

06

Воздействие частоты ультразвука на физико-механические свойства углепластика, сформированного по технологии послойного наплавления

© И.В. Злобина^{1,2}, Н.В. Бекренев¹, Д.О. Чуриков¹

¹ Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

² Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Москва, Россия

E-mail: irinka_7@mail.ru

Поступило в Редакцию 6 октября 2025 г.

В окончательной редакции 22 ноября 2025 г.

Принято к публикации 27 ноября 2025 г.

Выполнены исследования изменения прочности и жесткости при трехточечном изгибе, растяжении и ударных нагрузках углепластика, полученного по технологии FDM, после контактного воздействия ультразвука. Установлено, что финишная ультразвуковая обработка при 22 и 44 kHz способствует увеличению напряжений при трехточечном изгибе на 18.7 и 8.6 % соответственно. Установлен рост напряжений растяжения опытных образцов в среднем на 12 и 11 % в сравнении с контрольными.

Ключевые слова: углепластик, полиэфирэфиркетон, физико-механические характеристики, демпфирование ударных нагрузок.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.06.62461.20517

Промышленное производство в условиях постепенного перехода к „Индустрии 4.0“ характеризуется значительным ростом применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) и аддитивных технологий в конструкциях транспортных систем различного назначения, ветроэнергетических комплексов, строительства [1]. Это определяется высокой удельной прочностью ПКМ по сравнению с удельной прочностью металлов и однокомпонентных полимеров, а также простотой технологической реализации методами трехмерной печати процессов формообразования объектов сложной формы. Наиболее распространенными вследствие технической и стоимостной доступности являются аддитивные технологии, использующие неметаллические материалы (FDM, LOM) [2]. Изделия из термопластов, полученные по указанным технологиям, имеют существенный недостаток — малую межслоевую и сдвиговую прочность, что связано с нестабильностью температурных режимов в области печати, высокими температурными градиентами между предыдущим и последующим слоями, значительной дефектностью структуры, вызванной высокой вязкостью термопластов и плохой смачиваемостью ими поверхности армирующих волокон.

В литературе приводятся данные о результатах применения различных видов электрофизической модификации применительно к ПКМ [3–6]. Влияние ультразвуковых процессов на свойства изделий, формируемых из композиционных филаментов, армированных непрерывными углеродными волокнами (УВ), мало изучено. Известные работы по ультразвуковой модификации полимеров [6] указывают на хорошие перспективы для использования ультразвуковых технологий в части повы-

шения физико-механических характеристик изделий из ПКМ, сформированных аддитивными методами.

Целью настоящей работы является изучение влияния частоты ультразвуковых колебаний на напряжения и модули упругости при трехточечном изгибе образцов, полученных с использованием аддитивных технологий, а также на напряжения и относительное удлинение при растяжении и демпфирование ударных нагрузок.

В экспериментах использовали плоскопараллельные образцы углепластика размером $70 \times 10 \times 2.5$ mm с укладкой армирующего волокна $\pm 45^\circ$, сформированные по технологии FDM (fused deposition modeling) из филамента на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК), армированного УВ. Было проведено сравнение свойств контрольных образцов и образцов после контактного ультразвукового воздействия с резонансными частотами 22 и 44 kHz. Выбор указанных частот определялся направленностью исследований на последующую промышленную реализацию с учетом того, что это наиболее распространенные частоты для технологических целей, реализуемые серийно выпускаемыми современными отечественными генераторами. В процессе ультразвукового воздействия при помощи тепловизора Flir E40 велась запись термограмм. Из контрольных и опытных образцов было сформировано три группы по пять единиц. Испытания образцов ПКМ на трехточечный изгиб проводили в соответствии с ГОСТ Р 57866–2017, на растяжение — в соответствии с ГОСТ 32656–2017, на ударный изгиб — в соответствии с патентом RU № 2730055 [7].

При обработке на частоте 22 kHz температура в области контакта составила 32–40 °C, на частоте 44 kHz — 39.1–42.8 °C, что на 13.7 % выше.

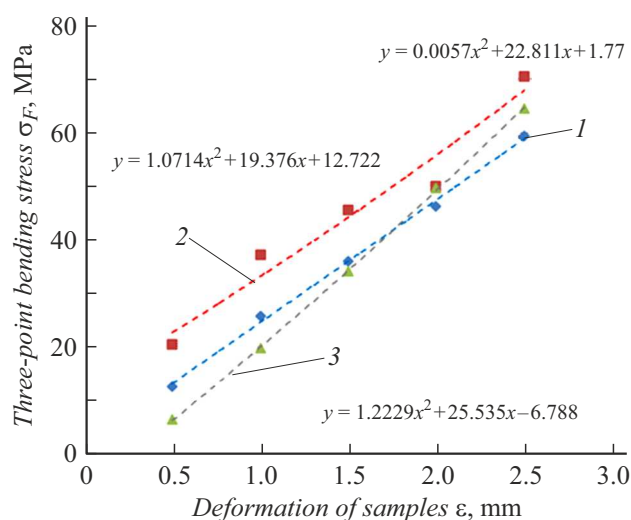


Рис. 1. Зависимость напряжение–деформация контрольных (1) и опытных (2 — после ультразвукового воздействия на частоте 22 kHz, 3 — на частоте 44 kHz) образцов.

Полученные в ходе испытаний на трехточечный изгиб и растяжение результаты представлены на рис. 1, 2. Экспериментальные графики напряжение–деформация при изгибе (рис. 1) с достаточно высокой точностью, составляющей 96–98 %, аппроксимируются полиномами второй степени.

В результате проведения испытаний на растяжение отмечается, что напряжения контрольных образцов составили в среднем 163 МПа, опытных после ультразвукового воздействия на частоте 22 kHz—182.7 МПа, на частоте 44 kHz—181.07 МПа. Характер зависимостей напряжение (нагрузка)—деформация при растяжении для контрольных и опытных образцов схож.

При визуальном осмотре области разрушения исследованных образцов отмечаются отличия, характеризующие механизмы влияния ультразвука (рис. 3). В области разрушения контрольного образца (рис. 3, а) заметны отдельные длинные и короткие жгуты консолидированных волокон. В местах разрыва опытных образцов (рис. 3, б, в) отмечаются участки волокон разной длины, кромка разрыва имеет ломаный вид.

Протяженность области повреждения меньше, чем у контрольных образцов, в 1.5–2 раза.

Полученные в результате приложения ударных нагрузок данные представлены в таблице.

Эффект ультразвуковой модификации образцов, полученных из композиционных филаментов по технологии FDM и состоящих из непрерывных УВ и ПЭЭК, существенно зависит от частоты ультразвука. Установлено, что финишная ультразвуковая обработка на частотах 22 и 44 kHz способствует увеличению напряжений при трехточечном изгибе на 18.7 и 8.6 % соответственно. В сравнении с контрольными образцами напряжения растяжения опытных образцов в среднем возрастают на 12 и 11 % при сохранении неизменной деформации для образцов, обработанных на частотах 22 и 44 kHz соответственно. Отмечено уменьшение эффекта демпфирования ударных нагрузок при воздействии ультразвука большей частоты: зафиксировано снижение силы удара, переданного через образец, соответственно на 23 и 10.8 %, что согласуется с данными известных исследований демпфирования ударных нагрузок полимерными структурами [8].

Отмеченные выше результаты могут быть объяснены следующими процессами, происходящими в связующем монослое при воздействии ультразвука. При контактом воздействии ультразвука на поверхность монослоя происходит пластическая деформация сжатия, проявляющаяся в уменьшении исходной толщины образцов.

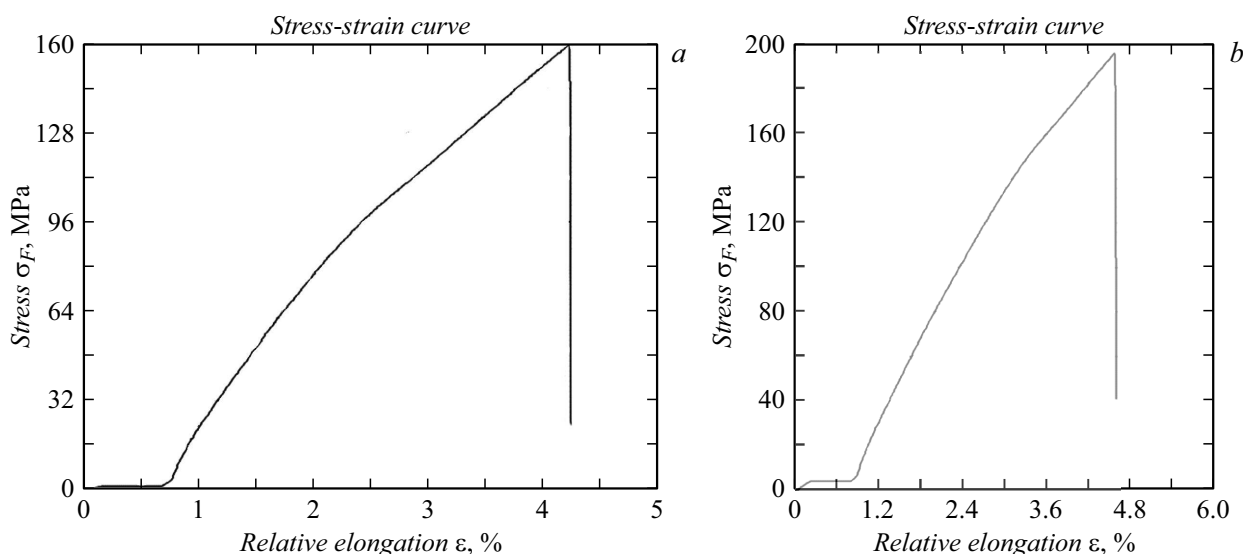


Рис. 2. Типичные графики напряжение–деформация при растяжении контрольного (а) и опытного (б) образцов.

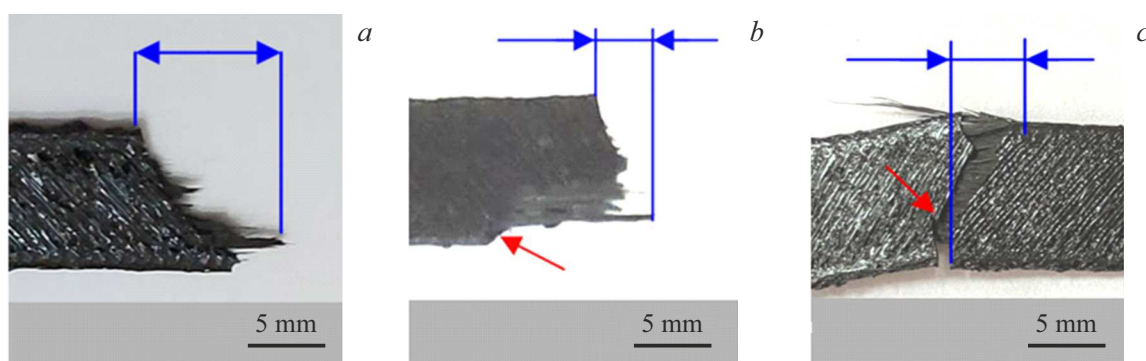


Рис. 3. Характер разрушения при растяжении: *a* — контрольного образца, *b* и *c* — опытных образцов после ультразвукового воздействия на частоте 22 и 44 kHz соответственно. Наклонные стрелки указывают на характерные области излома данной группы образцов. Горизонтальные стрелки показывают протяженность области повреждения, характерную для данной группы образцов.

Параметры восприятия образцами ударной нагрузки

Вид образца	Переданная сила, N	Длительность импульса действия силы, ms
Контрольный	0.31	9.03
После ультразвуковой обработки на частоте 22 kHz	0.27	6.67
Параметр опытного/параметр контрольного	0.87	0.74
После ультразвуковой обработки на частоте 44 kHz	0.34	2.50
Параметр опытного/параметр контрольного	1.11	0.28
Металл	0.88	7.05

Вследствие отмеченного повышения температуры и высоких давлений, вызванных динамической силой, величина которой примерно в 4 раза превышает силу статического прижатия концентратора [9], происходит диффузия термопластичного полимера внешней оболочки филамента в несплошности, имеющиеся в жгуте армирующих волокон, а также заполнение пустот между отдельными дорожками филамента в слое и их дополнительная взаимная сварка. При этом вследствие циклического нагружения с большим числом циклов (22 000 и 44 000 в секунду) возможны микроразрывы в термореактивной матрице, объединяющей армирующие волокна в жгуты. Указанные конкурирующие процессы происходят одновременно, что вызывает различный характер повреждения образцов в зависимости от качества предварительной пропитки и консолидации жгутов. В то же время ультразвуковая сварка соседних дорожек филаментов нивелирует указанные отрицательные явления.

Благодарности

Аналитические исследования выполнены с использованием научного оборудования ЦКП „Исследовательский химико-аналитический центр“ НИЦ „Курчатовский институт“.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 23-79-00039).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Е.Н. Лаптева, О.В. Назарочкина, *Машиностроение и компьютерные технологии*, № 5, 11 (2019). DOI: 10.24108/0519.0001500
- [2] Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер, *Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство* (Техносфера, М., 2016).
- [3] *Microwave processing of materials* (National Academy Press, Washington, 1994). DOI: 10.17226/2266
- [4] Ю.С. Архангельский, *Справочная книга по СВЧ-электро-термии* (Научная книга, Саратов, 2011).
- [5] И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, *Изв. Саратов. ун-та. Новая серия. Физика*, **22** (2), 158 (2022). DOI: 10.18500/1817-3020-2022-22-2-158-169

- [6] В.Н. Студенцов, И.В. Пятаев, ЖПХ, **87** (3), 389 (2014).
[V.N. Studentsov, I.V. Pyataev, Russ. J. Appl. Chem., **87** (3), 352 (2014). DOI: 10.1134/S1070427214030173].
- [7] И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, *Способ испытания полимерных композиционных материалов на сопротивление повреждению при ударном воздействии*, патент РФ № 2730055 (заявл. 14.02.2020, опубл. 14.08.2020).
- [8] В.М. Чернышев, *Демпфирование колебаний механических систем покрытиями из полимерных материалов* (Наука, М., 2009).
- [9] А.И. Марков, *Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов* (Машиностроение, М., 1968).