

УДК 534.2

ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРА PLA СТАТИЧЕСКИМИ И УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ МЕТОДАМИ

© 2021 г. А. И. Коробов^а, *, А. И. Кокшайский^а, Е. С. Михалев^а, Н. И. Одина^а, Н. В. Ширгина^а

^аМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Ленинские горы, Москва, 119991 Россия

*e-mail: aikor42@mail.ru

Поступила в редакцию 12.04.2021 г.

После доработки 12.04.2021 г.

Принята к публикации 23.04.2021 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований упругих свойств полимера PLA (полилактида), широко применяющегося в технологии 3D печати. Измерены зависимости механического напряжения от величины статической деформации, обнаружена гистерезисная зависимость. Оценены значения модуля Юнга на линейных участках нагрузки и разгрузки образца. Установлено, что периодические нагрузки-разгрузки образца приводят к его упрочнению в области упругих деформаций. Получено уравнение, связывающее изменение скорости акустических волн в тонком стержне с величиной его статической деформации, пригодное для описания исследуемого образца PLA. Обнаружена линейная зависимость относительного изменения скорости упругих волн в образце от величины его статической деформации. По результатам измерений определены коэффициенты упругости третьего порядка и рассчитан нелинейный акустический параметр в полимере PLA.

Ключевые слова: скорость ультразвуковых волн, полимер PLA, коэффициент упругости третьего порядка, нелинейный упругий параметр

DOI: 10.31857/S0320791921040067

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие все более востребованной становится технология 3D печати различных объектов, которая находит широкое применение во многих областях науки и техники. 3D печать позволяет создавать композиционные образцы как из полимерных материалов [1–5], так и из различных металлических сплавов [6–8]. Трехмерная печать – потенциально передовая технология в различных отраслях промышленности, включая аэрокосмическую, биомедицинскую и автомобильную промышленность. 3D принтер представляет собой станок с числовым программным управлением, использующий метод послойной печати детали для быстрого прототипирования макетов моделей и объектов. Постепенное наращивание компонентов позволяет создавать детали сложной геометрии, выполнять тонкую настройку конечного продукта.

В качестве материала для печати часто выступают полимерные материалы – термопласты, способные обратимо переходить при нагревании в эластичное состояние. Выбор материала варьируется в зависимости как от необходимой температуры плавления, так и от прочностных характе-

ристик конечного продукта. Одним из перспективных материалов для 3D печати является полимер PLA (polylactic acid, полимолочная кислота (полилактид)). Это биоразлагаемый, биосовместимый полимер, который может производиться из растительного сырья. PLA – линейный алифатический полиэфир, его мономером является молочная кислота (2-гидроксипропионовая кислота), которая может существовать в виде оптически активных D- или L-энантиомеров [9]. Разложение PLA происходит путем гидролиза с последующим биоразложением бактериями [10]. В настоящее время PLA уже используется для производства изделий для пищевой промышленности, а также в биомедицинских целях. Обзор влияния химического состава, способов производства и модификации материала на физические (в том числе механические) свойства семейства полимеров на основе PLA приведен в [11]. В последнее десятилетие в русле тенденции замены синтетических материалов натуральными PLA рассматривается также как основа ряда биокomпозитных материалов [12].

Механические свойства PLA и материалов на его основе исследовались ранее в основном ста-

тическими методами. В работе [13] были произведены испытания на разрыв и усталостную долговечность чистого и модифицированного образцов PLA. Было установлено, что PLA имеет достаточно высокую жесткость и высокую прочность по сравнению со многими синтетическими полимерами, при этом модифицирование может улучшать его механические свойства. В работе [14] было проведено исследование механических свойств тонких пленок PLA, изготовленных путем горячего прессования, при их растяжении. Было также исследовано влияние скорости деформации на механические свойства PLA. В работе [15] рассмотрено влияние ударной нагрузки на упругие свойства образцов полимера PLA. Было замечено, что прочность на сдвиг возрастает с увеличением ударного напряжения. Акустические методы применялись ранее для исследования процесса стеклования полимеров PLA и PLGA (polylactic-co-glycolic acid) в интервале температур 0° – 70° C [16], а также для мониторинга процесса деградации трех биоразлагаемых полимеров на основе PLA [17]. Для модифицированной PLA в работе [18] было проведено исследование влияния комбинированной физической и термохимической обработки (введение модифицирующей примеси, низкотемпературное старение после закалки, ультрафиолетовое облучение в различных комбинациях) при изгибной деформации образцов на величину нелинейного акустического параметра третьего порядка, измеряемого методом генерации гармоник. Отмечено, что наибольший рост нелинейного параметра третьего порядка происходит либо при введении модифицирующей примеси, либо при совместном применении всех использовавшихся методов обработки.

В настоящей работе приводятся результаты экспериментальных исследований ультразвуковыми и статическими методами упругих свойств (как линейных, так и нелинейных) образца PLA при непрерывном изменении его внутренней структуры, вызванном периодическими циклами его механической нагрузки-разгрузки. Изучение упругих свойств проводилось импульсным методом путем исследования распространения упругих продольных волн в образце при одновременном приложении механической нагрузки растяжения.

Для исследования нелинейных упругих свойств твердых тел в данной работе применяется модифицированный метод Терстона–Браггера, или квазистатический метод, который заключается в измерении параметров распространения упругих волн в твердом теле при воздействии на него постоянных внешних сил. В работе [19] было

проанализировано распространение акустических волн малой амплитуды в твердых телах, подвергнутых действию одноосного сжатия, и получена система линейных уравнений, позволяющая определять все независимые компоненты тензора коэффициентов упругости третьего порядка по результатам измерений зависимости скорости упругих волн в твердом теле от величины приложенного к нему внешнего статического давления сжатия. Этот метод является одним из наиболее распространенных при изучении нелинейных упругих свойств твердых тел. В работе [20] авторами были экспериментально изучены образцы из сплава алюминия B95 и композита B95/наноалмаз с примесью в виде наночастиц алмаза. В этих материалах импульсным ультразвуковым методом были определены упругие константы второго порядка, а с помощью квазистатического метода Терстона–Браггера – упругие константы третьего порядка. Было выявлено значительное различие коэффициентов упругости третьего порядка в сплаве B95 и композите B95/наноалмаз при практическом совпадении значений коэффициентов упругости второго порядка. Это указывает на высокую чувствительность нелинейных акустических свойств исследуемых сплавов к химическому составу и структуре материала. В работе [21] был исследован сплав алюминия марки АМг6 и были определены методом Терстона–Браггера коэффициенты упругости третьего порядка по результатам экспериментальных измерений зависимости скорости сдвиговых и продольных упругих волн от величины сжатия. В [22] было проведено экспериментальное исследование влияния процессов нагрузки-разгрузки на механические, линейные и нелинейные упругие свойства сплава алюминия АМг6. Изучение нелинейных упругих свойств на различных участках нагрузочной кривой проводились также методом Терстона–Браггера.

В данной работе впервые применяется метод Терстона–Браггера для оценки линейных и нелинейных упругих свойств образца PLA марки eSun при его растяжении вплоть до деформаций 0.004.

ОБРАЗЕЦ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения исследований был использован образец из полимера PLA марки eSun (используемой при 3D печати), имеющий форму тонкой цилиндрической нити длиной $L = 118$ мм и диаметром $D = 1.8$ мм. Дополнительная термическая или иная обработка образца не производилась. Была измерена стержневая скорость звука в ма-

териале образца в недеформированном состоянии, которая составила $V = 1630 \pm 20$ м/с, а также плотность $\rho = 1.40 \pm 0.05$ г/см³. Рассчитанный по этим данным модуль Юнга составляет $E = 3.3 \pm 0.1$ ГПа, что находится в хорошем соответствии с данными других авторов [15, 23].

Исследуемый образец PLA жестко закреплялся в пазах двух подвижных площадок, к которым при помощи винтового домкрата прикладывалась сила, создающая в образце деформацию растяжения. Образец закреплялся в специальном устройстве, которое позволяло преобразовать силу сжатия, создаваемую домкратом, в силу растяжения. Для генерации и приема упругих продольных волн в исследуемом образце использовались пьезокерамические преобразователи с резонансной частотой 300 кГц, которые прикреплялись подпружиненным зажимом к торцам образца. Для исключения паразитных высокочастотных компонент зондирующий сигнал проходил через фильтр нижних частот. Аналогичная методика проведения эксперимента ранее была использована для исследования механических и упругих свойств наноструктурного композита p-AMg6/C60 [24], а также для изучения особенностей распространения упругих продольных и крутильных волн в поликристаллической меди в области упругих и пластических деформаций [25], и показала себя как эффективный и надежный способ получения информации об упругих свойствах исследуемых материалов.

Для экспериментальных исследований упругих свойств полимера PLA использовалась автоматизированная ультразвуковая установка, которая была разработана на базе ультразвуковой автоматизированной системы Rites RAM-5000. Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В ультразвуковой системе был реализован импульсный метод измерения.

Акустическая продольная волна возбуждалась верхним пьезоэлектрическим преобразователем 1, проходила через образец 2 и достигала нижнего пьезоэлектрического преобразователя 3, генерируя в нем электрический сигнал, пропорциональный амплитуде акустической волны, который впоследствии усиливался, поступал в ультразвуковой акустический комплекс 4, обрабатывался методом квадратурной обработки и регистрировался в персональном компьютере 5. Для наблюдения сигналов в реальном времени использовался четырехканальный цифровой осциллограф (на рисунке не показан). Информация об изменении длины образца и приложенной к нему силе регистрировалась при помощи аналоговых датчиков 6, 7. Результаты измерения датчиков оцифровывались с помощью АЦП и поступали в ПК для хранения и дальнейшего анализа. В ходе эксперимента образец подвергался нескольким периодическим циклам механической нагрузки-разгрузки.

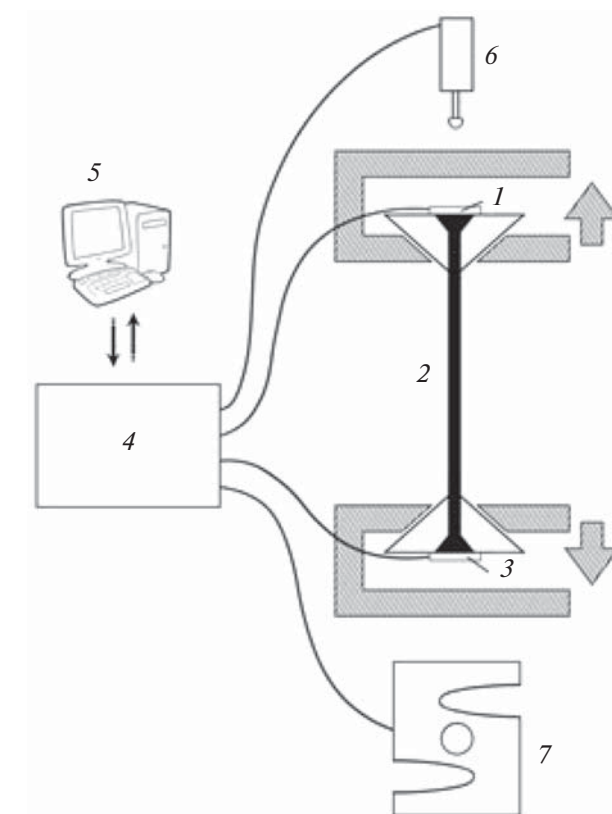


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – излучающий пьезоэлектрический преобразователь, 2 – образец, 3 – принимающий пьезоэлектрический преобразователь, 4 – ультразвуковой автоматизированный комплекс Rites RAM-5000, 5 – персональный компьютер, 6 – датчик удлинения образца, 7 – датчик силы.

вались с помощью АЦП и поступали в ПК для хранения и дальнейшего анализа. В ходе эксперимента образец подвергался нескольким периодическим циклам механической нагрузки-разгрузки.

Для управления ходом эксперимента с помощью персонального компьютера и обработки полученных данных использовался специально разработанный пакет программ с графическим интерфейсом. Интерфейс давал возможность одновременного проведения статических и ультразвуковых измерений с дальнейшим их архивированием и обработкой на персональном компьютере.

Разработанный измерительный комплекс позволил исследовать механические и упругие свойства образца PLA квазистатическим методом:

1. Статический метод использовался для измерения нагрузочной кривой “механическое напряжение σ –деформация ϵ ” при приложении к исследуемому образцу нескольких циклов нагрузки-разгрузки.

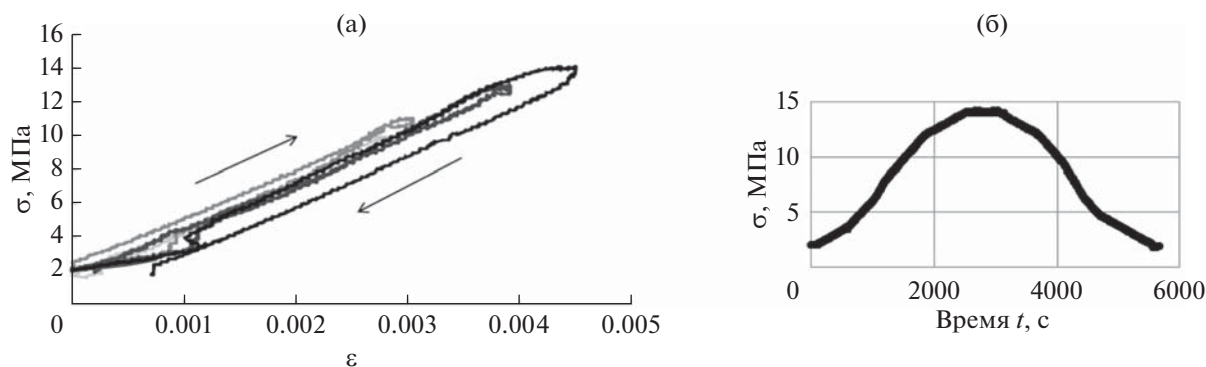


Рис. 2. (а) – Нагрузочная кривая $\sigma(\epsilon)$, (б) – пример зависимости приложенного статического напряжения от времени для четвертого цикла.

2. Модифицированный квазистатический метод Терстона–Браггера служил для определения коэффициентов упругости третьего порядка. Метод основан на измерении зависимости скорости упругих волн в твердом теле от величины приложенного механического напряжения растяжения.

Распространение продольных упругих волн в твердотельных изотропных цилиндрах (стержнях) вида:

$$U = U_0 \sin(\omega t - kx) \quad (1)$$

описывается уравнениями движения и состояния:

$$\rho_0 \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\sigma = E\epsilon + \frac{1}{2} E_N \epsilon^2, \quad (3)$$

где U – вектор смещения, σ – механическое напряжение, ω – частота упругой волны, $k = \omega/V$ – волновой вектор, $\epsilon = \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{\epsilon_{ct}=0}$ – деформация, создаваемая акустической волной в исследуемом образце цилиндрической формы, $E_N = \left(\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \epsilon^2} \right)_{\epsilon_{ct}=0}$ – коэффициент упругости третьего порядка, который в случае упругого стержня можно трактовать как модуль Юнга третьего порядка, $E = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} \right)_{\epsilon_{ct}=0}$ – модуль Юнга. Из уравнений (1)–(3) можно получить следующее выражение:

$$\left(\frac{\Delta V}{V} \right)_{\epsilon_{ct}=0} = \frac{E_N}{2E} \Delta \epsilon_{ct}. \quad (4)$$

Выражение (4) является аналогом формулы Терстона–Браггера, используемой для определения коэффициентов упругости в трехмерных твердых телах, и позволяет определить коэффи-

циент упругости третьего порядка E_N по результатам измерения зависимости стержневой скорости V в одномерном твердотельном стержне от величины статической деформации растяжения стержня ϵ_{ct} .

Для характеристики нелинейных упругих свойств тонкого цилиндрического образца в работе предлагается по аналогии с трехмерными твердыми телами использовать безразмерный акустический нелинейный параметр N :

$$N = \frac{E_N}{E}. \quad (5)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ АНАЛИЗ

В результате серии экспериментов была получена информация о линейных и нелинейных упругих свойствах исследуемого образца PLA марки eSun и влиянии на них периодических циклов механической нагрузки-разгрузки.

Результаты измерения зависимости напряжение–деформация $\sigma = \sigma(\epsilon)$ в исследуемом образце для четырех циклов периодического изменения приложенного к нему механического напряжения приведены на рис. 2а. Циклическое приложение силы к образцу PLA в режиме нагрузки-разгрузки происходило по схеме (0–9.9–0–11–0–12.9–0–14–0) МПа. Для каждого цикла нагрузки-разгрузки наблюдалась незначительная гистерезисная зависимость $\sigma = \sigma(\epsilon)$. После четвертого цикла обнаружены остаточные деформации $\epsilon \sim 0.0008$. Как можно видеть из зависимости приложенного к образцу напряжения от времени (рис. 2б), эксперимент проводился достаточно медленно, процесс был близок к квазистатическому, чтобы минимизировать влияние релаксационных процессов в образце.

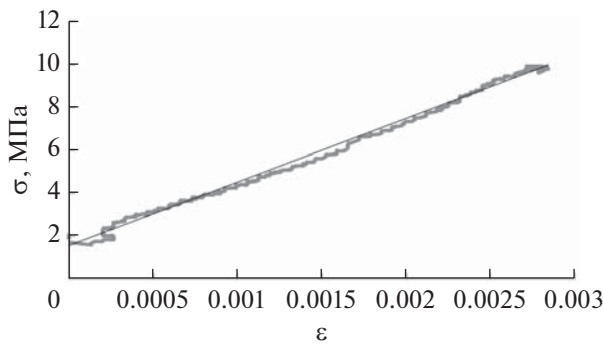


Рис. 3. Линейная аппроксимация нагрузочной кривой в области разгрузки методом наименьших квадратов для определения модуля Юнга.

Проведенные экспериментальные измерения зависимости напряжение–деформация позволили оценить значения модуля Юнга в исследуемом образце PLA на линейных участках нагрузки и разгрузки образца по методике, описанной в работе [21]. Пример аппроксимации линейной части цикла нагрузки-разгрузки методом наименьших квадратов (МНК) продемонстрирован на рис. 3. Рассчитанные по экспериментальным данным значения модуля Юнга представлены в табл. 1. Как видно из табл. 1, циклическое изменение нагрузки-разгрузки образца приводит к незначительному увеличению модуля Юнга E , т.е. происходит упрочнение исследуемого образца PLA.

В ходе эксперимента одновременно с измерением нагрузочной кривой $\sigma(\epsilon)$ были измерены зависимости относительного изменения скорости продольной волны $(\Delta V/V)$ в образце от величины его статической деформации $\epsilon_{ст}$ в процессе периодической нагрузки-разгрузки. Полученные зависимости представлены на рис. 4.

Обнаружено изменение скорости упругих волн в образце от величины его деформации, которое было аппроксимировано прямой линией (рис. 5). Отклонение от линейной зависимости изменения скорости при деформациях $\epsilon < 0.0005$ связывается с особенностями крепления образца.

Для определения модуля Юнга третьего порядка с помощью формулы (4) методом наименьших квадратов был проведен анализ зависимо-

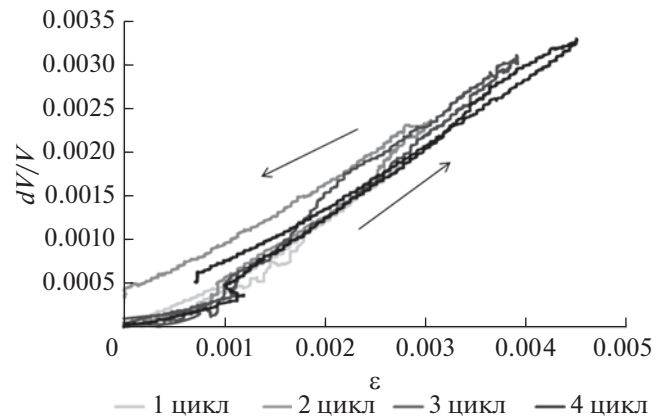


Рис. 4. Изменение скорости продольной волны в образце полимера PLA в зависимости от величины его статической деформации для четырех циклов механической нагрузки-разгрузки.

стей $[\Delta V(\epsilon_{ст})/V]$ от $\epsilon_{ст}$ в процессе периодической нагрузки-разгрузки. Значения коэффициентов упругости третьего порядка представлены в табл. 2.

Используя полученные значения модуля Юнга второго и третьего порядков, был определен акустический нелинейный параметр N по формуле (5), значения которого представлены в табл. 2. Обнаружено, что циклическое нагружение образца приводит сначала к увеличению нелинейного акустического параметра N , а потом к его уменьшению. В литературе данных об абсолютной величине нелинейного упругого параметра PLA нами не обнаружено. Нелинейный параметр второго порядка ряда широко используемых полимеров был измерен методом фокусированного ультразвука [26]. Типичные значения B/A для таких полимеров, как полистирол, акрил, полиэтилентерефталат, поливинилхлорид, поликарбонат составляют порядка 9–11. В работе [27] методом генерации второй гармоники был измерен нелинейный параметр второго порядка $\beta_2 = -\frac{\partial V(\epsilon)}{\partial \epsilon} / V$ для чистого и армированного стекловолокном полипропилена при его растяжении. На начальном участке деформаций для чистого полипропилена величина этого параметра изменяется от 5 до 10.

Таблица 1. Значения модуля Юнга в исследуемом образце PLA на линейных участках нагрузки-разгрузки образца

	E , ГПа, цикл 1	E , ГПа, цикл 2	E , ГПа, цикл 3	E , ГПа, цикл 4
Область нагрузки	2.91 ± 0.01	3.36 ± 0.01	3.09 ± 0.01	3.16 ± 0.01
Область разгрузки	2.71 ± 0.01	2.83 ± 0.01	2.82 ± 0.01	2.98 ± 0.01

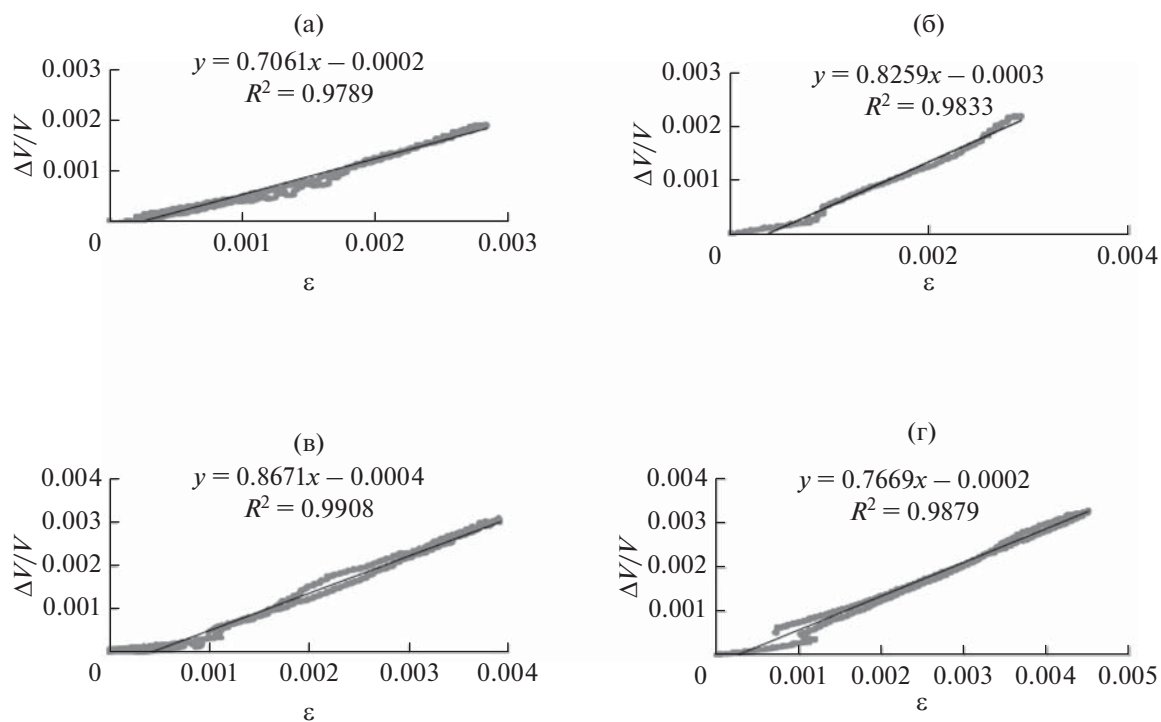


Рис. 5. Линейная аппроксимация зависимости относительного изменения скорости продольной волны в образце полимера PLA от величины его статической деформации для (а) – первого, (б) – второго, (в) – третьего и (г) – четвертого циклов нагрузки-разгрузки.

Таблица 2. Значения коэффициента упругости третьего порядка E_N и акустического нелинейного параметра N в исследуемом образце PLA

	Цикл 1	Цикл 2	Цикл 3	Цикл 4
E_N , ГПа	3.97 ± 0.03	5.11 ± 0.03	5.12 ± 0.02	4.71 ± 0.02
N	1.41 ± 0.02	1.65 ± 0.02	1.73 ± 0.02	1.53 ± 0.02

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданы и отработаны методики исследования упругих свойств нитей из образца промышленного полимера PLA марки eSun на базе ультразвуковой системы Rites RAM-5000 статическими и ультразвуковыми методами.

Исследованы зависимости механического напряжения σ от величины статической деформации ϵ в образце полимера PLA в процессе его циклической нагрузки-разгрузки вплоть до области деформаций 0.004. Обнаружена гистерезисная зависимость $\sigma(\epsilon)$.

По результатам измеренной зависимости $\sigma(\epsilon)$ методом наименьших квадратов оценены значения модуля Юнга E на линейных участках нагруз-

ки и разгрузки образца. Было установлено, что периодические нагрузки-разгрузки образца приводят к его упрочнению в области упругих деформаций и, как следствие, к увеличению величины модуля Юнга E .

Проведен анализ распространения акустических волн в тонком стержне, подвергнутом статической деформации растяжения. Получено уравнение, связывающее относительное изменение скорости акустических волн в образце с величиной его статической растягивающей деформации. Это уравнение является аналогом формулы Терстона–Браггера и дает возможность определить коэффициент упругости третьего порядка E_N в тонких стержнях и нитевидных образцах.

Одновременно с измерением нагрузочной кривой $\sigma = \sigma(\epsilon)$ измерено относительное изменение скорости продольных волн в деформируемом образце полимера PLA в зависимости от величины его статической деформации растяжения. Обнаружено линейное изменение скорости упругих волн $V(\epsilon_{ст})$ в образце от величины его статической деформации. По результатам этих измерений определены коэффициенты упругости третьего порядка E_N в полимере PLA.

В полимере PLA при различных значениях величины растягивающей нагрузки рассчитан нелинейный акустический параметр $N = (E_N)/E$.

Полученные результаты дают информацию о механических, линейных и нелинейных упругих свойствах полимера PLA и могут быть применены при создании композиционных образцов в технологии 3D печати.

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., Kroese 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. № 4. 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., Kefler O., Bader R. Mechanical properties of a newly additive manufactured implant material based on Ti–42Nb // Materials (Basel). 2018. V. 11. P. 13–16.
9. Lim L.T., Auras R., Rubino M. Processing technologies for poly(lactic acid) // Prog. Polym. Sci. 2008. V. 33. P. 820–852.
10. Nakatsuka T. Polylactic acid-coated cable // Fujikura Tech. Rev. 2011. P. 39–46.
11. 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.
12. La Mantia F.L., Morreale M. Green composites: A brief review. Composites, Part A // Appl. Sci. Manuf. 2011. V. 42. № 6. P. 579–588.
13. Averett R.D., Realf M.L., Jacob K., Cakmak M., Yalcin B. The mechanical behavior of poly(lactic acid) unreinforced and nanocomposite films subjected to monotonic and fatigue loading conditions // J. Composite Materials. 2011. V. 45(26) P. 2717–2726.
14. Mirkhalaf S.M., Fagerström M. The mechanical behavior of polylactic acid (PLA) films: fabrication, experiments and modelling // Mech. Time-Depend Mater. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11043-019-09429-w>
15. Agu H.O., Hameed A., Appleby-Thomas G.J., Wood D.C. The dynamic response of dense 3 dimensionally printed polylactic acid // J. Dynamic Behavior of Materials. 2019. V. 5. P. 377–386.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Brugger K., Thurston R.N. Third-order elastic constants and the velocity of small amplitude elastic waves in homogeneously stressed media // Phys. Rev. 1964. V. 133. № 6A. P. A1604–A1610.
20. Коробов А.И., Прохоров В.М. Нелинейные акустические свойства алюминиевого сплава В95 и композита В95/наноалмаз // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 6. С. 661–667.
21. Волков А.Д., Кокшайский А.И., Коробов А.И., Прохоров В.М. Коэффициенты упругости второго и третьего порядков в поликристаллическом сплаве алюминия марки АМг6 // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 6. С. 685–691.
22. Коробов А.И., Ширгина Н.В., Кокшайский, А.И. Прохоров В.М. Влияние статической реверсивной нагрузки на механические и упругие свойства поликристаллического сплава алюминия АМг6 // Акуст. журн. 2018. Т. 64. № 4. С. 424–431.

23. *Hassan A., Balakrishnan H., Akbari A.* Poly-lactic Acid Based Blends, Composites and Nanocomposites, *Advances. Natural Polymers*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013. P. 361–396.
24. *Коробов А.И., Ширгина Н.В., Кокшайский А.И., Прохоров В.М.* Упругие и механические параметры нанокомпозита p-AMg6/C60 в процессе циклической реверсивной статической нагрузки // *Акуст. журн.* 2019. Т. 65. № 2. С. 158–165.
25. *Коробов А.И., Бражкин Ю.А., Ван Нин.* Экспериментальные исследования упругой нелинейности в структурно-неоднородных материалах // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. № 5. С. 663–671.
26. *Saito S.* Nonlinearity parameter measurement for polymer plates using focused ultrasound // *AIP Conference Proceeding*. 2008. V. 1022. P. 561–564.
27. *Solodov I., Pfeleiderer 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.