

УДК 539.3

## ОПТИМАЛЬНОЕ ОБЪЕМНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЯЧЕИСТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ УДАРОПРОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ FDM

© 2022 г. Член-корреспондент РАН Е. В. Ломакин<sup>1,\*</sup>, Л. Н. Рабинский<sup>2</sup>,  
А. В. Бабайцев<sup>2</sup>, Ю. О. Соляев<sup>2</sup>

Поступило 29.04.2022 г.  
После доработки 29.04.2022 г.  
Принято к публикации 04.05.2022 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований ударной вязкости образцов полимерных материалов с облегченными ячеистыми заполнителями сетчатой структуры, получаемыми по технологии трехмерной печати Fused deposition modelling (FDM). Установлено, что существует оптимальное объемное содержание (коэффициент заполнения), при котором ударопрочность образца с заполнителем оказывается наиболее высокой и, в том числе, превосходит ударную вязкость сплошного материала с коэффициентом заполнения, равным единице.

*Ключевые слова:* трехмерная печать, полилактид, ударная вязкость, коэффициент заполнения, оптимальные свойства

**DOI:** 10.31857/S268674002204006X

### ВВЕДЕНИЕ

Технологии трехмерной печати в последнее время находят все большее применение в различных отраслях промышленности, так как позволяют получать изделия сложной формы, изготовление которых традиционными технологиями, зачастую, оказывается невозможным или затруднительным [1].

Одним из актуальных современных направлений исследований в области 3D-печати пластиков является разработка облегченных сетчатых структур и мета-материалов, обладающих специфическими механическими свойствами, такими как чрезвычайно высокая удельная жесткость и прочность [2], отрицательный коэффициент Пуассона [3], высокая ударопрочность [4], нарушение классических симметрий упругих материалов (на уровне эффективных свойств) [5], обеспечение запрещенных частотных диапазонов вибраций [6], наличие чрезвычайно больших обратимых линейных деформаций и высокой стойкости к развитию повреждений [7, 8, 12] и др.

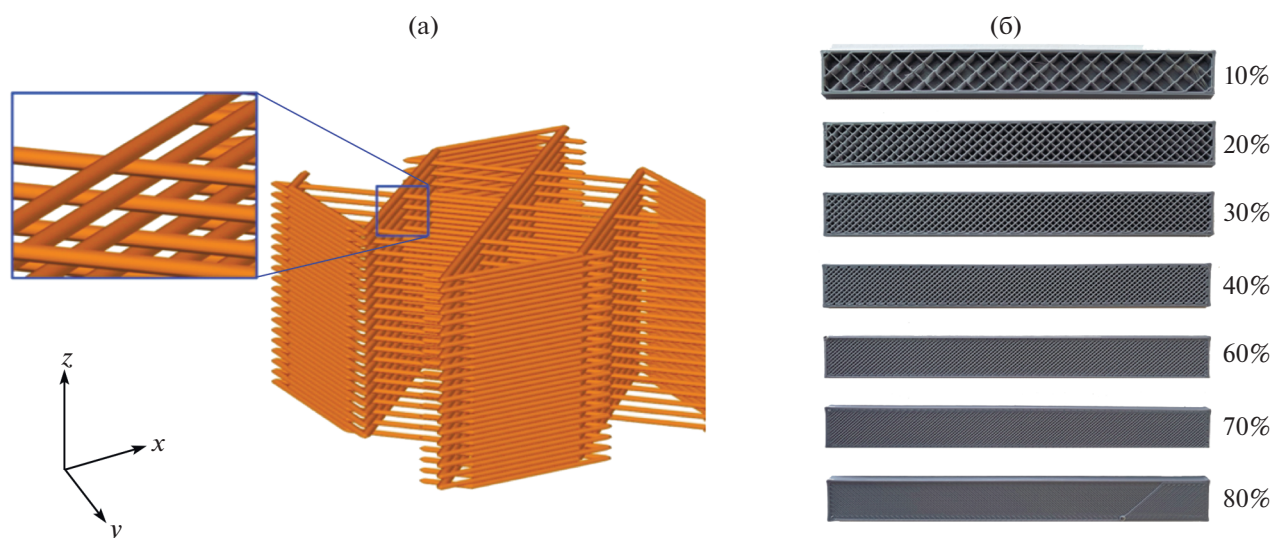
В настоящей работе рассматривается вариант сетчатых структур, которые используются в качестве заполнителей при изготовлении облегченных элементов конструкций по технологии наплавления (Fused deposition modelling, FDM) из полимерного материала – полилактида (PLA). Программное обеспечение для подготовки моделей позволяет выбирать коэффициент заполнения внутренней объема изготавливаемой детали для снижения расхода сырья и получения облегченных конструкций [13]. Материалы типа PLA не используются для изготовления высоконагруженных элементов конструкций, однако они могут быть полезны при изготовлении элементов ударопрочной упаковки, оснастки для механических испытаний, отдельных декоративных элементов [9]. В связи с этим к таким материалам также предъявляются определенные требования по механическим свойствам [9], а характеристики ударопрочности могут являться важным параметром, определяющим функциональные возможности изготавливаемого изделия.

Представлены результаты проведенных экспериментов по исследованию влияния коэффициента заполнения образцов из PLA на их ударную вязкость. Рассмотрен диапазон значений от 10 до 100% заполнения (объемного содержания). Показана возможность получения изделий с повышенными показателями ударной вязкости и сниженной массы. Предложено обоснование наблюдаемых явлений, основанное на изменении

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

\*E-mail: evlomakin@yandex.ru



**Рис. 1.** Геометрия ячеистого сетчатого заполнителя (а) и фотографии изготовленных образцов с различным коэффициентом заполнения (б). Наибольший размер грани изготовленных образцов – 120 мм.

характера концентрации напряжений и образования повреждений в материале с ячеистой структурой.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Для проведения испытаний были изготовлены образцы материала призматической формы с размерами  $120 \times 10 \times 15$  мм. Образцы имели наружную сплошную оболочку толщиной 0.8 мм, а внутри содержали облегченную ячеистую структуру. Геометрия внутренней ячеистой структуры выбиралась из доступных стандартных вариантов в программном обеспечении для подготовки моделей для 3D-печати Ultimaker Cura 4.6.1. В частности, был использован заполнитель типа “линии” (другие возможные варианты: “кубическая”, “зигзаг” и т.д.). Такой заполнитель представляет собой перекрестно расположенные протяженные упругие нити, спаянные в зонах контакта (рис. 1а). Получаемый вариант геометрии заполнителя можно характеризовать как пантографический [8, 4]. Диаметр нитей составлял 0.2 мм. Угол наклона нитей по отношению к оси образца составлял 45 градусов. При изготовлении образцов задавался различный коэффициент заполнения внутреннего объема образцов в диапазоне 10–100%. Этот коэффициент определяет объемное содержание сплошного материала, располагаемого внутри модели. Повышение объемного содержания приводит к уменьшению размера квадратных ячеек,

которые образованы нитями заполнителя. Размер грани ячейки заполнителя для рассмотренных вариантов объемного содержания представлен в табл. 1.

Образцы были изготовлены из материала PLA марки ESun Grey на принтере Original Prusa 3MKX с коэффициентом экструзии 98% (заметим, что этот параметр, определяющий расход материала через сопло 3D-принтера, является существенным для получения качественных изделий, и, в частности, его снижение до значения 96% приводит к существенному снижению механических свойств образцов и увеличению разброса результатов испытаний в 3–4 раза). Образцы выращивались таким образом, чтобы нити заполнителя располагались в плоскости печати ( $XY$ ). Для каждого варианта объемного содержания было изготовлено не менее 5 образцов. Фотографии внутренней структуры изготовленных вариантов образцов представлены на рис. 1б.

Исследование ударпрочности образцов проводилось в направлениях, перпендикулярных к плоскости печати. Испытания проводились на ударный трехточечный изгиб по схеме Шарпи. Исследовались направления удара вдоль оси  $X$  и вдоль оси  $Z$  (см. систему координат на рис. 1а). Испытания проводились на маятниковом копре модели КМ-0.5. Расстояние между опорами составляло 38 мм, радиус закругления опор составлял 10 мм. Образец помещался на опоры маятни-

**Таблица 1.** Размер грани ячейки в структурах с различным объемным содержанием материала

Объемное содержание, %	10	20	25	30	35	40	50	60	70	80
Размер грани ячейки, мм	4.54	2.24	1.6	1.4	1.28	1.03	0.74	0.58	0.64	0.39

кового копра так, чтобы удар молота маятника приходился на середину образца. Удар наносился молотом весом 0.91 кг с фиксированным начальным углом замаха, равным 147 градусов. Энергия удара составляла 10.3 Дж. Проверялось, чтобы на разрушение было израсходовано не менее 10% и не более 80% запаса энергии маятника. После разрушения образца фиксировался угол отклонения маятника, и на основе стандартных соотношений определялась энергия удара, поглощенная при разрушении образца. Вычислялись значения ударной вязкости, которая является сравнительной характеристикой для материалов с разной структурой. Результаты испытаний, при которых образцы оказывались не до конца разрушенными или разрушались с застреванием маятника между опорами (блокируя его в нижнем положении), исключались из рассмотрения.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Фотографии разрушенных образцов с различным объемным содержанием заполнителя показаны на рис. 2. Структура заполнителя не видна на этих фотографиях, так как образцы, подвергавшиеся испытаниям, были покрыты оболочкой сплошного материала со всех сторон. На рис. 2 видно, что при повышении объемного содержания изменяется характер разрушения образцов от “вязкого” с образованием большого количества расслоений и разрывов фрагментов заполнителя вдоль длины образца до характерного “хрупкого” с образованием единственной сквозной поперечной трещины.

Значения ударной вязкости образцов при ударе в двух направлениях представлены на рис. 3. Здесь показаны найденные относительные значения ударной вязкости образцов, нормированные на значение ударной вязкости сплошного материала, которая составила  $4.1 (\pm 0.2)$  кДж/м<sup>2</sup>. Установлено, что наиболее высокие значения ударной вязкости реализуются для образцов с коэффициентом заполнения 40% при ударе поперек пересечений нитей заполнителя (направление X, рис. 3а) и с заполнением 30% при ударе поперек слоев заполнителя (направление Z, рис. 3б). При этом ударопрочность образца с заполнителем оказывается выше, чем у сплошного материала, на 20–40%. Существенным также является тот факт, что уменьшение объемного содержания приводит к резкому снижению ударопрочности материала в направлении X, а оптимальное значение соответствует образцам, характер разрушения которых относится к “вязкому” с образованием разрывов заполнителя (см. рис. 2, образец 40%). Таким образом, наиболее прочные образцы характеризуются вязким характером разрушения при наибольшем объемном содержании заполнителя.

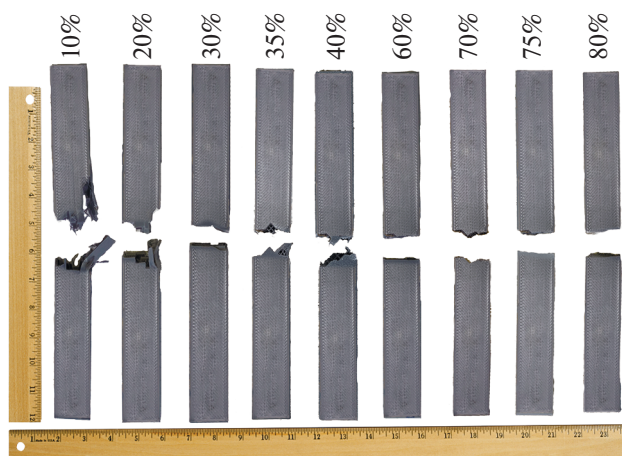
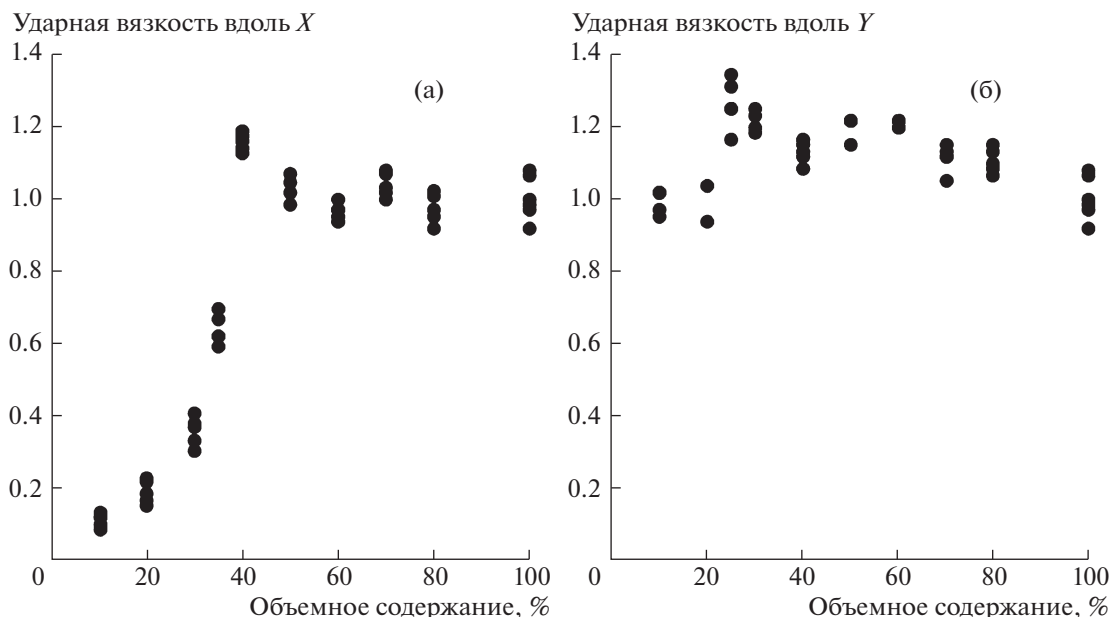


Рис. 2. Образцы с различным коэффициентом заполнения, испытанные на ударный трехточечный изгиб с направлением удара вдоль оси X.

Полученный результат может быть обоснован следующим образом. За счет сетчатой структуры заполнителя в нем при ударе происходят процессы множественного развития дефектов с образованием разрывов нитей и разрушений их контактов. Такой вид разрушения характеризуется высокими энергетическими затратами. Поверхность разрушения на микроуровне оказывается достаточно большой, при этом уровень концентрации напряжений и уровень триаксиальности напряженного состояния в зонах пересечения элементов заполнителя оказывается достаточно низким с преобладанием деформаций сдвига (аналогичные эффекты были исследованы в [4]). В результате рассматриваемые сетчатые структуры при достаточно высокой собственной плотности будут обладать хорошей ударопрочностью. Снижение объемного содержания приводит к образованию разреженной структуры заполнителя. Преимущественный вид разрушения такой структуры оказывается связан с собственным разрушением нитей заполнителя (но не зон контакта), которые, являясь тонкими и низкопрочными, плохо сопротивляются внешней поперечной нагрузке. Оптимальное значение объемного содержания, по всей видимости, в первую очередь определяется соотношением собственной прочности нитей и прочности их соединений.

Установленный эффект можно трактовать и с использованием стандартных представлений, при которых предполагается изменение типа структуры ячеистого материала от “bending-dominated” (с высокой ударопрочностью) к “stretching-dominated” (с высокой жесткостью и статической прочностью) при повышении относительной плотности материала [10]. В таком подходе оптимальная плотность материала обычно составляет менее 20% [10, 11], что соответствует полученным в дан-



**Рис. 3.** Зависимость относительных значений ударной вязкости образцов от объемного содержания заполнителя при ударе в направлении  $X$  (а) и в направлении  $Z$  (б), определенные по результатам испытаний не менее 5 однотипных образцов.

ной работе результатам испытаний на удар поперек плоскости расположения нитей заполнителя (рис. 3б). Однако оптимальное объемное содержание заполнителей при ударе поперек пересечений нитей (при котором они работают как элементы пантографической структуры [4, 8]), оказывается в два раза выше. Для типичной оптимальной относительной плотности 20% рассматриваемая структура оказывается сильно разупрочненной (рис. 3а).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований ударной прочности полимерных образцов с ячеистыми сетчатыми заполнителями различной плотности. Показано, что оптимальным объемным содержанием заполнителя, которое можно рекомендовать к использованию в ударопрочных конструкциях, является содержание, порядка 40%, при котором материал обладает повышенной ударной вязкостью при различных направлениях удара.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код проекта FSFF-2020-0017).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goh G.D. et al. Process–structure–properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review // *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*. 2020. V. 45. № 2. P. 113–133.
2. Askari M. et al. Additive manufacturing of metamaterials: A review // *Additive Manufacturing*. 2020. V. 36. P. 101562.
3. Joseph A., Mahesh V., Harursampath D. On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: a review // *Advances in Manufacturing*. 2021. V. 9. № 3. P. 342–368.
4. Solyaev Y. et al. Static and dynamic response of sandwich beams with lattice and pantographic cores // *Journal of Sandwich Structures & Materials*. 2022. V. 24. Iss: 2. P. 1076–1098.
5. Frenzel T., Kadic M., Wegener M. Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist // *Science*. 2017. V. 358. № 6366. P. 1072–1074.
6. El Sherbiny M.G., Placidi L. Discrete and continuous aspects of some metamaterial elastic structures with band gaps // *Archive of Applied Mechanics*. 2018. V. 88. № 10. P. 1725–1742.
7. dell'Isola F. et al. Large deformations of planar extensible beams and pantographic lattices: heuristic homogenization, experimental and numerical examples of equilibrium // *Proc. Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2016. V. 472. № 2185. P. 20150790.
8. Seppecher P. et al. Pantographic metamaterials: an example of mathematically driven design and of its technological challenges // *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2019. V. 31. № 4. P. 851–884.

9. *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. 21/5. P. 604–617.  
<https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2014-0135>
10. *Gibson I.J., Ashby M.F.* The mechanics of three-dimensional cellular materials // *Proc/ Royal Society of London. A. Mathematical and physical sciences*. 1982. V. 382. № 1782. P. 43–59.
11. *Bauer J. et al.* Nanolattices: an emerging class of mechanical metamaterials // *Advanced Materials*. 2017. V. 29. № 40. P. 1701850.
12. *Lomakin E.V. et al.* Mechanical characteristics of reinforced and three-layer shells based on metamaterials, taking into account operational damage // *Mechanics of Solids*. 2021. V. 56. № 6. P. 922–929.
13. *Yodo N., Dey A.* Multi-Objective Optimization for FDM Process Parameters with Evolutionary Algorithms // *Fused Deposition Modeling Based 3D Printing*. Cham: Springer, 2021. P. 419–444.

## OPTIMAL DENSITY OF THE LATTICE CORES FOR IMPACT-RESISTANT STRUCTURAL ELEMENTS PRODUCED BY FDM TECHNOLOGY

Corresponding Member of the RAS **E. V. Lomakin<sup>a</sup>, L. N. Rabinskiy<sup>b</sup>,  
A. V. Babaytsev<sup>b</sup>, and Y. O. Solyaev<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

The paper presents the results of experimental studies of impact toughness of polymer samples with lightweight lattice cores obtained by Fused deposition modelling (FDM) three-dimensional printing technology. It has been established that there is an optimum volume fraction (infill percentage) at which the impact strength of the sample with the lattice core is the highest and, even, exceeds the impact strength of the fully dense material with volume fraction equals to one.

*Keywords:* 3D printing, polylactide, impact toughness, infill percentage, optimal properties