

Научная статья

УДК 539.612

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-196-208

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

Часть 2

Р.Р. Иваньков¹, А.И. Гуляев¹

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

Аннотация. Предложен новый способ определения площади адгезионного контакта при испытании образцов модифицированным методом вытягивания из «узла». Значения прочности адгезионного контакта между российским углеродным волокном UMT42S-3K и эпоксидным связующим ВСЭ-30, полученные усовершенствованным методом вытягивания из «узла», сравнили со значениями, полученными эталонными методами pull out и push out. Представлены зоны адгезионного контакта после испытаний методом push out.

Ключевые слова: оптическая микроскопия, адгезия, прочность, углеродные волокна, эпоксидное связующее, растровая электронная микроскопия, метод выталкивания волокон

Для цитирования: Иваньков Р.Р., Гуляев А.И. Подходы к анализу площади адгезионного контакта при испытании модифицированным методом вытягивания из «узла». Часть 2 // Труды ВИАМ. 2026. № 9 (163). С. 196–208. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-196-208.

Scientific article

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

Part 2

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. This article proposes a new method for determining the area of adhesive contact during the testing of samples using the modified pull-out method. The obtained values of adhesive strength between the Russian carbon fiber UMT42S-3K and the epoxy binder VSE-30 using the improved pull-out method were compared with the values obtained using the reference pull-out and push-out methods. The article also presents the areas of adhesive contact after testing using the push-out method.

Keywords: optical microscopy, adhesion, strength, carbon fibers, epoxy binder, scanning electron microscopy, push-out test

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 2. *Trudy VIAM*, 2026, no. 9 (163), pp. 196–208. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-9-196-208.

* Часть 1 – см. «Труды ВИАМ», № 8 (162).

Введение

Развитие производства полимерных композиционных материалов открывает возможности для изготовления новых конструкций и изделий для авиационной и космической техники [1–3]. Именно поэтому необходимо совершенствовать методы анализа и способы обработки полученных данных с помощью различных прикладных программ [4, 5]. Изучение адгезионной прочности и площади контакта между полимерами и углеродными волокнами на протяжении долгого времени (~75 лет) ведется во многих странах: США, Великобритании, Франции и др. [6, 7]. Следует отметить, что и в СССР адгезионную прочность между разными типами волокон и полимерными матрицами изучали на базе ИХФ РАН методом вытягивания волокна из капли отвержденного связующего [6]. Создав большой задел и определив основные закономерности прочности адгезионной связи между наполнителем и полимерной матрицей, отечественные и зарубежные ученые предпринимали попытки по совершенствованию метода pull out и определению площади адгезионного контакта. В работах [6–11] определению адгезионной прочности уделяют особое внимание, так как данный параметр учитывают в первую очередь при создании новых видов полимерных композиционных материалов. На рис. 1 представлена фотография первых образцов, полученных с помощью затягивания «узла», для испытаний на адгезионную прочность.

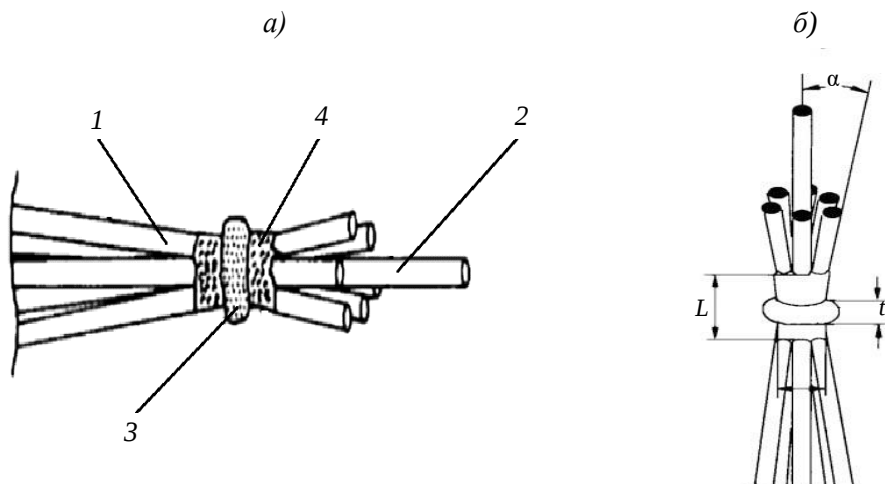


Рис. 1. Упрощенная форма образцов для расчета площади адгезионного контакта [9]: а – схематичное изображение испытываемой ячейки, где 1 – вспомогательные волокна (6 шт.); 2 – испытываемое моноволокно; 3 – вспомогательное моноволокно для формирования узла; 4 – полимерное связующее; б – геометрические параметры, где t_k – толщина вспомогательного жгута; L – длина пропитанного участка; α – угол между вспомогательным и испытываемым моноволоком

В данном случае площадь адгезионного контакта рассчитывают по формуле

$$S_t = A_t \left[6t_k \left(1 - \frac{1}{\cos \alpha} \right) + L \left(1 + \frac{6}{\cos \alpha} \right) \right], \quad (1)$$

где A_t – средняя площадь поперечного сечения волокон; t_k – толщина вспомогательного жгута; L – длина пропитанного участка; α – угол между вспомогательным и испытываемым моноволоком.

Существует и другой нестандартный способ, который учитывает влияние близлежащих волокон и называется методом трех волокон (рис. 2).

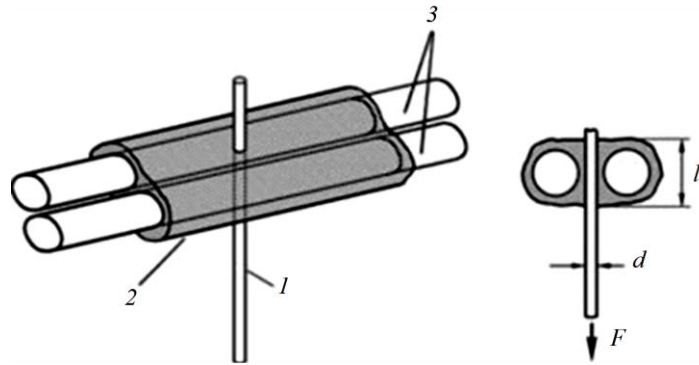


Рис. 2. Упрощенная форма образцов для расчета площади адгезионного контакта [6]: 1 – испытываемое волокно; 2 – полимерное связующее; 3 – вспомогательные волокна; F – действующая нагрузка; d – диаметр волокна; l – толщина полимерного связующего на вспомогательных волокнах

Преимуществом метода push out, как и классического метода microbond, является простой расчет площади адгезионного контакта:

$$S = P_{\text{вол}} h, \quad (2)$$

где $P_{\text{вол}}$ – периметр поперечного сечения волокна; h – толщина образца полимерного композиционного материала.

Метод выталкивания моноволокна из полимерной матрицы применяется в течение долгого времени как в России, так и за рубежом [8, 10–21]. Поэтому для подтверждения корректности данных, получаемых новыми методами, необходимо сравнить их с результатами испытаний эталонными методами – pull out или push out. В работах [6, 7] с помощью метода вытягивания pull out получены зависимости усилия вытягивания и прочности от площади адгезионного контакта. Преимуществом метода push out перед методом pull out является возможность анализа площади адгезионного контакта после испытаний с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ), что также позволяет проанализировать форму филаментов [15–18].

В настоящее время одним из перспективных методов определения адгезионной прочности является усовершенствованный метод вытягивания из «узла» [22].

С помощью немодифицированного метода вытягивания из «узла», представленного в работах [21, 23], зависимости прочности от площади контакта получить трудно. Это связано с тем, что можно определить только теоретическую площадь, используя формулу [23]

$$S = \frac{\pi^2}{\varphi} \sqrt{\frac{T_1 T_2}{\rho_1 \rho_2}}, \quad (3)$$

где 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 [23, 24].

Преимущества немодифицированного метода перед классическим методом pull out подробно описаны в работах [23, 24], где в основном приведены результаты испытаний арамидных волокон. Отличие модифицированного метода от классического метода вытягивания из «узла» заключается в том, что образцы представляют собой «жесткую конструкцию», так как они выполнены на основе микропластика, а не «сухого волокна».

Учитывая, что имеется множество подходов к определению площади адгезионного контакта, существует потребность в глубоком анализе данного параметра при испытании модифицированным методом вытягивания из «узла», который разработан на базе НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Необходимо также сравнить полученные результаты с данными, полученными методом push out, и установить зависимости усилия вытягивания и прочности от площади адгезионного контакта.

Материалы и методы

В исследованиях использовано полимерное связующее ВСЭ-30 производства НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. В качестве углеродных наполнителей выбраны российские волокна марки UMT42S-3K, основные характеристики которых указаны в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики высокопрочных углеродных волокон марки UMT42S-3K

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

Для затягивания «узла» выбран арамидный жгут Русар-НТ, основные характеристики которого указаны в табл. 2.

Таблица 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 изучения площади поверхности торца микропластика в «узле» использовали оптический микроскоп с программным обеспечением. Микропластик устанавливали перпендикулярно линзе оптического микроскопа.

Для оценки адгезионной прочности системы «волокно–матрица» методом выталкивания волокна индентором (push out) из образцов углепластика изготовлены объекты исследования толщиной ~20 мкм. Процесс изготовления включал вырезку заготовок толщиной ~1 мм перпендикулярно направлению армирования с последующим механическим утонением и полировкой с применением абразивной бумаги с последовательно уменьшающейся зернистостью.

Эксперимент по выталкиванию филаментов из отвержденного эпоксидного связующего ВСЭ-30 проводили с использованием специальной оснастки. Медную сетку

толщиной 25 мкм с диаметром отдельно взятой ячейки 50 мкм фиксировали на плоско-параллельном металлическом основании с помощью термопластичного клея. В процессе испытания необходимо обеспечить жесткость образцов при изгибе. Именно по этой причине следует применять медную сетку. Адгезионную прочность измеряли с помощью наноиндентометра. Алмазный индентор для проведения испытаний имеет форму усеченного конуса (угол при вершине 60 градусов, диаметр рабочего основания 5 мкм). Скорость испытания составила 50 мН/мин. Определение периметра торца моноволокон и регистрацию кривых зависимостей «нагрузка–перемещение» проводили с помощью специального программного обеспечения.

Зоны наноиндентирования и фактическую толщину образцов исследовали с помощью РЭМ. Съемку проводили при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе электронного пучка 20 пА. Изображения поперечных сечений волокон оконтуривали линией Безье по 10 точкам. Периметр измеряли с использованием специализированного программного обеспечения.

Работа выполнена при содействии ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Результаты и обсуждение

Для оценки корректности значений, полученных методом pull out, необходимо сравнить их с данными, полученными методом push out. Результаты сравнительного анализа представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения адгезионной прочности методом pull out и push out

Показатель	Значения показателей при определении методом	
	pull out	push out
Адгезионная прочность*, МПа	<u>75–131</u> 90,0	<u>65–119</u> 96,0
Среднее квадратичное отклонение	13,0	14,1
Коэффициент вариации CV, %	14,4	14,7

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

Разница значений адгезионной прочности не превышает 10 %, что свидетельствует о высокой сходимости данных, которые получают двумя эталонными методами – push out и pull out.

Зоны разрушения на границе раздела фаз представлены на рис. 3.

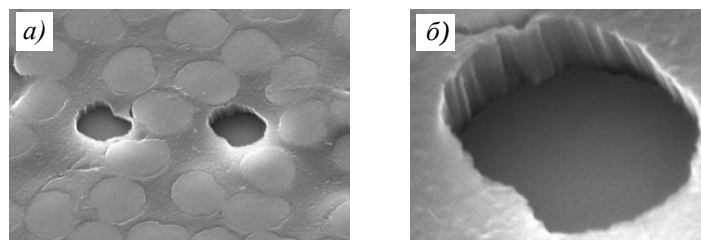


Рис. 3. Зоны разрушения адгезионной связи в углепластике на основе отечественного углеродного волокна UMT42S-3K и эпоксидного связующего ВСЭ-30: а – общий вид ($\times 3000$); б – микростроение зоны адгезионного контакта ($\times 15000$)

Применение РЭМ позволило проанализировать два ключевых фактора корректности проведения эксперимента по выталкиванию волокна индентором: соответствие

микромеханизма разрушения адгезионному типу и отсутствие повреждения торцов волокон индентором. На фотографиях микростроения зоны выталкивания волокон (рис. 3, б) хорошо заметна реплика фибриллизованной поверхности углеродного волокна на контактной поверхности полимерной матрицы, что свидетельствует об адгезионном разрушении по границе раздела «волокно–матрица». По результатам анализа поверхности торцов волокон после воздействия индентора не выявлено признаков их раскалывания или деформирования, что может происходить при неверном подборе индентора или избыточной толщине образца [20]. Анализ зоны индентирования методом РЭМ позволяет заключить, что получены метрологически корректные данные для определения среднего значения прочности адгезионной связи системы «волокно–матрица».

На рис. 4 представлены фотографии торцов микропластиков.

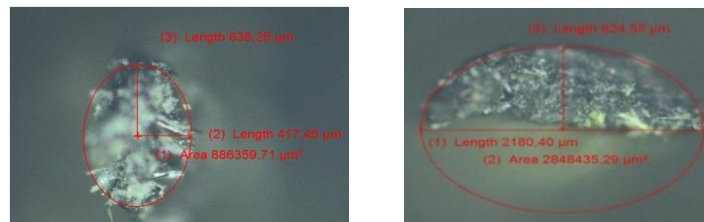


Рис. 4. Определение периметра торцов микропластика на оптическом микроскопе ($\times 50$)

Для анализа площади торца наиболее близкой формой является эллипс, периметр которого вычисляется по формуле Ш. Рамануджана:

$$P = \pi[3(a + b) - \sqrt{3ab(a + 3b)}], \quad (4)$$

где a – длина большой полуоси; b – длина малой полуоси.

Однако следует отметить, что для вычисления периметра эллипса используется более точное второе приближение:

$$P = \pi(a + b) \left(\frac{3h}{10 + \sqrt{4 - 3h}} \right), \quad (5)$$

$$h_t = \frac{(a - b)^2}{(a + b)^2}. \quad (6)$$

В некоторых случаях периметр торца микропластика составляет сумму половины периметра эллипса и удвоенной длины большой полуоси, тогда уравнение будет принимать следующий вид:

$$P_{\text{торца}} = \frac{\pi(a + b) \left(\frac{3h}{10 + \sqrt{4 - 3h_t}} \right)}{2} + 2a. \quad (7)$$

Согласно формуле (3), адгезионная прочность в системе «волокно–матрица» реализуется на длине волокна l [25], определяемой с помощью траверсы прибора, работа которого описана в работе [26]. Это связано с тем, что современные разрывные машины обладают точностью до 0,001 мм. Поэтому для вычисления полной площади боковой грани эллипсоидной поверхности можно применить выражение, аналогичное уравнению (2):

$$S_p = P_{\text{торца}} \xi, \quad (8)$$

где ξ – удлинение.

Результаты вычисления площади адгезионного контакта с помощью формулы (8) представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты определения площади контакта для каждого образца выборки

Результаты определения площади контакта для каждого образца выборки		
Условный номер испытаний	Площадь контакта, мм ²	
	теоретическая	экспериментальная
1	1,28	1,52
2		1,41
3		1,18
4		1,08
5		1,30
6		1,15
7	1,48	1,24
8		1,28
9		1,40
10		1,48
11		1,31
12		1,99
13	1,66	1,34
14		1,22
15		1,20
16		1,44
17		1,21
18		0,87
Среднее значение		1,31
Среднее отклонение		0,15
Коэффициент вариации CV, %		0,23

Для определения адгезионной прочности можно использовать как среднее значение периметра торца, так и конкретные значения для каждого образца.

Модифицированный метод вытягивания из «узла» наиболее предпочтительно сравнивать с методом pull out. Это связано с тем, что для этих способов определения адгезионной прочности используется схожий процесс нагружения образца.

В табл. 5 представлены результаты расчета площади адгезионного контакта различными способами.

Таблица 5

Результаты определения адгезионной прочности с использованием разных подходов к анализу зоны контакта

Условный номер испытаний	P, Н	S _p , мм ²	τ _p , МПа	S _т , мм ²	τ _т , МПа	S _з , мм ²	τ _з , МПа
1	104,8	1,52	68,8	1,28	81,9	2,48	42,3
2	101,9	1,41	72,4		79,6		41,1
3	100,2	1,18	85,1		78,2		40,4
4	98,9	1,08	91,6		77,3		39,9
5	110,8	1,30	85,3		86,6		44,7
6	105,3	1,15	91,7		82,3		42,5
7	106,3	1,24	85,5	1,48	71,9	2,86	37,2
8	129,5	1,28	100,8		87,5		45,3
9	121,2	1,40	86,8		81,9		42,4
10	121,8	1,48	82,3		82,3		42,6
11	125,7	1,31	95,7		84,9		43,9
12	117,7	1,99	59,0		79,5		41,1
13	122,3	1,34	91,4	1,66	73,7	3,20	38,2
14	107,1	1,22	87,7		64,5		33,5

Окончание таблицы 5

Условный номер испытаний	P , Н	S_p , мм ²	τ_p , МПа	S_t , мм ²	τ_t , МПа	S_s , мм ²	τ_s , МПа
15	127,3	1,20	106,1		76,7		39,8
16	113,2	1,44	78,7		68,2		35,4
17	120,4	1,21	99,6		72,5		37,6
18	112,6	0,87	129,7		67,8		35,2
Среднее значение	–	–	88,8	–	77,6	–	40,2
Среднее отклонение			14,9		6,6		3,4
Коэффициент вариации CV, %			16,8		8,6		8,4

Примечание. P – напряжение; S_p – площадь контакта для конкретного образца, определяемая по формуле (8); τ_p – адгезионная прочность для конкретного образца; S_t , S_s – площадь контакта, определенная методом вытягивания из «узла» при теоретическом и экспериментальном значении коэффициента плотности упаковки филаментов в микропластике соответственно; τ_t , τ_s – адгезионная прочность, определенная методом вытягивания из «узла» при теоретическом и экспериментальном значении коэффициента плотности упаковки филамента в микропластике соответственно.

Для определения адгезионной прочности будет использована формула

$$\tau_p = \frac{F}{S_p}, \quad (9)$$

где F – нагрузка, Н; S_p – площадь адгезионного контакта для конкретного образца, определяемая по формуле (8), мм².

Согласно данным табл. 5, интерес представляет адгезионная прочность при усредненном значении периметра торца. По данным табл. 5 можно получить зависимость адгезионной прочности от площади контакта, которая определяется с помощью формулы (8).

Исходя из данных рис. 5, можно сделать вывод, что модель определения площади адгезионного контакта, представленная в работах [21, 23], может некорректно отображать снижение адгезионной прочности.

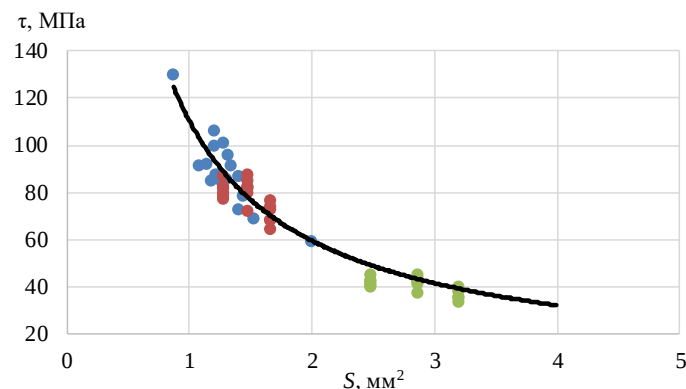


Рис. 5. Зависимость адгезионной прочности τ от площади контакта S , вычисленной разными способами: вытягивания из «узла» с зоной контакта, вычисленной по формуле (8) (●), и вытягивания из «узла» при теоретическом (●) и экспериментальном (●) значении коэффициента плотности упаковки филаментов в микропластике

На рис. 6 представлены зависимости адгезионной прочности от площади контакта при испытаниях методом «pull out» и модифицированным методом вытягивания из «узла» с учетом реальной площади адгезионного контакта, определяемой с помощью оптического микроскопа.

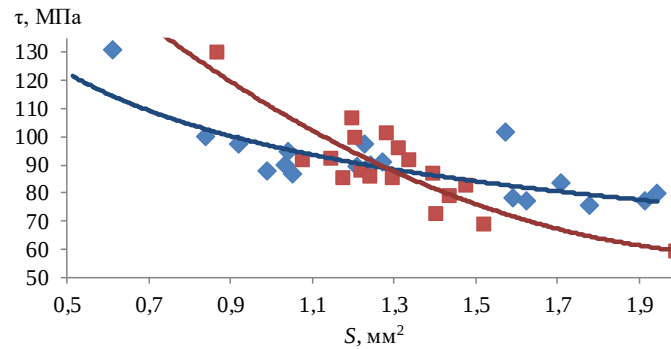


Рис. 6. Зависимости адгезионной прочности τ от площади контакта S для образцов, испытанных методом pull out (♦) и модифицированным методом вытягивания из «узла» (■)

Следует отметить, что зависимости, полученные обоими методами, имеют точку пересечения при адгезионной прочности ~ 90 МПа. Более резкое снижение адгезионной прочности при испытании модифицированным методом вытягивания из «узла» можно связать с большими, по сравнению с методом pull out, размерами образцов.

Чтобы получить корректные значения адгезионной прочности при испытании модифицированным методом из «узла», можно пренебречь значением коэффициента плотности упаковки филаментов ϕ . Тогда формула расчета площади контакта будет иметь следующий вид:

$$S = \pi^2 \sqrt{\frac{T_1 T_2}{\rho_1 \rho_2}}. \quad (10)$$

Результаты определения адгезионной прочности в зависимости от площади контакта без учета коэффициента плотности упаковки филаментов представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты пересчета адгезионной прочности в зависимости от площади адгезионного контакта без учета коэффициента плотности упаковки филаментов

Условный номер испытаний	P , Н	Площадь контакта, мм^2	Адгезионная прочность, МПа
1	104,8	1,11	94,4
2	101,9		91,8
3	100,2		90,2
4	98,9		89,1
5	110,8		99,8
6	105,3		94,9
7	104,8	1,29	82,4
8	101,9		100,4
9	100,2		94,0
10	98,9		94,4
11	110,8		97,4
12	105,3		91,2
13	122,3	1,44	84,9
14	107,1		74,4
15	127,3		88,4
16	113,2		78,6
17	120,4		83,6
18	112,6		78,2
Среднее значение	—	—	89,3
Среднее отклонение			7,3
Коэффициент вариации CV, %			8,2

Пренебрегая коэффициентом плотности упаковки филаментов в микропластике, можно получить значение адгезионной прочности, близкое к значениям, полученным методами pull out и push out. Разница средних значений не превышает 10 %.

Заключения

Предложен новый способ определения площади адгезионного контакта при испытании модифицированным методом вытягивания из «узла».

Предложенная модель расчета площади адгезионного контакта позволяет получить среднее значение адгезионной прочности, близкое к результатам, полученным эталонными методами pull out и push out. Разница значений не превышает 10 %.

Значения адгезионной прочности, полученные эталонными методами pull out и push out, отличаются менее чем на 5 %.

Для определения адгезионной прочности модифицированным методом вытягивания из «узла» можно пренебречь коэффициентом плотности упаковки ф.

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»).

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. Железина Г.Ф., Кулагина Г.С., Сидорина А.И., Соловьева Н.А. Усталость конструкционных органо-пластиков // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 1 (74). С. 89–100. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.05.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-98-100.
3. Начаркина А.В., Валуева М.И., Зеленина И.В., Шошева А.Л. Высокотемпературные углепластики на основе бисмалеинимидных связующих // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 4 (77). С. 43–61. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.05.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-43-61.
4. Скуридина Н.С., Большаков В.А., Клименко О.Н., Баринев Д.Я. Исследование кинетики отверждения эпоксидного связующего в препреге на основе равнопрочной ткани методами многовариантной регрессии // *Труды ВИАМ*. 2025. № 11 (153). С. 12–22. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-12-22.
5. Амирова Л.Р., Хамидуллин О.Л., Залялова Г.М., Амирова Л.М. Оценка кинетических параметров процесса отверждения эпоксидангидридных систем методом ДСК // *Известия Академии наук. Серия химическая*. 2017. № 3. С. 483–487.
6. Engineered interfaces in fiber reinforced composites / ed. J.K. Kim, Y.W. Mai. Elsevier, 1998. P. 416.
7. Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжиева В.Г., Куперман А.М. Адгезия модифицированных эпоксидных матриц к армирующим волокнам // *Высокомолекулярные соединения*. Сер.: А. 2016. Т. 58. № 5. С. 439–447. DOI: 10.7868/S2308112016050060.
8. Kumar R., Cross W.M., Kjerengtroen L., Kellar J.J. Fiber bias in nanoindentation of polymer matrix composites // *Composite Interfaces*. 2004. Vol. 11. P. 431–440.
9. Qiu Y., Schwartz P. A new method for study of the fiber-matrix interface in composites: single fiber pull-out from a microcomposite // *Journal of adhesion science and technology*. 1991. Vol. 5. No. 9. P. 741–756.
10. Гуляев А.И., Медведев П.Н., Сбитнева С.В., Петров А.А. Экспериментальное исследование по оценке адгезионной прочности «волокно–матрица» в углепластиках на основе эпоксидного связующего, модифицированного полисульфоном // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 4 (57). С. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86.

11. Гуляев А.И. Измерение адгезионной прочности «волоконно–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.
12. Jager J., Sause M.G.R., Burkert F. et al. Influence of plastic deformation on single-fiber push-out tests of carbon fiber reinforced epoxy resin // Composites. Part A. 2015. Vol. 71. P. 157–167.
13. Wang S.-W., Khan A., Sands R., Vasudevan A.K. A novel nanoindenter technique for measuring fibre-matrix interfacial strengths in composites // Journal of Materials Science Letters. 1992. Vol. 11. P. 739–741.
14. Desaegeer M., Verpoest I. On the use of the micro-indentation test technique to measure the interfacial shear strength of fibre-reinforced polymer composites // Composites Science and Technology. 1993. Vol. 48. P. 215–226.
15. Janczak J., Burki G., Rohr L. Interfacial characterisation of MMCs and CMCs using SEM-pushout technique // Key Engineering Materials. 1997. Vol. 127–131. P. 623–630.
16. Haerberle D.C. The use of nanoindentation to determine composite interfacial shear strength and the effects of environmental aging: Thesis for the Degree of Master of Science in Engineering Science and Mechanics. Blacksburg, 2001. 112 p.
17. Chawla N., Chawla K.K., Koopman M. et al. Thermal-shock behavior of a Nicalon-fiberreinforced hybrid glass-ceramic composite // Composites Science and Technology. 2001. Vol. 61. P. 1923–1930.
18. Gallo S.C., Li X., Zhang Z. et al. Viscoelastic response of carbon fiber reinforced polymer during push-out tests // Composites Part A. 2018. Vol. 112. P. 178–185.
19. Urena A., Rams J., Escalera M.D., Sanchez M. Characterization of interfacial mechanical properties in carbon fiber/aluminium matrix composites by the nanoindentation technique // Composites Science and Technology. 2005. Vol. 65. P. 2025–2038.
20. Mueller W.M., Moosburger-Will J., Sause M.G.R., Horn S. Microscopic analysis of single-fiber push-out tests on ceramic matrix composites performed with Berkovich and flat-end indenter and evaluation of interfacial fracture toughness // Journal of the European Ceramic Society. 2013. Vol. 33. P. 441–451.
21. 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.
22. 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 волоконно–термореактивное связующее при нормальных условиях // Клеи. Герметики. Технологии. 2025. № 9. С. 25–31. DOI: 10.31044/1813-7008-2025-0-9-25-31.
23. 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.
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: 25.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-170-184.
25. 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.
26. 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.

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. Zhelezina G.F., Kulagina G.S., Sidorina A.I., Soloveva N.A. Fatigue of constructional organoplastics. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 1, pp. 89–100. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 15, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-98-100.
3. Nacharkina A.V., Valueva M.I., Zelenina I.V., Shosheva A.L. High-temperature carbon fiber reinforced plastics based on bismaleinimide binders. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 4 (77), pp. 43–61. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 15, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-4-43-61.
4. Skuridina N.S., Bolshakov V.A., Klimenko O.N., Barinov D.Ya. Investigation of the kinetics of curing of an epoxy binder in a prepreg based on an equal-strength fabric using multivariate regression methods. *Trudy VIAM*, 2025, no. 11 (153), pp. 12–22. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 15, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-11-12-22.
5. Amirova L.R., Khamidullin O.L., Zalyalova G.M., Amirova L.M. Assessment of kinetic parameters of the curing process of epoxyanhydride systems by DSC. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya khimicheskaya*, 2017, no. 3, pp. 483–487.
6. *Engineered interfaces in fiber reinforced composites*. Ed. J.K. Kim, Y.W. Mai. Elsevier, 1998, p. 416.
7. Gorbatkina Yu.A., Ivanova-Mumzhieva V.G., Kuperman A.M. Adhesion of modified epoxy matrices to reinforcing fibers. *Vysokomolekulyarnye soyedineniya. Ser.: A*, 2016, vol. 58, no. 5, pp. 439–447. DOI: 10.7868/S2308112016050060.
8. Kumar R., Cross W.M., Kjerengtroen L., Kellar J.J. Fiber bias in nanoindentation of polymer matrix composites. *Composite Interfaces*, 2004, vol. 11, pp. 431–440.
9. Qiu Y., Schwartz P. A new method for study of the fiber-matrix interface in composites: single fiber pull-out from a microcomposite. *Journal of adhesion science and technology*, 1991, vol. 5, no. 9, pp. 741–756.
10. Gulyaev A.I., Medvedev P.N., Sbitneva S.V., Petrov A.A. Experimental research of «fiber-matrix» adhesion strength in carbon fiber epoxy/polysulphone composite. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86.
11. 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.
12. Jager J., Sause M.G.R., Burkert F. et al. Influence of plastic deformation on single-fiber push-out tests of carbon fiber reinforced epoxy resin. *Composites. Part A*, 2015, vol. 71, pp. 157–167.
13. Wang S.-W., Khan A., Sands R., Vasudevan A.K. A novel nanoindenter technique for measuring fibre-matrix interfacial strengths in composites. *Journal of Materials Science Letters*, 1992, vol. 11, pp. 739–741.
14. Desaeger M., Verpoest I. On the use of the micro-indentation test technique to measure the interfacial shear strength of fibre-reinforced polymer composites. *Composites Science and Technology*, 1993, vol. 48, pp. 215–226.
15. Janczak J., Burki G., Rohr L. Interfacial characterisation of MMCs and CMCs using SEM-pushout technique. *Key Engineering Materials*, 1997, vol. 127–131, pp. 623–630.
16. Haeberle D.C. *The use of nanoindentation to determine composite interfacial shear strength and the effects of environmental aging*: Thesis for the Degree of Master of Science in Engineering Science and Mechanics. Blacksburg, 2001, 112 p.
17. Chawla N., Chawla K.K., Koopman M. et al. Thermal-shock behavior of a Nicalon-fiberreinforced hybrid glass-ceramic composite. *Composites Science and Technology*, 2001, vol. 61, pp. 1923–1930.
18. Gallo S.C., Li X., Zhang Z. et al. Viscoelastic response of carbon fiber reinforced polymer during push-out tests. *Composites Part A*, 2018, vol. 112, pp. 178–185.
19. Urena A., Rams J., Escalera M.D., Sanchez M. Characterization of interfacial mechanical properties in carbon fiber/aluminium matrix composites by the nanoindentation technique. *Composites Science and Technology*, 2005, vol. 65, pp. 2025–2038.
20. Mueller W.M., Moosburger-Will J., Sause M.G.R., Horn S. Microscopic analysis of single-fiber push-out tests on ceramic matrix composites performed with Berkovich and flat-end indenter and evaluation of interfacial fracture toughness. *Journal of the European Ceramic Society*, 2013, vol. 33, pp. 441–451.

21. 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.
22. Gorbatkina Yu.A., Ivanova-Mumzhieva V.G. Influence of the polymer–fiber joint size on the change in adhesion strength under various external influences. Part 1. Scale dependence of the 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.
23. Kotomin S.V., Obidin I.M., Pavlyuchkova E.A. Scale factor in testing adhesive joints of heteroaramid threads using the «loop» method. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2023, no. 11, pp. 35–40.
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*, 2025, no. 12 (154), pp. 170–184. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 25, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-170-184.
25. Gorbatkina Yu.A., Ivanova-Mumzhieva V.G. Effect of the size of polymer-fiber joints on the change in adhesion strength under various external influences. Part 2. Effect of the size 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.
26. Nelyub V.A. Experimental evaluation of the elastic modulus of the adhesive bond of the epoxy matrix – carbon fiber with a metal coating system. *Sovremennye naukoymkiye tekhnologii*, 2019, no. 6, pp. 96–100.

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 31.07.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 31.08.2026.
The article was submitted 31.07.2026; approved and accepted for publication after reviewing 31.08.2026.