

Экспериментальное определение эффективной длины заделки нити для композитов, изготовленных с помощью аддитивных технологий

Д. Д. Власов, Т. П. Плугатарь, А. Э. Поляков, Н. А. Татусь

Изучены адгезионные свойства поверхности раздела нить – матрица в экспериментах по вытягиванию нити из полимерной матрицы, изготовленных методами аддитивных технологий. Определены предельные касательные напряжения на поверхности раздела углеродная нить – полимерная матрица, а также влияние длины “заделки” нити на усилие при вытягивании. Для этого были изготовлены образцы с различной длиной “заделки” нити. Для оценки полей перемещения применяли метод корреляции цифровых изображений (КЦИ). Получены картины полей перемещений и деформаций на поверхности образца, по которым можно судить о процессах, происходящих на границе раздела нить – матрица. Показаны характерные поля деформаций при вытягивании единичной нити из массива матрицы. Экспериментально определена длина нити, при которой несущая способность композита реализуется эффективнее и нагрузка близка к предельной для самой нити. На основе экспериментальных данных рассчитана минимальная эффективная длина “заделки” нити при изготовлении композитных элементов конструкции аддитивными методами.

Ключевые слова: армированные волокнами полимеры, вытягивание нити, адгезионная прочность, эффективная длина

DOI: 10.30791/1028-978X-2023-12-83-90

Введение

Особенность проектирования композитных конструкций заключается в том, что материал и деталь создаются одновременно и чаще всего не требуют последующей механической обработки. Традиционные композитные технологии, такие как вакуумная инфузия и контактное формование, практически не ограничивают сложность геометрической формы изделия, то есть можно изготовить деталь со сложной кривизной поверхности, переменной толщиной и другими изменениями геометрических размеров [1, 2]. Однако структуру материала поменять невозможно: для приведенных технологий она задается применяемыми тканями или препрегами, в которых количество и расположение волокон определено заранее [3, 4]. С технологической точки зрения это хорошо – тканевый материал просто упаковать в бобины или листы, а свойства материала известны изначально.

Однако при изготовлении композитных элементов конструкций наибольший интерес представляет именно укладка непрерывных волокон вдоль линий действия наибольших напряжений, то есть криволинейное армирование [5, 6]. Появившиеся не так давно 3D принтеры с возможностью армирования пластика непрерывными волокнами в процессе печати позволяют создавать оптимальные конструкции со сложной структурой, в которых локальная неоднородность и анизотропия свойств волокнистых композитов используются наиболее эффективно [7 – 9].

Была поставлена задача, применительно к напечатанным на 3D принтере пластиком, армированным волокнами, изучить влияние длины l “заделки” нити на адгезионные характеристики соединения нить – пластик. Данные для волокнистых композитов, изготовленных традиционными методами, имеются [10, 11], однако для материалов, изготовленных аддитивным методом результа-

тов немного, что обусловило актуальность работы [12 – 14].

При создании реальных композитных конструкций используются не моноволокна, а пучки (нити), состоящие из тысяч моноволокон, дальнейшее исследование будет связано именно с ними.

Цель работы — исследование влияния длины “заделки” нити на адгезионные характеристики соединения нить – пластик для композитов, изготовленных с помощью аддитивных технологий.

Эффективная длина нити

Существует множество моделей, описывающих механизмы разрушения и реализации прочности в границе раздела волокно – матрица. Известно и понятие эффективной длины волокна l_e . На непрерывное длинное волокно, помещенное в матрицу, при одноосном растяжении действуют два вида напряжений: нормальные — внутри волокна и касательные — по поверхности раздела волокно-матрица (рис. 1а). В случае поперечного разрыва волокна (по Розену [15]) нормальные напряжения в месте дефекта равны нулю, и на волокно действуют лишь касательные напряжения, возникающие на границе раздела. Значение нормальных напряжений постепенно растет, достигая на некотором расстоянии от места разрыва постоянного (невозмущенного) значения, а касательных — снижается.

Чаще всего под эффективной длиной волокна понимается расстояние l_e вдоль волокна от места поперечного разрыва, на котором волокно “помнит” о своем дефекте. За пределами этого участка напряжения распределены в сечении как в материале без дефекта, а волокно ведет себя как неразорванное.

В данном случае авторы отходят от стандартной теории потому, что рассматривают не одно волокно цилиндрической формы, а нить. Поэтому несколько иначе будет определяться и понятие эффективной длины нити. Схема нагружения также отличается (рис. 1б): для оценки адгезионных характеристик в процессе испытания нить вытягивается из полимерной матрицы.

Согласно простейшей адгезионной модели, предполагается, что прочность границы раздела волокно(нить)-матрица является константой материала и определяется соотношением:

$$\tau^* = \frac{P}{S}, \quad (1)$$

где P — предельная растягивающая нагрузка, S — площадь боковой поверхности нити.

Можно предположить, что при малых длинах “заделки” l небольшими будут и значения нагрузки P (рис. 2). В то же время увеличение длины l приведет к росту P до некоторого значения P^* , когда реализуется максимально возможная адгезионная прочность.

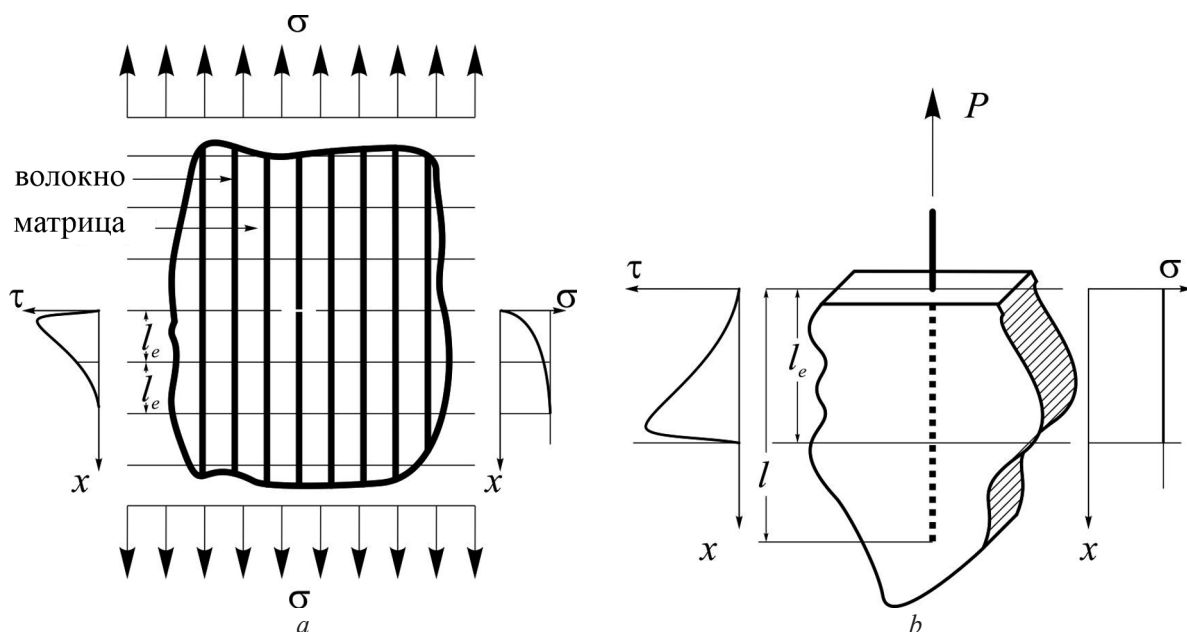


Рис. 1. а — модель разрушения при растяжении армированного волокнам композита; б — схема проведения испытаний.

Fig. 1. a — model of tensile failure of a fiber-reinforced composite, b — testing scheme.

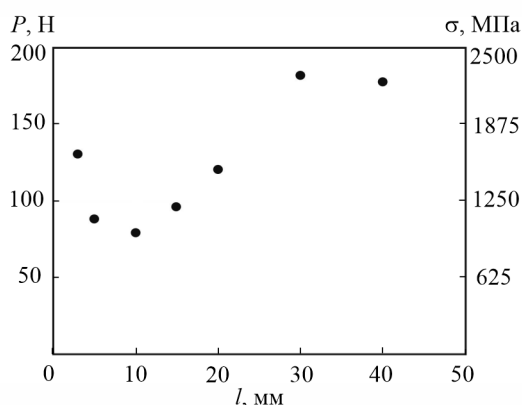


Рис. 2. Изменение критической силы вытягивания в зависимости от длины “заделки” нити.

Fig. 2. Change in the critical pulling force depending on the length of the filament “embedding”.

Таким образом, эффективная (критическая) длина нити l_e — минимальное значение, при котором полностью реализуются максимально возможные адгезионные свойства. Если длина нити меньше критической, нагрузка, необходимая для вытягивания нити, снижается. В идеальном случае при увеличении длины “заделки” l нити нагрузка вырастет до предела прочности самой нити (рис. 2). На практике реализуются два механизма разрушения: если адгезионная прочность больше прочности нити — произойдет ее разрыв, если ниже, то нить будет вытягиваться из полимерной матрицы. Во время проведения исследований из 21 экспериментального случая предел прочности нити был достигнут один раз. На рис. 3 представлена характерная зависимость нагрузки от перемещения при вытягивании нити из полимерной матрицы. Более распространен второй механизм разрушения — вытягивание нити. Диаграмму можно разделить на три характерных участка. На участке 1 происходит упругое растяжение образца без движения нити вплоть до достижения предельных касательных напряжений (1) на границе раздела. Область 2 переходная, когда, после достижения P^I , адгезионное соединение разрушается и растянутая нить “выстреливает”, нагрузка мгновенно (P^I и P^{II} лежат на одной ординате) падает до значения P^{II} . Затем, в области 3, нагрузка возрастает до P^{III} и, преодолев силу трения покоя, начинает постепенно снижаться по мере уменьшения площади контакта. Резкий скачкообразный переход к P^{II} связан с большой жесткостью соединения нить – матрица. Если бы соединение было податливым, то нить вытяги-

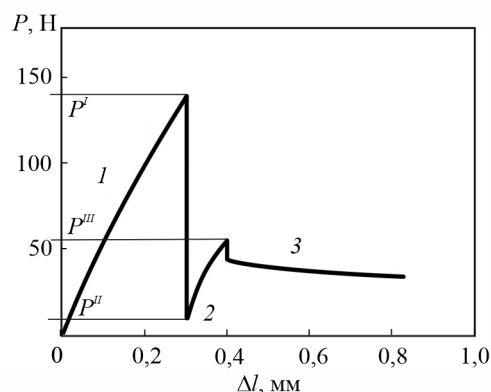


Рис. 3. Характерная диаграмма нагрузка – перемещение.

Fig. 3. Typical load-displacement diagram.

валась при постоянной нагрузке P^I без появления участка 2. Участок III диаграммы нагрузка – перемещение отражает преодоление снижающейся силы трения вплоть до полного вытягивания нити из матрицы.

Для оценки критической длины нити l_e используется формула Келли [16]:

$$l_e \approx \frac{d_f \sigma_f^*}{4\tau_m^*}, \quad (2)$$

где d_f — диаметр нити; σ_f^* — прочность нити на разрыв; τ_m^* — сдвиговая прочность поверхности нить – матрица.

В данном случае единственная неизвестная величина — сдвиговая прочность поверхности раздела τ_m^* , которую и предстоит определить экспериментально.

Постановка задачи

Адгезионное соединение возникает на поверхности раздела углеродная нить – пластик PLA. Площадь поверхности соединения характеризуется длиной заделки l и диаметром нити d (рис. 4): $S = \pi dl$. В процессе проведения эксперимента измеряется сила P , необходимая для вытягивания нити из массива матрицы, зная которую, определяется сдвиговая адгезионная прочность или предельные сдвиговые напряжения. Адгезионная прочность для каждого образца рассчитывается по формуле (1).

Прочность, определяемая с помощью формулы (1), идеализирована, поскольку поперечное сече-

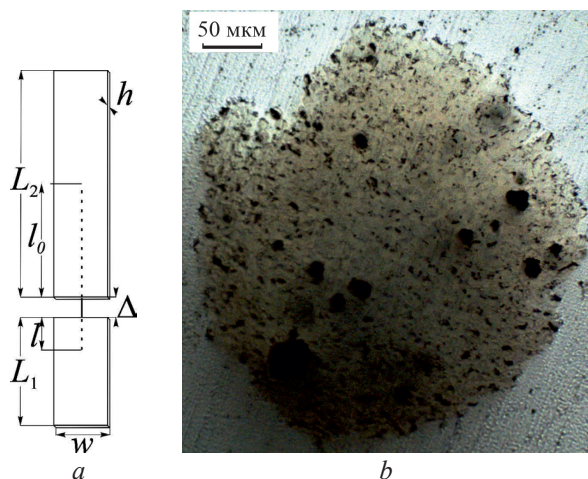


Рис. 4. *a* — внешний вид образца для определения адгезионной прочности; *b* — поперечное сечение нити, применяемой для 3D печати.

Fig. 4. *a* — appearance of the specimen to determine adhesive strength; *b* — cross-section of the filament used for 3D printing.

ние нити редко соответствует форме окружности (рис. 4*b*). Для строгого соблюдения данной зависимости и, соответственно, для получения точного значения τ^* необходимо выполнение следующих условий: сечение наполнителя должно быть круглым; диаметр погруженного в матрицу участка нити — постоянным; нить равномерно (без нарушения сплошности) покрыта полимером; видимая и истинная площади соприкосновения наполнителя и матрицы были одинаковы; касательные напряжения на границе раздела между связующим и нитью распределены равномерно.

Наблюдаемая в эксперименте картина (рис. 5) показывает снижение предельных напряжений с ростом длины l участка нити, погруженного в матрицу.

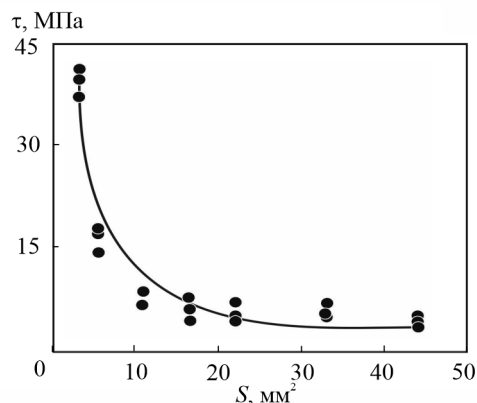


Рис. 5. Зависимость адгезионной прочности от площади контакта нить – матрица для PLA-пластика и углеродной нити.

Fig. 5. Dependence of adhesive strength on the thread – matrix contact area for PLA plastic and carbon filament.

Методика и эксперимент

Были изготовлены образцы (рис. 4*a*) одинаковой геометрии с различным наполнением — длина “заделки” нити l изменялась. Образцы были напечатаны на 3D принтере ANISOPRINT COMPOSER A3. Исследуемые материалы — биоразлагаемый пластик PLA и углеродная нить. Углеродная нить диаметром 350 мкм состоит из моноволокон диаметром 6 – 10 мкм, то есть в нити может быть до 1000 волокон. Поперечное сечение нити считалось круглым, площадь сечения нити вычисляли по формуле:

$$A = \frac{\pi d^2}{4}.$$

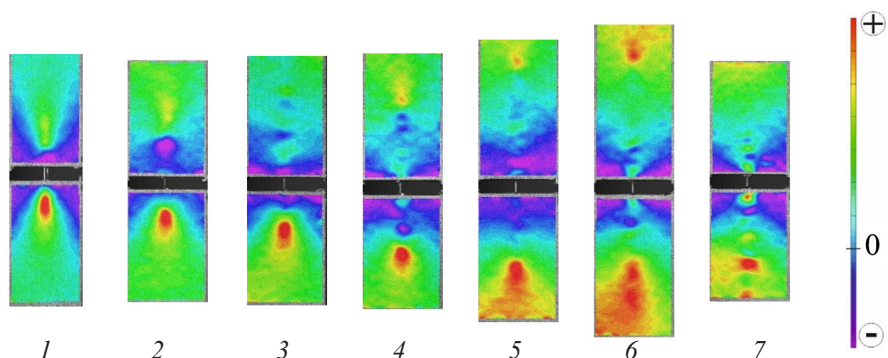


Рис. 6. Картины продольных деформаций при максимальной нагрузке для различной длины заделки нити: 1 — 3 мм, 2 — 5 мм, 3 — 10 мм, 4 — 15 мм, 5 — 20 мм, 6 — 30 мм, 7 — 40 мм, 8 — шкала деформаций.

Fig. 6. Pictures of longitudinal strain at maximum load for different lengths of filament embedding: 1 — 3 mm, 2 — 5 mm, 3 — 10 mm, 4 — 15 mm, 5 — 20 mm, 6 — 30 mm, 7 — 40 mm, 8 — scale of strain.

Таблица 1

Экспериментальные данные по вытягиванию нитей

Table 1

Experimental data on pull-out

Длина заделки, мм	Максимальное усилие (среднее по 3 образцам), Н	Максимальные нормальные напряжения, P/A , МПа	Максимальные касательные напряжения, P/S , МПа	Перемещения при максимальной нагрузке, мм
3	130	1348	39,3	0,32
5	89	929	16,3	0,28
10	99	839	7,3	0,40
15	97	1009	5,9	0,45
20	119	1238	5,4	0,51
30	183	1900	5,5	0,72
40	178	1855	4,1	0,83

Испытания проводили на электромеханической машине INSTRON 34 ТМ. Испытания считались законченными после полной потери несущей способности.

В процессе нагружения регистрировали перемещения с помощью прибора КЦИ Vis 3D, что позволило получить картину полей перемещений и деформаций в зоне заделки нити.

На рис. 6 показаны поля деформаций при максимальной нагрузке для образцов с заделкой нити на разную длину. Видно, что концентрация деформаций наибольшая у начала заделки нити. Поскольку особенности отображения деформаций в используемом КЦИ-методе не позволяют построить одну общую шкалу для всех экспериментов, на рис. 6 и 7 приведены принципиальные шкалы

деформаций, где знаком “+” отмечены зоны растяжения, а знаком “-” — сжатия.

Результаты и обсуждение

Найдена зависимость максимальной силы и максимальных касательных напряжений для образцов с различной длиной заделки нити. Данные представлены в табл. 1.

На рис. 7 показано распределение продольных деформаций в образце, с длиной заделки 30 мм по длине нити по мере увеличения нагрузки.

Максимальное напряжение сдвига для образца с “заделкой” нити 3 мм составило 39 МПа. Это значение было принято за предел прочности пластика при сдвиге и подставлено в выражение (2), откуда

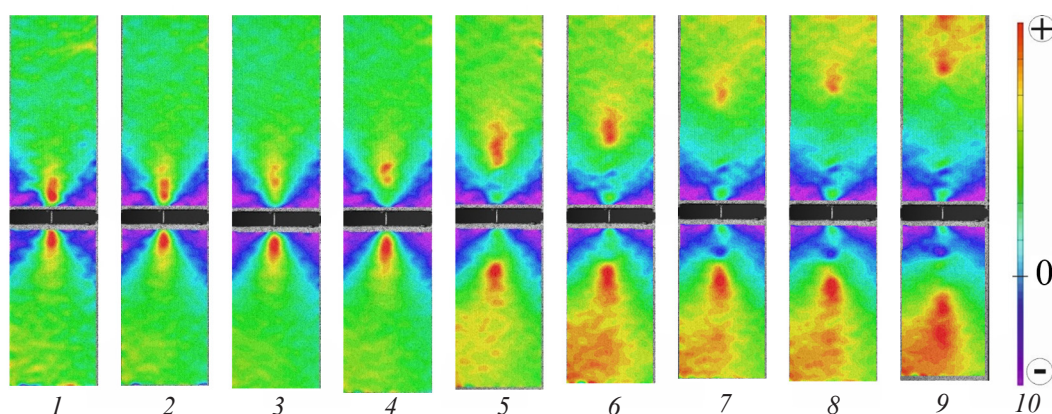


Рис. 7. Перемещение зоны концентрации деформаций по длине нити по мере его вытягивания в процессе нагружения: 1 — 50 Н, 2 — 75 Н, 3 — 97 Н, 4 — 103 Н, 5 — 123 Н, 6 — 123 Н, 7 — 165 Н, 8 — 179 Н, 9 — 229 Н, 10 — шкала деформаций.

Fig. 7. Displacement of the strain concentration zone of zone along the filament length as it is pulled out during loading: 1 — 50 N, 2 — 75 N, 3 — 97 N, 4 — 103 N, 5 — 123 N, 6 — 123 N, 7 — 165 N, 8 — 179 N, 9 — 229 N, 10 — scale of strain.

была определена эффективная длина нити, равная $l_e \sim 5$ мм.

Установлено, что адгезионные характеристики выбранной композиции углеродная нить – пластик PLA непостоянны и отличаются для образцов с различной длиной “заделки” нити.

Выводы

Характер распределения напряжений при вытягивании нити из полимерного композита, полученного с помощью 3D печати такой же, как и для традиционных ПКМ.

Максимальные адгезионные напряжения для исследуемых материалов находятся на уровне 40 МПа, что соответствует напряжениям в стандартных композициях: углеродная нить – эпоксидная матрица.

Эффективная длина нити для исследуемых материалов и данной технологии изготовления составляет приблизительно 5 мм.

Согласно формуле Келли, эффективная длина нити зависит от её диаметра. Поскольку на современных композитных 3D принтерах есть возможность широко варьировать параметры печати, в том числе и диаметр нити, необходимо проводить подобные исследования для всех типовых размеров применяемых нитей.

Научный труд опубликован в рамках Шестого международного молодежного научно-практического форума “Нефтяная столица” (22 – 23 марта 2023 г).

Литература/References

1. Kablov E.N. New generation materials and technologies for their digital processing. Herald of the Russ. Acad. Sci., 2020, v. 90, iss. 2, pp. 225 – 228. DOI: 10.1134/S1019331620020124.
2. Marques A.T. Fibrous materials reinforced composites production techniques. Fibrous and Composite Materials for Civil Engineering Applications, 2011, pp. 191 – 215. DOI: 10.1016/B978-1-84569-558-3.50007-7.
3. Kolosov A.E., Repelis I.A., Khozin V.G., et al. Impregnation of fibrous fillers with polymer binders. 2. Effect of the impregnation regimes on the strength of the impregnated fillers. Mech. Compos. Mater., 1988, v. 24, pp. 373 – 380. DOI: 10.1007/BF00606611.
4. Соколов В.В., Антипов П.Ю., Голишев О.А., Долинский С.В. Влияние количества слоев армирующего материала на толщину и весовые характеристики углепластиковых деталей, получаемых методом вакуумной инфузии. Пластические массы, 2021, № 1 – 2, с. 62 – 64. DOI: 10.35164/0554-2901-2021-1-2-62-64.
5. Sokolov V.V., Antipov P.Yu., Golishev O.A., Dolinsky S.V. Vliyanie kolichestva sloev armiruyushchego materiala na tolshchinu i vesovye karakteristiki ugleplastikovyh detalej, poluchaemyh metodom vakuumnoj infuzii [Effect of number of layers of the reinforcing material on the thickness and weight characteristics of carbon fiber parts produced by vacuum infusion]. Plasticheskie massy [International Polymer Science and Technology], 2021, v. 1 – 2, pp. 62 – 64. (In Russ.) DOI: 10.35164/0554-2901-2021-1-2-62-64.
6. Baranovsk S.V., Yar L.Z. Optimization of the fin structure from polymer composite materials using bioinspired structural layouts. Civil Aviation High Technologies, 2023, v. 26, no. 2, pp. 37 – 48, <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2023-26-2-37-48>.
7. Callister W.D. Materials science and engineering: An Introduction. Wiley Publishers, 2006, 832 p.
8. Александрова Д.С., Богдановская М.В., Егоров А.С., Выгодский Я.С. Создание новых композиционных материалов для 3D-печати на основе полиимидных связующих и непрерывного углеродного волокна. Труды Крыловского государственного научного центра, 2021, no. S2, pp. 97 – 107.
9. Alexandrova D.S., Bogdanovskaya M.V., Yegorov A.S., Vygodsky Y.S. Sozдание novyh kompozitsionnykh materialov dlya 3D-pechati na osnove poliimidnykh svyazuyushchih i nepreryvnogo uglerodnogo volokna [Development of new composite materials for 3D printing based on polyimide binders and continuous carbon fiber]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra [Transactions of the Krylov state research centre], 2021, no. S2, pp. 97 – 107. (In Russ.) DOI 10.24937/2542-2324-2021-2-S-I-97-107.
10. Jagadeesh P., Madhu P., Sanjay M.R., Karfidov A.S., Gorbatyuk S.A., Khan A., Doddamani M., Siengchin S. A comprehensive review on 3D printing advancements in polymer composites: technologies, materials, and applications. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, v. 114, pp. 1309 – 1321. DOI: 10.1007/s00170-022-09406-7.
11. Yeong W.Y., Goh G.D. 3D printing of carbon fiber composite: the future of composite industry. Matter, 2020, v. 2, pp. 1361 – 1363. DOI: 10.1016/j.matt.2020.05.010.
12. Sorensen B.F., Lilholt H. Fiber pull-out test and single fiber fragmentation test-analysis and modelling. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, v. 139, art. 012009, doi:10.1088/1757-899x/139/1/012009.
13. Горбаткина Ю.А. Адгезионная прочность в системах полимер-волокно. М.: Химия, 1987, 192 с.
14. Gorbatkina Yu. A. Adgezionnaya prochnost' v sistemah polimer — volokno [Adhesion strength in polymer-fiber systems]. Moscow, Khimiya Publ., 1987, 192 p. (In Russ.).

12. Azarov A.V., Golubev M.V., Krasovskii D.S., Stupnikov V.V., Khaziev A.R., Antonov F.K., Vasil'ev V.V., Razin A.F., Salov V.A. Development of a two-matrix composite material fabricated by 3D printing. *Polymer Science, Series D*, 2017, v. 10, no. 1, pp. 87 – 90.
13. Adumitroaie A., Antonov F., Khaziev A., Azarov A., Golubev M., Vasiliev V.V. Novel continuous fiber Bi-matrix composite 3-D printing technology. *Materials*, 2019, v. 12, no. 18, art. 3011. DOI: 10.3390/ma12183011.
14. Azarov A.V., Antonov F.K., Golubev M.V., Khaziev A.R., Ushanov S.A. Composite 3D printing for the small size unmanned aerial vehicle structure. *Composites. Part B: Engineering*, 2019, v. 169, pp. 157–163. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.03.073.
15. Liebowitz H. *Fracture: An advanced treatise*, v. 7, Fracture of nonmetals and composites. N.Y., Academic Press, 1972, 1044 p.
16. Полилов А.Н., Татусь Н.А. Биомеханика прочности волокнистых композитов. М.: Физматлит, 2018, 328 с.
- Polilov A.N., Tatus' N.A. Biomekhanika prochnosti voloknistyh kompozitov. [Biomechanics of strength of fibrous composites]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2018, 328 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию — 18.07.2023 г.

после доработки — 26.09.2023 г.

принята к публикации — 27.09.2023 г.

Власов Данила Денисович — Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (101000, Москва Малый Харитоньевский переулок, 4), младший научный сотрудник, специалист в области механики композитных материалов. E-mail: danila_vlasov_98@mail.ru.

Плугатарь Тарас Петрович — Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, 4), младший научный сотрудник специалист в области экспериментальной механики. E-mail: tplugatar@gmail.com.

Поляков Артем Эдуардович — Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, 4), инженер-исследователь, специалист в области механики композитных материалов. E-mail: aradd@mail.ru.

Татусь Николай Алексеевич — Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (101000, Москва, Малый Харитоньевский переулок, 4), кандидат технических наук, заведующий лабораторией, специалист в области механики композитных материалов. E-mail: nikalet@mail.ru.

Experimental determination of the effective filament length for composites manufactured using additive technologies

D. D. Vlasov, T. P. Plugatar, A. E. Polyakov, N. A. Tatus

This article presents the results of an experimental and theoretical study aimed at studying the adhesive properties of the filament – matrix interface. The experiment on pulling a filament out of a polymer matrix was carried out for materials manufactured by additive technology. The purpose of the study was to determine the limiting shear stresses at the carbon filament-polymer matrix interface, as well as the influence of the length of the “embedding” of the filament on the pulling force. For this purpose, specimens were made with different lengths of filament “embedding”. The tensile experiment was carried out on a universal testing machine and the load-displacement diagram was recorded. To estimate the displacement fields, the digital image correlation (DIC) method was used. In the process of testing, pictures of displacement and strain fields on the surface of the specimen were obtained, from which it is possible to assess the processes occurring on the surface of the filament-matrix interface. The typical fields of strain when pulling a single thread from the matrix array are shown. The length of the filament at which the load-bearing capacity of the composite is realized more efficiently and the load is close to the limit for the filament itself was determined experimentally. Based on experimental data, the minimum effective length of filament “embedding” was calculated when manufacturing composite structural elements using additive methods.

Keywords: fiber-reinforced polymers, thread elongation, adhesive strength, effective filament length.

***Vlasov Danila** — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Maly Kharitonevsky pereulok, 4), junior researcher, specialist in the field of mechanics of composite materials. E-mail: danila_vlasov_98@mail.ru.*

***Plugatar Taras** — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Maly Kharitonevsky pereulok, 4), junior researcher, specialist in experimental mechanics. E-mail: tplugatar@gmail.com.*

***Polyakov Artem** — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Maly Kharitonevsky pereulok, 4), research engineer, specialist in the field of mechanics of composite materials. E-mail: apadd@mail.ru.*

***Tatus' Nikolay** — Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Maly Kharitonevsky pereulok, 4), PhD (Eng), head of the laboratory, specialist in the field of mechanics of composite materials. E-mail: nikalet@mail.ru.*