕЗИОННОГО КОНТАКТА ПРИ ИСПЫТАНИИ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ВЫТЯГИВАНИЯ ИЗ «УЗЛА» Часть 1

Р.Р. Иванов¹, А.И. Гуляев¹

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

Аннотация. Проанализирована площадь контакта при испытании образцов модифицированным методом вытягивания из «узла». Получены значения адгезионной прочности между отечественным углеродным волокном UMT42S-3K и эпоксидным связующим ВСЭ-30 усовершенствованным методом вытягивания из «узла» и эталонным методом pull out. Исследован коэффициент плотности упаковки наполнителя в микропластике с помощью сканирующего электронного микроскопа. На микроразрывной машине определены значения прочности углеродных моноволокон.

Ключевые слова: оптический микроскоп, адгезия, прочность, углеродные волокна, эпоксидное связующее, сканирующий электронный микроскоп

Для цитирования: Иванов Р.Р., Гуляев А.И. Подходы к анализу площади адгезионного контакта при испытании модифицированным методом вытягивания из «узла». Часть 1 // Труды ВИАМ. 2026. № 8 (162). С. 181–194. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-181-194.

Scientific article

APPROACHES TO THE ANALYSIS OF THE ADHESIVE CONTACT AREA WHEN TESTING USING A MODIFIED PULL-OUT METHOD FROM A «LOOP-KNOT» Part 1

R.R. Ivankov¹, A.I. Gulyaev¹

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

Abstract. The contact area was analyzed during the testing of samples using the modified pull-out method from a «knot». The adhesive strength between the domestic carbon fiber UMT42S-3K and the epoxy binder VSE-30 was obtained using the improved pull-out method from a “knot” and the reference pull-out method. The packing density coefficient of the filler in microplastic was investigated using a scanning electron microscope. The strength of carbon monofilaments was determined using a microtensile testing machine.

Keywords: optical microscope, adhesion, strength, carbon fibers, epoxy binder, scanning electron microscope

For citation: Ivankov R.R., Gulyaev A.I. Approaches to the analysis of the adhesive contact area when testing using a modified pull-out method from a «loop-knot». Part 1. *Trudy VIAM*, 2026, no. 8 (162), pp. 181–194. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-8-181-194.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется разработке и производству конструкций и изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Это связано с их уникальными упруго-прочностными и физико-химическими свойствами. Поэтому ПКМ получили широкое распространение в области производства авиационной и космической техники [1–3].

Наиболее широко распространенным типом связующих являются эпоксидные смолы, которые на протяжении долгого времени модифицируются разными способами [4–12]. Согласно работе [12], существуют три разных способа модификации: химическая, физическая и физико-химическая.

В XXI в. широкое распространение при производстве авиационной техники получили углеродные волокна, которые обладают уникальными прочностными и физико-химическими свойствами. Следует отметить, что поверхность углеродных волокон можно модифицировать несколькими способами, которые описаны в работах [13–20].

При разработке современных видов армированных угле- и стеклопластиков ученые и инженеры уделяют особое внимание адгезии и граничным слоям [21]. Это связано с тем, что, управляя свойствами граничного слоя, можно повысить уровень физико-механических свойств изделий из ПКМ.

Существуют несколько способов определения адгезионной прочности [21–25]. Наиболее часто используемыми прямыми (микромеханическими) методами определения адгезионной прочности в системе «волокно–полимерная матрица» являются методы pull out и push out, образцы для которых представлены на рис. 1.

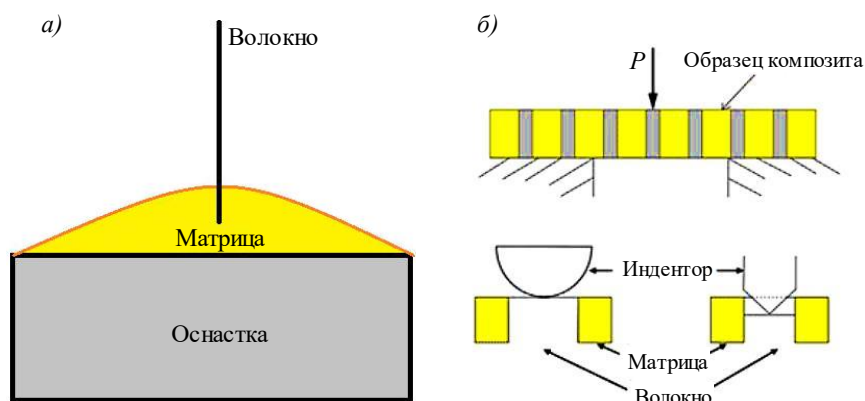


Рис. 1. Методы определения адгезионной прочности в системе «волокно–полимерная матрица»: а – pull out; б – push out (P – нагрузка) [21, 22, 24]

Проведение испытаний методом pull out подразумевает вытягивание моноволокна из блока или капли связующего. В случае метода push out моноволокно выталкивается или выдавливается из образца ПКМ определенной толщины. В России наиболее широкое распространение получил метод pull out [26–28]. Однако метод push out достаточно долго используется в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [22, 23, 29]. Следует отметить, что при подготовке образцов к испытаниям оба метода требуют повышенного внимания со стороны высококвалифицированного персонала. В Германии разработан специальный прибор, который позволяет снизить влияние человеческого фактора на качество образцов для исследования методом pull out. Он позволяет работать с материалами, которые плавятся в широком диапазоне температур – от 25 до 400 °С.

Для преодоления сложностей, возникающих при подготовке образцов к испытаниям, авторы работ [30, 31] предложили способ определения адгезионной прочности с помощью вытягивания волокон из «узла». Однако он предназначен исключительно для жгута из арамидных нитей и для обеспечения возможности испытаний углеродных волокон нуждается в модификации. Необходимость модификации данного метода, предложенная в работе [21], связана с тем, что углеродные волокна, по сравнению с арамидными, имеют больший модуль упругости. В ходе испытания на разрывной машине данное свойство негативно влияет на процесс определения величины адгезионной прочности. Углеродное волокно можно повредить как в момент затягивания зажимов, так и в процессе движения траверсы, так как оно не пропитано эпоксидным связующим.

В целях исключения перечисленных недостатков в работе [21] впервые предложен новый подход к созданию образцов:

- на специальной установке по изготовлению микропластиков углеродный жгут пропускают через ванну с термореактивным эпоксидным связующим и наматывают на рамки с заданной на пульте управления скоростью;
- для формирования адгезионной ячейки на пропитанный углеродный жгут, намотанный на рамку, наносят каплю того же связующего;
- в месте, куда была нанесена капля связующего, затягивают узел из арамидного волокна.

Именно с помощью метода, представленного в работах [21, 24], получены значения адгезионной прочности в системе «волокно–полимерная матрица», которые коррелируют с данными, зафиксированными методом pull out. Однако данный показатель определяется согласно формуле, приведенной в работах [30, 31], поэтому для точной оценки значений адгезионной прочности необходимо грамотно подойти к анализу и выбору метода определения зоны адгезионного контакта.

Материалы и методы

Для получения образцов модифицированным методом вытягивания из «узла» использовали эпоксидное связующее ВСЭ-30 производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, основные характеристики которого подробно описаны в работе [32].

В качестве углеродных наполнителей выбраны отечественные волокна марки УМТ42S-3К (табл. 1).

Таблица 1

Основные характеристики высокопрочных углеродных волокон марки УМТ42S-3К

Показатель	Номинальные значения показателей
Линейная плотность, текс	190
Прочность при растяжении, МПа	4200
Модуль упругости, ГПа	240–270
Относительное удлинение, %	≥1,5
Содержание аппрета на нити, % (по массе)	1,0–1,7
Плотность волокна, г/см ³	1,78±0,03
Тип аппрета	Эпоксидный

Для затягивания «узла» выбраны волокна Русар-НТ, которые обладают высокими показателями прочности при растяжении, а также адгезии с эпоксидными связующими (табл. 2).

Основные характеристики арамидного жгута Русар-НТ

Показатель	Значения показателей
Плотность, г/см ³	1,48
Удельная разрывная нагрузка нити, сН/текс	290
Прочность при растяжении, ГПа	5,8–6,0
Модуль упругости, ГПа	165–175
Удлинение при разрыве, %	2,0
Линейная плотность, текс	60

Для определения адгезионной прочности связи при испытании методом вытягивания из «узла» использовали стандартную разрывную машину с нагрузкой 1 кН.

Для определения адгезионной прочности эпоксидной матрицы по отношению к углеродному волокну использовали усовершенствованный метод вытягивания из «узла» [21, 24]. В качестве сравнительного метода выбран метод pull out.

Для определения адгезионной прочности зачастую используется формула [25, 26]

$$\tau = P/S, \quad (1)$$

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

С целью определения объемной доли волокон в образцах микропластика проводили исследование микрошлифов на конфокальном сканирующем лазерном микроскопе. Планарную съемку поверхности образцов осуществляли с применением объектива с увеличением $\times 50$ (общее увеличение микроскопа $\times 1180$) в режиме совмещения полей зрения (панорама 2×1 , общая площадь полей зрения $\sim (485 \times 255)$ мкм²). Объемную долю волокон определяли с применением специализированного программного обеспечения для анализа и обработки изображений. Определение данной величины в микропластике при исследовании микрошлифа основано на световом контрасте между углеродными волокнами и полимерной матрицей. Проводили операцию бинаризации, в результате которой исходное изображение в оттенках серого переводится в бинарное (черно-белое) изображение. Для этого на гистограмме интенсивности оттенков серого выставляли минимальный порог бинаризации между пиками, соответствующими структурным составляющим материала. Объемную долю волокон определяли путем вычисления отношения площади изображения, занимаемой поперечными сечениями волокон, ко всей площади поля зрения [33].

Результаты и обсуждение

Формула для расчета площади адгезионного контакта в случае испытания методом pull out должна выводиться из формул расчета площадей боковой и нижней граней цилиндра:

$$S = 2\pi Rl + \pi R^2, \quad (2)$$

где R – радиус моноволокна, мкм; l – длина соединения, мкм.

Однако в случае испытания микромеханическим методом вытягивания филамента из блока связующего пренебрегают расчетом площади основания цилиндра. Это связано с тем, что моноволокно можно отрезать неровно и получить неправильное сечение.

Именно поэтому площадь адгезионного контакта в случае испытаний методом pull out рассчитывается по формуле [27]

$$S = \pi dl, \quad (3)$$

где d – диаметр моноволокна, мкм.

Ограничивающим фактором длины соединения l является критическая длина моноволокна, которая определяется по формуле

$$l_{кр} = \sigma_b d / 2\tau, \quad (4)$$

где σ_b – прочность углеродного волокна при растяжении, МПа; τ – адгезионная прочность на границе раздела «волокно–полимерная матрица», МПа.

Согласно данным, полученным в работе [24], среднее значение адгезионной прочности при сдвиге τ на границе раздела «волокно–полимерная матрица» для связующего ВСЭ-30 и углеродного волокна марки UMT42S-3K составляет 70 МПа.

Для определения $l_{кр}$ проведены испытания на специальной машине [34] с точностью до 0,01 сН согласно ГОСТ Р 57407–2017 (табл. 3).

Таблица 3

**Относительное удлинение, прочность при растяжении
и диаметр углеродного моноволокна**

Условный номер испытаний	Относительное удлинение ξ , %	Прочность при растяжении σ_b , МПа	Диаметр d , мкм
1	1,44	3809	6,52
2	1,52	3856	6,69
3	1,47	3879	6,26
4	1,51	3887	6,74
5	1,49	3919	6,11
6	1,48	4012	6,28
7	1,55	4038	6,17
8	1,53	4077	6,66
9	1,61	4113	6,81
10	1,55	4122	6,91
11	1,56	4135	6,60
12	1,62	4160	6,72
13	1,57	4160	6,48
14	1,60	4175	6,73
15	1,61	4197	6,99
16	1,60	4209	6,99
17	1,61	4256	6,74
18	1,57	4266	6,07
19	1,67	4269	7,15
20	1,68	4278	6,43
21	1,63	4308	6,86
22	1,63	4343	6,91
23	1,69	4415	6,44
24	1,69	4451	6,25
25	1,79	4492	7,23
26	1,70	4555	6,67
27	1,71	4582	6,21
28	1,74	4583	6,15
29	1,75	4595	6,22
30	1,75	4654	6,50
Среднее значение	1,61	4227	6,58
Среднее отклонение	0,09	239	0,32
Коэффициент вариации CV, %	5,72	6	4,90

Таким образом, для данного углеродного волокна $l_{кр} = 200$ мкм. Это критическая длина погружения моноволокна в блок связующего при испытании методом pull out.

Подготовку образцов для испытаний методом pull out проводили согласно ISO 19875:2024. С помощью специального прибора [34] методом pull out получены результаты, представленные в табл. 4. В отличие от данных, приведенных в работах [21, 24], усилие при затягивании узла не контролировали.

Таблица 4

**Адгезионная прочность системы «волокно–полимерная матрица»
при измерении методом pull out**

Условный номер испытаний	Площадь контакта $S \cdot 10^3, \text{мм}^2$	Адгезионная прочность τ , МПа
1	0,61	130,9
2	0,84	100,0
3	0,92	97,0
4	0,99	87,5
5	1,05	86,8
6	1,03	89,9
7	1,04	94,8
8	1,23	97,1
9	1,57	101,8
10	1,59	78,2
11	1,62	77,2
12	1,71	83,3
13	1,92	77,2
14	1,95	79,6
15	1,78	75,3
16	1,27	91,0
17	1,21	89,2
18	1,25	89,9
Среднее значение	—	90,4
Среднее отклонение		13,0
Коэффициент вариации CV, %		14,4

Согласно работам [25–28], усилие вытягивания и адгезионную прочность необходимо представлять в виде зависимости от площади контакта. Результаты определения значений площади представляют в виде $S \cdot 10^3$.

В случае испытания методом pull out при увеличении площади контакта адгезионная прочность снижается (рис. 2), что совпадает с данными работ [25–28]. Таким образом, значение адгезионной прочности, полученное методом pull out для данной системы на участке площадью от 0,0006 до 0,0012 мм², составило 90,4 МПа.

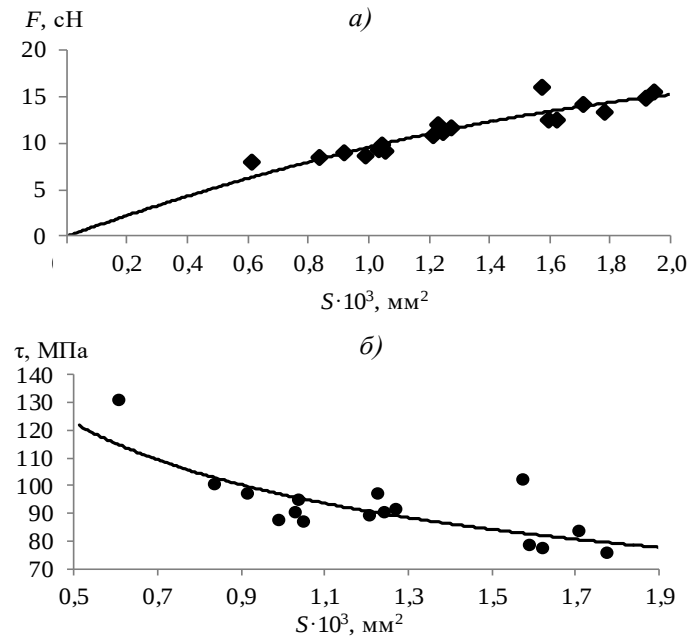


Рис. 2. Зависимости усилия вытягивания F (а) и адгезионной прочности τ (б) от площади контакта S в системе «волокно–полимерная матрица»

Площадь адгезионного контакта для определения прочности при сдвиге при испытании усовершенствованным методом вытягивания из «узла» рассчитывается по формуле [30]

$$S = \frac{\pi^2}{\varphi} \sqrt{\frac{T_1 T_2}{\rho_1 \rho_2}}. \quad (5)$$

Данное выражение следует из формул, представленных в статье [30]:

$$D_1 = 2 \sqrt{\frac{T_1}{\varphi \rho_1}}, \quad (6)$$

$$D_2 = 2 \sqrt{\frac{T_2}{\varphi \rho_2}}, \quad (7)$$

где D_1 , D_2 – диаметр испытываемого материала и охватывающей его комплексной нити соответственно; T_1 , T_2 – линейная плотность испытываемого материала и охватывающей его комплексной нити соответственно; ρ_1 , ρ_2 – объемная плотность испытываемого материала и охватывающей его комплексной нити соответственно; φ – коэффициент, характеризующий плотность упаковки цилиндрических нитей в жгуте [31].

Следует отметить, что коэффициент φ определяется согласно графику, который представлен в работах [31, 35]. Данный коэффициент при содержании нитей в жгуте >3000 практически не изменяется и составляет 0,87 [35].

Значения площади адгезионного контакта, рассчитанные по формуле (5), представлены в табл. 5.

Плотность упаковки филаментов в микропластике может сильно отличаться от данных научно-технической литературы [35]. Можно предположить, что это связано с повышенным содержанием связующего и неправильной формой углеродных моноволокон [23]. Для определения параметра φ сделаны снимки микропластиков при помощи конфокального сканирующего лазерного микроскопа (рис. 3).

**Напряжение, адгезионная прочность и удлинение образцов
с теоретически рассчитанными площадями контакта**

Площадь контакта S , мм ²	Условный номер испытаний	Напряжение P , Н	Удлинение ξ , мм	Адгезионная прочность τ , МПа
1,28	1	104,8	0,54	81,9
	2	101,9	0,50	79,6
	3	100,2	0,41	78,2
	4	98,9	0,38	77,3
	5	110,8	0,46	86,6
	6	105,3	0,40	82,3
	Среднее значение	–	–	81,0
	Среднее отклонение			3,4
	Коэффициент вариации CV , %			4,2
1,48	7	106,3	0,44	71,9
	8	129,5	0,45	87,5
	9	121,2	0,49	81,9
	10	121,8	0,52	82,3
	11	125,7	0,46	84,9
	12	117,7	0,70	79,5
	Среднее значение	–	–	81,3
	Среднее отклонение			5,4
	Коэффициент вариации CV , %			6,6
1,66	13	122,3	0,47	73,7
	14	107,1	0,43	64,5
	15	127,3	0,42	76,7
	16	113,2	0,51	68,2
	17	120,4	0,43	72,5
	18	112,6	0,31	67,8
	Среднее значение	–	–	70,6
	Среднее отклонение			4,5
	Коэффициент вариации CV , %			6,4

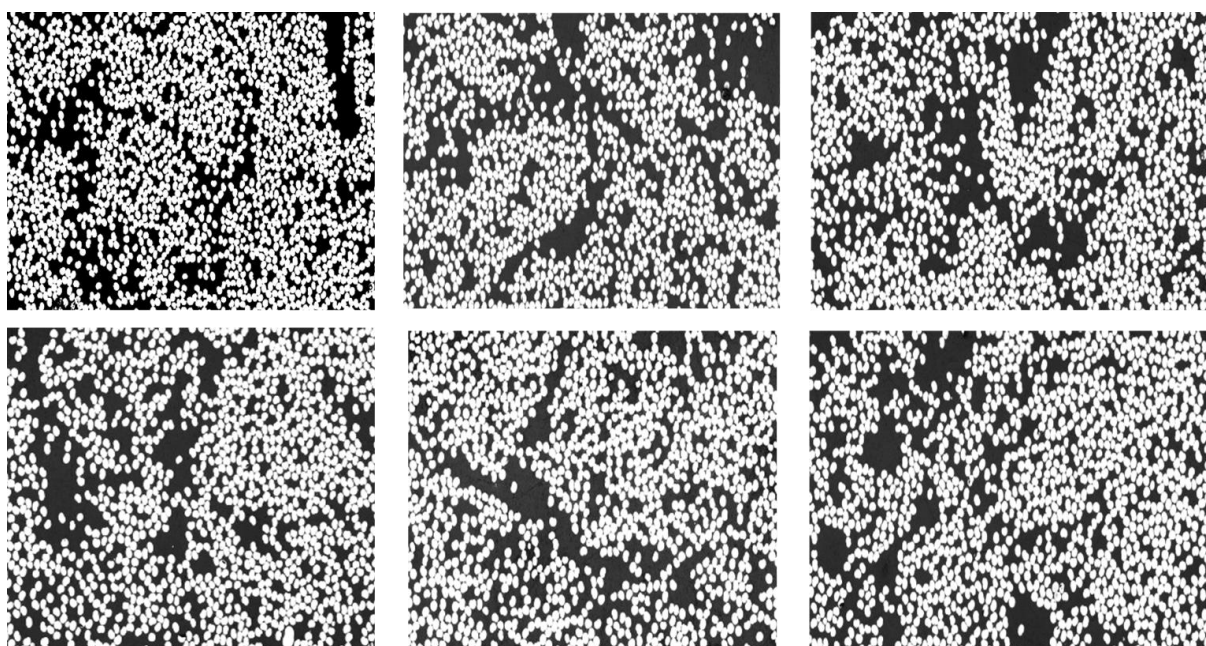


Рис. 3. Моноволокна в объеме микропластика

С использованием описанного метода определения коэффициента ϕ микропластика получены результаты, представленные в табл. 6.

Таблица 6

Коэффициент плотности упаковки филаментов в микропластике

Условный номер испытаний	Коэффициент плотности упаковки филаментов в микропластике ϕ
1	0,49
2	0,41
3	0,49
4	0,42
5	0,43
6	0,44
Среднее значение	0,45
Среднее отклонение	0,03
Коэффициент вариации CV, %	7

В соответствии с рис. 3 коэффициент ϕ микропластика составляет 0,45. Именно поэтому принято решение пересчитать площадь адгезионного контакта в «узле» после экспериментального определения ϕ .

Получив значение $\phi = 0,45$, можно вычислить величину площади и адгезионной прочности для данной выборки (табл. 7).

Таблица 7

Сравнение результатов определения адгезионной прочности с использованием теоретического и экспериментального значения коэффициента плотности упаковки филаментов

Условный номер испытаний	P , Н	S_t , мм ²	τ_t , МПа	S_z , мм ²	τ_z , МПа
1	104,8	1,28	81,9	2,48	42,3
2	101,9		79,6		41,1
3	100,2		78,2		40,4
4	98,9		77,3		39,9
5	110,8		86,6		44,7
6	105,3		82,3		42,5
7	104,8	1,48	71,9	2,86	37,2
8	101,9		87,5		45,3
9	100,2		81,9		42,4
10	98,9		82,3		42,6
11	110,8		84,9		43,9
12	105,3		79,5		41,1
13	122,3	1,66	73,7	3,20	38,2
14	107,1		64,5		33,5
15	127,3		76,7		39,8
16	113,2		68,2		35,4
17	120,4		72,5		37,6
18	112,6		67,8		35,2
Среднее значение		—	77,6	—	40,2
Среднее отклонение			6,6		3,4
Коэффициент вариации CV, %			8,6		8,4
Примечание. P – напряжение; S_t , S_z – площадь контакта при теоретическом и экспериментальном значении коэффициента плотности упаковки филаментов в микропластике соответственно; τ_t , τ_z – адгезионная прочность при теоретическом и экспериментальном значении коэффициента плотности упаковки филамента в микропластике соответственно.					

Среднее значение прочности при $\varphi = 0,45$ составило 40,2 МПа, что наиболее близко к прочности сдвига ПКМ, полученных из отечественных типов волокон [36].

Заключения

Значение коэффициента φ , полученное с помощью конфокального сканирующего лазерного микроскопа, составило 0,45, площадь контакта при данном коэффициенте: 2,48; 2,86 и 3,20 мм².

Разница между теоретическими и экспериментальными значениями коэффициента φ находится в диапазоне от 50 до 55 %. При теоретической площади контакта, равной 1,48 мм², среднее значение величины адгезии связующего ВСЭ-30 к углеродному волокну марки UMT42S-3K составляет 83,3 МПа, что близко к среднему значению адгезионной прочности при испытании эталонным методом pull out (90,4 МПа). Таким образом, разница значений адгезионной прочности при испытании методом pull out и модифицированным методом вытягивания из «узла» при площади контакта 1,48 мм² не превышает 10 %.

Адгезионная прочность в системе «волокну–полимерная матрица», получаемая с помощью эталонного метода pull out, уменьшается при увеличении площади контакта.

Несмотря на близкие значения адгезионной прочности, полученные модифицированным методом вытягивания из «узла» и методом pull out, необходимо предложить новые способы определения зоны адгезионного контакта.

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

Благодарности

Автор благодарит магистранта МГТУ им. Н.Э. Баумана Е.А. Овчинникову за проведение физико-механических испытаний образцов методом pull out.

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. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). С. 22–33. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.03.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
4. Огрель Л.Ю., Ястребинская А.В., Горбунова И.Ю. Модификация эпоксидного связующего полиметилсилоксаном для изготовления стеклопластиковых труб и газоотводящих стволы // Строительные материалы. 2006. № 5. С. 57–59.
5. Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Гуревич Я.М. и др. Модификация эпоксидных связующих циклоалифатическими эпоксиимидами // Клеи. Герметики. Технологии. 2013. № 7. С. 11–17.
6. Яруллин Р.Р. Модификация эпоксидных смол как способ получения композиционных материалов с заданными физико-механическими характеристиками (обзор) // Пластические массы. 2024. № 5. С. 11–17. DOI: 10.35164/0554-2901-2024-05-11-17.
7. Куприянова Е.В., Морозова Т.В., Дворцевая А.М., Аристов В.М. Модификация эпоксидного связующего для повышения трещиностойкости композитного шлема при ударном воздействии // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33. № 6 (216). С. 50–52.

8. Мостовой А.С., Панова Л.Г., Курбатова Е.А. Модификация эпоксидных полимеров кремнийсодержащим наполнителем с целью повышения эксплуатационных свойств // Вопросы материаловедения. 2016. № 2 (86). С. 87–95.
9. Мараховский К.М., Осипчик В.С., Водовозов Г.А., Папина С.Н. Модификация эпоксидного связующего с повышенными характеристиками для получения композиционных материалов // Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 30. № 10 (179). С. 56–58.
10. Гулиев К.Г., Ищенко Н.А., Хамедова У.А. и др. Модификация эпоксидной смолы ЭД-20 циклопропансодержащими соединениями // Пластические массы. 2019. № 3–4. С. 19–20.
11. Третьяков И.В., Вяткина М.А., Черевинский А.П. и др. Влияние полиэфирсульфона на свойства эпоксидного связующего и намоточных стеклопластиков на его основе // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. Т. 85. № 8. С. 1132–1136. DOI: 10.31857/S0367676521080317.
12. Иванов А.В., Столяров С.О., Дементьев Ф.А., Ферулев А.П. Исследование эксплуатационных характеристик огнезащитных покрытий на основе эпоксидных смол, модифицированных астраленами // Пожаровзрывобезопасность. 2020. Т. 29. № 1. С. 55–68. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.55-68.
13. Сидорина А.И. Повышение адгезии углеродного волокнистого наполнителя к полимеру с помощью аппретирования (обзор) // Химические волокна. 2022. № 5. С. 3–10.
14. Гарифуллин А.Р., Абдуллин И.Ш. Плазменная гидрофилизация углеродной ленты для создания композиционных материалов с повышенными прочностными характеристиками // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 14. С. 101–102.
15. Сагитова Ф.Р., Шарифуллин Ф.С. Модификация углеродных волокон и тканей для их применения в качестве армирующих компонентов в композиционных материалах // Вестник технологического университета. 2025. Т. 28. № 8. С. 81–86. DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_8_81.
16. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Воробьева Е.А. и др. Модификация поверхности углеродного волокна при облучении ионами плазмы с энергиями от сотен эВ до десятков кэВ // Ядерная физика и инжиниринг. 2024. Т. 15. № 3. С. 224–231. DOI: 10.56304/S2079562923030028.
17. Андрианова Н.Н., Борисов А.М., Машкова Е.С. и др. Ионно-лучевая модификация поверхности углеродных волокон // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023. № 4. С. 10–24. DOI: 10.31857/S1028096023040027.
18. Морозов С.В., Ананьин С.В. Влияние модификации поверхности углеродных волокон на физико-механические характеристики углепластиков // Ползуновский вестник. 2022. № 1. С. 134–138. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.018.
19. Гарифуллин А.Р. Применение плазменного метода модификации поверхности углеродных волокон для повышения показателей механических свойств углеродных волокон // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 18. С. 76–77.
20. Мосеев С.И., Красников Д.В., Казакова М.А. Модификация поверхности углеродных волокон многослойными углеродными нанотрубками и ее влияние на механические характеристики композитов с эпоксидной смолой // Журнал прикладной химии. 2016. Т. 89. № 12. С. 1555–1563.
21. Иваньков Р.Р. Определение прочности адгезионной связи между углеродными волокнами и эпоксидной матрицей // Физико-механические испытания, прочность и надежность современных конструкционных и функциональных материалов: материалы XVII Всерос. конф. по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат». М., 2025. С. 140–162.
22. Гуляев А.И. Измерение адгезионной прочности «волокно–матрица» с применением наноиндентирования (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 3 (75). С. 68–78. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.03.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-68-78.
23. Гуляев А.И., Медведев П.Н., Сбитнева С.В., Петров А.А. Применение наноиндентирования для определения адгезионной прочности волокно–матрица в углепластиках // Роль фундаментальных исследований при реализации Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года: материалы V Всерос. науч.-техн. конф. М., 2019. С. 240–253.
24. 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). С. 170–184. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.03.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-170-184.

25. Горбаткина Ю.А. Адгезионная прочность в системах полимер–волокно. М.: Химия, 1987. 192 с.
26. Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжиева В.Г. Влияние размера соединений полимер–волокно на изменение адгезионной прочности при различных внешних воздействиях. Ч. 1. Масштабная зависимость адгезионной прочности соединений волокно–термореактивное связующее при нормальных условиях // Клеи. Герметики. Технологии. 2025. № 9. С. 25–31. DOI: 10.31044/1813-7008-2025-0-9-25-31.
27. Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжиева В.Г. Влияние размера соединений полимер–волокно на изменение адгезионной прочности при различных внешних воздействиях. Ч. 2. Влияние размеров соединений термореактивное связующее–волокно на температурную зависимость их адгезионной прочности // Клеи. Герметики. Технологии. 2025. № 10. С. 33–37. DOI: 10.31044/1813-7008-2025-0-10-33-37.
28. Вяткина М.А., Горбаткина Ю.А., Петрова Т.В., Солодилов В.И. Становление адгезионной прочности систем эпоксидангидридная матрица–волокно // Химическая физика. 2023. Т. 42. № 11. С. 16–22. DOI: 10.31857/S0207401X23110110.
29. 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. DOI: 10.31044/1813-7008-2021-0-1-28-35.
30. 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. Р. 197–212.
31. 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.
32. Кудрявцева А.Н., Ткачук А.И., Григорьева К.Н., Гуревич Я.М. Использование связующего марки ВСЭ-30, перерабатываемого по инфузионной технологии, для изготовления низко- и средненагруженных деталей конструкционного назначения // Труды ВИАМ. 2019. № 1 (73). С. 31–39. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.03.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-31-39.
33. Гуляев А.И., Исходжанова И.В., Журавлева П.Л. Применение метода оптической микроскопии для количественного анализа структуры ПКМ // Труды ВИАМ. 2014. № 7. С. 51–56. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-7-7.
34. 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.
35. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб.: Научные основы и технологии, 2009. 184 с.
36. 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). С. 55–63. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.03.2026). 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. Tkachuk A.I., Donetskyy 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), pp. 22–33. Available at: <https://journal.viam.ru> (accessed: March 05, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
4. Ogrel L.Yu., Yastrebinskaya A.V., Gorbunova I.Yu. Modification of epoxy binder with polymethylsiloxane for the manufacture of fiberglass pipes and gas exhaust manifolds. *Stroitelnye materialy*, 2006, no. 5, pp. 57–59.

5. Panina N.N., Grebeneva T.A., Gurevich Ya.M. et al. Modification of epoxy binders with cycloaliphatic epoxyimides. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2013, no. 7, pp. 11–17.
6. Yarullin R.R. Modification of epoxy resins as a method for obtaining composite materials with specified physical and mechanical characteristics (review). *Plasticheskie massy*, 2024, no. 5, pp. 11–17. DOI: 10.35164/0554-2901-2024-05-11-17.
7. Kupriyanova E.V., Morozova T.V., Dvortsevaya A.M., Aristov V.M. Modification of an epoxy binder to improve the crack resistance of a composite helmet under impact. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2019, vol. 33, no. 6 (216), pp. 50–52.
8. Mostovoy A.S., Panova L.G., Kurbatova E.A. Modification of epoxy polymers with a silicon-containing filler to improve performance properties. *Voprosy Materialovedeniya*, 2016, no. 2 (86), pp. 87–95.
9. Marakhovsky K.M., Osipchik V.S., Vodovozov G.A., Papina S.N. Modification of an epoxy binder with improved characteristics for producing composite materials. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2016, vol. 30, no. 10 (179), pp. 56–58.
10. Guliev K.G., Ishchenko N.A., Khamedova U.A. et al. Modification of ED-20 epoxy resin with cyclopropane-containing compounds. *Plasticheskiye massy*, 2019, no. 3–4, pp. 19–20.
11. Tretyakov I.V., Vyatkina M.A., Cherevinsky A.P. et al. Effect of polyethersulfone on the properties of epoxy binder and winding fiberglass reinforced plastics based on it. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya fizicheskaya*, 2021, vol. 85, no. 8, pp. 1132–1136. DOI: 10.31857/S0367676521080317.
12. Ivanov A.V., Stolyarov S.O., Dementyev F.A., Ferulev A.P. Study of the performance characteristics of fire-protective coatings based on epoxy resins modified with astralenes. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2020, vol. 29, no. 1, pp. 55–68. DOI: 10.18322/PVB.2020.29.01.55-68.
13. Sidorina A.I. Increasing the adhesion of carbon fiber filler to polymer using finishing (review). *Khimicheskie volokna*, 2022, no. 5, pp. 3–10.
14. Garifullin A.R., Abdullin I.Sh. Plasma hydrophilization of carbon tape for creating composite materials with enhanced strength characteristics. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 14, pp. 101–102.
15. Sagitova F.R., Sharifulin F.S. Modification of carbon fibers and fabrics for their use as reinforcing components in composite materials. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2025, vol. 28, no. 8, pp. 81–86. DOI: 10.55421/3034-4689_2025_28_8_81.
16. Andrianova N.N., Borisov A.M., Vorobyova E.A. et al. Modification of the Carbon Fiber Surface by Irradiation with Plasma Ions with Energies from Hundreds of eV to Tens of KeV. *Yadernaya fizika i inzhiniring*, 2024, vol. 15, no. 3, pp. 224–231. DOI: 10.56304/S2079562923030028.
17. Andrianova N.N., Borisov A.M., Mashkova E.S. et al. Ion-Beam Modification of the Carbon Fiber Surface. *Poverkhnost. Rentgenovskie, sinkhotronnye i neytronnye issledovaniya*, 2023, no. 4, pp. 10–24. DOI: 10.31857/S1028096023040027.
18. Morozov S.V., Ananyin S.V. The influence of carbon fiber surface modification on the physical and mechanical characteristics of carbon fiber reinforced plastics. *Polzunovskiy Vestnik*, 2022, no. 1, pp. 134–138. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.01.018.
19. Garifullin A.R. Application of plasma method of modification of carbon fiber surface to improve mechanical properties of carbon fibers. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2016, vol. 19, no. 18, pp. 76–77.
20. Moseenkov S.I., Krasnikov D.V., Kazakova M.A. Modification of carbon fiber surface with multiwalled carbon nanotubes and its effect on the mechanical properties of composites with epoxy resin. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2016, vol. 89, no. 12, pp. 1555–1563.
21. Ivankov R.R. Determination of the strength of the adhesive bond between carbon fibers and an epoxy matrix. *Physicomechanical tests, strength and reliability of modern structural and functional materials: Proc. XVII All-Rus. Conf. for testing and research of materials properties «TestMat»*. Moscow, 2025, pp. 140–162.
22. Gulyayev A.I. Fiber-matrix adhesion strength measurement using nanoindentation (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), pp. 68–78. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 05, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-68-78.
23. Gulyaev A.I., Medvedev P.N., Sbitneva S.V., Petrov A.A. Application of nanoindentation to determine the fiber-matrix adhesion strength in carbon fiber reinforced plastics. *The role of fundamental research in the implementation of Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030: Proc. of the V All-Rus. sci. and tech. conf. Moscow*, 2019, pp. 240–253.

24. 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*, 2026, no. 12 (154), pp. 170–184. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 05, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-170-184.
25. Gorbatkina Yu.A. *Adhesion strength in polymer-fiber systems*. Moscow: Khimiya, 1987, 192 p.
26. Gorbatkina Yu.A., Ivanova-Mumzhieva V.G. Effect of polymer-fiber joint size on change in adhesion strength under various external influences. Part 1. Scale dependence of adhesion strength of fiber-thermosetting binder joints under normal conditions. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2025, no. 9, pp. 25–31. DOI: 10.31044/1813-7008-2025-0-9-25-31.
27. Gorbatkina Yu.A., Ivanova-Mumzhieva V.G. Effect of polymer-fiber joint size on change in adhesion strength under various external influences. Part 2. Effect of the dimensions of thermosetting binder–fiber joints on the temperature dependence of their adhesion strength. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2025, no. 10, pp. 33–37. DOI: 10.31044/1813-7008-2025-0-10-33-37.
28. Vyatkina M.A., Gorbatkina Yu.A., Petrova T.V., Solodilov V.I. Formation of the adhesion strength of epoxy anhydride matrix–fiber systems. *Khimicheskaya fizika*, 2023, vol. 42, no. 11, pp. 16–22. DOI: 10.31857/S0207401X23110110.
29. Gulyaev A.I., Yerasov V.S., Oreshko E.I., Utkin D.A. Analysis of Carbon Fiber Failure during Multifilament Cylinder Ejection. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2021, no. 1, pp. 28–35. DOI: 10.31044/1813-7008-2021-0-1-28-35.
30. Kotomin S.V., Obidin I.M., Pavlyuchkova E.A. Calculation of the Adhesive Bond Strength of Reinforcing Fibers with Polymers Using the «Loop» Method. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 2022, vol. 58, no. 1, pp. 197–212.
31. Kotomin S.V., Obidin I.M., Pavlyuchkova E.A. Scale factor in testing adhesive joints of heteroaramid yarns using the «loop» method. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2023, no. 11, pp. 35–40.
32. Kudryavtseva A.N., Tkachuk A.I., Grigorieva K.N., Gurevich Ya.M. The use of epoxy resin system VSE-30, processed by the infusion technology, for the manufacture of low and medium loaded structural polymer composite materials. *Trudy VIAM*, 2019, no. 1 (73), pp. 31–39. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 05, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-31-39.
33. Gulyaev A.I., Ishodzhanova I.V., Zhuravleva P.L. Application of optical microscopy method for the quantitative analysis of polymer composite material structure. *Trudy VIAM*, 2014, no. 7, pp. 51–56. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: March 28, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-7-7.
34. Nelyub V.A., Guskov A.M., Belov P.A. On the design of carbon fiber-reinforced plastics for tension taking into account fiber adhesion to the matrix. *Aktualnye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk*, 2014, no. 12–1, pp. 62–66.
35. Perepelkin K.E. *Reinforcing fibers and fibrous polymer composites*. St. Petersburg: Nauchnyye osnovy i tekhnologii, 2009, 184 p.
36. 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), pp. 55–63. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: March 28, 2026). 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

Гуляев Артем Игоревич, ведущий научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Roman R. Ivankov, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Artem I. Gulyaev, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 30.04.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.05.2026.
The article was submitted 30.04.2026; approved and accepted for publication after reviewing 14.05.2026.