

Научная статья

УДК 620.179.4

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29107>



*Е.Д. Васильева* ✉, *А.Н. Иванов*

Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН»,  
Якутск, Россия

✉ [vasilyeva\\_edm@mail.ru](mailto:vasilyeva_edm@mail.ru)

## **ОЦЕНКА АДГЕЗИИ МАТРИЦА–ВОЛОКНО С ПОМОЩЬЮ ПЛАТФОРМЫ УДАЛЕННОГО КОНТРОЛЯ С АНАЛОГОВО-ЦИФРОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ARDUINO**

*Аннотация.* В работе рассмотрены два подхода к проведению испытаний по оценке межфазного взаимодействия адгезионного контакта поверхностей «базальтовое волокно–эпоксидная матрица», а именно метод отрыва капли с волокна и метод отрыва адгезионного контакта волокно–матрица, с использованием платформы с аналогово-цифровым преобразователем для удаленного контроля Arduino. В ходе двух испытаний были выявлены результаты, сопоставимые с работами других исследователей. Предложен вариант устройства для определения параметров межфазного взаимодействия между волокном и матрицей с возможностью варьировать параметрами нагружения и зоны нагружения. Таким образом, устройство с использованием платформы с аналогово-цифровым преобразователем Arduino может быть рекомендовано для внедрения в систему контроля качества адгезии межфазного взаимодействия границ раздела «базальтовое волокно–эпоксидная матрица».

*Ключевые слова:* адгезия, межфазное взаимодействие, эпоксидная смола, базальтовое волокно, микропластик, микропроцессор.

*Благодарности:* Работа выполнена в рамках Государственного задания Минобрнауки России (шифр №FSRG-2022-0011).

*Для цитирования:*

Васильева Е.Д., Иванов А.Н. Оценка адгезии матрица–волокно с помощью платформы удаленного контроля с аналогово-цифровым преобразователем Arduino // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 1. С. 129–138. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29107>



*E.D. Vasileva* ✉, *A.N. Ivanov*

Federal Research Centre  
“The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”,  
Yakutsk, Russia

✉ [vasilyeva\\_edm@mail.ru](mailto:vasilyeva_edm@mail.ru)

## MATRIX–FIBER ADHESION ASSESSMENT USING THE ARDUINO ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER REMOTE CONTROL PLATFORM

*Abstract.* This paper considers two approaches to conducting tests to evaluate the basalt fiber–epoxy matrix interfacial adhesion using the Arduino analog-to-digital converter remote control platform. The approaches include the droplet detachment method from the fiber and the fiber–matrix detachment method. The results obtained in the two tests showed results comparable to those of other researchers. A variant of the device for determination of the fiber–matrix interface interaction parameters with the possibility of adjusting the loading parameters and loading zone is proposed. Thus, a device using Arduino analog-to-digital converter platform can be recommended for implementation for adhesion quality control of the fiber–epoxy matrix interface interaction.

*Keywords:* adhesion, interfacial interaction, epoxy, basalt fiber, microplastic, microprocessor.

*Acknowledgements:* The work was carried out within the framework of the State task of the Ministry of Education and Science of Russia (code No. FSRG-2022-0011).

*Citation:*

E.D. Vasileva, A.N. Ivanov, Matrix–fiber adhesion assessment using the Arduino analogue-to-digital converter remote control platform, *Global Energy*, 29 (01) (2023) 129–138, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29107>

**Введение.** Принято считать, что взаимодействие поверхности полимера с рельефной поверхностью волокна [2], характеризуется наличием молекулярных и химических связей, а также свойств соприкасающихся поверхностей (выемок, выступов, наличием и генезисом аппрета с замасливателем). К примеру, энергия химической ковалентной связи варьируется от 200 до 900 кДж/моль, водородная связь от 8 до 42 кДж/моль [1], а энергия Ван-дер-Ваальсового взаимодействия 10,5 кДж/моль.

К сожалению, макроскопические испытания межфазного взаимодействия в композитах могут дать только качественную сравнительную информацию о состоянии границы раздела волокно–матрица. В случаях, когда требуется количественная характеристика производительности межфазного взаимодействия границ раздела волокно–матрица, обычно прибегают к использованию одного из микромеханических испытаний [3]. Для понимания процессов, происходящих на границе раздела волокно–матрица в армированных полимерных композиционных материалах можно прибегать к приближенным методам оценки адгезионного межфазного взаимодействия путем определения прочности на разрыв, изучения структуры и состояния границы раздела с применением оптических и спектрометрических методов анализа. Определяющими факторами прочности энергии сцепления волокна к полимерной матрица являются затраченное усилие и время на разрушение адгезионного контакта, по которым проводится характеристика соединения.

Для определения параметров межфазного взаимодействия между волокном и матрицей разработано достаточно большое количество методов испытаний, которые подразделяют на две основные категории [4]. Первая группа включает испытания, в которых внешне нагружается только волокно: выталкивание единичного волокна [5–7, 14], вытягивание единичного волокна [8, 13] с его вариациями. Вторая группа включает различные испытания на вытягивание пучков волокон [9–12].

Известный способ выдергивания волокна (pull-out test) [14] в микропластике с наименьшей погрешностью характеризует прочность волокна с полимерным связующим. Величина приложенного напряжения, возникающего при нарушении сцепления между адгезивом (полимерным связующим) и субстратом (волокно), принимается равной адгезионной прочности [15].

*Целью данной работы* является оценка работы адгезии волокна с эпоксидной матрицей методом определения нагрузки на отрыв микрокапли связующего с базальтового волокна, а также нагрузки на разрыв контакта базальтового ровинга с эпоксидным связующим в однонаправленном микропластике.

### Материалы и оборудование

Связующим компонентом выбрана матрица составом: эпоксидная смола  $56,7 \pm 0,2$  % по масс. ЭД-20 (Hefei TNJ Chemical Industry Co., Ltd., Китай),  $42,5 \pm 0,2$  % по масс. изо-МТФГА (АО «Стерлитамакский нефтехимический завод, Россия),  $0,8 \pm 0,05$  % по масс. УП-606/2 (АО «Стерлитамакский нефтехимический завод, Россия) согласно РТП-СП2-20994511-1999Т.

Исследование адгезионной прочности склеек полимерных композиций на базальтовом волокне проводили на нитях базальтового ровинга РБ(Т) 18-2400-041М (ООО «МАГМАнит», г. Великий Новгород) по ТУ 23.14.11-001-28511481-2019. Отбор образцов проводили вручную согласно ГОСТ 18321-73 с использованием оптического микроскопа High Cloud (Shenzhen Ksl Electronic Equipment Co., Китай) при увеличении  $\times 10$  и на оптическом микроскопе Nikon Eclipse LV100 (Nikon, Япония) при увеличении  $\times 20$  (рис. 1). Диаметр элементарной нити равен 18 мкм, линейная плотность 2400 текс.

Микропластики изготавливали согласно рецептуре РТП-СП2-20994511-1999Т. Отобранные нити прикладывали друг на друга, таким образом, чтобы площадь контакта составляла не менее  $10 \text{ мм}^2$ , затем заливали подготовленным составом. Отверждение проводили при температуре  $160 \pm 2^\circ\text{C}$  в муфельной печи VULKAN-45 («», г. Кострома) в течение 4 часов с дальнейшим кондиционированием в течение 24 часов.

Фотографии микропластиков получены на оптическом микроскопе High Cloud (Shenzhen Ksl Electronic Equipment Co., Китай) при увеличении  $\times 20$ . Изображение межфазной границы в ме-

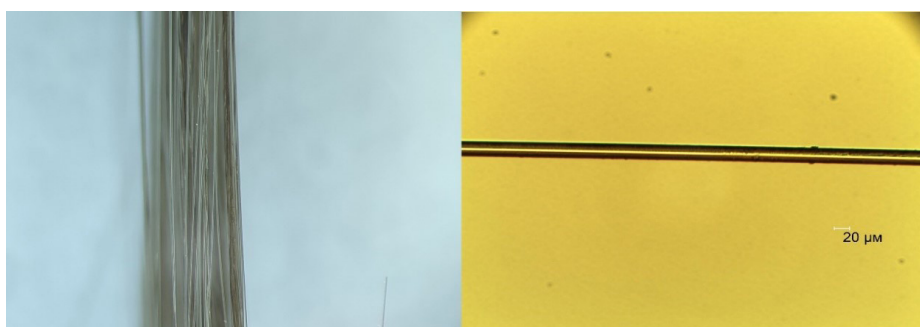


Рис. 1. Изображение базальтовой нити при увеличении в  $\times 10$  и единичного базальтового волокна при увеличении  $\times 20$

Fig. 1. Image of a basalt filament at  $\times 10$  magnification and a single basalt fibre at  $\times 20$  magnification

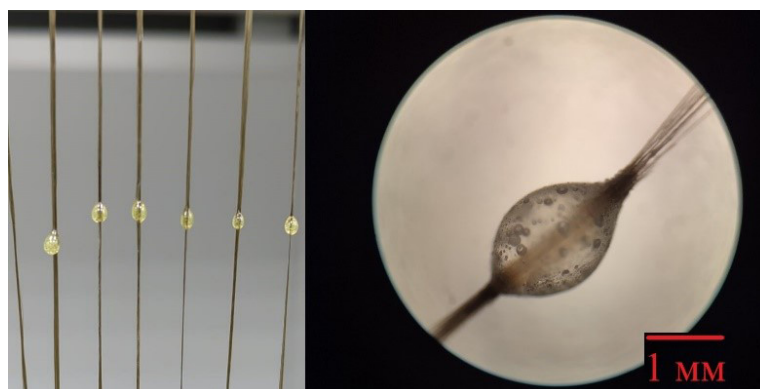


Рис. 2. Образцы базальтовой нити с нанесенными каплями связующего и изображение одной капли при увеличении x10

Fig. 2. Samples of basalt thread with applied binder droplets and an image of a single droplet at x10 magnification

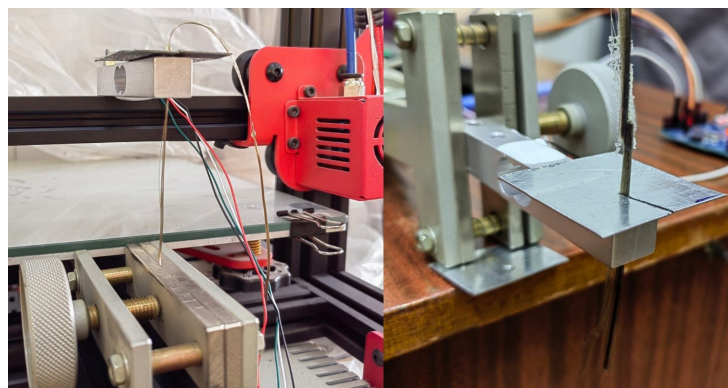


Рис. 3. Вид мостового тензодатчика с микропластиком

Fig. 3. View of a bridge strain gauge with microplastic

сте отрыва волокна от матрицы было получено на оптическом микроскопе Nikon Eclipse LV100 (Nikon, Япония).

Образцы нитей на отрыв микрокапли были подготовлены путем нанесения связующего с отвердителем, как показано на рис. 2.

Испытания на разрыв адгезионного контакта (рис. 3) проводили с помощью мостового тензодатчика из алюминия (рис. 4, в) подключенного к микроконтроллеру Arduino UNO (Италия) и платы с аналогово-цифровым преобразователем XFW-HX711 (Китай), зафиксированных на станине механизма движущейся верх-вниз со скоростью 0,1 мм/с, характеристики которых представлены в табл. 1–2.

Частота опроса датчика 10 сигналов в секунду (9600 бод). Калибровка проводилась с помощью гири массой 100 г с классом точности F2. Капля и Микропластик фиксировался на мостовом тензодатчике в месте склеивания для регистрирования сигнала приложенной нагрузки к площади контакта. При отрыве капли и сгибании микропластика сигнал с мостового тензодатчика считывался платой HX711 (рис. 4, а), далее сигнал передавался на микроконтроллер Arduino UNO (рис. 4, б) и затем с помощью среды разработки Arduino IDE (Version 2.0.0) сигнал преобразовывался в поток данных представленных в Н.

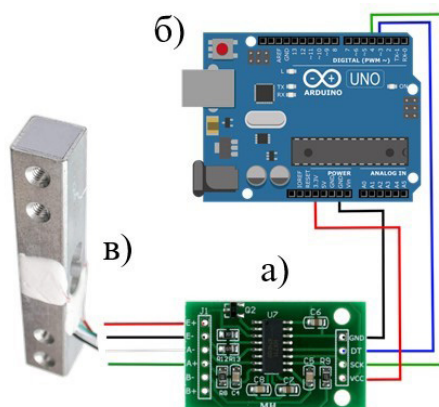


Рис. 4. Плата тензодатчика XFW-HX711 (а) и микроконтроллер Arduino UNO (б)

Fig. 4. XFW-HX711 load cell board (a) and Arduino UNO microcontroller (b)

Таблица 1

## Плата АЦП тензодатчика XFW-HX711

Table 1

## Load Cell ADC board XFW-HX711

Характеристика	Величина измерения
Дифференциальный вход с напряжением	$\pm 40$
Разрядность АЦП (точность преобразования)	24 бит (24 бит / D конвертер)
Частота обновления	80 Гц
Регулируемый коэффициент усиления	32, 64, 128
Рабочее напряжение	5В постоянного тока
Напряжение питания	от 2.6 – 5.5В
Рабочий ток	< 10 мА
Потребление тока	до 1.5 мА
Диапазон рабочих температур	$-40 \sim + 85 \text{ } ^\circ\text{C}$
Размеры	38×21×10 мм

## Результаты и обсуждение

На изображениях, представленных на рис. 5 видно, что адгезия эпоксидной смолы (рис. 5.1) и базальтового волокна (рис. 5.3) происходит путем механического заклинивания в порах и микроканалах волокна, с образованием локальных областей вращения (торсионов, рис. 5.2, 5.4) [1]. Согласно микрореологической теории, адгезия осуществляется за счет затекания адгезива в поры или трещины на поверхности субстрата с последующим затвердеванием. Таким образом, прочность адгезионного соединения определяется пористостью базальтового волокна и прочностью пленки эпоксидной матрицы.

Преобразованные сигналы, полученные с помощью оболочки для программирования ARDUINO IDE выдавали результаты в виде нагрузки, приложенной к зоне адгезионного контакта с пиком в точке разрушения, выдаваемом в виде силы в [Н]. Результаты полученных данных по двум методам испытания приведены в табл. 3.



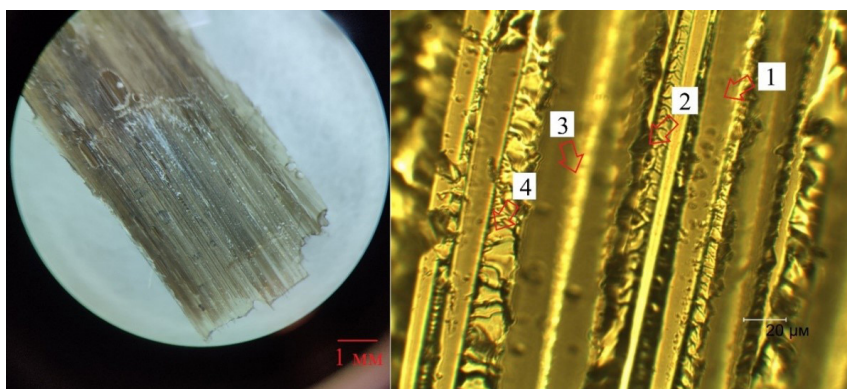


Рис. 5. Деформация микроструктуры полимерной матрицы на границе с базальтовыми волокнами при испытании на отрыв

Fig. 5. Deformation of the microstructure of the polymer matrix at the interface with the basalt fibres in a tear-off test

Таблица 2

**Микроконтроллер Arduino UNO Rev3**

Table 2

**Arduino UNO Rev3 microcontroller**

Характеристика	Величина измерения
Микроконтроллер	ATmega328P
Тактовая частота	16 МГц
Флеш-память	32 Кб, из которых 0.5 Кб используются для загрузчика
Рабочее напряжение	5 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7–12 В
Входное напряжение (предельное)	6–20 В
Цифровые входы/выходы	20
ШИМ выходы	6
Аналоговые входы	6, 10-бит
Максимальный постоянный ток через вход/выход	40 мА, рекомендуемый: 20мА
USB-разъем	USB, тип-B

По результатам двух испытаний, базальтовое волокно демонстрирует свойства сопоставимые с другими испытаниями (в зависимости от плотности нитей). В виду небольшого усилия на разрыв межфазной границы базальтовое волокно-эпоксидная матрица можно предположить, что адгезия образуется за счет физической и водородной связей, с характерным затеканием эпоксидной матрицы в дефекты волокна. В настоящее время в большинстве составов для пропитки базальтовых волокон используются составы, имитирующие стекловолокно, которые не могут улучшить свойства таких базальтовых волокон [19]. Следовательно, необходимо усовершенствовать рецептуру пропиточных составов для базальтового волокна с целью создания химического взаимодействия на границе раздела волокно-матрица.

**Вывод**

В работе рассмотрены два подхода к проведению испытаний по оценке межфазного взаимодействия адгезионного контакта поверхностей «базальтовое волокно-эпоксидная матрица». Согласно методу разрыва капли с волокна результаты получены немного ниже, чем в работах

Таблица 3

Результаты испытания методом разрыва адгезионного контакта (debonding),  
методом разрыва капли (single-microsphere debonding, microbond), выдергивания нити (pull-out)

Table 3

Test results of debonding, single-microsphere debonding, microbonding, pull-out

Материал межфазного контакта	Усилие, Н	Тип испытания	Источник
Базальтовое волокно/эпоксидная смола	3,64	debonding	Настоящая работа
	13,7–16,3	single-microsphere debonding	
Базальтовое волокно/эпоксидная смола	1,58	debonding	16
Базальтовое волокно/эпоксидная смола	20,7	single-microsphere debonding	15
Стекловолокно/эпоксидная смола	32,6	single-microsphere debonding	15
Углеродное волокно/эпоксидная смола	43,7	microbond	17
Углеродное волокно/эпоксидная смола	36,3	debonding	5
	39,5	fragmentation	18
Углеродное волокно/эпоксидная смола	18,8	debonding	5
	18,4	microbond	17
Углеродное волокно/эпоксидная смола	24,8	debonding	5
	25	pull-out	19
Полиэфирное волокно/эпоксидная смола	3,29	microbond	12
Стекловолокно/эпоксидная смола	9–11	microbond	20
Углеродное волокно/эпоксидная смола	0,12	microbond	8
Углеродное волокно/эпоксидная смола	4,01–12,36	microbond	11

других исследователей, что связано с высокими показателями текст и линейной плотностью ровинга. Метод разрыва адгезионного контакта волокно-матрица показал усилие на 2 Н выше, чем в сравниваемой работе в виду разницы геометрии площади контакта и неплохой смачиваемостью базальтового волокна с замасливателем 041М эпоксидной смолой. Предложенный вариант устройства определения параметров межфазного взаимодействия между волокном и матрицей дает возможность проводить различные методы идентификации нагрузки до разрушения на микропластиках и контролировать процесс путем внесения изменения силы и зоны нагружения. Таким образом устройство с использованием платформы с аналогово-цифровым преобразователем Arduino может быть рекомендовано для внедрения за контролем качества адгезии межфазного взаимодействия границ раздела «базальтовое волокно-эпоксидная матрица».

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] Majd M.T., Shahrabi T., Ramezanzadeh B. The role of neodymium based thin film on the epoxy/steel interfacial adhesion and corrosion protection promotion, Applied Surface Science, 464 (2019) 516–533. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.09.109

[2] Стýкач А.В., Динцер А.И. Исследование адгезионной прочности полимеров. Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. Специальный выпуск 1. С. 338–340. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-338-340

- [3] **Thomason J.** An overview of some scaling issues in the sample preparation and data interpretation of the microbond test for fibre-matrix interface characterisation, *Polymer Testing*, 111 (2022). DOI: 10.1016/j.polymertesting.2022.107591
- [4] **Zhou J., Li Y., Li N., Hao X., Liu C.** Interfacial shear strength of microwave processed carbon fiber/epoxy composites characterized by an improved fiber-bundle pull-out test, *Composites Science and Technology*, 133 (2016) 173–183. DOI: 10.1016/j.compscitech.2016.07.033
- [5] **Орешко Е.И., Ерасов В.С., Уткин Д.А., Яковлев Н.О.** Определение сдвиговой прочности полимерных композиционных материалов при индентировании // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2021. Т. 27. № 1. С. 73–88. DOI: 10.33113/mkmc.ras.2021.27.01.073\_088.06
- [6] **Gallo S.C., Li X., Zhang Z., Charitidis C., Dong H.** Viscoelastic response of carbon fiber reinforced polymer during push-out tests, *Composites Part A*, 112 (2018) 178–185. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.06.003
- [7] **Zhi C., Long H., Miao M.** Microbond testing and finite element simulation of fibre-microballoon-epoxy ternary composites, *Polymer Testing* 65 (2018), 450–458. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2017.12.029
- [8] **Nishikawa M. et al.** Micromechanical modeling of the microbond test to quantify the interfacial properties of fiber-reinforced composites, *International Journal of Solids and Structures*, 45 14-15 (2008) 4098–4113. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2008.02.021
- [9] **Котомин С.В.** Оценка прочности адгезионной связи волокно — термопластичная матрица методом петли // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2015. № 12. С. 1–10.
- [10] **Gorbatkina Ya.A.** Adhesive strength in fibre-polymer systems, Ellis Horwood Limited, Chichester, 1992. 264. DOI: 10.1002/pi.1994.210330423
- [11] **Wang H. et al.** An improved microbond test method for determination of the interfacial shear strength between carbon fibers and epoxy resin, *Polymer Testing* 32 (2013) 1460–1465 DOI: 10.1016/j.polymertesting.2013.09.017
- [12] **Gonzalez-Canche N.G., Flores-Johnson E.A., Carrillo J.G.** Mechanical characterization of fiber metal laminate based on aramid fiber reinforced polypropylene, *Composite Structures*. 172 (2017) 259–266. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.02.100
- [13] **Beter J., Maroh B., Schritteser B., Mühlbacher I., Griesser T., Schlögl S., Fuchs P.F., Pinter G.** Tailored interfaces in fiber-reinforced elastomers: a surface treatment study on optimized load coupling via the modified fiber bundle debond technique, *Polymers*, 13 (1) 36 (2021) DOI: 10.3390/polym13010036
- [14] **Гуляев А.И.** Измерение адгезионной прочности «волокно-матрица» с применением наноидентирования (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 3 (75). С. 68–78. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-68-78
- [15] **Liu Y., Zhang M., Liu H., Tian L., Liu J., Fu C., Fu X.** Properties of basalt fiber core rods and their application in composite cross arms of a power distribution network, *Polymers*, 14 (2022) DOI: 10.3390/polym14122443
- [16] **Mun S.Y., Ha J., Lee S., Ju Y., Lim H.M., Lee D.** Prediction of enhanced interfacial bonding strength for basalt fiber/epoxy composites by micromechanical and thermomechanical analyses, *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, 142 (2020). DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.106208
- [17] **Zhang F.H., Wang R.G., He X.D., Wang C., Ren L.N.** Interfacial shearing strength and reinforcing mechanisms of an epoxy composite reinforced using a carbon nanotube/carbon fiber hybrid, *J. Mater. Sci.* 44 (13) (2009) 3574–3577.
- [18] **Li M., Gu Y., Liu Y., Zhang Li Y.** Interfacial improvement of carbon fiber/epoxy composites using a simple process for depositing commercially functionalized carbon nanotubes on the fibers, *Carbon*, 52 (2013) 109–121. DOI: 10.1016/j.carbon.2012.09.011
- [19] **Song W., Gu A., Liang G., Yuan L.** Effect of the surface roughness on interfacial properties of carbon fibers reinforced epoxy resin composites, *Appl. Surf. Sci.*, 257 (9) (2011) 4069–4074. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.11.177
- [20] **Dsouza R. et al.** 3D interfacial debonding during microbond testing: Advantages of local strain recording, *Composites Science and Technology*, 195 (2020) 108163. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108163



## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ВАСИЛЬЕВА Елена Дмитриевна** — младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», без степени.

E-mail: vasilyeva\_edm@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8953-9309>

**ИВАНОВ Афанасий Ньюгунович** — инженер-исследователь сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», без степени.

E-mail: inanovafan98@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9009-3778>

## REFERENCES

- [1] **M.T. Majd, T. Shahrabi, B. Ramezanzadeh**, The role of neodymium based thin film on the epoxy/steel interfacial adhesion and corrosion protection promotion, *Applied Surface Science*, 464 (2019) 516–533. DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.09.109
- [2] **A.V. Stúkach, A.I. Dintser**, Issledovaniye adgezionnoy prochnosti polimerov. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*. 2021. Spetsialnyy vypusk 1. S. 338–340. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-338-340
- [3] **J. Thomason**, An overview of some scaling issues in the sample preparation and data interpretation of the microbond test for fibre-matrix interface characterisation, *Polymer Testing*, 111 (2022) DOI: 10.1016/j.polymertesting.2022.107591
- [4] **J. Zhou, Y. Li, N. Li, X. Hao, C. Liu**, Interfacial shear strength of microwave processed carbon fiber/epoxy composites characterized by an improved fiber-bundle pull-out test, *Composites Science and Technology*, 133 (2016) 173–183, DOI: 10.1016/j.compscitech.2016.07.033
- [5] **Ye.I. Oreshko, V.S. Yerasov, D.A. Utkin, N.O. Yakovlev**, Opredeleniye sdvigovoy prochnosti polimernykh kompozitsionnykh materialov pri indentirovaniy // *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy*. 2021. T. 27. № 1. S. 73–88. DOI: 10.33113/mkkm.ras.2021.27.01.073\_088.06
- [6] **S.C. Gallo, X. Li, Z. Zhang, C. Charitidis, H. Dong**, Viscoelastic response of carbon fiber reinforced polymer during push-out tests, *Composites Part A*, 112 (2018) 178–185. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.06.003
- [7] **C. Zhi, H. Long, M. Miao**, Microbond testing and finite element simulation of fibre-microballoon-epoxy ternary composites, *Polymer Testing* 65 (2018), 450–458. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2017.12.029
- [8] **M. Nishikawa et al.**, Micromechanical modeling of the microbond test to quantify the interfacial properties of fiber-reinforced composites, *International Journal of Solids and Structures*, 45 14-15 (2008) 4098–4113. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2008.02.021
- [9] **S.V. Kotomin**, Otsenka prochnosti adgezionnoy svyazi volokno — termoplastichnaya matritsa metodom petli // *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2015. № 12. S. 1–10.
- [10] **Ya.A. Gorbatkina**, Adhesive strength in fibre-polymer systems, Ellis Horwood Limited, Chichester, 1992. 264. DOI: 10.1002/pi.1994.210330423
- [11] **H. Wang et al.**, An improved microbond test method for determination of the interfacial shear strength between carbon fibers and epoxy resin, *Polymer Testing* 32 (2013) 1460–1465. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2013.09.017
- [12] **N.G. Gonzalez-Canche, E.A. Flores-Johnson, J.G. Carrillo**, Mechanical characterization of fiber metal laminate based on aramid fiber reinforced polypropylene, *Composite Structures*. 172 (2017) 259–266. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.02.100
- [13] **J. Beter, B. Maroh, B. Schritteser, I. Mühlbacher, T. Griesser, S. Schlögl, P.F. Fuchs, G. Pinter**, Tailored interfaces in fiber-reinforced elastomers: a surface treatment study on optimized load coupling via the modified fiber bundle debond technique, *Polymers*, 13 (1) 36 (2021). DOI: 10.3390/polym13010036

- [14] **A.I. Gulyayev**, Izmereniye adgezionnoy prochnosti «volokno-matritsa» s primeneniym nanoidentirovaniya (obzor) // Trudy VIAM. 2019. № 3 (75). S. 68–78. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-68-78
- [15] **Y. Liu, M. Zhang, H. Liu, L. Tian, J. Liu, C. Fu, X. Fu**, Properties of basalt fiber core rods and their application in composite cross arms of a power distribution network, *Polymers*, 14 (2022) DOI: 10.3390/polym14122443
- [16] **S.Y. Mun, J. Ha, S. Lee, Y. Ju, H.M. Lim, D. Lee**, Prediction of enhanced interfacial bonding strength for basalt fiber/epoxy composites by micromechanical and thermomechanical analyses, *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, 142 (2020). DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.106208
- [17] **F.H. Zhang, R.G. Wang, X.D. He, C. Wang, L.N. Ren**, Interfacial shearing strength and reinforcing mechanisms of an epoxy composite reinforced using a carbon nanotube/carbon fiber hybrid, *J. Mater. Sci.* 44 (13) (2009) 3574–3577.
- [18] **M. Li, Y. Gu, Y. Liu, Li Y. Zhang**, Interfacial improvement of carbon fiber/epoxy composites using a simple process for depositing commercially functionalized carbon nanotubes on the fibers, *Carbon*, 52 (2013) 109–121. DOI: 10.1016/j.carbon.2012.09.011
- [19] **W. Song, A. Gu, G. Liang, L. Yuan**, Effect of the surface roughness on interfacial properties of carbon fibers reinforced epoxy resin composites, *Appl. Surf. Sci.*, 257 (9) (2011) 4069–4074. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.11.177
- [20] **R. Dsouza et al.**, 3D interfacial debonding during microbond testing: Advantages of local strain recording, *Composites Science and Technology*, 195 (2020) 108163. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108163

#### INFORMATION ABOUT AUTHOR

**Elena D. VASILEVA** – *Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”*.  
E-mail: vasilyeva\_edm@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8953-9309>

**Afanasiy N. IVANOV** – *Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”*.  
E-mail: inanovafan98@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9009-3778>

**Поступила: 14.12.2022; Одобрена: 11.01.2023; Принята: 17.01.2023.**  
**Submitted: 14.12.2022; Approved: 11.01.2023; Accepted: 17.01.2023.**