

УДК 621.9.047/048

DOI: 10.35211/1990-5297-2024-6-289-40-44

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

**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ
НА ТВЕРДОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ОТВЕРЖДЕННОГО МОНОСЛОЯ,
СФОРМИРОВАННОГО ПУТЕМ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ ИЗ ПРЕПРЕГА,
АРМИРОВАННОГО НЕПРЕРЫВНЫМ УГЛЕРОДНЫМ ВОЛОКНОМ***

Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина

e-mail: irinka_7@mail.ru

В статье изложены результаты исследования влияния ультразвуковой обработки на резонансных частотах 22 и 44 кГц монослоя, сформированного путем трехмерной печати из препрегов, армированных непрерывным углеродным волокном, на твердость их поверхности. Установлено повышение плотности структуры монослоя после ультразвукового воздействия, приводящее к увеличению твердости поверхности в единицах Шора-Д на 13,5 % при частоте воздействия 22 кГц и на 10 % при частоте 44 кГц.

Ключевые слова: аддитивные технологии, композиционные материалы, твердость, прочность, ультразвук

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

**THE EFFECT OF ULTRASONIC TREATMENT ON THE SURFACE HARDNESS
OF A CURED MONOLAYER FORMED BY THREE-DIMENSIONAL PRINTING
FROM A PREPREG REINFORCED WITH CONTINUOUS CARBON FIBER**

Yuri Gagarin Saratov State Technical University

The article presents the results of a study of the effect of ultrasonic processing at resonant frequencies of 22 and 44 kHz of a monolayer formed by three-dimensional printing from prepregs reinforced with continuous carbon fiber on the hardness of their surface. An increase in the density of the monolayer structure after ultrasonic exposure was found, leading to an increase in surface hardness in units of Schor-D by 13.5% at a frequency of 22 kHz and by 10% at a frequency of 44 kHz.

Keywords: additive technologies, composite materials, hardness, strength, ultrasound

На протяжении последних десятилетий композиционные материалы все активнее проникают в такие стратегически важные отрасли как авиационная и космическая, а также энергетика и строительство [1]. С начала XXI века наблюдается устойчивый рост объема потребления ПКМ, и эта тенденция сохранится в ближайшее десятилетие [2]. Аддитивные технологии, являющиеся в настоящее время одним из ключевых трендов развития цифрового производства, позволяют в наибольшей степени использовать преимущества ПКМ поскольку последние формируются одновременно с формообразованием изделия, что в полной мере соответствует современному представлению об аддитивных технологиях. Однако, при их промышленном внедрении остается актуальной проблема недостаточной прочности и жесткости изделий из полимеров, а также низкая стойкость по отношению к другим внешним воздействиям, что отрицательно сказывается на надежности конструкций из них [3; 4].

Одним из путей решения проблемы недостаточной стойкости изделий, изготавливаемых

по технологии FDM, к внешним деструктивным факторам является их печать композиционными материалами [5]. последних – в изделие. Однако, эта технология имеет существенный недостаток, заключающийся в разнородности теплофизических и механических свойств терморективного связующего, которым предварительно пропитывают жгут, и термопластичного для формируемого изделия, что снижает адгезию между слоями и вызывает остаточные напряжения, приводящие к образованию хаотично распределенных в структуре пустот. Изложенное делает целесообразным дополнительную модификацию изделий из ПКМ. Среди технологических процессов модификации можно выделить использование физических методов, в том числе – ультразвука [6; 7]. Однако, при этом не изучалось влияние ультразвука на сформированные путем трехмерной печати монослои термопластичного полимера из препрегов, армированных непрерывным волокном.

Целью исследований явилось изучение влияния амплитуды и частоты ультразвука, а также

© 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»

времени его воздействия на твердость поверхности объектов трехмерной печати, которая во многом определяет устойчивость монослоев к износу под действием скоростных потоков микрочастиц, которые характерны для условий эксплуатации прежде всего транспортных систем и строительных конструкций.

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 полиэфиркетеном. Изготавливали 3 группы плоско-параллельных образцов размерами 50x8x1,2 мм: контрольные, подвергаемые ультразвуковой обработке на частоте 22 кГц, и на частоте 44 кГц. Каждая группа состояла из пяти образцов.

Обработку образцов осуществляли на лабораторной ультразвуковой установке с экспериментальным многочастотным ультразвуковым генератором, обеспечивающим частотный диапазон выходного напряжения 20–60 кГц с дискретностью регулировки 10 Гц, что позволяет осуществлять точную настройку системы в резонанс.

В процессе обработки образец закрепляли при помощи прихвата на специальном перемещающемся столе со встроенной пружиной нагружения. Инструмент диаметром 14 мм, что

обеспечивало перекрытие всего поперечного размера образца подвели до касания с образцом, плавно увеличивали нагрузку 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. Фактические резонансные частоты преобразователя составили 24,5 кГц и 43,7 кГц.

Изменение твердости поверхности образцов оценивали по Шору-Д при помощи цифрового дюрометра Novotest ТШ-Ц, межслоевую структуру изучали при помощи цифрового микроскопа Bresser LCD 50x–2000x при увеличении x40.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 1–4 и в таблице. Установлено повышение твердости опытных образцов, равное 13,5 % после обработки на частоте 22 кГц и 10 % на частоте 44 кГц. На частоте 22 кГц отмечается рост твердости поверхности образцов с увеличением амплитуды во всем диапазоне времен воздействия. На частоте

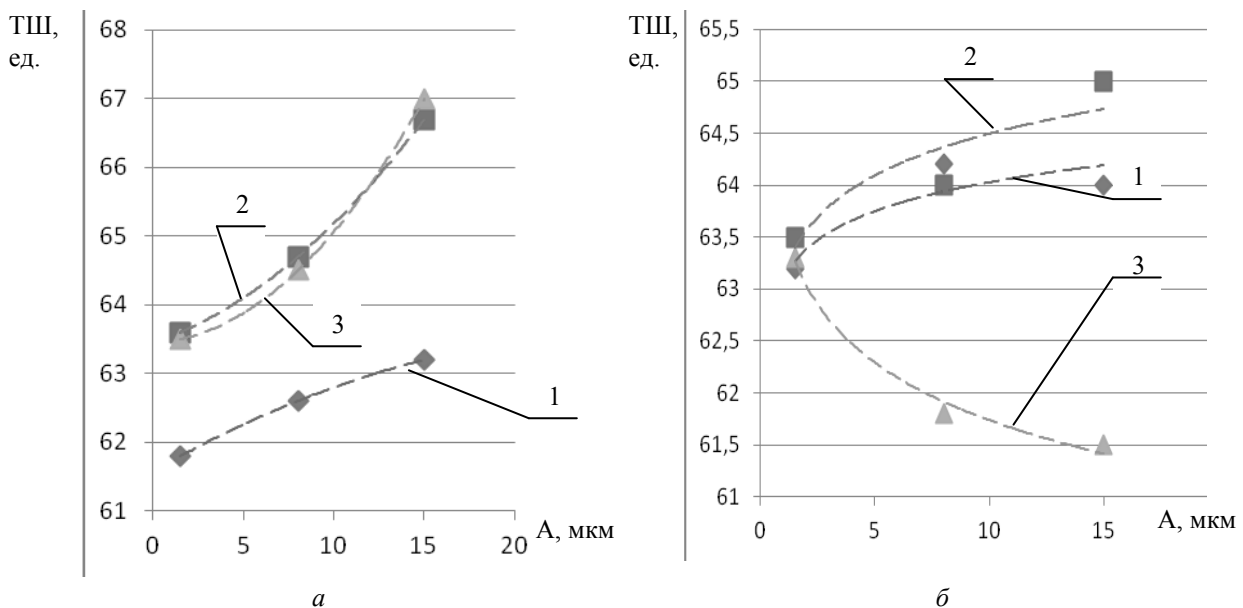


Рис. 1. Изменение твердости поверхности образцов в зависимости от амплитуды ультразвука и времени воздействия при 22 кГц (а) и 44 кГц (б).
Время воздействия в данной точке: 1 – 5 с; 2 – 10 с; 3 – 15 с

44 кГц – снижение твердости с увеличением амплитуды при максимальном из установленном в опыте времени воздействия. На частоте 22 кГц полученные зависимости аппроксимируются полиномами второго порядка, на частоте 44 кГц – степенными функциями (таблица). При этом на частоте 44 кГц отмечается значимое (практически в 2 раза) увеличение степени влияния амплитуды на твердость образцов с увеличением времени воздействия. На частоте 22 кГц, напротив, степень влияния ампли-

туды понижается практически на порядок.

Изучение структуры в поперечном сечении контрольных и опытных образцов (рис. 3 и 4) позволило высказать предположения о механизме отмеченных выше результатов по увеличению твердости образцов. При увеличении $\times 40$ на торцевой поверхности контрольных образцов отмечаются протяженные выходящие за пределы поля зрения макротрещины шириной от 0,05 до 0,1 мм, в целом эквидистантные поверхности монослоя.

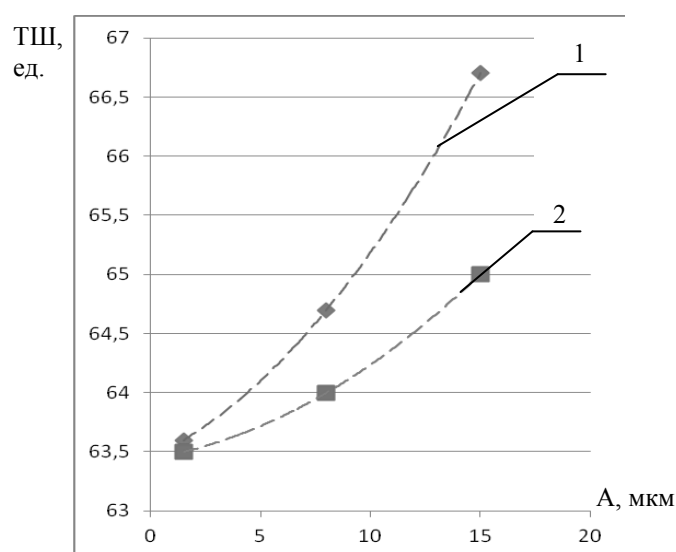


Рис. 2. Изменение твердости поверхности образцов в зависимости от амплитуды и частоты ультразвука при времени воздействия в точке 10 с:
1 – 22 кГц; 2 – 44 кГц

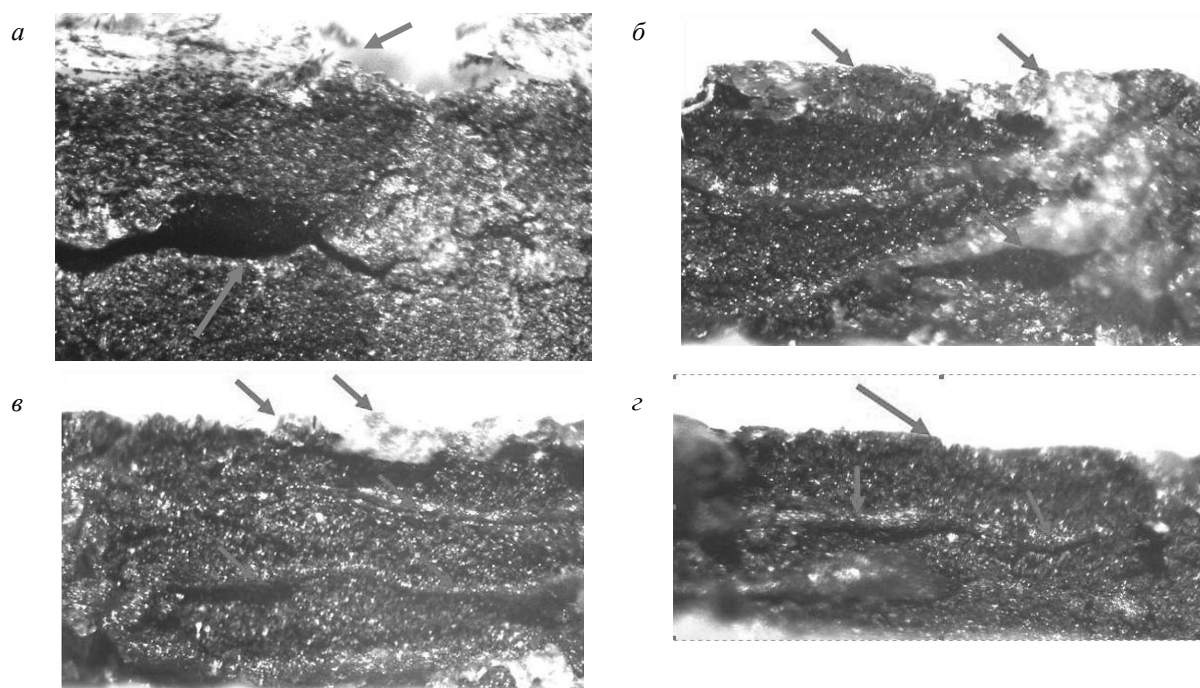


Рис. 3. Микрофотографии ($\times 40$) торцевой поверхности монослоя контрольных образцов (а) и опытных образцов после ультразвукового воздействия на частоте 22 кГц с амплитудой 1,5 мкм (б), 8 мкм (в) и 15 мкм (г) в течение 15 с

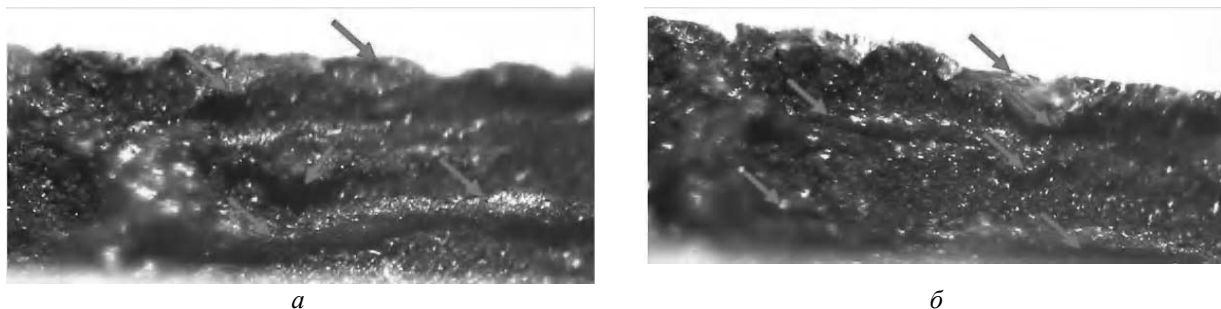


Рис. 4. Микрофотографии (х40) торцевой поверхности монослоя опытных образцов после ультразвукового воздействия на частоте 44 кГц с амплитудой 1,5 мкм (а) и 15 мкм (б)

Изменение твердости образцов после струйно-абразивной обработки

Частота, кГц	22	44
5 с	$y = -0,0028x^2 + 0,1494x + 61,582$	$y = 63,11x^{0,0063}$
10 с	$y = 0,0086x^2 + 0,0873x + 63,45$	$y = 63,17x^{0,009}$
15 с	$y = 0,0151x^2 + 0,0108x + 63,45$	$y = 63,599x^{-0,013}$

Внешняя поверхность характеризуется значительной рельефностью, образованной застывшими после печати данной дорожки монослоя каплями полимера, высота элементов микрорельефа (выступы и впадины) в ряде случаев превышает 0,15 мм (рис. 3, а). В структуре образцов после ультразвукового воздействия с частотой 22 кГц и амплитудой 15 мкм отмечаются только короткие трещины протяженностью не более 0,4 мм и шириной до 0,01–0,02 мм. Элементы структуры выглядят вытянутыми в плоскостях, параллельных внешней поверхности монослоя. В свою очередь поверхность представляется относительно ровной (рис. 3, з). При малых амплитудах сохраняются достаточно крупные полости (промежутки между композитными филаментами), что связано с невысокой интенсивностью ультразвука, но микрорельеф поверхности оказывается сглаженным воздействием инструмента (рис. 3, б). При средних амплитудах пустоты и трещины занимают промежуточное положение по размерам, также их количество снижается (рис. 3, в). Аналогичные изменения характеризуют и структуру образцов после обработки на частоте 44 кГц (рис. 4, а и б), однако, размеры и количество дефектов несколько больше. Уменьшение размеров и количества дефектов в поперечном сечении опытных образцов определяет отмеченное выше повышение твердости их поверхности.

Значительные знакопеременные высокочастотные механические нагрузки вызывают пла-

стическую деформацию полимера и его перераспределение в направлении дефектов структуры – пустот. Это движение облегчается также уменьшением трения связующего по поверхности образующих жгут волокон, которые благодаря своей упругости являются хорошими проводниками ультразвуковых волн. В результате связующее заполняет имеющиеся в структуре макро- и мезопустоты, а его поверхность сглаживается, что сопровождается уменьшением размеров выступов и впадин микрорельефа. С другой стороны, чрезмерная интенсивность или длительность воздействия ультразвука вызывает сверхмногоцикловые нагрузки. Это может привести к быстрому достижению предельного (базового) числа циклов нагружения и истощению запаса усталостной прочности матрицы. Соответственно, в этом случае возможно вторичное появление трещин и отслоений, представляющих собой повреждения способные нарушить целостность композиции. В результате увеличение эффективности упрочнения при повышении частоты оказывается невысоким по сравнению с меньшими частотами воздействия. В тоже время, вследствие увеличения связанности армирующих волокон и связующего на макроуровне наблюдается устойчивый рост эффективности данного метода модификации.

Таким образом, установлено повышение плотности структуры монослоя после ультразвукового воздействия, приводящее к увеличению твердости поверхности в единицах Що-

ра-Д на 13,5 % при частоте воздействия 22 кГц и на 10 % при частоте 44 кГц. Повышение плотности структуры монослоя и уменьшение количества и размеров дефектов в нем после воздействия ультразвука является основной причиной увеличения твердости материала и возможного повышения его стойкости к воздействию скоростного потока твердых частиц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы / Ю. А. Михайлин. – 2-е изд. СПб. : Научные основы и технологии, 2010. – 822 с.
2. Дориомедов, М. С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) / М. С. Дориомедов // Труды ВИАМ. – 2020. – № 6–7. – С. 29–37.
3. Гибсон, Я. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство / Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер. – М. : ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 656 с.
4. https://delprof.ru/upload/iblock/ced/DelProf_Analitika_Rynok-3D_pechati.pdf.
5. Wang, F. Fiber-matrix Impregnation Behavior During Additive Manufacturing of continuous Carbon Fiber reinforced Poly(lactic Acid) Composites / Wang F., Wang G., Zhang Z., Ning F. // Additive Manufacturing. V. 37, 2021. P. 101661. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101661
6. Студенцов, В. Н. Физическая модификация армированных реактопластов / В. Н. Студенцов // Вестник СГТУ. – 2011. – № 4. – Вып. 3. – 243 с.
7. 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.