

УДК 534.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ 3D-ПЕЧАТИ ПРИ 100% ЗАПОЛНЕНИИ НА УПРУГИЕ СВОЙСТВА НИТЕВИДНЫХ ОБРАЗЦОВ ПОЛИМЕРА PLA

© 2023 г. А. Б. Володарский^а, А. И. Кокшайский^а, Н. И. Одина^а, А. И. Коробов^{а, *},
Е. С. Михалев^а, Н. В. Ширгина^а

^аМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет,
Ленинские горы 1, стр. 2, Москва, 119991 ГСП-1 Россия

*e-mail: aikor42@mail.ru

Поступила в редакцию 14.12.2022 г.

После доработки 10.03.2023 г.

Принята к публикации 16.03.2023 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния 3D-печати при 100% заполнении на упругие свойства нитевидных образцов полимера PLA. Статическим методом и методом Терстона–Браггера одновременно измерены зависимость деформации и относительного изменения скорости упругих волн от приложенного механического напряжения (вплоть до разрыва) для исходного и 3D-напечатанного образцов полимера PLA. По результатам измерений рассчитаны линейный и нелинейный модули Юнга и акустический нелинейный параметр второго порядка. Установлено, что 3D-печать приводит к ухудшению прочностных и пластических характеристик полимера PLA. Обнаружено различное поведение нелинейных параметров исходного и 3D-напечатанного образцов полимера PLA в области нагрузки и разгрузки, которое связывается с изменением внутренней структуры образца, вызванным 3D-печатью.

Ключевые слова: полимер PLA, 3D-печать, коэффициент упругости третьего порядка, нелинейный упругий параметр

DOI: 10.31857/S0320791922600536, **EDN:** QRMALS

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие все более востребованной становится технология 3D-печати различных материалов, которая активно применяется не только в лабораториях и на фабриках с высокоточным и массовым производством, но и на бытовом уровне. 3D-печать открывает возможности создания новых композитных образцов, в том числе метаматериалов, из различных материалов, как полимеров [1–5], так и металлических сплавов [6–8]. В общем смысле 3D-принтер представляет собой станок с программным управлением, использующий при изготовлении детали различные физические принципы [9]. Перечислим основные виды 3D-печати. Существует SLA-печать (stereolithography, лазерная стереолитография), позволяющая печатать с очень высокой точностью образцы из фотополимеров [10]. Принтер для SLA-печати и расходные материалы к нему доступны по цене, что способствует их широкому распространению. В ряде технологий 3D-печати, таких как DMLS (direct metal laser sintering), SLS (selective laser sintering), SLM (selective laser melting) используется сплавление либо спекание металлов

при помощи мощных лазеров [11]. Расходные материалы и принтеры для этих видов печати являются самыми дорогими на рынке, поэтому применяют их в основном в лабораториях и при ограниченном производстве сложных деталей. К этим же видам печати относится EBM (electron-beam melting) печать, где вместо лазера применяется электронно-лучевая трубка [12]. Сферы применения этого вида печати ограничены медицинскими приложениями, аэрокосмической областью и мелкосерийным производством деталей сложной формы. Самой же распространенной технологией является FDM (fused deposition modeling) печать, позволяющая печатать объемные модели из полимеров при помощи послойного наплавления [13, 14]. Широкий выбор полимеров для печати позволяет покрыть огромный спектр различных приложений – они используются для изготовления гибких или жестких, устойчивых к ультрафиолету или ацетону, обладающих повышенной температурой размягчения изделий. Доступная цена принтеров и расходных материалов обеспечивает им широкое распространение во всех при-

ложениях, в которых не требуется повышенная точность или прочность, сравнимая с металлами.

Одним из термопластических полимеров, широко используемых при 3D-печати, является PLA (polylactic acid, полилактид). Будучи нетоксичным и имея хорошие механические свойства, PLA используется для производства различных компонентов и объектов пищевой и медицинской промышленности, в том числе биомедицинских устройств [15–19].

Одним из важных преимуществ PLA является то, что детали из него можно легко изготовить методом FDM с помощью простых и недорогих коммерческих 3D-принтеров. На механические свойства аддитивно изготовленного PLA существенно влияют как параметры 3D-печати, такие как размер сопла, процент и схема заполнения, температура и скорость печати [20, 21], так и химический состав (например, пигменты, вводимые для изменения окраски, также влияют на механические свойства и на уровень кристалличности PLA) [22].

Многочисленные исследования показывают, что 3D-печать приводит к существенному изменению механических характеристик PLA [23–26]. Так, если предел прочности исходного литого PLA может достигать 60 МПа [23], то для 3D-напечатанных материалов предел прочности может значительно уменьшаться (вплоть до 50%) в зависимости от ориентации нитей заполнения [24–26].

Сравнение механических характеристик 3D-напечатанного и литого PLA, измеренных статическим методом, было произведено в работе [27]. Было обнаружено, что для исследованных образцов PLA 3D-печать приводит к существенному уменьшению предела прочности (с примерно 52 до 44 МПа), уменьшению модуля Юнга (с примерно 3.2 до 3 ГПа) и предела текучести (с примерно 12.7 до 10.5 МПа); в то же время предельная деформация при разрыве, наоборот, незначительно увеличилась для напечатанных образцов (с 1.65 до 1.74%).

Такое изменение механических свойств является следствием изменения микроструктуры полимеров, вызванного термомеханическими воздействиями, возникающими при 3D-печати: возникает текстура, определяемая способом укладки нити, возникают дефекты, обусловленные особенностями и несовершенством адгезии нитей, пористость в случае отсутствия дегазации [27], может изменяться соотношение кристаллической и аморфной фаз, могут изменяться или возникать упорядоченные субструктуры [23].

Линейные акустические методы применялись ранее для исследования процессов стеклования [28] и деградации [29] полимеров на основе PLA. В работе [30] были исследованы линейные акустические свойства образцов 3D-напечатанных

восьми коммерчески доступных термопластических полимеров, включая PLA. Стандартными эхо-импульсными методами на отражение и прохождение были измерены коэффициент затухания, скорость звука и рассчитан акустический импеданс.

Нелинейные акустические методы для исследования полимеров на основе PLA применялись в работе [23]. Методом генерации гармоник измерялся нелинейный акустический параметр третьего порядка при изгибной деформации образцов PLA, подвергавшихся химическим и физическим воздействиям. Установлено, что наибольшее воздействие на изменение величины нелинейного акустического параметра оказывает введение примеси, а также сочетанное применение всех использованных методов обработки.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований ультразвуковым и статическим методами влияния 3D-печати на линейные и нелинейные упругие свойства нитевидных образцов полимера PLA марки eSun. Были исследованы как линейные упругие свойства образцов полимера PLA (статическим методом, т.е. по нагрузочной кривой механическое напряжение σ –деформация ϵ вплоть до разрыва), так и нелинейные (с использованием модифицированного метода Терстона–Браггера, который заключается в измерении зависимости относительного изменения скорости упругих волн в образце от величины приложенного к нему механического напряжения растяжения).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ, УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Автоматизированная установка, использовавшаяся для одновременного измерения статическим методом и методом Терстона–Браггера зависимости деформации и относительного изменения скорости упругих волн от приложенного механического напряжения, ранее подробно была описана в [31]. Она включала в себя механическую (для создания механического напряжения растяжения) и ультразвуковую части. Для измерения относительного изменения скорости упругих волн использовалась автоматизированная импульсная ультразвуковая установка, которая была разработана на базе ультразвуковой автоматизированной системы Ritec RAM-5000. Для генерации и приема продольных акустических волн были использованы пьезоэлектрические преобразователи с резонансной частотой 300 кГц. Преобразователи прикреплялись с помощью подпружиненных зажимов к торцам усеченных конусов, в которых были закреплены концы образцов. Для устранения высокочастотных компонент зондирующий сигнал пропусклся через фильтр нижних частот.

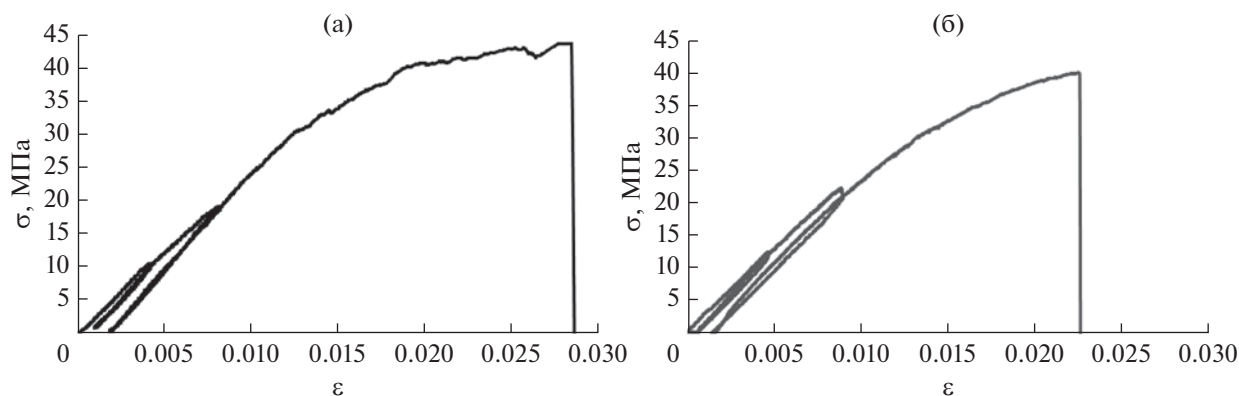


Рис. 1. Экспериментально измеренная нагрузочная кривая $\sigma(\epsilon)$ для (а) – исходного и (б) – 3D-напечатанного образцов PLA.

Для управления ходом эксперимента и обработки полученных данных использовался специально разработанный пакет программ с графическим интерфейсом. Он был установлен на персональном компьютере и обеспечивал возможность одновременного проведения статических и ультразвуковых измерений с дальнейшим их архивированием и обработкой.

Для проведения исследований были изготовлены два образца полимера PLA. Первый (называемый далее “исходным”) был вырезан из нити коммерческого полимера PLA марки eSun без дополнительной термической или иной обработки. Он имел форму тонкого цилиндра длиной $L = 121.7$ мм и диаметром $D = 1.7$ мм.

Второй образец (называемый далее “напечатанным”) был напечатан на 3D-принтере из той же нити полимера PLA марки eSun. Он имел форму тонкой прямой призмы длиной 118 мм с основанием в форме правильного шестиугольника с длиной стороны 1.05 мм. Печать производилась методом послойного наплавления на самодельном 3D-принтере, близком по параметрам к модели “3DQ Mini”, при температуре 160°C, 100% заполнении и диаметре сопла 0.05 мм, ориентация нити – вдоль длинной оси призмы.

По результатам измерений были рассчитаны по методике, описанной в [31], как линейные (линейный модуль Юнга E), так и нелинейные упругие параметры (нелинейный модуль Юнга E_N и нелинейный параметр второго порядка N) для нитевидных образцов как исходного образца PLA марки eSun, так и для образца PLA, изготовленного методом 3D-печати из исходного материала.

Линейный модуль Юнга (коэффициент упругости второго порядка) E определялся из нагрузочной кривой механическое напряжение–деформация по формуле:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}. \quad (1)$$

Нелинейный модуль Юнга (коэффициент упругости третьего порядка) E_N определялся из зависимости относительного изменения скорости от приложенного механического напряжения по формуле:

$$E_N = \frac{2E}{\Delta\epsilon_{ст}} \left(\frac{\Delta V}{V} \right). \quad (2)$$

Акустический нелинейный параметр второго порядка N рассчитывался по формуле:

$$N = \frac{E_N}{E}. \quad (3)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ АНАЛИЗ

В результате серии экспериментов была получена информация о линейных и нелинейных упругих свойствах исследуемых образцов исходного и 3D-напечатанного образцов полимера PLA и влиянии на них периодических процессов циклов механической нагрузки–разгрузки. Общее время каждого эксперимента составляло 4.5 ч, таким образом, процесс нагружения можно считать близким к квазистатическому.

Результаты измерения зависимости напряжение–деформация $\sigma = \sigma(\epsilon)$ в исследуемых образцах для двух с половиной циклов периодического изменения приложенного к нему механического напряжения приведены на рис. 1 для (а) исходного и (б) 3D-напечатанного образцов. Для каждого цикла нагрузки–разгрузки наблюдалась незначительная гистерезисная зависимость $\sigma = \sigma(\epsilon)$. После первого цикла остаточные деформации составляли $\epsilon \sim 0.0010 \pm 0.0003$ для исходного образца и $\epsilon \sim 0.0003 \pm 0.0003$ для напечатанного, после второго – $\epsilon \sim 0.0019 \pm 0.0003$ для исходного образца и $\epsilon \sim 0.0014 \pm 0.0003$ для напечатанного.

Проведенные экспериментальные измерения зависимости напряжение–деформация позволи-

Таблица 1. Прочностные и пластические характеристики исходного и 3D-напечатанного образцов PLA

	Исходный	3D-напечатанный
Модуль Юнга, ГПа	2.6 ± 0.1	2.7 ± 0.1
Предел прочности, МПа	44 ± 1	40 ± 1
Деформация при разрыве, %	2.9 ± 0.1	2.3 ± 0.1

ли определить механические характеристики исследуемых образцов (предел прочности, остаточная деформация при разрыве, модуль Юнга). Модуль Юнга определялся на линейных участках нагрузочных кривых по методике, описанной в работе [31]. Рассчитанные по экспериментальным данным значения механических параметров исходного и 3D-напечатанного образцов PLA представлены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, механические свойства напечатанного образца полимера PLA несколько ухудшились: он имеет несколько меньший предел прочности и меньшую остаточную деформацию при разрыве.

По формуле (1) были рассчитаны линейные модули Юнга в обоих исследуемых образцах при их нагрузке и разгрузке. Линейная часть второго цикла нагрузки-разгрузки, по которой рассчитывался модуль Юнга методом наименьших квадратов, приведена на рис. 2.

Значения линейных модулей Юнга в исследуемых образцах PLA для всех циклов нагрузки и разгрузки приведены в табл. 2. Видно, что модули Юнга как исходного, так и напечатанного образцов несколько увеличиваются при нагружении образцов, что можно объяснить их упрочнением. На первом цикле нагрузки-разгрузки, в линейной области нагрузочной кривой, различие модулей Юнга исходного и напечатанного образцов порядка погрешности измерения. На втором цикле нагрузки-разгрузки, который уже выходил за пределы линейной области, исходный и напечатанный

образец ведут себя различным образом: модуль Юнга исходного образца остается почти неизменным, а напечатанного незначительно уменьшается после нагрузки.

В ходе эксперимента одновременно с измерением нагрузочной кривой $\sigma(\epsilon)$ были измерены зависимости относительного изменения скорости продольной упругой волны $(\Delta V/V)$ в образце от величины его статической деформации $\epsilon_{ст}$ в процессе нагрузки-разгрузки. Полученные зависимости представлены на графиках (рис. 3).

Видно, что при малых деформациях (до 0.01) зависимость относительного изменения скорости упругих волн от деформации при нагрузке-разгрузке образцов близка к линейной. Это позволило рассчитать значения модулей Юнга третьего порядка с помощью формулы (2) с использованием метода наименьших квадратов. Пример линейной части зависимости относительного изменения скорости от деформации для первого цикла нагрузки-разгрузки для исходного и напечатанного образцов приведен на рис. 4. Отметим, что различное поведение относительного изменения скорости звука при нагрузке и разгрузке видно уже после первого цикла нагружения.

Значения коэффициентов упругости третьего порядка для всех циклов нагрузки и разгрузки представлены в табл. 3. Видно, что нагружение как исходного, так и напечатанного образцов приводит к росту нелинейного модуля Юнга, и этот рост одного порядка для исходного и напеча-

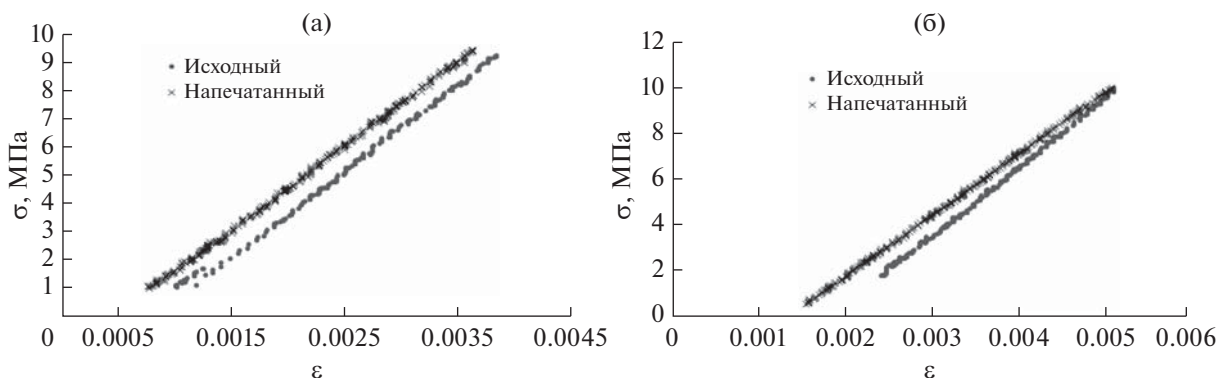


Рис. 2. Экспериментально измеренные нагрузочные кривые $\sigma(\epsilon)$ для второго цикла при (а) – нагрузке и (б) – разгрузке исходного и 3D-напечатанного образцов PLA.

танного образцов. Но если нелинейный модуль Юнга исходного образца возрастает почти монотонно, то его поведение для 3D-напечатанного образца немонотонное: он несколько увеличивается в области нагрузки и уменьшается в области разгрузки.

Используя полученные значения коэффициентов упругости второго и третьего порядков, по формуле (3) был рассчитан акустический нелинейный параметр N , значения которого представлены в табл. 4. Видно, что нелинейный параметр как для исходного, так и для напечатанного образцов ведет себя немонотонно по мере нагружения. Однако нелинейный параметр исходного образца сильно увеличивается после первого нагружения, а потом меняется слабо. Нелинейный же параметр напечатанного образца растет и при первом, и при втором нагружении, а на второй разгрузке падает. Такое различие можно связать с различием внутренней структуры исходного и 3D-напечатанного образцов.

Данных об абсолютном значении нелинейного параметра PLA в литературе нами не обнаружено. В предшествующей статье авторов по определению упругих модулей и нелинейного параметра образцов PLA [31] была допущена ошибка при вычислении относительного изменения скорости звука, что привело к существенному занижению абсолютных значений нелинейного модуля упругости и нелинейного параметра. Скорректированные значения нелинейного параметра приведены в [32] и составляют от 5.0 ± 0.4 до 5.9 ± 0.5 в сопоставимом диапазоне деформаций, что в пределах погрешности близко к значениям, полученным в данной работе. Небольшое различие может быть связано со старением второго образца, который исследовался на 2 года позже.

Средние значения нелинейного параметра B/A для ряда полимеров (полистирол, акрил, полиэтилентерефталат, поливинилхлорид, поликарбонат), измеренные методом фокусированного

Таблица 2. Линейный модуль Юнга исходного и 3D-напечатанного образцов PLA при нагрузке-разгрузке

Модуль Юнга, ГПа	Исходный	3D-напечатанный
1 цикл, нагрузка	2.6 ± 0.1	2.7 ± 0.1
1 цикл, разгрузка	2.7 ± 0.1	2.8 ± 0.1
2 цикл, нагрузка	3.0 ± 0.1	2.9 ± 0.1
2 цикл, разгрузка	3.0 ± 0.1	2.7 ± 0.1
3 цикл, нагрузка	3.1 ± 0.1	3.2 ± 0.1

Таблица 3. Коэффициенты упругости третьего порядка исходного и 3D-напечатанного образцов PLA при нагрузке-разгрузке

Коэффициент упругости третьего порядка, ГПа	Исходный	3D-напечатанный
1 цикл, нагрузка	14.4 ± 0.7	14.6 ± 0.7
1 цикл, разгрузка	19.0 ± 0.9	16.9 ± 0.8
2 цикл, нагрузка	18.8 ± 0.9	19.7 ± 0.9
2 цикл, разгрузка	20 ± 1	16.2 ± 0.8
3 цикл, нагрузка	21 ± 1	22 ± 1

ультразвука, достигают 9–11 [33]. Поведение нелинейного параметра при механическом нагружении полипропилена исследовалось в работе [34]. На начальном участке растяжения чистого полипропилена его нелинейный параметр второго порядка $-\frac{\partial V(\epsilon)}{\partial \epsilon}/V$ вел себя немонотонно: в линейной части он падал с 7.5 до 5, при выходе на начальную стадию пластической области снова возрос до 7.5, а при дальнейшем растяжении снова стал уменьшаться. Таким образом, можно сделать вывод о том, что величина нелинейного параметра полимера меняется в зависимости от то-

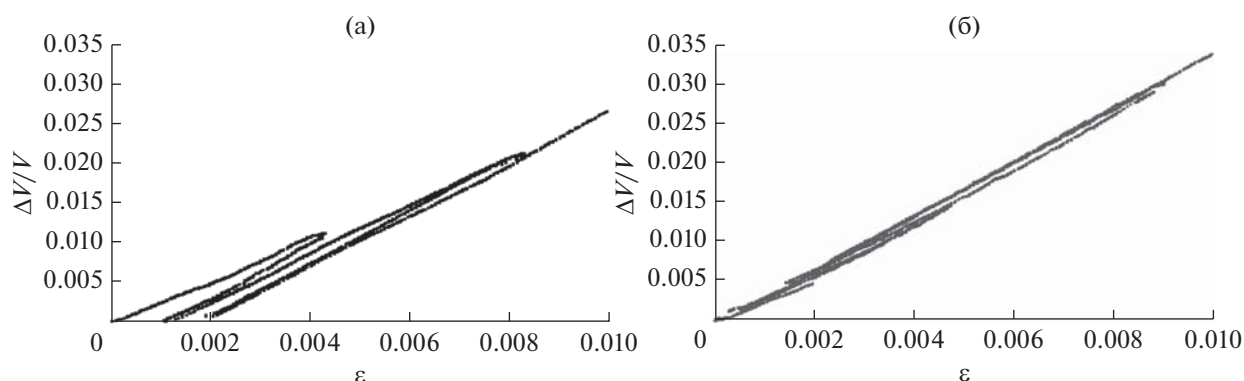


Рис. 3. Экспериментально измеренные зависимости относительного изменения скорости продольной волны от статической деформации для (а) — исходного и (б) — 3D-напечатанного образцов PLA.

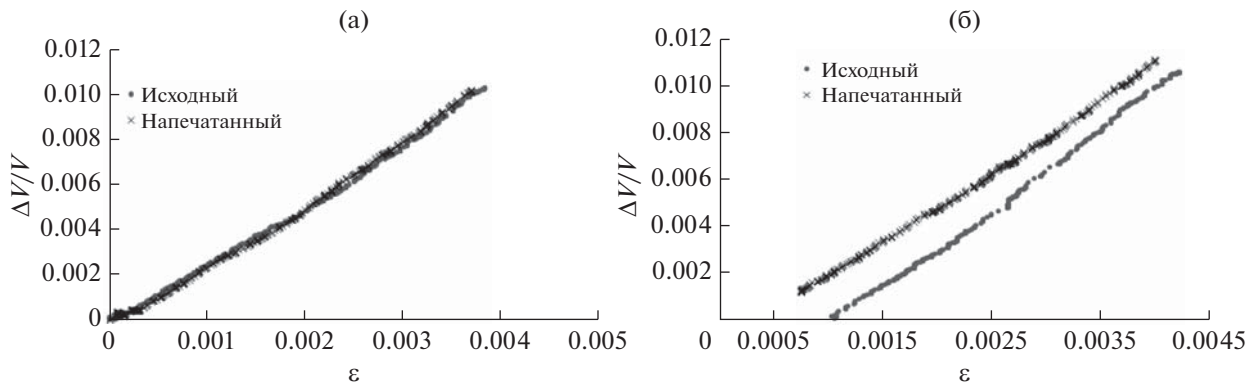


Рис. 4. Экспериментально измеренные зависимости относительного изменения скорости продольной волны от статической деформации для первого цикла при (а) – нагрузке и (б) – разгрузке исходного и 3D-напечатанного образцов PLA.

Таблица 4. Нелинейный акустический параметр исходного и 3D-напечатанного образцов PLA при нагрузке-разгрузке

Нелинейный акустический параметр	Исходный	3D-напечатанный
1 цикл, нагрузка	5.5 ± 0.4	5.4 ± 0.4
1 цикл, разгрузка	7.0 ± 0.6	6.0 ± 0.5
2 цикл, нагрузка	6.3 ± 0.5	6.8 ± 0.5
2 цикл, разгрузка	6.7 ± 0.5	6.1 ± 0.5
3 цикл, нагрузка	6.8 ± 0.5	6.9 ± 0.5

го, на каком участке нагрузочной кривой он измеряется. Это может служить основой для нелинейного акустического контроля нагружаемых полимеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследовано влияние 3D-печати при 100% заполнении на механические, линейные и нелинейные упругие параметры образца промышленного полимера PLA марки eSun.

Для 3D-напечатанного образца PLA обнаружено уменьшение предела прочности примерно на 10% и величины остаточной деформации при разрыве примерно на 20%.

Установлено, что периодические нагрузки-разгрузки образца приводят к незначительному увеличению величины модуля Юнга E как для исходного, так и для напечатанного образцов.

Обнаружено немонотонное поведение нелинейного модуля упругости и нелинейного параметра по мере нагружения, характер которого отличается для исходного и для напечатанного образцов. Это различие связывается с различием

внутренней структуры исходного и 3D-напечатанного образцов.

Полученные результаты дают информацию о влиянии 3D-печати при 100% заполнении на механические, линейные и нелинейные упругие свойства полимера PLA и могут быть использованы при создании образцов композитов и метаматериалов в технологии 3D-печати, а также служить основой для развития методов нелинейного акустического контроля нагружаемых полимеров.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-12-00098).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schumacher C., Bickel B., Rys J., Marschner S., Daraio C., Gross M. Microstructures to control elasticity in 3D printing // *ACM Trans. Graph.* 2015. V. 34. P. 136:1–136:13.
2. Cantrell J., Rohde S., Damiani D., Gurnani R., DiSandro L., Anton J., Young A., Jerez A., Steinbach D., Krose C., Ifju P. Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts // *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics.* 2017. V. 3. P. 89–105.
3. Kao Y., Zhang Y., Wang J., Tai B.L. Loading–unloading cycles of three-dimensional-printed built bimaterial structures with ceramic and elastomer // *J. Manuf. Sci. Eng.* 2016. V. 139. P. 041006–041006-6.
4. Zou R., Xia Y., Liu S., Hu P., Hou W., Hu Q., Shan C. Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material // *Compos. Part B Eng.* 2016. V. 99. P. 506–513.
5. Бошняк В.А., Языков А.В. Оценка возможности применения изделий из пластмасс, созданных посредством послойной наплавки материала, в силовой оснастке лабораторных установок // *Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана.* 2016. С. 311–320.
6. Martin J.H., Yahata B.D., Hundley J.M., Mayer J.A., Schaedler T.A., Pollock T.M. 3D printing of high-

- strength aluminium alloys // *Nature*. 2017. V. 549. P. 365–369.
7. *Ma C., Dong Y., Ye C.* Improving surface finish of 3D-printed metals by ultrasonic nanocrystal surface modification // *Procedia CIRP*. 2016. V. 45. P. 319–322.
 8. *Schulze C., Weinmann M., Schweigel C., Keßler O., Badler R.* Mechanical properties of a newly additive manufactured implant material based on Ti–42Nb // *Materials (Basel)*. 2018. V. 11. P. 13–16.
 9. *Ланцова Ю.А., Павленко Т.Г.* 3D принтеры // *Физика и современные технологии в АПК: материалы XI Всероссийской молодежной конференции молодых ученых, студентов и школьников с международным участием, Орел, 19 февраля 2020 г. Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина. Орел: ООО Полиграфическая фирма “Картуш”, 2020. С. 45–48.*
 10. *Wang J., Goyanes A., Gaisford S., Basit A.W.* Stereolithographic (SLA) 3D printing of oral modified-release dosage forms // *Int. J. Pharmaceutics*. 2016. V. 503. P. 207–212.
 11. *Msallem B., Sharma N., Cao S., Halbeisen F.S., Zeilhofer H.F., Thieringer F.M.* Evaluation of the dimensional accuracy of 3D-printed anatomical mandibular models using FFF, SLA, SLS, MJ, and BJ printing technology // *J. clinical medicine*. 2020. V. 9. P. 817.
 12. *Murr L.E., Martinez E., Amato K.N., Gaytan S.M., Hernandez J., Ramirez D.A., Shindo P.W., Ryan F.M., Wickner R.B.* Fabrication of metal and alloy components by additive manufacturing: examples of 3D materials science // *J. Materials Research and technology*. 2012. V. 1. P. 42–54.
 13. *Doshi M., Mahale A., Singh S.K., Deshmukh S.* Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects // *Materials Today: Proc.* 2021. V. 50. P. 2269–2275.
 14. *Wickramasinghe S., Do T., Tran P.* FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments // *Polymers*. 2020. V. 12. P. 1529.
 15. *Lim L.T., Auras R., Rubino M.* Processing technologies for poly(lactic acid) // *Prog. Polym. Sci.* 2008. V. 33. P. 820–852.
 16. *Nakatsuka T.* Polylactic Acid-Coated Cable // *Fujikura Tech. Rev.* 2011. P. 39–46.
 17. *Farah S., Anderson D.G., Langer R.* Reviews Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications – A comprehensive review // *Advanced Drug Delivery*. 2016. V.107. P. 367–392.
 18. *La Mantia F.L., Morreale M.* Green composites: A brief review. Composites, Part A // *Appl. Sci. Manuf.* 2011. V. 42. P. 579–588.
 19. *Hamad K., Kaseem M., Ayyoob M., Joo J., Deri F.* Polylactic acid blends: The future of green, light and tough // *Progress in Polymer Science*. 2018. V. 85. P. 83–127.
 20. *de Ciurana J., Serenó L., Vallès E.* Selecting Process Parameters in RepRap Additive Manufacturing System for PLA Scaffolds Manufacture // *Procedia CIRP*. 2013. V. 5. P. 152–157.
 21. *Fernandez-Vicente M., Calle W., Ferrandiz S., Conejero A.* Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing // *3D Printing and Additive Manufacturing*. 2016. V. 3. P. 183–192.
 22. *Wittbrodt B., Pearce J.M.* The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components // *Additive Manufacturing*. 2015. V. 8. P. 110–116.
 23. *Zhao G., Gomes F.P.C., Marway H., Thompson M.R., Zhu Zh.* Physical Aging as the Driving Force for Brittle–Ductile Transition of Polylactic Acid // *Macromol. Chem. Phys.* 2020. V. 221. P. 1900475.
 24. *Lanzotti A., Grasso M., Staiano G., Martorelli M.* The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer // *Rapid Prototyping Journal*. 2015. V. 21. P. 604–617.
 25. *Afrose M.F., Masood S.H., Iovenitti P., Nikzad M., Sbarski I.* Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material // *Progress in Additive Manufacturing*. 2016. V. 1. P. 21–28.
 26. *Ahmed A.A., Susmel L.* Additively Manufactured PLA under static loading: strength/cracking behaviour vs deposition angle // *Procedia Structural Integrity*. 2017. V. 3. P. 407–507.
 27. *Oztan C., Karkkainen R., Fittipaldi M., Nygren G., Roberson L., Lane M., Celik E.* Microstructure and mechanical properties of three dimensional-printed continuous fiber composites // *J. Composite Materials*. 2019. V. 53. P. 271–280.
 28. *Parker N., Mather M.L., Morgan S.P., Povey M. J.* Longitudinal acoustic properties of poly(lactic acid) and poly(lactic-co-glycolic acid) // *Biomedical Materials*. 2010. V. 5. P. 055004.
 29. *Wua H.-C., Shenb F.-W., Honga X., Changa W.V., Winet H.* Monitoring the degradation process of biopolymers by ultrasonic longitudinal wave pulse-echo technique // *Biomaterials*. 2003. V. 24. P. 3871–3876.
 30. *Antoniou A., Evripidou N., Giannakou M., Constantinides G., Damianou C.* Acoustical properties of 3D printed thermoplastics // *J. Acoust. Soc. Am.* 2021. V. 149. P. 2854–2864.
 31. *Коробов А.И., Кокшайский А.И., Михалев Е.С., Одина Н.И., Ширгина Н.В.* Исследования упругих свойств полимера PLA статическими и ультразвуковыми методами // *Акуст. журн.* 2021. Т. 67. № 4. С. 387–394.
 32. *Коробов А.И., Кокшайский А.И., Михалев Е.С., Одина Н.И., Ширгина Н.В.* Поправки к “Исследования упругих свойств полимера PLA статическими и ультразвуковыми методами” [Акуст. журн. 2021. Т. 67. № 4. С. 387–394] // *Акуст. журн.* 2023. Т. 69. № 3. С. 390.
 33. *Saito S.* Nonlinearity Parameter Measurement for Polymer Plates Using Focused Ultrasound // *AIP Conf. Proc.* 2008. V. 1022. P. 561–564.
 34. *Solodov I., Pfleiderer K., Gerhard H., Busse G.* Nonlinear acoustic approach to material characterization of polymers and composites in tensile tests // *Ultrasonics*. 2004. V. 42. P. 1011–1015.