

Научная статья

УДК 539.612

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-154-165

## ВЗАИМОСВЯЗЬ СМАЧИВАЕМОСТИ ВОЛОКНА И ВЕЛИЧИНЫ АДГЕЗИИ В СИСТЕМЕ «ВОЛОКНО–ПОЛИМЕРНАЯ МАТРИЦА»

*Р.Р. Иваньков<sup>1,2</sup>, А.И. Сидорина<sup>1</sup>, С.В. Котомин<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия; bauman@bmstu.ru

**Аннотация.** *Определена величина адгезии эпоксидного связующего ВСЭ-30 к волокнам различных производителей. Проведена оценка смачиваемости поверхности углеродных волокон эпоксидным связующим. Исследована взаимосвязь коэффициента смачиваемости с величиной адгезионной прочности. Проведена отмывка углеродных волокон от эпоксидного аппрета с помощью аппарата Сокслета. Получены фотографии поверхности углеродных волокон с помощью сканирующего электронного микроскопа.*

**Ключевые слова:** *адгезия, углеродные волокна, смачиваемость, эпоксидное связующее, аппрет, полимерный композиционный материал*

**Для цитирования:** Иваньков Р.Р., Сидорина А.И., Котомин С.В. Взаимосвязь смачиваемости волокна и величины адгезии в системе «волокно–полимерная матрица» // Труды ВИАМ. 2026. № 6 (160). С. 154–165. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-154-165.

Scientific article

## THE RELATIONSHIP BETWEEN FIBER WETTABILITY AND ADHESION VALUE IN THE «FIBER–POLYMER MATRIX» SYSTEM

*R.R. Ivankov<sup>1,2</sup>, A.I. Sidorina<sup>1</sup>, S.V. Kotomin<sup>2</sup>*

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

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

**Abstract.** *In the article the adhesion of VSE-30 epoxy binder to fibers from various manufacturers was determined. The wettability of the carbon fiber surface by the epoxy binder was assessed. The article studies the relationship between horizontal impregnation and the adhesion strength. The carbon fibers are washed from the epoxy impregnation using a Soxhlet extractor. Photographs of the carbon fiber surface were obtained using a scanning electron microscope.*

**Keywords:** *adhesion, carbon fibers, wettability, epoxy binder, finish coat, polymer composite material*

**For citation:** Ivankov R.R., Sidorina A.I., Kotomin S.V. The relationship between fiber wettability and adhesion value in the «fiber–polymer matrix» system. *Trudy VIAM*, 2026, no. 6 (160), pp. 154–165. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-154-165.

## Введение

В XXI в. стремительно увеличивается объем производства и разработки новых полимерных композиционных материалов (ПКМ). Преимущественно это обусловлено тем, что ПКМ обладают высокими упруго-прочностными характеристиками при меньшей массе по сравнению с металлами и сплавами, что делает их востребованными для производства изделий и конструкций автомобильной, авиационной и космической техники [1–3].

Наиболее широко применяемыми полимерными связующими являются эпоксидные смолы, которые модифицируют различными способами [3–10]. Их используют в производстве лакокрасочных покрытий, ПКМ, клеевых и заливочных композиций, а также герметиков [11].

В настоящее время разработчики ПКМ в качестве тканых наполнителей используют углеродные волокна, обладающие уникальными прочностными и химическими свойствами. Поверхность углеродных волокон также можно модифицировать различными способами, которые рассмотрены в работах [12–16].

Особое внимание при изготовлении изделий из ПКМ уделяют вопросам достижения оптимальной величины адгезии на границе раздела «волокно–полимерная матрица». Это обусловлено тем, что полимерная матрица должна эффективно распределять нагрузку между углеродными волокнами в конструкции из ПКМ [17, 18]. Однако полимерная матрица значительно отличается по своим свойствам от углеродных наполнителей, в связи с чем перед исследователями, химиками и инженерами возникает задача достижения оптимальной величины адгезии углеродных наполнителей к полимерной матрице [19–24].

На границе раздела фаз при взаимодействии полимерной матрицы и углеродного волокна возникают как физические, так и химические связи. Именно поэтому адгезия является комплексным явлением. Если увеличить адгезионную прочность между наполнителем и эпоксидным связующим, то можно повысить и физико-механические характеристики ПКМ [19, 24]. По этой причине при разработке волокнистых материалов особое внимание уделяется границам раздела фаз (*interface*) и граничному слою (*interphase*) [24].

Для определения величины адгезии в системе «волокно–полимерная матрица» преимущественно используют методы pull out и push out [18–24]. Однако в работе [17] предложен усовершенствованный метод вытягивания из «узла», который позволяет определить данный параметр значительно быстрее. В работе [19] представлены основные положения по пробоподготовке образцов к испытаниям методом pull out. Автор исследовал зависимость адгезионной прочности от степени отверждения и способа модификации полимерной матрицы. Установлена взаимосвязь прочности границы раздела фаз и физико-механических свойств волокнистых ПКМ.

На рис. 1 приведены наиболее распространенные схемы испытаний для оценки адгезионной прочности в системе «волокно–полимерная матрица». Согласно данным работы [23], для определения среднего значения адгезионной прочности требуется большое количество образцов. Кроме того, для испытаний используют отдельный монофиламент, что не соответствует реальным условиям работы армирующих волокон в виде жгутов или тканей в армированных пластиках. Одним из главных недостатков метода pull out, по мнению авторов статьи [24], является то, что разрушение при испытаниях углеродных и стеклянных мононитей происходит не на границе раздела фаз с полимерной матрицей, а по волокну. Именно по этой причине наиболее перспективным методом исследования адгезионной прочности является метод push out, который исключает повреждение волокна в ходе испытаний. Большинство микромеханических

методов определения адгезии характеризуются значительной трудоемкостью и длительностью проведения испытаний, а также требуют высокой квалификации персонала. Вследствие непостоянного диаметра по длине волокна существует неопределенность при расчете площади адгезионного контакта. Из-за влияния геометрической формы и переменного по длине диаметра углеродных волокон могут возникать остаточные напряжения, что приводит к искажению результатов испытаний. В результате возникает разброс получаемых данных, что усложняет проведение статистической обработки [23, 24].

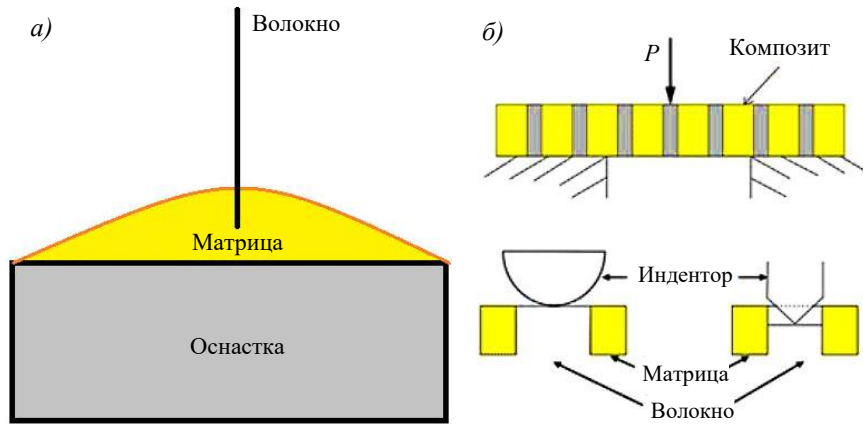


Рис. 1. Методы определения адгезионной прочности в системе «волокно–полимерная матрица»: а – pull out; б – push out ( $P$  – нагрузка) [18]

Существуют и другие способы определения адгезионной прочности, такие как фрагментация волокна и метод трех волокон. Однако данные методы имеют ряд ограничений, которые приведены в работах [17–19, 24].

Согласно работе [24], в большинстве случаев адгезионную прочность измеряют в условиях сдвиговой нагрузки. Именно поэтому адгезию между полимерным связующим и углеродным наполнителем оценивают с помощью методов межслойного сдвига и межслоевой трещиностойкости по *модам* I и II.

В связи с часто возникающими проблемами при пробоподготовке образцов к испытаниям методом pull out в ФРГ разработан прибор, который позволяет работать с разными видами полимерных матриц в широком диапазоне температур.

В настоящее время одним из самых распространенных методов получения изделий из ПКМ является вакуумная инфузия [3]. При проведении этого технологического процесса необходимо понимать, насколько хорошо смачивается углеродный тканый наполнитель эпоксидным связующим [3, 25, 26].

На протяжении нескольких лет для оценки смачиваемости углеродного волокна применяется метод определения краевого угла смачивания (рис. 2), который подробно описан в научно-технической литературе [27–29]. Тем не менее данный метод не всегда является достаточно информативным.

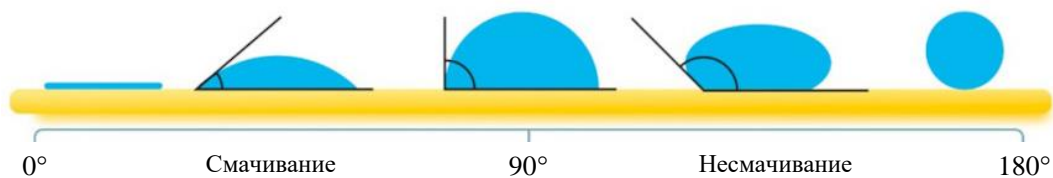


Рис. 2. Определение краевого угла смачивания [27]

Следует отдельно выделить описанный в работе [30] метод для определения смачиваемости углеродных жгутов связующими – растекание капли по горизонтально расположенному углеродному волокну.

Цель данной работы – установить взаимосвязь между смачиваемостью волокна и величиной адгезии эпоксидного связующего к углеродным волокнам отечественного и зарубежных производителей.

### Материалы и методы

В качестве полимерного связующего использовали двухкомпонентное эпоксидное связующее ВСЭ-30, основные свойства которого представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства связующего ВСЭ-30 и его аналогов [31]

Показатель	Значения показателей для связующего	
	ВСЭ-30 (НИИ «Курчатовский институт» – ВИАМ)	Epicote LR285 MGS Aero/LH286 (компания Hexion)
Температура стеклования, °С	115	85–90
Вязкость при 25 °С, Па·с	0,45	0,06–0,10
Температура формообразования, °С	15–30	15–30
Жизнеспособность при 25±5 °С, мин	100	40
Температура доотверждения, °С (продолжительность, ч)	120 (4)	80 (15)

Эпоксидное связующее ВСЭ-30 производства НИИ «Курчатовский институт» – ВИАМ по сравнению с отечественными аналогами Т-32 и ЭПС-И-108 обладает низкой вязкостью, что позволяет легко инжектировать его в герметично собранный пакет для процесса инфузионной пропитки тканого наполнителя [31].

В качестве углеродных наполнителей использованы волокна китайского (УВI), российского (УМТ42S-3К (УВII), УМТ49S-12К (УВIII)) и японского (УВIV) производителей (табл. 2).

Таблица 2

Свойства высокопрочных углеродных волокон разных производителей

Показатель	Значения показателей для углеродного волокна			
	УВI	УВII	УВIII	УВIV
Линейная плотность, текс	198±6	190	770	800
Прочность при растяжении, МПа	≥4000	4200	4900	≥4900
Модуль упругости, ГПа	220–260	240–270	250–270	≥230
Относительное удлинение, %	≥1,5	≥1,5	≥1,8	≥2,0
Содержание аппрета на нити, % (по массе)	1,0–1,5	1,0–1,7	1,0–1,6	1,0–1,5
Плотность волокна, г/см <sup>3</sup>	1,78±0,05	1,78±0,03	1,78±0,03	1,80±0,03
Тип аппрета	Эпоксидный			

В качестве вспомогательного жгута для затягивания узла выбран жгут Русар-НТ (табл. 3). Арамидные волокна третьего поколения обладают рекордными прочностными показателями и значительной адгезией к эпоксидным связующим.

Свойства арамидного жгута Русар-НТ

Показатель	Значения показателей
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,45
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

На базе НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработан модифицированный метод вытягивания из «узла», который заключается в следующем [17]. На специальной установке 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. Далее проводят затягивание узла из арамидного волокна согласно рекомендациям, которые приведены в научно-технической литературе.

Способ затягивания узла на пропитанном участке неотвержденного микропластика представлен на рис. 3.

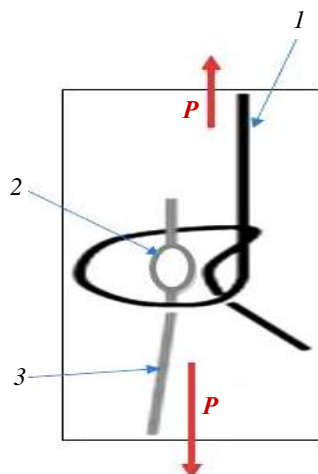


Рис. 3. Схема формирования адгезионной ячейки: 1 – арамидный жгут Русар-НТ; 2 – капля эпоксидного связующего ВСЭ-30; 3 – углеродное волокно ( $P$  – нагрузка)

Чтобы определить адгезионную прочность между термореактивной матрицей и углеродными волокнами разных производителей, использованы метод, представленный в работе [17], и метод pull out [19–22]. Образцы, которые испытывали методом pull out, получали на специализированном приборе, представленном в МГТУ им. Н.Э. Баумана [18, 21, 22].

В целях обеспечения целостности микропластика, который зажимается в испытательной машине, его края обматывают клейкой лентой (рис. 4).

При растяжении образцов в разрывной машине происходит разрушение связи между углеродным волокном и матрицей, соответствующее максимуму усилия на деформационной кривой. Адгезионную прочность при сдвиге рассчитывали согласно формуле

$$\sigma = P/S,$$

где  $P$  – нагрузка, Н;  $S$  – площадь адгезионного контакта, мм<sup>2</sup>.

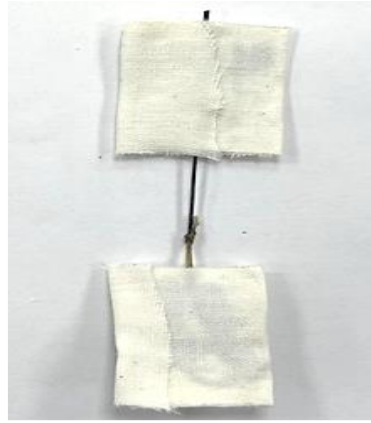


Рис. 4. Типовой образец для испытаний на вытягивание из «узла»

Площадь адгезионного контакта рассчитывали по формуле [32, 33]

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

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотность углеродного жгута и арамидной нити соответственно, г/см<sup>3</sup>;  $T_1$  и  $T_2$  – линейная плотность углеродного жгута и арамидной нити соответственно, текс;  $\varphi$  – степень наполнения (согласно данным работы [32],  $\varphi = 0,87$ ).

Метод, представленный в работе [17], по сравнению с методом pull out технически проще и менее трудоемок.

Для определения смачиваемости углеродных волокон эпоксидным связующим использован метод, описанный в работе [30] (рис. 5). Метод заключается в следующем [17, 18]. На две опорные рамы натягивают жгут из углеродного волокна. По центру натянутого жгута углеродных волокон наносят каплю связующего ВСЭ-30, отобранного с помощью пластиковой пипетки. После растекания капли и пропитки волокон связующим рамку помещают в термощкаф для отверждения пропитанного участка. После отверждения полученный участок вырезают из жгута и взвешивают на аналитических весах.

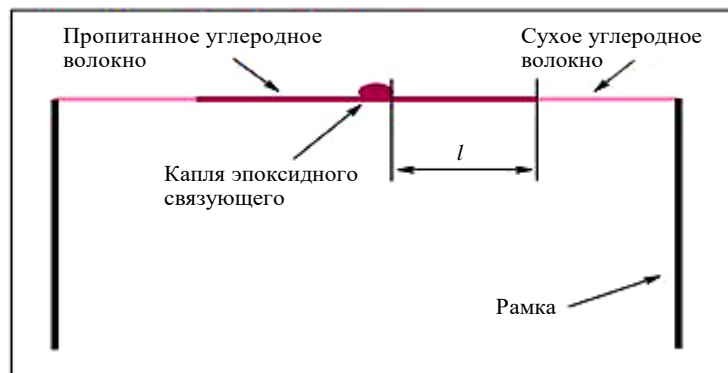


Рис. 5. Схема метода оценки смачиваемости углеродного волокна эпоксидным связующим ( $l$  – длина пропитанной части) [30]

Далее определяют длину пропитанного связующим участка и рассчитывают массу связующего на этом участке.

Масса волокна на пропитанном участке рассчитывается по формуле

$$m_f = l\rho_{lin},$$

где  $\rho_{lin}$  – линейная плотность волокна, текс;  $l$  – длина пропитанного участка, мм.

Масса отвержденного эпоксидного связующего на пропитанном участке определяется по формуле

$$m_r = m - m_f,$$

где  $m_r$  – масса эпоксидной смолы, которая впиталась в результате смачивания углеродного волокна, г;  $m_f$  – масса углеродного волокна, г;  $m$  – масса пропитанного участка, г.

Массовую долю связующего рассчитывают по формуле

$$M = \frac{m_r}{m} \cdot 100 \%$$

Далее определяют отношение длины пропитанного участка к массовой доле связующего на этом участке – коэффициент  $K$ , который характеризует смачиваемость жгута в динамических условиях растекания:

$$K = l/M.$$

В работе [30] для оценки смачиваемости использовали только длину пропитанной части  $l$ . По мнению авторов данной статьи, соотношение  $l/M$  более точно характеризует смачивание в условиях пропитки.

Для исследования поверхности углеродных филаментов проводили удаление аппрета согласно ГОСТ Р ИСО 10548–2012.

### Результаты и обсуждение

По результатам проведения испытаний на определение величины адгезионной прочности модифицированным методом вытягивания из «узла» и оценке смачиваемости методом, предложенным в литературе [30], были получены результаты, представленные в табл. 4. В целях правильного определения среднего значения адгезионной прочности необходимо провести испытания образцов с тремя различными величинами площади контакта. Этого можно достичь с помощью варьирования количества арамидных жгутов перед затягиванием узла.

Таблица 4

**Адгезионная прочность, измеренная методом вытягивания из «узла», и смачиваемость углеродных волокон отечественного и зарубежных производителей с эпоксидным связующим ВСЭ-30**

Показатель	Значения показателей для углеродного волокна											
	УВІ			УВІІ			УВІІІ			УВІV		
Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Площадь контакта, мм <sup>2</sup>	1,07	1,31	1,51	1,10	1,30	1,50	4,04	4,32	5,18	4,08	4,37	4,88
Адгезионная прочность в выборке, МПа:												
минимальная	78,6	78,2	74,9	52,8	58,8	58,1	52,6	57,7	47,5	53,5	65,5	56,2
средняя	84,2	96,0	80,9	63,3	73,3	73,4	62,6	62,5	63,9	61,3	72,3	63,6
максимальная	88,1	104,6	86,5	73,7	83,2	84,7	71,4	67,4	78,6	72,8	82,4	71,4
Среднее значение адгезионной прочности, МПа	87,0			70,0			63,0			65,7		
Коэффициент смачиваемости жгута (среднее значение)	60,0			33,5			31,8			57,2		
Содержание аппрета, %	1,12			1,00			1,00			1,00		

Для подтверждения данных, полученных с помощью модифицированного метода вытягивания из «узла», определена величина адгезионной прочности между углеродным волокном УВІ и связующим ВСЭ-30 методом pull out.

Средний показатель адгезионной прочности между углеродным волокном производства КНР и эпоксидным связующим ВСЭ-30 при трех глубинах погружения мононити составил 84,0 МПа.

Согласно результатам, представленным в табл. 4, наибольшей адгезией к связующему ВСЭ-30 обладают волокна УВІ, наименьшей – волокна марки УМТ49S-12К (УВІІ). Самое низкое значение коэффициента смачиваемости, который определен с помощью метода представленного в работе [30], также имеет углеродное волокно УВІІ. Вероятно, это связано с несколькими факторами: поверхностью и формой сечения углеродного волокна, количеством и химической совместимостью аппрета с наполнителем.

Для оценки смачиваемости углеродных волокнистых наполнителей эпоксидным связующим проведены исследования их поверхности. С помощью сканирующего электронного микроскопа получены фотографии поверхности углеродных волокон без аппрета (рис. 6).

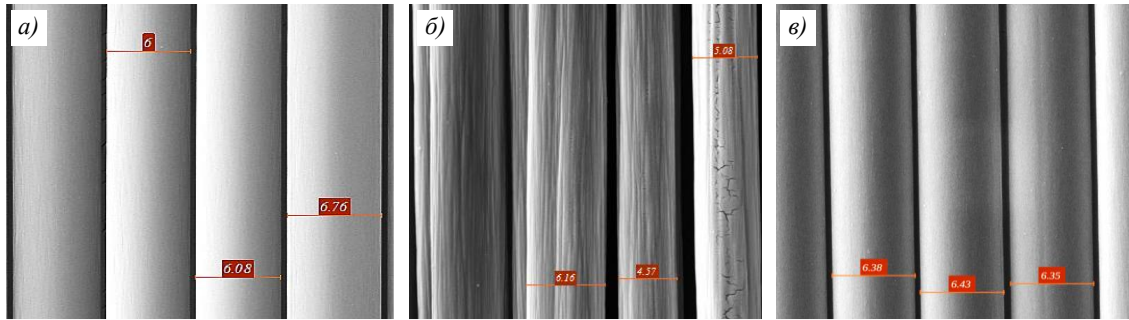


Рис. 6. Фотографии ( $\times 5000$ ) углеродных волокон УВІ (а), УВІІ (б) и УВІV (в) после удаления аппрета

Согласно данным табл. 4, наибольшее количество аппрета находится на поверхности углеродного волокна производства КНР. Оно обладает наилучшей адгезионной прочностью и коэффициентом смачиваемости.

Можно отметить, что российское углеродное волокно имеет фибриллизованную поверхность (рис. 6, б), что может оказывать влияние на смачиваемость. Кроме того, на смачиваемость углеродного волокна могут влиять рельеф его поверхности, содержание аппрета и геометрическая форма сечения элементарного волокна [34].

### Заключения

Углеродное волокно производства КНР обладает наилучшим средним значением адгезионной прочности со связующим ВСЭ-30. Вероятно, это связано с тем, что оно имеет сечение круглой формы и наибольшее количество аппрета на поверхности.

Углеродное волокно УВІІ имеет среднее значение адгезионной прочности со связующим ВСЭ-30 (70,0 МПа), которое находится в диапазоне, ограниченном значениями для углеродных волокон УВІ и УВІV (87,0 и 65,7 МПа соответственно).

Значения показателей адгезионной прочности углеродных волокон УВІІ и УВІV с эпоксидным связующим ВСЭ-30 близки, однако углеродное волокно УВІV имеет лучшую смачиваемость за счет гладкой поверхности.

Наименьшие показатели адгезионной прочности и смачиваемости углеродного волокна УВІІ связующим ВСЭ-30 могут быть связаны с тем, что оно имеет фибриллизованную поверхность. Кроме того, влияние может оказывать и геометрическая форма сечения филаментов.

Установлено, что величина адгезионной прочности для углеродных волокон с одинаковой линейной плотностью (УВІ и УВІІ) коррелирует с коэффициентом смачиваемости.

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»).

### Благодарности

Авторы выражают благодарность ведущему научному сотруднику, к.т.н. А.И. Гуляеву и ведущему инженеру Е.В. Куршеву за предоставленные снимки углеродных волокон.

### 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., Каравасев 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: 02.09.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
4. 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.
5. Войтенко В.А., Привалова Н.М. Модификация компаундов на основе эпоксидных смол // *Научные труды КубГТУ*. 2019. № 7. С. 288–295.
6. Максимова Ю.Р., Шабалкина Т.Ю., Юманова Л.А. и др. Модификация эпоксидной смолы фурфуроловым спиртом // *Научные известия*. 2022. № 29. С. 232–234.
7. Любимогов А.А., Хамзина Д.А., Борисов С.В. и др. Модификация эпоксидной смолы ЭД-20 фосфатами меди и аммония // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2025. № 5. С. 42–48. DOI: 10/31044/1813-7008-2025-0-5-42-48.
8. Киляков Д.А., Татарканов А.А. Модификация эпоксидных смол углеродными нанотрубками (обзор) // *Теория и практика приоритетных научных исследований: сб. науч. тр. по материалам X Междунар. науч.-практ. конф. Смоленск: Наукофера, 2019. С. 44–49.*
9. Мухамедгалиев Б.А. Разработка технологии модификации эпоксидной смолы ЭД-20 фосфорсодержащими полимерами // *Химическая промышленность сегодня*. 2005. № 3. С. 44–47.
10. Садыгов Ш.Ф., Ищенко Н.Я., Назаралиев Х.Г., Агаева С.А. Галоидсодержащие модификаторы для эпоксидных смол // *Пластические массы*. 2011. № 4. С. 24–26.
11. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные 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.
12. Нурмухаметова А.Н., Хамидуллин А.Р., Зенитова Л.А. Углеродное волокно. Получение, модификация, свойства, области применения // *Бутлеровские сообщения*. 2020. Т. 62. № 5. С. 1–44.
13. Григорян Н.С., Губанов А.А., Ваграмян Т.А., Коршак Ю.В. Электрохимическая модификация поверхности углеродного волокна // *Журнал прикладной химии*. 2015. Т. 88. № 7. С. 1059–1065.
14. 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.
15. Морозов С.В. Влияние модификации поверхности углеродных волокон на физико-механические характеристики углепластиков // *Ползуновский вестник*. 2022. № 1. С. 134–138.
16. Клименко И.В. Углеродные волокна на основе пека: состояние производства и модификация свойств // *Химическая физика*. 2022. Т. 41. № 2. С. 70–77.
17. Иванов 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.
18. Иванов 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: 15.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-170-184.

19. Горбаткина Ю.А. Адгезионная прочность в системах полимер–волокно. М.: Химия, 1987. 192 с.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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). С. 104–118. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.
24. 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: 15.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-68-78.
25. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Особенности технологии и полимерные композиционные материалы для изготовления крыльев перспективных самолетов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). С. 66–75. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-66-75.
26. Белинис П.Г., Донецкий К.И., Лукьяненко Ю.В., Рогожников В.Н., Майер Ю., Быстрикова Д.В. Объемно-армирующие цельнотканые преформы для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 4 (57). С. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
27. Рехвиашвили С.Ш., Кишტიкова Е.В. Поверхностное натяжение, линейное натяжение и краевой угол смачивания малой капли в изотермических условиях // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2014. Т. 50. № 1. С. 3–7. DOI: 10.7868/S0044185614010112.
28. Валуева М.И., Зеленина И.В., Хасков М.А., Гуляев А.И. Подготовка углеродного волокна к нанесению интерфазного покрытия для композиционных материалов с керамической матрицей // Труды ВИАМ. 2017. № 10 (58). С. 79–89. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-9-9.
29. Злобина И.В., Бекренев Н.В., Чуриков Д.О. Оценка смачиваемости наполнителя связующим в процессе изготовления препрега с воздействием ультразвука для трехмерной печати филламентами, армированными непрерывным углеродным волокном // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2024. Т. 24. № 1. С. 52–61. DOI: 10.18500/1817-3020-2024-24-1-52-61.
30. Ilyin S.O., Kotomin S.V. The effect of nanoparticles and their anisometry on the adhesion and strength of hybrid epoxy nanocomposites reinforced with carbon fiber // Journal of Composites Science. 2023. Vol. 7. No. 4. P. 147.
31. 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: 15.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-31-39.
32. 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.
33. 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.
34. 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.

## 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., 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), pp. 22–33. Available at: <https://www.journal.viam.ru> (accessed: September 02, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
4. Yarullin R.R. Modification of epoxy resins as a method for producing 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.
5. Voitenko V.A., Privalova N.M. Modification of compounds based on epoxy resins. *Nauchnye trudy KubGTU*, 2019, no. 7, pp. 288–295.
6. Maksimova Yu.R., Shabalkina T.Yu., Yumanova L.A. et al. Modification of epoxy resin with furfuryl alcohol. *Nauchnye izvestiya*, 2022, no. 29, pp. 232–234.
7. Lyubibogov A.A., Khamzina D.A., Borisov S.V. et al. Modification of ED-20 epoxy resin with copper and ammonium phosphates. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2025, no. 5, pp. 42–48. DOI: 10/31044/1813-7008-2025-0-5-42-48.
8. Kilyakov D.A., Tatarkanov A.A. Modification of epoxy resins with carbon nanotubes (review). *Theory and practice of priority scientific research: Coll. of sci. papers based on the materials of the X Int. Sci. and Pract. Conf.* Smolensk: Naukosfera, 2019, pp. 44–49.
9. Mukhamedgaliev B.A. Development of a technology for modifying ED-20 epoxy resin with phosphorus-containing polymers. *Khimicheskaya promyshlennost segodnya*, 2005, no. 3, pp. 44–47.
10. Sadygov Sh.F., Ishchenko N.Ya., Nazaraliev Kh.G., Agaeva S.A. Halogen-containing modifiers for epoxy resins. *Plasticheskie massy*, 2011, no. 4, pp. 34–26.
11. 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.
12. Nurmukhametova A.N., Khamidullin A.R., Zenitova L.A. Carbon fiber. Obtaining, modification, properties, areas of application. *Butlerovskiye soobshcheniya*, 2020, vol. 62, no. 5, pp. 1–44.
13. Grigoryan N.S., Gubanov A.A., Vagramyan T.A., Korshak Yu.V. Electrochemical modification of the surface of carbon fiber. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 2015, vol. 88, no. 7, pp. 1059–1065.
14. 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.
15. Morozov S.V. Influence of Carbon Fiber Surface Modification on the Physicomechanical Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Plastics. *Polzunovskiy Vestnik*, 2022, no. 1, pp. 134–138.
16. Klimenko I.V. Pitch-Based Carbon Fibers: State of Production and Property Modification. *Khimicheskaya fizika*, 2022, vol. 41, no. 2, pp. 70–77.
17. Ivankov R.R. Determination of the strength of the adhesive bond between carbon fibers and an epoxy matrix. *Physical and mechanical tests, strength and reliability of modern structural and functional materials: Proc. XVII All-Rus. Conf. on Testing and Research of Material Properties «TestMat».* Moscow, 2025, pp. 140–162.
18. 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: October 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-170-184.
19. Gorbatkina Yu.A. *Adhesion strength in polymer-fiber systems.* Moscow: Khimiya, 1987, 192 p.
20. Gorbatkina Yu.A., Zhuravleva O.A., Ivanova-Mumzhiyeva V.G., Chebotarev V.P. Effect of polysulfone molecular weight on the adhesion of epoxy-polysulfone binders to fibers. *Plasticheskie massy*, 2017, no. 5–6, pp. 14–17.
21. Nelyub V.A., Guskov A.M., Belov P.A. On the design of carbon fiber-reinforced plastics for tensile testing taking into account fiber adhesion to the matrix. *Aktualnye problemy gumanitarnykh i yestestvennykh nauk*, 2014, no. 12-1, pp. 62–66.

22. 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 naukoymkie tekhnologii*, 2019, no. 6, pp. 96–100.
23. 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), pp. 104–118. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.
24. 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: October 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-68-78.
25. Timoshkov P.N., Goncharov V.A., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Features of technology and polymer composite materials for the manufacture of wings of advanced aircraft (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), pp. 66–75. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-66-75.
26. Belinis P.G., Donetskiy K.I., Lukyanenko Yu.V., Rogozhnikov V.N., Mayer Yu., Bystrikova D.V. Volume reinforcing solid-woven preforms for manufacturing of polymer composite materials (review). *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 18–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26.
27. Rekhviashvili S.Sh., Kishtikova E.V. Surface tension, linear tension and contact angle of a small drop under isothermal conditions. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov*, 2014, vol. 50, no. 1, pp. 3–7. DOI: 10.7868/S0044185614010112.
28. Valueva M.I., Zelenina I.V., Khaskov M.A., Gulyaev A.I. Preparation of carbon fibers to interphase coating deposition for ceramic matrix composites. *Trudy VIAM*, 2017, no. 10 (58), pp. 79–89. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-9-9.
29. Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Churikov D.O. Evaluation of filler wettability by binder in the process of ultrasound-assisted prepreg manufacturing for three-dimensional printing with continuous carbon fiber-reinforced filaments. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Ser.: Fizika*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 52–61. DOI: 10.18500/1817-3020-2024-24-1-52-61.
30. Ilyin S.O., Kotomin S.V. The effect of nanoparticles and their anisometry on the adhesion and strength of hybrid epoxy nanocomposites reinforced with carbon fiber. *Journal of Composites Science*, 2023, vol. 7, no. 4, p. 147.
31. 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: October 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-31-39.
32. 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.
33. Kotomin S.V., Obidin I.M., Pavlyuchkova E.A. Scale factor in testing adhesive-glye joints of heteroaramid yarns using the «loop» method. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2023, no. 11, pp. 35–40.
34. 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 tekhnologii*, 2019, no. 4 (57), pp. 80–86. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-80-86.

#### Информация об авторах

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

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

**Котомин Сергей Владимирович**, профессор, д.х.н., МГТУ им. Н.Э. Баумана, [bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)

#### Information about the authors

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

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

**Sergey V. Kotomin**, Professor, Doctor of Sciences (Chem.), Bauman Moscow State Technical University, [bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)

Статья поступила в редакцию 02.04.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.04.2026.  
The article was submitted 02.04.2026; approved and accepted for publication after reviewing 06.04.2026.