

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №10 (172). С.23-30.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №10 (172). P.23-30.

Научная статья
УДК 621.792.6/620.174.21
doi: 10.30987/2223-4608-2025-10-23-30

Прочность на изгиб 3D-печатных изделий, армированных непрерывным углеволокном

Иван Сергеевич Торубаров¹, к.т.н.
Алексей Владимирович Дроботов², к.т.н.
Алексей Михайлович Макаров³, к.т.н.
Михаил Петрович Кухтик⁴, к.т.н.

^{1, 2, 3, 4} Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

¹ is.torubarov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4958-7116>

² alexey.drobotov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1148-0495>

³ amm34@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5617-8738>

⁴ mpkuhtik@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7258-6624>

Аннотация. Применение аддитивных технологий в производстве деталей беспилотных летательных аппаратов имеет ряд преимуществ. Современные исследования подтверждают необходимость обязательной проверки прочностных свойств узлов БПЛА, произведенных с использованием 3D-печати. В данной работе представлены результаты испытаний на статический изгиб композитных изделий, полученных на аддитивных установках Stereotech Fiber 530 V5 методом трёх- и пятиосевой объёмной печати с армированием непрерывным волокном. Для исследования поведения армированных образцов при совместном воздействии изгиба и межслойного сдвига проведены испытания на статический изгиб согласно ГОСТ Р 56810-2015. Для испытаний изготовлено семь групп образцов с различными схемами расположения слоёв и структурами армирования термопластиком PA6 в виде материала матрицы и армированием филаментом Contifiber CPA на основе нити Umatex UMT42S-3K. Для армирования использовалось разное количество армирующего филамента. Испытания образцов проведены на универсальной машине ТРМ-С 10 А1 с приспособлением для испытаний на трёхточечный изгиб. Приведены рассчитанные значения следующих показателей прочности: предел прочности по нормальным напряжениям, прочность при межслойном сдвиге, модуль упругости при изгибе и модуль межслойного сдвига. Представлены диаграммы нагружения образцов при испытаниях на статический изгиб. Установлено, что пятиосевая технология аддитивного изготовления армированных изделий позволяет достичь увеличения предела прочности при статическом изгибе от 1,5 до 2,5 раз и модуля сдвига от 2 до 4 раз для изделий, изготавливаемых по технологии пятиосевой печати с армированием непрерывным волокном 10...20 % объёма, по сравнению с неармированными печатными изделиями и печатными изделиями, армированными по традиционной трёхосевой технологии.

Ключевые слова: аддитивное производство, пятиосевая печать, армирование, прочность, статический изгиб

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и администрации Волгоградской области № 24-29-20242, <https://rscf.ru/project/24-29-20242/>.

Для цитирования: Торубаров И.С., Дроботов А.В., Макаров А.М., Кухтик М.П. Прочность на изгиб 3D-печатных изделий, армированных непрерывным углеволокном // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 10 (172). С. 23–30. doi: 10.30987/2223-4608-2025-10-23-30

Resistance to bending of 3D printed products reinforced with continuous carbon fiber

Ivan S. Torubarov¹, PhD. Eng.
Alexey V. Drobotov², PhD. Eng.
Alexey M. Makarov³, PhD. Eng.
Mikhail P. Kukhtik⁴, PhD. Eng.

^{1, 2, 3, 4} Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹ is.torubarov@gmail.com

² alexey.drobotov@gmail.com

³ amm34@mail.ru

⁴ mpkhtik@gmail.com

Abstract. The use of additive technologies in the production of parts for drone aircrafts has a number of advantages. Modern research confirms the need for mandatory verification of the strength properties of UAV components produced using additive manufacturing. This paper presents the results of tests for static bending of composite products obtained on Stereotech Fiber 530 V5 additive installations using three- and five-axis volumetric printing with continuous fiber reinforcement. To study the behavior of reinforced samples under the combined action of bending and interlaminar shear, static bending tests were performed in accordance with State Standard R 56810-2015. Seven groups of samples with different layer arrangements and reinforcement structures with PA6 thermoplastic in the form of a matrix material and reinforcement with Contifiber CPA filament based on Umatex UMT42S-3K filament were produced for testing. Different amounts of reinforcing filament were used for reinforcement. The samples were tested on a universal machine TRM-S 10 A1 with a device for testing three-point bending. The calculated values of the following strength indicators are given: tensile yield strength, interlaminar shear strength, flexural modulus of elasticity and interlaminar shear modulus. Diagrams of sample application of load during static bending tests are presented. It has been proved that the five-axis technology of additive manufacturing of reinforced products makes it possible to achieve an increase in the tensile strength under static bending from 1,5 to 2,5 times and a shear modulus from 2 to 4 times for products manufactured using the technology of five-axis printing with continuous fiber reinforcement of 10...20 % of the volume, compared with non-reinforced printed products and printed products reinforced by traditional three-axis technology.

Keywords: additive manufacturing, five-axis printing, reinforcement, strength, static bending

Acknowledgments: This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation and the Volgograd Region Administration (No. 24-29-20242, <https://rscf.ru/project/24-29-20242/>).

For citation: Torubarov I.S., Drobotov A.V., Makarov A.M., Kukhtik M.P. Resistance to bending of 3D printed products reinforced with continuous carbon fiber / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 10 (172). P. 23–30. doi: 10.30987/2223-4608-2025-10-23-30

Введение

Применение аддитивных технологий для создания деталей и компонентов БПЛА общего назначения позволяет ускорить процесс разработки и снизить затраты на изготовление [1]. Поскольку аддитивные технологии позволяют создавать сложные геометрические формы и компоненты, которые трудно или невозможно изготовить традиционными методами [2], их применение позволяет повысить технологичность конструкции и уменьшить количество деталей, например, за счёт их объединения, применения специальных креплений и других функциональных элементов. Широко используется в конструировании и мелкосерийном производстве элементов несущей системы БПЛА технология послойного наплавления полимерного материала FDM (Fused Deposition Modelling), особенно вместе с композиционными материалами с короткими или

непрерывными армирующими волокнами. Например, в работе [3] была предложена технология аддитивного изготовления армированных изделий, предусматривающая построение армирующего каркаса и матрицы при трёх- и пятиосевой печати по одному из шести способов в зависимости от конфигурации изделия и технических требований. Методы пятиосевой печати находят применение преимущественно для изготовления изделий в виде тел вращения, какие представляют собой, например, трубчатые лучи и некоторые крепления беспилотников коптерного типа.

В то же время применение любой технологии для производства ответственных изделий, таких как элементы несущей системы БПЛА, требует знания о механических свойствах получаемых изделий в зависимости от значений технологических параметров. Так, в исследованиях [4 – 6] отмечается необходимость проверки прочностных свойств узлов

БПЛА, произведенных с использованием 3D-печати и подтверждается недостаточная проработанность справочного материала о свойствах печатных изделий. Кроме того, в технологиях печати с укладкой непрерывных армирующих материалов свойства очень сильно зависят не только от свойств исходного материала, но и от условий и параметров конкретного технологического процесса.

Целью данного исследования является экспериментальная проверка прочности при статическом изгибе композитных изделий, полученных методами трёх- и пятиосевой объёмной печати с армированием, и сопоставление с неармированными печатными изделиями и печатными изделиями, армированными по традиционной трёхосевой технологии.

Из-за сложностей с обработкой результатов испытания на статический изгиб зачастую считаются второстепенными, и их не рекомендуют использовать при расчётах армированных конструкций. Тем не менее, этот вид испытаний очень распространён [5, 7] благодаря своей простоте, возможности оценить влияние условий технологического процесса производства образцов на их прочностные свойства, а также большому объёму получаемой информации: по результатам испытаний

возможно рассчитать предел прочности по нормальным напряжениям, прочность при межслойном сдвиге, модуль упругости при изгибе и модуль межслойного сдвига [8].

Материалы и методы исследования

Для исследования поведения армированных образцов при совместном воздействии изгиба и межслойного сдвига проведены испытания на статический изгиб согласно ГОСТ Р 56810-2015. Изготовлено семь групп образцов с применением материалов: материал матрицы – термопластик РА6 производства ООО «РЭК», армирование – армирующий филамент Contifiber CPA производства ООО «РЭК», представляющий собой препрег на основе нити Umatex UMT42S-3K с 50 % содержанием волокна в филаменте. Для изготовления всех армированных образцов применялся принтер Stereotech Fiber 530 V5.

Для испытаний изготовлено 6 групп образцов в виде призматических брусков (по 5 образцов каждого вида):

1) 3D печать с армированием в плоскости XY (плоское армирование), расположение слоёв образца «плашмя» к направлению нагрузки (рис. 1);

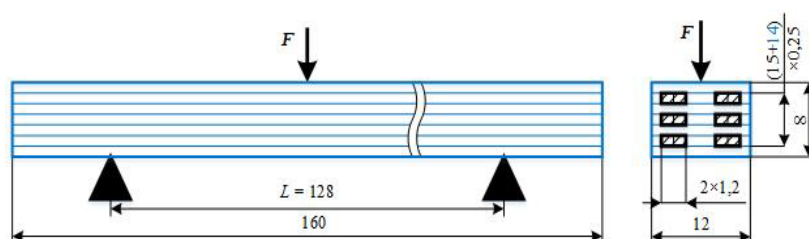


Рис. 1. Схема расположения слоёв и структуры армирования для плоско армированных образцов группы 1 (расположение XY)

Fig. 1. Diagram of the layers and reinforcement structure for flat-reinforced samples of group 1 (XY location)

2) 3D печать с армированием в плоскости XZ (плоское армирование), расположение слоёв образца «ребром» к направлению нагрузки (рис. 2);

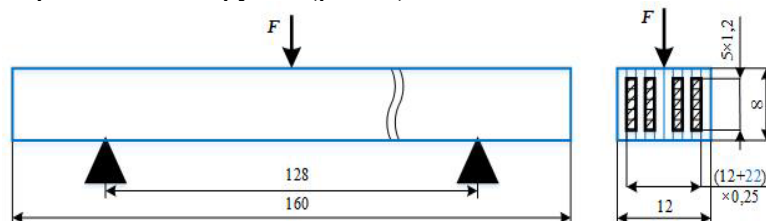


Рис. 2. Схема расположения слоёв и структуры армирования для плоско армированных образцов группы 2 (расположение XZ)

Fig. 2. Diagram of the layers and reinforcement structure for flat-reinforced samples of group 2 (location XZ)

3) классическая пятиосевая печать без армирования с углом подъёма линий термопластика $\pm 45^\circ$ (рис. 3), описанная в [9];

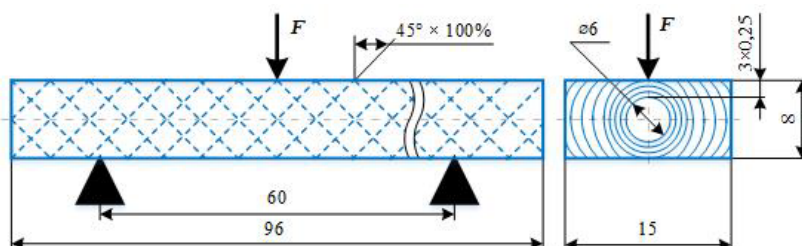


Рис. 3. Схема расположения слоёв и структуры армирования для пятиосевых неармированных образцов группы 3

Fig. 3. Diagram of the layers and reinforcement structure for five-axis non-reinforced samples of group 3

4) пятиосевая печать с сетчатым армированием, с углом $\varphi = 75^\circ$ (цилиндрическое армирование) и различной плотностью укладки волокон $\rho_F = \{100; 75; 50\} \%$ (рис. 4).

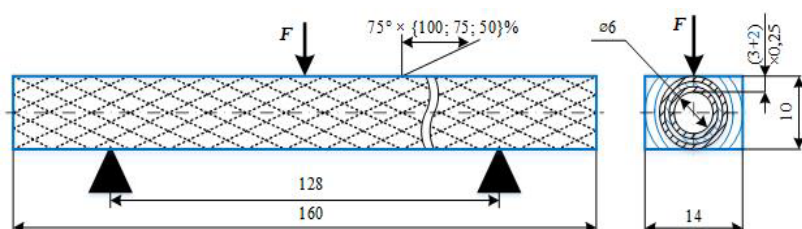


Рис. 4. Схема расположения слоёв и структуры армирования для пятиосевых армированных образцов групп 4, 5 и 6

Fig. 4. Diagram of the layers and reinforcement structure for five-axis reinforced samples of groups 4, 5 and 6

Ориентация образцов групп 1, 2 относительно осей координат установки указана в соответствии с ГОСТ Р 59929-2021. Для армирования использовалось разное количество армирующего филамента, объемное содержание армирования V_F составило от 11 % до 18 %. Структуры армирования образцов каждой группы показаны на рис. 2 – 6, матрица построена из 3 контуров термопластика шириной 0,6 мм и сплошного внутреннего заполнения линиями под углом $\pm 45^\circ$. Образцы групп 4 – 7 печатались на сердечниках из того же

матричного материала с однонаправленным плоским армированием, сердечники печатались в режиме 3D с расположением слоёв XY (аналогично образцам группы 1). Количество и объемное содержание волокна в пятиосевых образцах для каждой группы приведено с учётом волокна, заложенного в сердечник.

Также изготовлена седьмая группа симметричных образцов в виде цилиндров, армированных сеткой с $\varphi = 75^\circ$ и $\rho_F = 75 \%$ (рис. 5). Образцы группы 7 также изготовлены в количестве 5 штук.

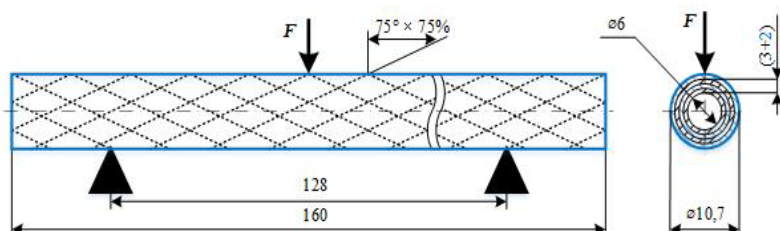


Рис. 5. Схема расположения слоёв и структуры армирования для пятиосевых армированных образцов группы 7

Fig. 5. Diagram of the layers and reinforcement structure for five-axis reinforced samples of group 7

Испытания образцов проведены на универсальной машине ТРМ-С 10 А1 с приспособлением для испытаний на трёхточечный изгиб. Согласно ГОСТ Р 56810 использованы диаметры опор $d = 5$ мм, установлено расстояние между опорами $S = 128$ мм, скорость нагружения $v = 5$ мм/мин. При испытании фиксировались максимальная нагрузка F_{\max} и максимальный прогиб образца w_{\max} (по перемещению подвижной траверсы), а также диаграмма нагружения и характер разрушения. Предел прочности (по нормальным напряжениям) и модуль упругости при изгибе определялись по рекомендациям ГОСТ Р 56810.

По рекомендациям ГОСТ модуль упругости $E_{\text{и}}$ определялся по линейному участку диаграммы при относительной деформации $\varepsilon = \{0,05; 0,25\}$ %.

Также для каждого образца определялись максимальные касательные напряжения $\tau_{\text{и}}$ по формуле Журавского [11]:

$$\tau_{\max} = \frac{Q_y \cdot S'_z}{b \cdot J_z}, \quad (1)$$

где $Q_y = F/2$ – значение поперечной силы при трёхточечной схеме испытания [10]; J_z – момент инерции сечения относительно центральной оси, зависящий от формы сечения (прямоугольник или круг); S'_z – статический момент площади A' отсечённой части сечения образца относительно центральной оси, зависящий от

формы сечения согласно [11].

Модуль межслойного сдвига G_{xz} оценивался по зависимости, предложенной Ю.М. Тарнопольским и Т.Я. Кинцисом [8]:

$$\frac{1}{E_{\text{и}}^{\text{коп}}} = \frac{1}{E_{\text{раст}}} + \frac{1,2}{G_{xz}} \cdot \left(\frac{h}{L}\right)^2, \quad (2)$$

где $E_{\text{раст}}$ – истинный модуль упругости, определяемый из испытаний на растяжение, по результатам испытаний на растяжение в [6] принято $E_{\text{раст}} \approx 50$ ГПа; $E_{\text{и}}^{\text{коп}}$ – фиктивный модуль упругости при изгибе, скорректированный с учётом деформации образцов согласно рекомендациям статьи [12].

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты испытаний с рассчитанными значениями всех перечисленных показателей прочности приведены в табл. 1. Диаграммы нагружения образцов всех групп при изгибе приведены на рис. 6. Если образец с 50 % армированием имеет мало отличий от неармированного пятиосевого образца, то образцы с плотностью укладки волокон 75 % и более уже показали максимальные нормальные и касательные напряжения в 1,5 – 3 раза больше. Похожая разница в 1,5 – 2,5 раза есть и между образцами с объёмным и плоским армированием.

1. Результаты испытаний на статический изгиб

1. Static bending test results

№ гр.	Тип образца	Количество УВ, м	Содержание армирования, %	$\sigma_{\text{и}}$, МПа	$\tau_{\text{и}}$, МПа	$E_{\text{и}}$, ГПа	G_{xz} , МПа
1	3D печать XY	10	18	65,74	2,05	5,2	8,70
2	3D печать XZ	11	18	75,33	2,62	5,2	21,89
3	5-осевая печать без армирования	-	-	58,44	1,83	1,9	20,55
4	5-осевая печать, брусок, сетка 100 %	15	18	94,83	3,76	1,8	17,07
5	5-осевая печать, брусок, сетка 50 %	8	11	70,50	2,70	2,3	9,22
6	5-осевая печать, брусок, сетка 75 %	10	13	91,79	3,66	3,0	24,59
7	5-осевая печать, цилиндр, сетка 75 %	10	19	143,71	4,00	8,2	40,87

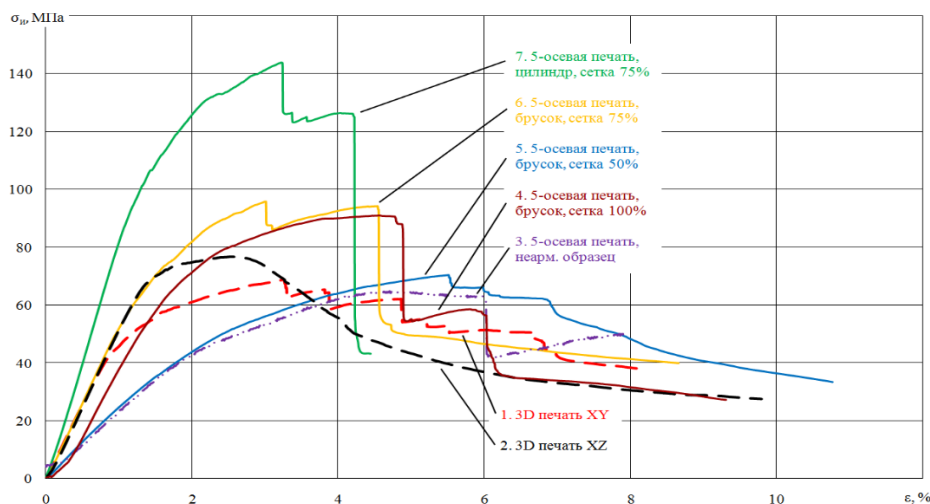


Рис. 6. Диаграммы нагружения образцов при испытаниях на статический изгиб

Fig. 6. Diagrams of sample loading during static bending tests

Линейный участок диаграмм всех армированных образцов располагается примерно до 1 % относительной деформации нижних волокон, что соответствует примерно 4...5 мм прогиба.

Объёмно армированные образцы с содержанием волокна 13...19 % показали в 1,5 – 3 раза большие значения предела прочности, максимума касательных напряжений и

модуля межслойного сдвига. Видно качественное различие в характере разрушения. На плоских образцах (рис. 7) хорошо заметно расслоение, следы межслойного сдвига, а также в зоне сжатия – распадаение армирующего жгута на отдельные волокна, что видно на образце XY. Все объёмно армированные образцы ломаются с чётким образованием трещины в среднем сечении (рис. 8).

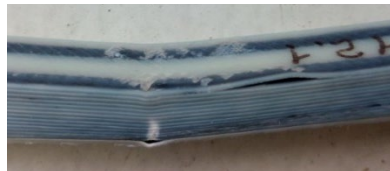


Рис. 7. Характерное разрушение образцов групп 1 и 2 с плоским армированием XY и XZ – межслойный сдвиг (расслоение образца)

Fig. 7. Characteristic fracture of samples of groups 1 and 2 with flat reinforcement XY and XZ – interlayer shift (stratification of the sample)

Наилучшие результаты показал цилиндрический образец. Образцы такой формы ГОСТом не предусмотрены, однако при меньших размерах сечения он выдержал почти такую же нагрузку, причём и модуль упругости для него оказался на 60 % больше, чем для образцов с

плоским армированием. При этом цилиндрический образец полностью симметричен, т. е. независимо от того, в каком направлении будет приложена изгибающая нагрузка, он покажет одинаковые характеристики, в отличие от плоских образцов.



Рис. 8. Характерное разрушение образцов групп 4 – 6 в виде брусков и группы 7 в виде цилиндров с сетчатым цилиндрическим армированием – растяжение

Fig. 8. Typical fracture of samples of groups 4 – 6 in the form of bars and group 7 in the form of cylinders with mesh cylindrical reinforcement – stretching

По итогам испытания образцов с трёх- и пятиосевым армированием на изгиб можно установить следующие закономерности:

1. Наибольшую эффективность показывают образцы, полностью построенные из замкнутых слоёв, как цилиндрические образцы группы 7 – предел прочности, максимальные касательные напряжения и модуль сдвига до 2,5 раз больше, чем у плоско армированных образцов с тем же содержанием армирования. При этом образцы группы 6 в виде брусков с аналогичной структурой сетчатого армирующего каркаса показали меньшую концентрацию армирующих волокон и большую толщину образца.

2. Несмотря на то, что образцы в виде брусков с цилиндрическим армированием показали меньшую прочность, чем образцы цилиндрической формы, по сравнению с плоско армированными образцами они показали схожие или лучшие показатели максимальных нормальных и касательных напряжений, модуля сдвига, т. е. всех вычисленных параметров, кроме модуля упругости при изгибе. Разрушение этих образцов также происходило без значительного расслоения. В то же время образцы с пятиосевым армированием с углом подъёма армирующих линий $\varphi = 45^\circ$,

испытания которых описаны в статье [3], показали, напротив, худшие результаты, чем образцы с плоским армированием.

3. Как по нормальным, так и по касательным напряжениям для образцов в виде брусков с пятиосевым сетчатым армированием (группы 4 – 6) прирост прочности при увеличении плотности укладки волокон ρ_F с 75 % до 100 % незначителен (рис. 9), при этом разброс значений увеличивается почти в 2 раза, что объясняется ухудшением стабильности процесса выкладки армирующего волокна.

4. Иную зависимость показывает модуль сдвига G_{xz} , вычисленный по результатам испытаний на статический изгиб (рис. 9): при плотности $\rho_F = 75\%$ он существенно превышает результат для образцов с $\rho_F = 100\%$ и 50 % (в 1,5 и 2,5 раза соответственно). Предположительно, такая разница между результатами для образцов с плотностью 75 % и 100 % также связана с тем, что при изготовлении последних накапливается большее количество дефектов и местных отклонений толщины слоя, из-за чего нарушается структура слоёв матрицы, окружающих армирование, и последующие слои частично размазываются поверх построенного армирующего каркаса.

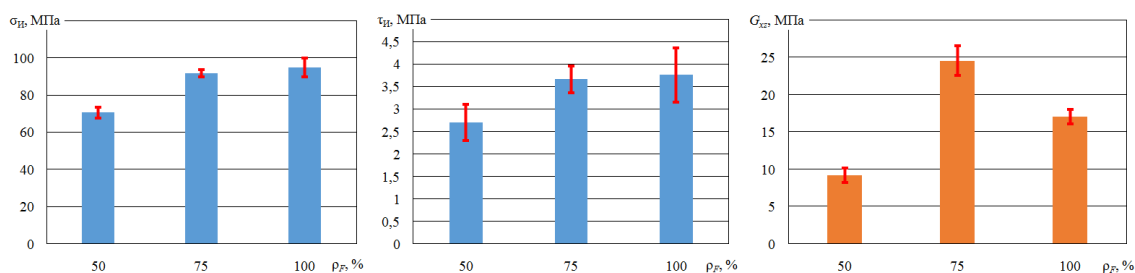


Рис. 9. Влияние плотности укладки армирующих линий ρ_F на показатели прочности при статическом изгибе

Fig. 9. The effect of the density of the reinforcement lines ρ_F on the strength under static bending

В связи с закономерностями, описанными в п. 3 и 4, при нагрузках на изгиб целесообразно использовать схемы армирования с плотностью укладки армирующих линий около 75 %.

Заключение

В результате экспериментальной проверки установлено, что технология аддитивного изготовления армированных изделий позволяет достичь увеличения предела прочности при статическом изгибе от 1,5 до 2,5 раз и модуля сдвига от 2 до 4 раз для изделий, изготавливаемых по технологии пятиосевой печати с армированием непрерывным волокном на 10...20 % объёма, как по сравнению с классической технологией пятиосевой печати, так и по сравнению с известными методами трёхосевой FDM печати с армированием.

Это позволяет расширить технологические возможности и области применения аддитивных технологий при производстве деталей беспилотных летательных аппаратов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Власов А.И., Гараев А.В., Захарова В.О., Селиванов К.В., Чернышов Д.Д. Методика профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 4 (44). С. 95–110. DOI: 10.21685/2307-4205-2023-4-9. EDN FCSGIV
2. Григорьянц А.Г., Лутченко А.В. Современные проблемы развития аддитивных технологий в машиностроении // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 8 (134). С. 27–30. DOI 10.30987/2223-4608-2022-8-27-30. EDN CAWHSG
3. Торубаров И.С., Дроботов А.В., Гуцин И.А., Вдовин Д.С., Плотников А.Л., Яковлев А.А. Аддитивное

производство изделий с пространственным армированием непрерывным волокном // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 2. 13 с. URL: <https://www.vektornaukitech.ru/jour/article/view/429/401> (дата обращения: 10.05.2025). DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-92-104. EDN PCDAZE

4. Кулаков К.С., Крылов Ю.П., Красников В.И. Применение аддитивных технологий для прототипирования и изготовления составных частей БПЛА // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 5–6 (191–192). С. 130–136. DOI 10.53816/23061456_2024_5-6_130. EDN YFSPQS

5. Навроцкий Р.А., Москвитин Г.В., Полежаев Э.Р. Исследование прочности элементов квадрокоптера, созданных по аддитивной технологии / В сборнике: XXXIV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения. Сборник трудов конференции. 2022. С. 319–325. EDN HRKJJY

6. Dams B., Chen B., Kaya Y.F., Shepherd P., Kovac M., Ball R.J. The rise of aerial additive manufacturing in construction: a review of material advancements // Frontiers in Materials 2025. Vol. 11. № 1458752. DOI: 10.3389/fmats.2024.1458752

7. Терещенко Т.С., Орехов А.А., Рабинский Л.Н. Исследование статических и динамических физико-механических характеристик стали, изготовленной методом послойного лазерного спекания // Труды МАИ. 2025. № 140. EDN SHCSDM

8. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. М.: Химия. 1981. 271 с.

9. Avdeev A.R., Shvets A.A., Guschin I.A., Torubarov I.S., Drobotov A.V., Makarov A.M., Plotnikov A.L., Serdobintsev Y.P. Strength Increasing Additive Manufacturing Fused Filament Fabrication Technology, Based on Spiral Toolpath Material Deposition // Machines. 2019. Vol. 7, Issue 3. 18 p. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/7/3/57>. DOI: 10.3390/machines7030057

10. Багмутов В.П., Захаров И.Н. Сопротивление материалов. Конспект лекций, тетрадь первая: учеб. пособие / ВолгГТУ. Волгоград, 2015. 91 с.

11. Савкин А.Н., Водопьянов В.И., Кондратьев О.В., Седов А.А. Основы расчетов на прочность и жесткость типовых элементов конструкций: учеб.-метод. пособие / ВолгГТУ. Волгоград, 2019. 252 с.

12. Михеев П.В., Муранов А.Н., Гусев С.А. Экспериментальное определение модуля межслоевого сдвига слоистого углепластика // Конструкции из композиционных материалов. 2015. № 4 (140). С. 46–50. EDN VOKSXD

REFERENCES

1. Vlasov A.I., Garaev A.V., Zakharova V.O., Selivanov K.V., Chernyshov D.D. Additive technologies and profiling of general purpose drones // Reliability and quality of

complex systems. 2023. no. 4 (44). pp. 95–110. DOI: 10.21685/2307-4205-2023-4-9. EDN FCSGIV

2. Grigoryants A.G., Lutchenko A.V. Modern problems of technological development of additive techniques in mechanical engineering // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2022. no. 8 (134). pp. 27–30. DOI 10.30987/2223-4608-2022-8-27-30. EDN CAWHSG

3. Torubarov I.S., Drobotov A.V., Guschin I.A., Vdovin D.S., Plotnikov A.L., Yakovlev A.A. Additive manufacturing of parts with three-dimensional continuous fiber reinforcement // Frontier Materials & Technologies. 2022. № 2. 13 p. URL: <https://www.vektornaukitech.ru/jour/article/view/429/401> (date of access: 10.05.2025). DOI: 10.18323/2782-4039-2022-2-92-104. EDN PCDAZE

4. Kulakov K.S., Krylov Yu.P., Krasnikov V.I. Application of additive technologies for prototyping and manufacturing of UAV components // Issues of defense technology. Series 16: Countermeasures of terrorism. 2024, no. 5–6 (191–192), pp. 130–136. DOI 10.53816/23061456_2024_5-6_130. EDN YFSPQS

5. Navrotsky R.A., Moskvitin G.V., Polezhaev E.R. Research of the strength of quadcopter elements created using additive technology / In the collected papers: XXXIV-th International Innovative Conference of Young Scientists and Students on modern problems of machine science. Proceedings of the conference. 2022. pp. 319–325. EDN HRKJJY

6. Dams B., Chen B., Kaya Y.F., Shepherd P., Kovac M., Ball R.J. The rise of aerial additive manufacturing in construction: a review of material advancements // Frontiers in Materials 2025. vol. 11. no. 1458752. DOI: 10.3389/fmats.2024.1458752

7. Tereshchenko T.S., Orekhov A.A., Rabinsky L.N. Investigation of static and dynamic physical mechanical characteristics of steel produced by layered laser sintering // Proceedings of MAI 2025. no. 14. EDN SHCSDM

8. Tarnopolsky Yu.M., Kintzis T.Ya. Methods of static testing of reinforced plastics. Moscow: Khimiya. 1981. 271 p.

9. Avdeev A.R., Shvets A.A., Guschin I.A., Torubarov I.S., Drobotov A.V., Makarov A.M., Plotnikov A.L., Serdobintsev Y.P. Strength Increasing Additive Manufacturing Fused Filament Fabrication Technology, Based on Spiral Toolpath Material Deposition // Machines. 2019. Vol. 7, Issue 3. 18 p. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1702/7/3/57>. DOI: 10.3390/machines7030057

10. Bagmutov V.P., Zakharov I.N. Resistance of materials. Lecture notes, notebook one: studies. manual / VolgSTU. Volgograd, 2015. 91 p.

11. Savkin A.N., Vodopyanov V.I., Kondratiev O.V., Sedov A.A. Fundamentals of calculations for strength and rigidity of typical structural elements: textbook.-the method. manual / VolgSTU. Volgograd, 2019. 252 p.

12. Mikheev P.V., Muranov A.N., Gusev S.A. Experimental definition of the module of interlayered shift of the layered carbon fibre reinforced plastic // Structures made of composite materials, 2015, No. 4 (140), pp. 46–50. EDN VOKSXD

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 29.05.2025; одобрена после рецензирования 02.06.2025; принята к публикации 16.06.2025.

The article was submitted 29.05.2025; approved after reviewing 02.06.2025; assested for publication 16.06.2025.