

И. В. Злобина, Н. В. Бекренев, А. С. Егоров

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ МОНОСЛОЯ,
СФОРМИРОВАННОГО ПУТЕМ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ
ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО ПРЕПРЕГА, НА ЕГО ПОВРЕЖДЕНИЕ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЕРЕРЕЗЫВАЮЩИХ НАГРУЗОК***

Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина

e-mail: irinka_7_@mail.ru

В статье изложены результаты исследований влияния ультразвукового дискретного нагружения с усилием 25 Н на сопротивление перерезывающей силе монослоя, сформированного по аддитивной технологии FDM из препрега, армированного непрерывным углеродным волокном. Установлено, что воздействие с амплитудой 15 мкм с выдержкой в течение 10–15 с в каждой точке образца способствует увеличению напряжений среза на (20–25,6) %.

Ключевые слова: аддитивные технологии, композиционные материалы, препрег, армированный непрерывным углеродным волокном, срез, прочность, ультразвук.

I. V. Zlobina, N. V. Bekrenev, A. S. Egorov

**THE EFFECT OF ULTRASONIC TREATMENT OF A CURED MONOLAYER
FORMED BY THREE-DIMENSIONAL PRINTING FROM A COMPOSITE
PREPREG ON ITS DAMAGE WHEN EXPOSED TO SHEARING LOADS**

Yuri Gagarin Saratov State Technical University

The article presents the results of studies of the effect of ultrasonic discrete loading with a force of 25 N on the resistance to the shearing force of a monolayer formed using additive FDM technology from a prepreg reinforced with continuous carbon fiber. It was found that exposure with an amplitude of 15 microns with exposure for 10–15 seconds at each point of the sample contributes to an increase in shear stresses by (20–25,6) %.

Keywords: additive technologies, composite materials, prepreg reinforced with continuous carbon fiber, shear, strength, ultrasound.

© Злобина И. В., Бекренев Н. В., Егоров А. С., 2024.

* Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-79-00039 «Обоснование методологии комплексного модифицирования композиционных материалов для экстремальных условий эксплуатации на основе изучения фазово-структурных превращений под влиянием электрофизических воздействий различного частотного диапазона».

В условиях цифрофизации производства, устойчивого перехода к многономенклатурности и усложнению отдельных конструктивных элементов большое значение приобретает внедрение в технологический цикл изготовления изделий различного назначения аддитивных технологий. Наиболее распространенной в любительской, профессиональной и производственной сферах технологией 3D печати является FDM – построение объекта в виде слоев нитей, которые формируются путем их расплавления и застывания [1, 2]. Однако, при их промышленном внедрении остается актуальной проблема недостаточной прочности и жесткости изделий из полимеров, что отрицательно сказывается на надежности конструкций из них [2]. Одним из путей решения проблемы недостаточной прочности изделий, изготавливаемых по технологии FDM, является формирование их из композиционных материалов, в частности, введение в структуру наносимых полимерных нитей жгутов из непрерывных армирующих волокон, предварительно пропитанных термореактивным связующим – препрегов [3, 4]. В экструдере головки препрег покрывается термопластичной оболочкой и в таком виде наносится на платформу построения (метод коэкструзии). Однако, в этом случае вследствие разнородности теплофизических и механических свойств термореактивного и термопластичного полимеров, снижается адгезия и становится возможной деструкция связующего в жгутах

при определенной температуре эксплуатации.

Известно, что одним из эффективных методов повышения физико-механических свойств полимерных материалов является воздействие ультразвуковых колебаний [5, 6]. Однако, влияние ультразвука на физико-механические свойства изделий, сформированных путем трехмерной печати, из препрегов, армированных непрерывным волокном, практически не рассматривалось.

Целью исследований явилось изучение влияния амплитуды ультразвука, а также времени его воздействия на напряжения при срезе монослоев, сформированных путем трехмерной печати по технологии FDM / коэкструзии и определение наиболее рациональных технологических режимов.

В исследованиях использованы образцы, вырезанные из монослоя, сформированного на 3D принтере Anisoprint Composer A4 из препрега, армированного жгутом из непрерывных углеродных волокон, пропитанного эпоксидной смолой ЭД-20 и покрытого термопластичным полиэфирэфиркетонном. Изготавливали две группы образцов размерами 30x5x1,2 мм: контрольные и подвергаемые ультразвуковой обработке на резонансной частоте 22 кГц. Опытная группа разделялась в соответствии с планом ПФЭ² (таблица) с учетом сочетания технологических режимов: амплитуды колебаний инструмента и времени воздействия. В каждом случае выполняли по три контрольных опыта.

План эксперимента и уровни варьирования факторов

Параметры эксперимента	Номер опыта N	Входные факторы				Факторы взаимодействия			Значение функции отклика, МПа
		X ₁	A, мкм	X ₂	t, с	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₁ X ₂	
ПФЭ ²	1	-1	1,5	-1	5	+1	+1	+1	3,0
	2	+1	15	-1	5	+1	+1	-1	3,48
	3	-1	1,5	+1	15	+1	+1	-1	3,1
	4	+1	15	+1	15	+1	+1	+1	3,77
«Звездные точки» 2К	5	-1	1,5	0	10	+1	0	0	3,05
	6	+1	15	0	10	+1	0	0	3,6
	7	0	8	-1	5	0	+1	0	3,2
	8	0	8	+1	15	0	+1	0	3,5
Центр плана n ₀	9	0	8	0	10	0	0	0	3,4

Обработку образцов осуществляли на лабораторной ультразвуковой установке с экспериментальным многочастотным ультразвуковым генератором, с дискретностью регулировки 10 Гц. В процессе обработки образец закрепляли при

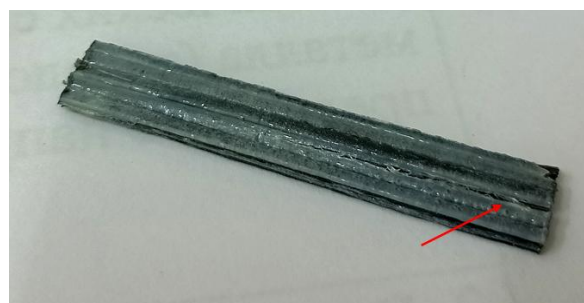
помощи прихвата на специальном перемещающемся столе со встроенной пружинной нагрузкой. Инструмент диаметром 14 мм, что обеспечивало перекрытие всего поперечного размера образца подвели до касания с образцом,

плавно увеличивали нагрузку от 0 до 25 Н и выдерживали под этой нагрузкой в течение 5, 10 и 15 с. Далее нагрузку снимали, а образец перемещали на расстояние 10 мм в продольном направлении так, чтобы обеспечивалось перекрытие зон воздействия не более 5 мм. Операцию повторяли до обработки всей поверхности образца. Амплитуду колебаний инструмента изменяли путем регулировки напряжения силового автотрансформатора, входящего в схему генератора. Значение амплитуды на торце инструмента измеряли при помощи индуктивного датчика модели 214 по шкале с ценой деления 0,5 мкм. Во всех опытах использовали амплитуды 1,5, 8 и 15 мкм. Фактическая резонансная частота преобразователя составила 21780 Гц.

Таким образом был реализован двухфакторный эксперимент соответственно при меньшей и большей частоте воздействия с изменением переменных на трех уровнях: нижнем, среднем и верхнем.



а



б

Рис. 1. Внешний вид контрольного (а) и опытного (б) образцов

Контрольные образцы характеризуются множественными повреждениями в виде продольных расслоений значительной ширины, проходящих через весь образец, что определяет отмеченную выше практически полную потерю несущей способности. Опытные образцы имеют повреждения в виде узких трещин, в ряде случаев не достигающих до края образцов, что свидетельствует о сохранении части механических связей между нитями в монослое и, соответственно, позволяет в большей степени сохранить несущую способность после повреждения в результате действия перерезывающих сил.

Обработка полученных в соответствии с планом эксперимента значений касательных напряжений (в таблице приведены средние по повторным опытам величины) позволила получить полином (формула), с погрешностью в пределах (9,5–12) % описывающий влияние

Испытания образцов на срез проводили по методике, реализованной в компьютерной лабораторной установке производства ИП «Майоров», г. Орел с программным обеспечением LabView. Касательные напряжения среза вычисляли по известным зависимостям, принятым для расчета призматических конструктивных элементов на срез.

Результаты испытаний контрольных и опытных образцов представлены на рис. 1–3. Отмечается, что для опытных образцов после обработки с амплитудой 15 мкм характерно более плавное нарастание и спад нагрузки, контрольные образцы повреждаются за меньшее время (в среднем – на 18 %). Разрушение контрольных образцов происходит ступенчато, что свидетельствует о неравномерности механических связей отдельных нитей в монослое. Различия в характере повреждения опытных и контрольных образцов при срезе подтверждаются при их визуальном осмотре (рис. 1).

амплитуды ультразвука и времени воздействия на касательные напряжения при срезе исследованного монослоя.

$$Y = 3,376 + 0,325X_1 + 0,115X_2 - 0,059X_1^2 - 0,017X_2^2 + 0,047X_1 X_2,$$

где X_1 соответствует амплитуде ультразвуковых колебаний инструмента, X_2 – времени воздействия.

Анализ полинома позволяет отметить, что увеличение как амплитуды, так и времени воздействия ультразвука приводит к росту функции отклика, также положительно влияет и совместное действие указанных факторов. Амплитуда колебаний является более значимым фактором, что проявляется в 2,8 раза большем коэффициенте при X_1 . Также следует указать, что совместное влияние факторов имеют практически на порядок меньшую значимость. Ана-

лиз зависимостей рис. 2 и 3, отражающих влияние одного из действующих факторов на вели-

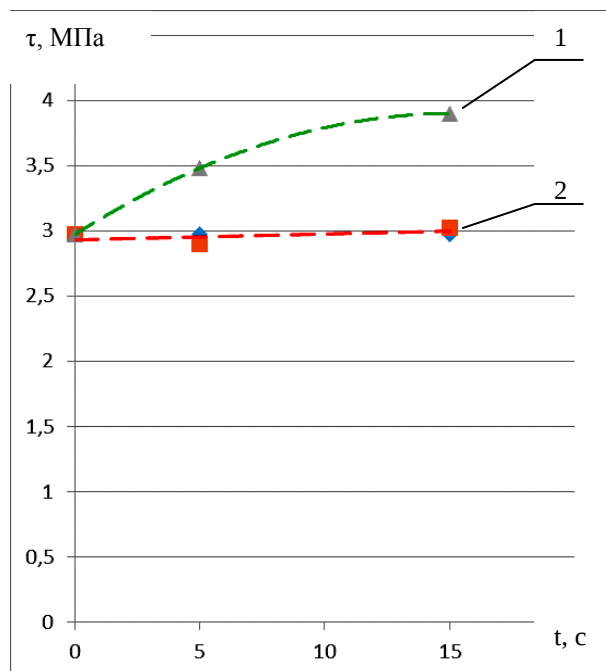


Рис. 2. Зависимость напряжений сдвига от времени при амплитуде 15 мкм (1) и 1,5 мкм (2)

При малых амплитудах (1,5–5 мкм в эксперименте) ультразвуковое воздействие оказывается весьма малозначимым фактором. Графически это проявляется в практически параллельной оси t прямой, соответствующей амплитуде 1,5 мкм (рис. 2) и отлнчии не более чем в (2–3) % от значений, отмеченных для контрольного образца (рис. 3). Время воздействия также оказывает влияние на значение напряжений только в определенной области. Увеличение длительности разового воздействия более 15–20 с на основе экстраполяции графика 1 на рис. 2 сохраняет эффект практически на прежнем уровне. В тоже время увеличение амплитуды колебаний стабильно способствует повышению эффективности упрочнения на всех временах воздействия из исследованного диапазона, что соответствует известным рекомендациям по ультразвуковой сварке, согласно которым наибольшая прочность сварных швов обеспечивается при амплитудах 30–50 мкм. Применение, однако, данных амплитуд в нашем случае, по видимому, не целесообразно, поскольку может привести к деструкции терморезактивного связующего в препреге жгута волокон и их повреждению вследствие высокоинтенсивных знакопеременных механических нагрузок.

чину касательных напряжений, позволяет отметить следующее.

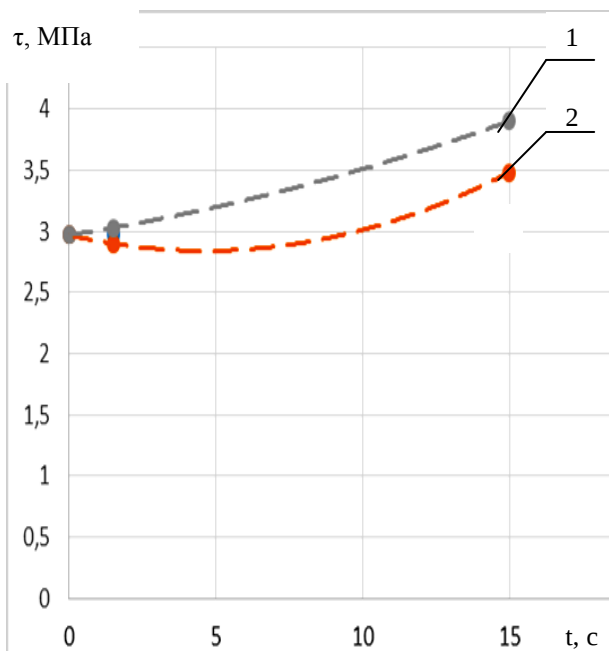


Рис. 3. Зависимость напряжений сдвига от амплитуды при времени воздействия 15 с (1) и 5 с (2)

Результаты проведенных экспериментов позволяют выделить технологические режимы, обеспечивающие максимальное увеличение напряжений при срезе монослоя из композитных нитей: амплитуда колебаний инструмента – 15 мкм, время выдержки в каждой области воздействия 10–15 с. В этом случае обеспечивается увеличение предельных напряжений сдвига на (20–25,6) %, что следует из данных таблицы и рис. 2, 3.

Значительные знакопеременные высокочастотные механические нагрузки вызывают пластическую деформацию терморезактивного полимера и его перераспределение в направлении дефектов структуры – пустот, образовавшихся в процессе печати. Это движение облегчается также уменьшением трения связующего по поверхности образующих жгут волокон, которые благодаря своей упругости являются хорошими проводниками ультразвуковых волн. При этом происходит также размягчение и терморезактивного связующего в препрегах жгутов волокон, поскольку, как нами установлено, мгновенная температура в области ультразвукового воздействия составляет (60–70) °С и находится как раз в диапазоне временного размягчения отвержденных эпоксидных смол [7]. Ультразвуковые колебания, передаваемые в область

контакта двух типов связующего интенсифицируют их взаимную диффузию. В совокупности это повышает плотность и консолидированность материала и может способствовать значительному повышению его прочностных характеристик.

Таким образом, воздействие с амплитудой 15 мкм на частоте 22 кГц с выдержкой в течение 10–15 с в каждой точке образца способствует увеличению напряжений среза на (20–25,6) %. При этом нарастание значения напряжений происходит более плавно, а повреждение образца менее выражено. Результаты исследований могут быть использованы при разработке технологий упрочнения объектов трехмерной печати термопластичными нитями и препрегами, армированными непрерывными волокнами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гибсон, Я. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое

цифровое производство / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер. – М. : ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 656 с.

2. Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. Additive Manufacturing methods and modeling approaches: a critical review // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 83. P. 389–405. DOI: 10.1007/s00170-015-7576-2.

3. Fuda Ning, Weilong Cong, Jingjing Qiu, Junhua Wei, Shiren Wang. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. Composites Part B 80 (2015) 369-378.

4. Wang F. Fiber-matrix Impregnation Behavior During Additive Manufacturing of continuous Carbon Fiber reinforced Polylactic Acid Composites / Wang F., Wang G., Zhang Z., Ning F. // Additive Manufacturing. V. 37, 2021. P. 101661. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101661

5. Студенцов, В. Н. Физическая модификация армированных реактопластов / В. Н. Студенцов // Вестник СГТУ. – 2011. – № 4. – Вып. 3. – 243 с.

6. Негров, Д. А. Влияние энергии ультразвуковых колебаний на структуру и свойства полимерного композиционного материала на основе политетрафторэтилена : дис. ... канд.тех.н.: 05.02.01 / Негров Д. А.; [Место защиты: Ом. гос. техн. ун-т]. – Омск, 2009. – 123 с.

7. Мошинский, Л. Я. Эпоксидные смолы и отвердители (структура, свойства, химия и топология отверждения) / Л. Я. Мошинский. – Аркадия-Пресс. Тель-Авив, 1995. – 370 с.