

УДК 623.4

doi: 10.53816/23061456_2025_1–2_137

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК ИЗ СТЕКЛА И КАРБОНА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРМОПЛАСТОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

THE EFFECT OF GLASS AND CARBON FIBER ADDITIVES ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THERMOPLASTICS FOR 3D PRINTING

Канд. техн. наук К.С. Кулаков, Ю.П. Крылов, Н.Ю. Тархов

Ph.D. K.S. Kulakov, Y.P. Krylov, N.Y. Tarhov

НПО Спецматериалов

В статье исследована возможность применения армированных карбоном, стеклом и минеральными волокнами термопластов. Представлены результаты испытаний физико-механических свойств готовых изделий, напечатанных на 3D-принтере FDM типа. На основе полученных данных проведен анализ механических свойств армированных термопластов. Показано несоответствие механических свойств, заявленных производителем, с реальными. Установлено, что армирование в большинстве случаев негативно сказалось на физико-механических свойствах изделий. На основе полученных данных сделан вывод, что термопласты с добавками из стекла и карбона не рекомендуется использовать для производства изделий, требующих высоких механических характеристик, однако благодаря увеличенной внешней спекаемости они могут быть применены в декоративных и нетребовательных к механическим свойствам изделиях. Определены новые направления исследований в области изучения физико-механических свойств термопластов.

Ключевые слова: макетирование, аддитивные технологии, механические свойства материалов, прототипирование, армированные термопласты, 3D-печать.

The article examines the possibility of using thermoplastics reinforced with carbon, glass and mineral fibers. The results of tests on the physical and mechanical properties of finished products printed on an FDM type 3D printer are presented. Based on the data obtained, the analysis of the mechanical properties of reinforced thermoplastics was carried out. The discrepancy between the mechanical properties declared by the manufacturer and the real ones is shown. It was found that reinforcement in most cases had a negative effect on the physical and mechanical properties of the products. Based on the data obtained, it is concluded that such materials are not recommended for the production of products requiring high mechanical characteristics, however, due to the increased external sinterability, they can be used in decorative and undemanding products with mechanical properties. New directions of research in the field of studying the physico-mechanical properties of thermoplastics have been identified.

Keywords: prototyping, additive technologies, mechanical properties of materials, prototyping, reinforced thermoplastics, 3D printing.

Аддитивные технологии (3D-печать) все больше используются в современном производстве и проектировании. Например, для деталей авионики и космонавтики, медицинских имплантатов и протезов, а также инструментов и оснастки. В числе очевидных плюсов аддитивного производства может быть отмечено следующее:

- возможность создания сложных по форме деталей с высокой точностью;
- получение улучшенных свойств итогового продукта;
- скорость производства сложных деталей и элементов конструкций.

Чаще всего аддитивные технологии используются для выпуска малых партий, производства сложных по форме деталей, макетирования и прототипирования. При прототипировании изделия главной задачей выступает быстрое получение работающего опытного образца изделия, на котором возможна отработка базовых функций. При этом зачастую прототип неоднократно изменяется и повторно тестируется, в данном случае 3D-печать позволяет сократить сроки разработки за счет уменьшения времени на внесение изменений и создание прототипа [1].

Для некоторых видов задач предъявляются повышенные требования к физико-механическим свойствам материалов [2]. Решением может стать армирование материалов стеклом, карбоном или минеральными волокнами. Помимо этого способа армирования также существует еще армирование соэкструзией [3], ламинирование [4], а также армирование полостей в готовом изделии [5]. Тем не менее, влияние добавок на физикомеханические характеристики конечного продукта остается недостаточно изученным.

Для производства конструктивных элементов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) необходимы материалы, обладающие низкой плотностью при высокой механической прочности, а также достаточно высокой температурой плавления. Это обусловлено тем, что в процессе продолжительных полетов материалы могут накапливать значительное количество солнечного излучения, а двигатели БПЛА генерируют значительное количество тепла [6, 7]. Помимо этого, в корпусировании, функциональных, статичных изделиях и т.д. требуются более

высокие механические свойства без каких-либо требований к массе изделия.

Необходимость использования материалов с высокими физико-механическими свойствами требует дополнительного исследования влияния добавок на свойства материалов, сравнение указанных производителями свойств с реальными. Одним из основных недостатков информации, предложенной в открытых источниках, является отсутствие у большинства производителей данных о процентном содержании добавок, а также недостоверность свойств, заявленных производителем. Стоит отметить, что на отечественном и зарубежном рынке представлено малое разнообразие материалов с различными добавками.

Армированные термопласты, используемые для создания испытуемых изделий, были выполнены в виде пластиковой нити, армированной при производстве малыми рублеными частицами добавок, с процентом их содержания указанных в наименовании группы изделий. Исследуемые показатели и использованные методики испытаний приведены в табл. 1. В данной статье рассматриваются изделия, изготовленные из термопластов PLA (полилактид) и ABS (акрилонитрилбутадиенстирол). Изделия были поделены на группы согласно углу наклона модели (рис. 1) к печатному столу для каждого вида пластика, а также по содержанию тех или иных добавок (карбона, стекла, минеральных волокон). В итоге получилось 24 испытуемых группы. Для каждой группы выбраны два типа образцов, первый тип 1А (согласно ГОСТ 11262–2017 [8]) для исследования прочности на растяжение и относительного удлинения при разрыве, второй тип — рекомендуемый образец (согласно ГОСТ 4648–2014 [9]) для исследования усадки, плотности и

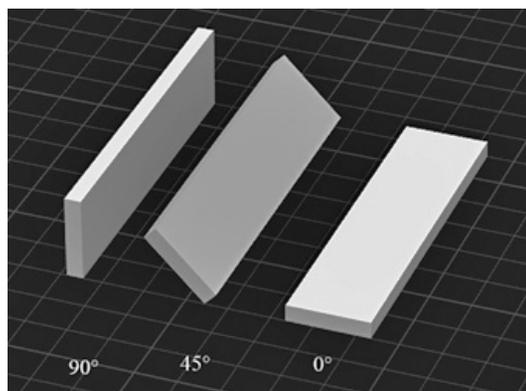


Рис. 1. Пример положения наклона модели к столу

прочности на статический изгиб. Для каждого типа образцов было изготовлено по 5 экземпляров.

Образцы изготавливались на 3D-принтере Creality K1 Max, обеспечивающем скорость печати до 500 мм/с, температуру сопла до 300 °С, ширину линии от 0,1 до 0,8 мм.

Исследование готовых изделий на усадку выполнялось с помощью цифрового штангенциркуля Энкор 10740 с погрешностью измерений не более 5 мкм. Для каждого линейного размера проводилось не менее трех индивидуальных измерений, после чего вычислялось среднеарифметическое для каждого размера. Результатом испытаний является разница между измеренными значениями размеров изготовленного образца и используемой для печати 3D-модели, выраженная в процентах.

Исследование готовых изделий на кажущую плотность выполнялось с помощью цифрового штангенциркуля Энкор 10740 с погрешностью измерений не более 5 мкм, и весов с точностью измерений до 0,01 г. Для вычисления объема образца линейные размеры брались из результатов обмера образцов на усадку. Каждый образец взвешивался, результат фиксировался с точностью до 4 значащих цифр. Кажущаяся плотность вычислялась по формуле:

$$\rho_k = \frac{m}{V},$$

где m — масса образца, г;

V — объем образца, см³.

Результатом испытаний принималось среднеарифметическое значение вычислений кажущейся плотности.

Исследование готовых изделий на статический изгиб выполнялось согласно ГОСТ 4648–2014 [9] с использованием машины

испытательной универсальной МИМ.1-5-2.1-15.1-1.1.1. Испытуемый образец прямоугольного поперечного сечения, свободно лежащий на опорах, подвергался изгибу с постоянной скоростью в середине между опорами до его разрушения или до достижения образцом заданной величины относительной деформации или прогиба. Во время испытания измерялась нагрузка, прикладываемая к образцу, и соответствующие значения прогиба посередине между опорами.

Исследование готовых изделий на растяжение выполнялось согласно ГОСТ 11262–2017 [8] с использованием машины испытательной универсальной МИМ.1-5-2.1-15.1-1.1.1. Перед испытанием измерялись толщина и ширина образцов в трех местах узкой части, после чего рассчитывались среднеарифметические значения полученных результатов, используя которые вычислялось начальное поперечное сечение образца. Образцы, у которых минимальное и максимальное значение толщины или ширины различались более чем на 0,2 мм, не допускались до испытаний. Максимальная скорость растяжения выбиралась так, чтобы время от момента приложения нагрузки к образцу до его разрушения составляло не менее 1 мин. Нагрузка и удлинение образца измерялись непрерывно.

В ходе исследования плотности материалов установлено, что плотности готового изделия отличаются от заявленной производителем, что показано в табл. 2. Эти отклонения обусловлены наличием микрополостей в детали между нитями материала, возникающих в результате особенностей печати методом FDM [10–15].

Исследование усадки готовых изделий (табл. 3) показало незначительную зависимость усадки от материала, и угла наклона модели к столу. Допустимыми значениями усадки принимаются показатели не более 0,5 %.

Таблица 1

Исследуемые характеристики деталей, изготовленных с помощью 3D-принтеров

Показатель	Метод испытаний	Единицы измерений
Усадка	–	%/мм
Кажущаяся плотность	–	г/см ³
Прочность на растяжение	ГОСТ 11262–2017	МПа
Относительное удлинение при разрыве	ГОСТ 11262–2017	%
Прочность на статический изгиб	ГОСТ 4648–2014	МПа

Таблица 2

Сравнение заявленной производителем плотности с измеренной

Материал	Заявленная плотность, г/см ³	Измеренная кажущаяся плотность, г/см ³	Кажущаяся плотность материала без добавок, г/см ³
PLA-GF16	1,31	1,24	1,15
PLA-CF4	1,21	1,16	1,15
PLA-CF10	1,22	1,15	1,15
PLA-CF20	–	1,19	1,15
ABS-GF4	1,1	0,96	0,99
ABS-GF12	1,16	1,05	0,99
ABS-CF5	–	0,95	0,99
ABS-CF15	1,11	0,96	0,99
ABS-MF5	–	1	0,99

Примечание:

GF — Grass Fiber (наполненный стеклом);

CF — Carbon Fiber (наполненный карбоном);

MF — Mineral Fiber (наполненный минеральными волокнами).

Число после типа наполнения — процентное объемное содержание добавки

В ходе исследования прочности при растяжении образцов установлено, что заявленные производителем характеристики не совпадают с измеренными. Результаты исследования прочности на растяжение приведены в табл. 4.

Таблица 3

Результаты исследования усадки

Материал	Усадка, %	Усадка изначального материала, %
PLA-GF16	0,9	0,4
PLA-CF4	0,8	0,4
PLA-CF10	0,5	0,4
PLA-CF20	0,5	0,4
ABS-GF4	0,4	0,8
ABS-GF12	0,4	0,8
ABS-CF5	0,2	0,8
ABS-CF15	0,2	0,8
ABS-MF5	1,0	0,8

В ходе проведения измерений изгибающего напряжения образцов также выявлено несоответствие заявленных производителем характеристик с измеренными, что показано в табл. 5. Также установлено, что чем больше процент армирования, тем выше визуальная спекаемость (рис. 2). Процесс проведения испытания приведен на рис. 3.

Помимо этого, установлено, что при 3D-моделировании требуется в обязательном порядке учитывать усадку материала, для того чтобы физические размеры изготавливаемого изделия соответствовали требуемым. Исследования показали, что в подавляющем большинстве случаев армирование термопластов не оказывает значительного положительного влияния на основные физико-механические характеристики материалов. В худшем случае прочность при

Таблица 4

Результаты исследования прочности на растяжение

Партия	Прочность при растяжении, МПа	Прочность при растяжении, заявленная производителем, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное удлинение, заявленное производителем, %
PLA-GF16	58,1	59,3	6,4	8,0
PLA-CF4	26,7	39,0	1,1	4,3
PLA-CF10	30,2	38,0	1,2	3,2
PLA-CF20	25,8	–	1,0	–
ABS-GF4	25,7	–	8,7	–
ABS-GF12	12,0	60,0	7,8	3,0
ABS-CF5	17,6	–	4,0	–
ABS-CF15	15,3	22,7	4,1	2,1
ABS-MF5	37,9	–	11,3	–

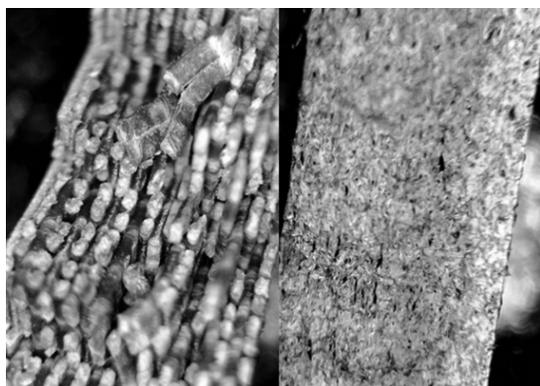


Рис. 2. Фотографии разломов PLA и ABS-GF12 в масштабе 16:1

растяжении материала уменьшалась на 69,9 %, изгибающее напряжение — на 44,1 %, а относительная деформация — на 61 %. Однако некоторые композиционные пластики, например ABS-CF5, продемонстрировал улучшение изгибаемого напряжения на 26,4 % и относительного удлинения на 16,8 %, что является наилучшим результатом среди исследованных материалов. Остальные полимерные композиции продемонстрировали либо незначительные улучшения, либо ухудшение их физико-механических свойств по сравнению с оригинальными материалами.

Проведенные исследования основных физико-механических свойств термопластов, армированных карбоновыми, стеклянными и минеральными волокнами, в контексте 3D-печати показали, что использование армирования оказывает неоднозначное влияние на характеристики материалов. В целом армирование не продемон-

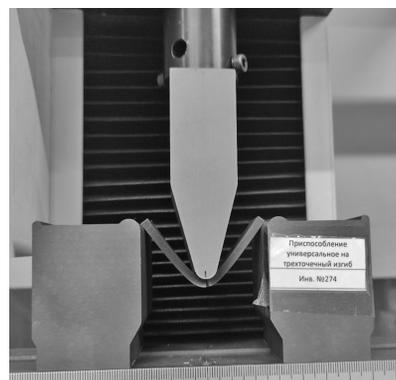


Рис. 3. Проведение испытаний на статический изгиб образца из исследуемой группы PLA-CF20

рировало значительного улучшения основных свойств, таких как прочность при растяжении, изгибающее напряжение и относительная деформация.

Заключение

В ходе данной работы решены следующие задачи:

- исследована возможность применения термопластов, армированных карбоном, стеклом и минеральными волокнами для изготовления изделий (конструктивных элементов БПЛА);
- исследованы основные механические свойства материалов для 3D-печати, армированных карбоном, стеклом и минеральными волокнами, что позволит создавать более точные трехмерные и числовые модели. Позволит быстрее и точнее переходить от прототипа к изделию, а

Таблица 5

Результаты исследования прочности на изгиб изделий из термопластов

Партия	Изгибающее напряжение, МПа	Изгибающее напряжение, заявленное производителем, МПа	Относительная деформация, %	Относительная деформация, заявленная производителем, %
PLA-GF16	62,9	85,0	2,4	8,0
PLA-CF4	64,4	103,0	3,9	4,3
PLA-CF10	61,8	89,0	3,3	3,2
PLA-CF20	49,3	–	3,2	–
ABS-GF4	50,0	–	3,7	–
ABS-GF12	55,7	–	3,5	–
ABS-CF5	63,0	–	2,9	–
ABS-CF15	53,0	74,8	2,4	2,1
ABS-MF5	58,4	–	3,9	–

также производить конечные изделия с помощью аддитивных технологий;

– выявлено отсутствие прямой корреляции между содержанием добавок из стекла и карбона на механические свойства термопластов;

– установлено значительное расхождение между заявленными и измеренными физико-механическими свойствами, что свидетельствует о необходимости проведения обязательной проверки этих характеристик при производстве изделий;

– определено, что для печати составных частей БПЛА нецелесообразно использовать армированные термопласты, из-за большей плотности и хрупкости готового изделия;

– проведены испытания на механические свойства готовых изделий (элементов конструкции БПЛА), напечатанных на 3D-принтерах FDM типа.

Помимо этого, в дальнейшем планируется проведение:

– исследований других механических и физических свойств изделий, получаемых при помощи аддитивного производства;

– исследования способов увеличения прочностных характеристик составных частей БПЛА, получаемых при помощи 3D-печати;

– исследования возможности использования гибких (резиновых) материалов для 3D-печати для создания частей БПЛА, например резиновых прокладок или виброгасящих стоек;

– исследования устойчивости материалов 3D-печати к ультрафиолетовому излучению.

Список источников

1. 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.

2. Прошин А.А., Горячев Н.В., Горячева Е.П. и др. Область применения 3D-принтеров: робототехника и системный анализ: сб. науч. ст. / Пензенский государственный технологический университет. Пенза. Том. 1. 2015. С. 95–105.

3. Торубаров И.С., Дроботов А.В., Плотников А.Л., Гушин И.А. Развитие технологии 3D-

печати с армированием непрерывным волокном // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 8. С. 81–86.

4. Rahmani H., Najafi S.H. M., Ashori A. Mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminated composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2014. Т. 33. № 8. Pp. 733–740.

5. Никонов В.А., Акимов В.В., Осипчик В.С., Олихова Ю.В и др. Эпоксидные связующие для композитной 3D-печати // Успехи в химии и химической технологии. 2017. Т. 31, № 11 (192). С. 82–84.

6. Каримов А.Х. Особенности проектирования беспилотных авиационных систем нового поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. 6 с.

7. Иванов А.А., Горшков С.С. Проектирование и эксплуатация беспилотных летательных аппаратов. М.: Изд-во «Компания программных продуктов», 2019. 146 с.

8. ГОСТ 11262–2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартинформ, 2018. 24 с.

9. ГОСТ 4648–2014. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. М.: Стандартинформ, 2016. 25 с.

10. Смирнов М.А., Рыбкин Н.О., Ксенофонта О.Л. FDM-технология: особенности применения, преимущества, недостатки; сб. науч. тр. вузов России / «Проблемы экономики, финансов и управления производством». 2021. № 48. С. 115–122.

11. Кондрашов С.В., Пыхтин А.А., Ларионов С.А., Сорокин А.Е. Влияние технологических режимов FDM-печати и состава используемых материалов на физико-механические характеристики FDM-моделей (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). С. 34–49.

12. Фомина Е.А., Ваниев М.А., Нилидин Д.А. и др. Исследование влияния параметров 3D-печати на свойства изделий из АБС-пластика // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2023. № 5 (276). С. 113–118.

13. Тимошенко М.В., Кошечкина К.С., Балабанов С.В., Сычев М.М. Влияние параметров 3D-печати на физико-механические характеристики материалов // Физика и химия стекла. 2022. Т. 48, № 4. С. 484–492.

14. Михальченко А.А., Невзорова А.Б., Одарченко И.Б. Влияние режимов 3D-печати термопластами на прочностные свойства изделий //

Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2023. № 1. С. 31–40.

15. Бондаренко Б.А., Баязов В.А., Корнев О.О. и др. Подбор составов смесей для 3D-печати // Вестник Евразийской науки. 2021. Том 13, № 3. 12 с.

References

1. 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. Technical means of countering terrorism. 2024. No 5–6 (191–192). Pp. 130–136.

2. Proshin A.A., Goryachev N.V., Goryacheva E.P. et al. 3D-printer's application area: robotics and system analysis: a collection of scientific articles / Penza State Technological University. Penza. Vol. 1. 2015. Pp. 95–105.

3. Torubarov I.S. et al. Development of 3D-printing technology with continuous fiber reinforcement // Proceedings of the Volgograd State Technical University. 2021. No 8. Pp. 81–86.

4. Rahmani H., Najafi S.H. M., Ashori A. Mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminated composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2014. Vol. 33, No 8. Pp. 733–740.

5. Nikonov V.A. et al. Epoxy binders for composite 3D-printing // Advances in chemistry and chemical technology. 2017. Vol. 31. No 11 (192). Pp. 82–84.

6. Karimov A.H. Design features of unmanned aircraft systems of the new generation // Proceedings of MAI. 2011. No 47. 6 p.

7. Ivanov A.A., Gorshkov S.S. Design and operation of unmanned aerial vehicles. M.: Publishing house «Software Products Company», 2019. 146 p.

8. GOST 11262–2017. Plastics. Tensile testing method. Moscow: Standartinform, 2018. 24 p.

9. GOST 4648–2014. Plastics. Static bending test method. Moscow: Standartinform, 2016. 25 p.

10. Smirnov M.A., Rybkin N.O., Ksenofontova O.L. FDM technology: application features, advantages, disadvantages // Collection of scientific papers of Russian universities «Problems of economics, finance and production management». 2021. No 48. Pp. 115–122.

11. Kondrashov S.V., Pikhtin A.A., Lariov S.A., Sorokin A.E. Influence of technological modes of FDM-printing and composition of used materials on physical and mechanical characteristics of FDM-models (review) // Proceedings of VIAM. 2019. No 10 (82). Pp. 34–49.

12. Fomina E.A., Vaniev M.A., Nilidin D.A. et al. Investigation of the influence of 3D-printing parameters on the properties of ABS-plastic products // Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2023. No 5 (276). Pp. 113–118.

13. Timoshenko MV, Koshevaya KS, Balabanov SV, Sychev MM Influence of 3D-printing parameters on the physical and mechanical characteristics of materials // Physics and Chemistry of Glass. 2022. T. 48, No 4. Pp. 484–492.

14. Mikhilchenko A.A., Nevzorova A.B., Odarchenko I.B. Influence of the modes of 3D-printing with thermoplastics on the strength properties of products // Vestnik of State Technical University named after P.O. Sukhoi. 2023. No 1. Pp. 31–40.

15. Bondarenko B.A., Bayazov V.A., Kornev O.O. et al. Selection of mixture compositions for 3D-printing // Bulletin of Eurasian Science. 2021. Vol. 13, No 3. 12 p.