АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2024, том 70, № 2, с. 167–173

НЕЛИНЕЙНАЯ АКУСТИКА

УДК 534.2

ВЛИЯНИЕ 3D-ПЕЧАТИ НА УПРУГИЕ СВОЙСТВА НИТЕВИДНЫХ ОБРАЗЦОВ ПОЛИМЕРА ABS

© 2024 г. А. Б. Володарский[a], А. И. Кокшайский[a], Н. И. Одина[a], А. И. Коробов[a, *], Е. С. Михалев[a]

[a] *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, 119991 Россия*

**e-mail: aikor42@mail.ru*

Поступила в редакцию 05.12.2023 г.
После доработки 20.02.2024 г.
Принята к публикации 28.02.2024 г.

Приведены результаты экспериментального исследования влияния 3D-печати при 100% заполнении на линейные и нелинейные упругие свойства образцов полимера ABS, выполненных в виде тонких нитей. Исследования исходного и 3D-напечатанного образцов полимера ABS проводились статическим методом и методом Терстона–Браггера. Были определены значения линейных и нелинейных модулей Юнга, а также упругих нелинейных параметров второго порядка для нескольких циклов нагрузки-разгрузки образца. Показано, что выбранный режим 3D-печати почти не изменяет прочностные характеристики полимера ABS, а пластические характеристики даже несколько улучшаются. Обнаружено, что механическое нагружение оказывает различное воздействие на нелинейный параметр исходного и 3D-напечатанного образцов. Для 3D-напечатанного образца обнаружено уменьшение нелинейного параметра по мере роста нагрузки.

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

DOI: 10.31857/S0320791924020039, **EDN:** YNVOGY

ВВЕДЕНИЕ

Термопластический полимер акрилонитрил-бутадиен-стирол (acrylonitrile butadiene styrene – ABS) относится к семейству технических сополимеров [1]. ABS представляет собой термополимер, получаемый путем полимеризации стирола, акрилонитрила и полибутадиена [1]. Полимеры ABS являются двухфазными: стирол-акрилонитрил (САН) образует непрерывную (матричную) фазу; вторая фаза состоит из дисперсных частиц полибутадиена, на поверхность которых привит слой САН [1]. Результирующий материал обладает высокой химической стойкостью, твердостью и жесткостью, хорошим сопротивлением усталостным нагрузкам при достаточно высокой ударной вязкости и пластичности при низких температурах [1–2]. Полимер ABS имеет блестящую поверхность и относительно легко поддается обработке. ABS обладает хорошей химической стойкостью к кислотам и основаниям, но плохой стойкостью к ароматическим соединениям, хлорированным растворителям, сложным эфирам, кетонам и альдегидам. Однако ABS имеет не очень хорошую устойчивость к ультрафиолетовому излучению [1–2]. Детали, выполненные из полимеров на основе ABS, широко используется в автомобильной, легкой, медицинской и строительной промышленности [1–2].

Механические свойства полимера ABS, произведенного различными способами (как традиционными, например, путем литья, так и с помощью 3D-печати) изучены достаточно хорошо. В работе Рамезани и др. [3] проведено сравнение механических и упругих характеристик образцов коммерческого ABS марки Terluran GP-35, полученных методом традиционного литья и одним из аддитивных методов, а именно Arburg Plastic Free Forming. Образцы, полученные методом литья, показали при продольных нагрузочных испытаниях высокую повторяемость упругих и прочностных характеристик, но значительное различие в величине остаточной деформации при разрыве: она варьировалась от 6 до 12%. По приведенным авторами графическим данным модуль Юнга литого образца можно оценить как 2.1 ГПа, а предел прочности 35.5 МПа, модуль Юнга аддитивно произведенного образца с укладкой слоев вдоль оси образца 1.9 ГПа,

а предел прочности 24.5 МПа. В работе [4] представлены результаты экспериментального исследования влияния направления укладки на упругие и прочностные характеристики (такие, как модуль Юнга, относительное удлинение при разрыве, предел прочности и предел текучести) полимера ABS, изготовленного FDM методом. При продольной укладке нитей модуль Юнга получился равным 1759 МПа, а относительное удлинение при разрыве составило 4.1%. Авторы работы [5] приводят сравнение модулей Юнга и пределов прочности для произведенного ими методом 3D-печати образца и нити полимера при продольном растяжении. Отмечено, что модуль Юнга нити может заметно превосходить модуль Юнга для печатного образца. В публикации [6] также исследовались упругие параметры произведенных из ABS методом 3D-печати образцов при растяжении и сжатии, и было установлено, что деформация материала при его растяжении зависит от количества нитей на оболочке поверхностного слоя. Было установлено, что чем больше нитей в оболочке образца, тем больше деформация при разрыве, тогда как предел прочности в образце меняется незначительно (в пределах 5%). В статье [7] исследовались модуль Юнга, предел текучести и предел прочности при комнатной температуре и 77 K для аддитивно изготовленного полимера ABS при изменении толщины слоя, растрового рисунка и процента заполнения в качестве настроек 3D-печати. Изменение настроек печати приводит при комнатной температуре к вариации модуля Юнга до 20%. Авторами исследования [8] была проведена комплексная оценка механических свойств для определения влияния плотности заполнения и толщины слоя ABS-пластика (изготовленного методом FDM) на предел прочности при растяжении, модуль упругости, предел текучести, деформацию разрушения и ударную вязкость. Показано, что максимальная предельная прочность на растяжение и модуль упругости достигались при более низкой высоте слоя. В работе [9] было произведено сравнение упругих характеристик для трех способов изготовления образцов, а именно литья под давлением, компрессионного формования и 3D-печати с укладкой слоев под 45° к направлению растяжения. По приведенным авторами результатам можно отметить, что модуль Юнга для напечатанных деталей (около 2 ГПа) на 43–45% ниже, чем для отлитых деталей (порядка 3.7 ГПа). В исследовании [9] показано также, что предел прочности у напечатанного образца (43 МПа) в 1.5 раза ниже, чем у отлитого (69 МПа), тогда как деформация при разрыве отличается гораздо меньше (3.13–3.21% у отлитого и 2.81–3.01% у 3D-напечатанного).

Исследования упругих свойств полимеров семейства ABS производились и акустическими методами. В работе Adair и Cook [10] для полимера ABS марки GSE-1000 были произведены подробные исследования коэффициентов отражения и прохождения продольных упругих волн в интервале частот 100 кГц–2 МГц. В работе Hartmann [11] проведено исследование скоростей и затухания продольных и поперечных волн для полимера ABS на частоте 1.8 МГц, а также особенностей прохождения звука частотой 500 кГц через пластины разной толщины. В работе Antoniou [12] представлены результаты исследования линейных акустических свойств образцов, произведенных методом 3D-печати, для восьми широко распространенных полимеров, включая ABS. Стандартными эхо-импульсными методами в режиме на отражение и прохождение были измерены коэффициент затухания, скорость звука и рассчитан акустический импеданс. В работе Vasina и др. [13] было исследовано влияние геометрии на коэффициенты звукопоглощения ряда пористых образцов, изготовленных методом 3D-печати из ABS-полимера.

Несмотря на то, что нелинейные упругие свойства полимеров активно изучаются еще с прошлого века, исследованию нелинейных упругих свойств семейства ABS посвящено недостаточное количество работ. В работе Nagy [14] было экспериментально исследовано поведение линейных и нелинейных упругих параметров ряда полимеров (в том числе и ABS) при циклических нагрузках. Измерения производились на частоте 5 МГц. Было показано, что при большом числе циклов нагружения (более 250 для ABS) линейные параметры остаются почти постоянными, а нелинейные показывают существенный рост, что может служить основой для нелинейной диагностики усталостной прочности полимеров. В работе [15] квазистатическим методом измерены и рассчитаны упругие нелинейные параметры для полимеров PMMA, PS и PSF (как по собственным данным, так и по данным [16, 17]). В более поздней работе [18] для ряда широко распространенных полимеров (PS, Acrylic, PET, PVC и PC) методом фокусированного ультразвука определены значения нелинейного параметра второго порядка. Разброс значений B/A для этих полимеров лежал в диапазоне 9–12. В работе Солодова и пр. [19] для нахождения нелинейного параметра второго порядка $\beta_2 = -\dfrac{\partial V(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} / V$ использовался метод генерации второй гармоники.

Были измерены нелинейные параметры при растяжении для чистого полипропилена и полипропилена, армированного стекловолокном. На начальном участке деформаций диапазон, в котором лежали значения β_2, составил от 5 до 10 для чистого полипропилена, от 10 до 25 для образца с 20%-GFR и от 5 до 7 для образца с 30%-GFR. Метод генерации гармоник использовался также для исследования нелинейного упругого параметра третьего порядка при исследовании образцов PLA, подвергавшихся

химическим и физическим воздействиям, при их изгибном нагружении [20].

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования влияния 3D-печати на линейные и нелинейные упругие свойства образцов полимера ABS (марки eSun) нитевидной формы при их продольном растяжении. Линейные упругие свойства были исследованы статическим методом (по зависимости механического напряжения σ от деформации ε), а для исследования нелинейных упругих свойств использовался метод Терстона–Браггера (по зависимости относительного изменения скорости упругих волн $\Delta V/V$ от величины деформации ε).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ, УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для экспериментального исследования линейных и нелинейных упругих параметров полимерных нитей была использована автоматизированная измерительная установка, описанная ранее в работе [21]. Она позволяла в автоматическом режиме одновременно измерять как нагрузочную кривую $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ при продольном растяжении образца, так и зависимость относительного изменения скорости упругих волн от статической деформации. Измерения производились на частоте 200 кГц.

Для экспериментов были подготовлены два образца полимера ABS. Один (называемый далее “исходным”) был вырезан из нити коммерческого полимера ABS марки eSun без дополнительной обработки. Он представлял собой цилиндр длиной $L = 124.9$ мм и диаметром $D = 1.7$ мм.

Другой образец (называемый далее “напечатанным”) был произведен на 3D-принтере из той же нити полимера ABS марки eSun. Он имел форму тонкой прямой призмы с основанием в форме правильного шестиугольника с длиной стороны 1.05 мм и длиной 123.5 мм. Печать производилась по FDM технологии при температуре 160°C, 100% заполнении, диаметре сопла 0.05 мм на 3D-принтере собственного изготовления, близком по характеристикам к модели “3DQ Mini”, укладка нитей полимера производилась вдоль длинной оси призмы.

По методике, приведенной в работе [21], были рассчитаны как линейные (линейный модуль Юнга E), так и нелинейные (нелинейный модуль Юнга E_N и нелинейный параметр второго порядка N) упругие параметры для обоих образцов.

Линейный модуль Юнга (коэффициент упругости второго порядка) E можно определить как тангенс угла наклона линейной части графика зависимости механического напряжения от деформации:

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

Нелинейный модуль Юнга (коэффициент упругости третьего порядка) E_N можно рассчитать по зависимости относительного изменения скорости от прикладываемого внешнего квазистатического механического напряжения:

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

Соответственно, акустический нелинейный параметр второго порядка N можно определить по формуле:

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ АНАЛИЗ

Для исходного и 3D-напечатанного образцов полимера ABS были проведены одновременные измерения деформации и скорости упругих волн в зависимости от прикладываемого механического напряжения. Было проведено два цикла нагрузки-разгрузки и еще одна нагрузка до разрыва образца. Каждый эксперимент длился около 2.5 ч, что позволяет рассматривать процессы нагрузки-разгрузки как квазистатические.

На рис. 1 приведены графики экспериментально измеренных зависимостей напряжение-деформация $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ для двух с половиной циклов изменения приложенного механического напряжения: (а) – для исходного и (б) – 3D-напечатанного образцов. При проведении эксперимента в каждом цикле нагрузки-разгрузки наблюдались небольшие гистерезисные зависимости $\sigma(\varepsilon)$. При этом для каждого цикла нагрузки-разгрузки остаточная деформация для 3D-напечатанного образца была меньше, чем для исходного: после первого цикла остаточные деформации составляли $\varepsilon \sim 0.0007 \pm 0.0005$ для исходного образца и $\varepsilon \sim 0.0005 \pm 0.0005$ для напечатанного, после второго – $\varepsilon \sim 0.0028 \pm 0.0005$ для исходного образца и $\varepsilon \sim 0.0014 \pm 0.0005$ для напечатанного.

Проведенные эксперименты показали, что выбранный способ 3D-печати незначительно изменил механические свойства полимера ABS: модуль Юнга и предел прочности практически не изменились, а деформация при разрыве несколько увеличилась (табл. 1).

Так же, как и в предшествующей работе [21], по измеренным нагрузочным кривым были рассчитаны значения модуля Юнга по формуле (1) при нагрузке и разгрузке обоих образцов. Рассчитанные значения модуля Юнга представлены в табл. 2.

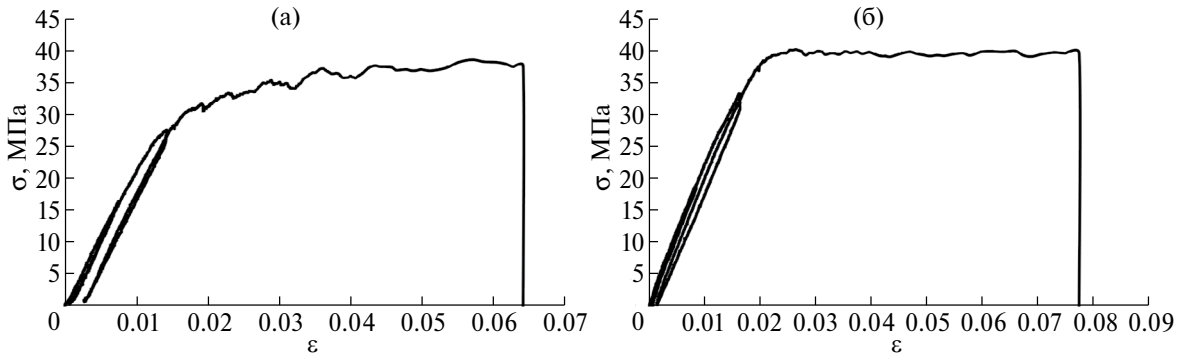

Рис. 1. Экспериментально измеренная нагрузочная кривая σ(ε) для (а) – исходного и (б) – 3D-напечатанного образцов ABS.

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

	Исходный	3D-напечатанный
Модуль Юнга, ГПа	2.3± 0.1	2.2 ± 0.1
Предел прочности, МПа	39 ± 1	40 ± 1
Деформация при разрыве, %	6.42 ± 0.05	7.74 ± 0.06

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

Модуль Юнга, ГПа	Исходный	3D-напечатанный
1 цикл, нагрузка	2.2 ± 0.1	2.2 ± 0.1
1 цикл, разгрузка	2.3 ± 0.1	2.3 ± 0.1
2 цикл, нагрузка	2.4 ± 0.1	2.3 ± 0.1
2 цикл, разгрузка	2.2 ± 0.1	2.0 ± 0.1
3 цикл, нагрузка	2.5 ± 0.1	2.3 ± 0.1

На первом цикле нагружения (как при нагрузке, так и при разгрузке) модуль Юнга практически не изменился как для исходного, так и для 3D-напечатанного образцов. На втором цикле нагружения (рис. 2) при разгрузке модуль Юнга уменьшается (для 3D-напечатанного образца более значительно). Отметим, что исходный образец в процессе проведения второго цикла вышел за пределы упругой области. При дальнейшем нагружении (на третьем цикле нагрузки) модуль Юнга снова возрос, причем для исходного образца более значительно, чем для 3D-напечатанного.

Одновременно с измерением зависимостей величин нагрузки от деформаций σ(ε) регистрировались зависимости относительного изменения скорости продольной упругой волны ($\Delta V/V$) от значения статической деформации ε_{cm} образца в процессе нагрузки-разгрузки. Линейность зависимости относительного изменения скорости от деформации при малых деформациях вплоть до 0.018 (рис. 3) позволила рассчитать значения нелинейных модулей Юнга по формуле (2)

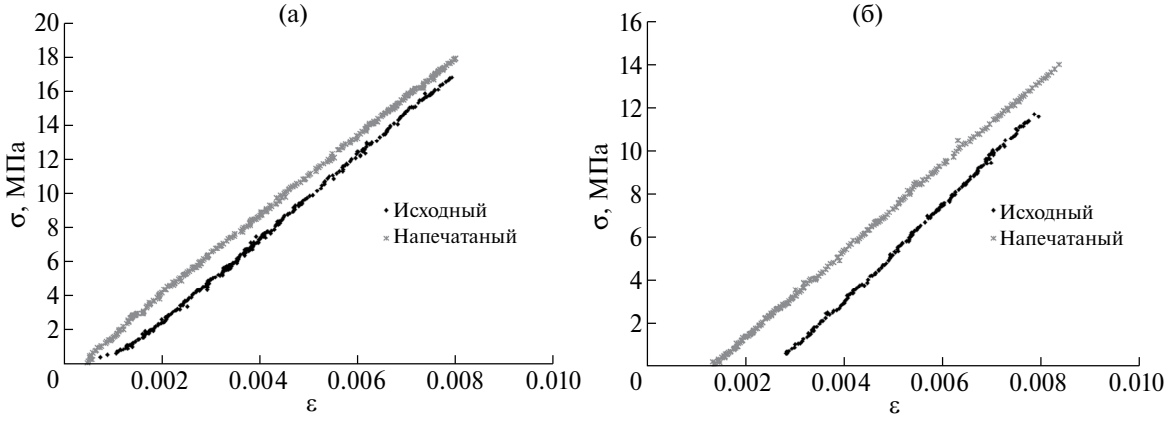

Рис. 2. Экспериментально измеренные нагрузочные кривые σ(ε) для второго цикла при (а) – нагрузке и (б) – разгрузке исходного и 3D-напечатанного образцов ABS.

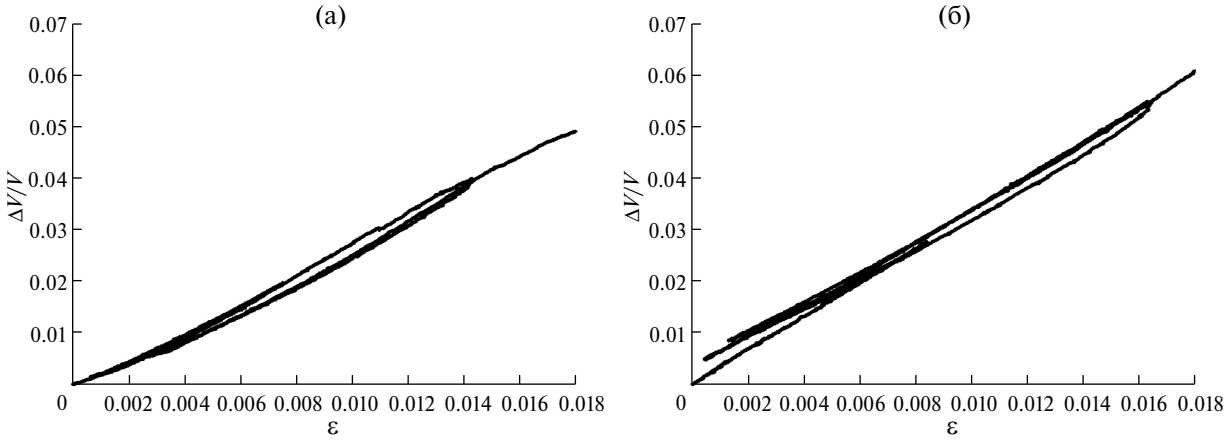

Рис. 3. Экспериментально измеренные зависимости относительного изменения скорости продольной волны от статической деформации для (а) – исходного и (б) – 3D-напечатанного образцов ABS.

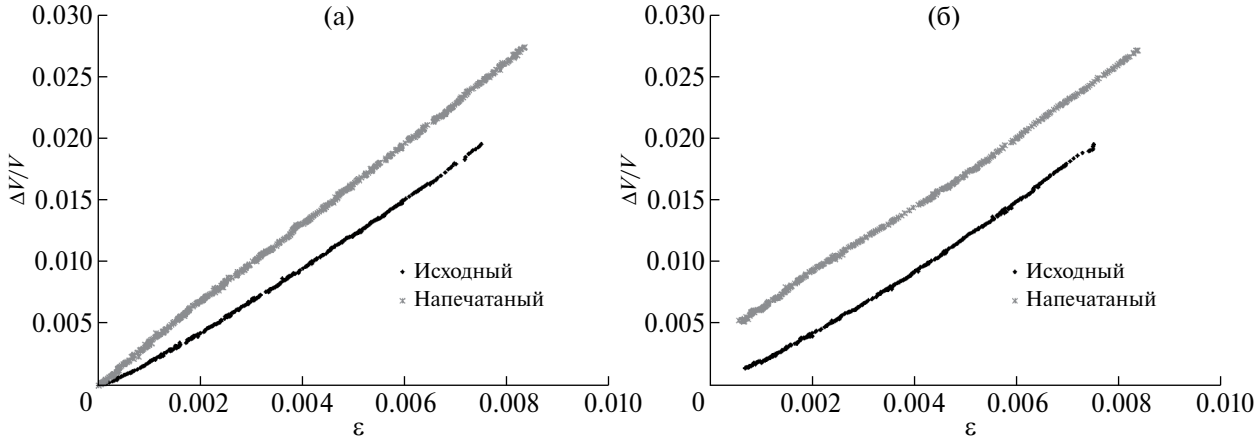

Рис. 4. Экспериментально измеренные зависимости относительного изменения скорости продольной волны от статической деформации для первого цикла при (а) – нагрузке и (б) – разгрузке исходного и 3D-напечатанного образцов ABS.

с аппроксимацией методом наименьших квадратов. Отметим, что наиболее значительное изменение скорости произошло уже на первом цикле нагружения (рис. 4).

По экспериментально измеренным данным для исходного и 3D-напечатанного образцов были рассчитаны значения нелинейного модуля Юнга в области нагрузки и разгрузки (табл. 3).

Поведение нелинейного модуля Юнга для исходного и 3D-напечатанного образцов является различным: если для исходного образца нелинейный модуль Юнга почти монотонно возрастает при нагружении (за исключением разгрузки второго цикла), то для 3D-напечатанного образца он растет при нагружении и падает при разгрузке, причем его конечное значение (при третьем нагружении) меньше начального (при первом нагружении).

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

Коэффициент упругости третьего порядка, ГПа	Исходный	3D-напечатанный
1 цикл, нагрузка	11.6 ± 0.6	14.5 ± 0.7
1 цикл, разгрузка	12.2 ± 0.6	12.7 ± 0.6
2 цикл, нагрузка	13.3 ± 0.7	13.8 ± 0.7
2 цикл, разгрузка	11.1 ± 0.6	10.3 ± 0.5
3 цикл, нагрузка	13.6 ± 0.7	12.8 ± 0.6

Таблица 4. Нелинейный упругий параметр исходного и 3D-напечатанного образцов ABS при нагрузке-разгрузке

Нелинейный упругий параметр	Исходный	3D-напечатанный
1 цикл, нагрузка	5.2 ± 0.5	6.5 ± 0.5
1 цикл, разгрузка	5.3 ± 0.5	5.5 ± 0.5
2 цикл, нагрузка	5.5 ± 0.5	5.9 ± 0.5
2 цикл, разгрузка	5.0 ± 0.5	5.1 ± 0.5
3 цикл, нагрузка	5.4 ± 0.5	5.7 ± 0.5

По значениям линейного и нелинейного модулей Юнга, приведенным выше, по формуле (3) был рассчитан упругий нелинейный параметр N. Результаты расчета приведены в табл. 4.

Видно, что нелинейный параметр для исходного образца почти монотонно возрастает при нагружении (снижаясь только при второй разгрузке), а для 3D-напечатанного образцов снижается по мере нагружения, причем это снижение является более сильным при разгрузках.

Таким образом, можно отметить, что полученные нелинейные параметры близки по порядку величины к измеренным другими авторами для других полимеров (порядка 9–12) [18]. Кроме этого, они ведут себя немонотонно по мере нагружении, как и в работах [19, 22]. Отметим, что если для исходного ABS-полимера отмечается слабый рост по мере нагружения, то для 3D-напечатанного выявляется слабое уменьшение нелинейного параметра. По данным [19] при испытании на растяжение полимеры, имеющие различную структуру, также выявляют различное поведение нелинейного параметра по мере нагружения. Для чистого полипропилена на начальной стадии нагружения можно заметить область спада, роста и последующего спада; для полипропилена, армированного 20% GFR, спад совсем маленький, а последующий рост весьма существенный (более чем в 2 раза); для полипропилена, армированного 30% GFR, наблюдается слабый рост с последующим слабым спадом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование влияние 3D-печати при 100% заполнении на механические, линейные и нелинейные упругие параметры образца промышленного полимера ABS марки eSun.

Отмечено, что 3D-печать оказала слабое влияние на механические свойства полимера ABS: предел прочности образца практически не изменился, а величина остаточной деформации возросла на 20%.

Установлено, что модуль Юнга практически не изменился на первом цикле для обоих образцов, тогда как на втором наблюдалось снижение, более значительное для 3D-напечатанного образца.

Обнаружено, что для исходного образца нелинейный модуль Юнга почти монотонно возрастает при нагружении, а для 3D-напечатанного образца он ведет себя немонотонно, а именно растет при нагружении и падает при разгрузке. Это различие связывается с различием внутренней структуры исходного и 3D-напечатанного образцов. Нелинейный параметр ведет себя немонотонно для обоих образцов. Отмечено общее уменьшение нелинейного параметра по мере нагружения для 3D-напечатанного образца полимера ABS.

Результаты исследования дают информацию о влиянии 3D-печати при 100% заполнении на механические, линейные и нелинейные упругие свойства полимера ABS при его механическом растяжении.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ (проект № 19-12-00098).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Campo E.A.* Selection of Polymeric Materials – How to Select Design Properties from Different Standards. New York: William Andrew Inc.: Norwich, 2008. 350 p.
2. *Peters E.N.* Plastics: Thermoplastics, Thermosets, and Elastomers, Handbook of Materials Selection / Ed. by Kutz M. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002. P. 363–365.
3. *Ramezani H.D., Barbe F., Delbreilh L., Azzouna M.B., Guillet A., Breteau T.* Polymer additive manufacturing of ABS structure: Influence of printing direction on mechanical properties // J. Manuf. Proc. 2019. V. 44. P. 288–298.
4. *Шмелёв А.В., Ивченко В.И., Талалуев А.В.* Экспериментальное и расчетное определение механических характеристик образцов ABS-пластика при растяжении, изготовленных методом 3D-печати // Инженерный журн.: наука и инновации. 2021. № 4. С. 1–15.
5. *Чеврычкина А.А., Евстифеев А.Д., Волков Г.А.* Исследование прочностных характеристик акрилонитрилбутадиенстирол пластика при динамических нагрузках // Журн. техн. физ. 2018. Т. 88. № 3. С. 392–395.
6. *Балашов А.В., Маркова М.И.* Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью // Инженерн. вест. Дона. 2019. № 1.
7. *Saenz F., Otarola C., Valladares K., Rojas J.* Influence of 3D printing settings on mechanical properties of ABS at room temperature and 77 K // Add. Manuf. 2021. V. 39. № 101841.

8. *Shafaat A., Ashtiani H.R.* Influence processing parameters of FDM 3D printer on the mechanical properties of ABS Parts // Ind. J. of Engin. & Mate. Scien. 2021. V. 28. P. 250–257.
9. *Shaik Y.P., Naidu N.K., Yadavalli V.R., Muthyala M.R.* The Comparison of the Mechanical Characteristics of ABS Using Three Different Plastic Production Techniques // Open Access Lib. J. 2023. V. 10. P. 1–18.
10. *Adair L.C., Cook R.L.* Acoustic Properties of Rho-C and ABS in the Frequency Range 100 kHz-2 MHz // J. Acoust. Soc. Am. 1973. V. 54. № 6. P. 1763–1765.
11. *Hartmann B.* Ultrasonic properties of poly (4methyl pentene1) // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. P. 1763–1765.
12. *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.
13. *Vasina M., Monkova K., Monka P.P., Kozak D., Tkac J.* Study of the Sound Absorption Properties of 3D-Printed Open-Porous ABS Material Structures // Polymers. 2020. V. 12. P. 1062.
14. *Nagy P.B.* Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization // Ultrasonics. 1998. V. 36. P. 375–381.
15. *Wu M.-C.* Nonlinearity parameters of polymers. Dissertations, Theses, and Masters Projects. The College of William and Mary. USA, Virginia, Williamsburg. 1989. Paper 1539623784.
16. *Asay J.R., Lamberson D.L., Guenther A.H.* Pressure and Temperature Dependence of the Acoustic Velocities in Polymethylmethacrylate // J. Appl. Phys. 1969. V. 40. № 4. P. 1768–1783.
17. *Lamberson D.L., Asay J.R., Guenther A.H.* Equation of State of Polystyrene and Polymethylmethacrylate from Ultrasonic Measurements at Moderate Pressures // J. Appl. Phys. 1972. V. 43. № 3. P. 976–985.
18. *Saito S.* Nonlinearity parameter measurement for polymer plates using focused ultrasound // AIP Conference Proceeding. 2008. V. 1022. P. 561–564.
19. *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.
20. *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.
21. *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.
22. *Володарский А.Б., Кокшайский А.И., Одина Н.И., Коробов А.И., Михалев Е.С., Ширгина Н.В.* Экспериментальные исследования влияния 3D-печати при 100% заполнении на упругие свойства нитевидных образцов полимера PLA // Акуст. журн. 2023. Т. 69. № 4. С. 410–416.

Influence of 3D Printing on the Elastic Properties of ABS Polymer Filament Samples

A. B. Volodarskii[1], A. I. Kokshaiskii[1], N. I. Odina[1], A. I. Korobov[1, *], E. S. Mikhalev[1]

[1]Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, 119991, Moscow, Russia

**e-mail: aikor42@mail.ru*

This work shows the results of experimental study of the impact of 3D printing with 100% filling on the elastic properties of samples made of ABS filament. The dependence of the deformation and the relative change in the velocity of elastic waves on the applied mechanical stress (up to rupture) for the initial and 3D-printed samples of ABS polymer were measured simultaneously by both the static method and the Thurston-Bragger method. As a result of the experiment, linear and non-linear Young's moduli and the 2nd order non-linear acoustic parameter were calculated. It was established that the selected 3D printing mode almost does not change the strength characteristics of the ABS polymer, and the plastic characteristics are slightly improved. A difference was found in the behavior of nonlinear parameters for the original and 3D-printed samples under mechanical loading, which is associated with changes in the internal structure of the samples caused by 3D printing. For the 3D printed sample, a decrease in the nonlinear parameter was found as the load increased.

Keywords: ABS polymer, 3D printing, 3[d] order elasticity coefficient, non-linear elastic parameter