

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИАМИДНЫХ ИЗДЕЛИЙ С ТОПОЛОГИЕЙ
“ПРИМИТИВ ШВАРЦА”, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ**

© 2019 г. М. Ю. Арсентьев^{1, *}, С. В. Балабанов¹, А. И. Макогон¹, М. М. Сычев^{1, 2}

¹*Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия*

²*Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
Московский проспект, 26, Санкт-Петербург, 190013 Россия*

**e-mail: ars21031960@gmail.com*

Поступила в редакцию 06.05.19 г.

После доработки 19.07.19 г.

Принята к публикации 07.08.19 г.

Методом 3D-печати из материала “полиамид-12” были созданы изделия с топологией “примитива Шварца” с разной величиной параметра t . Образцы получены методом селективного лазерного спекания на 3D-принтере фирмы EOS. Получены экспериментальные кривые зависимости напряжений от степени деформации. Выявлено, что с увеличением параметра t прочность образцов уменьшается. Проведено компьютерное моделирование в программе ComsolMultiphysics.

Ключевые слова: 3D-печать, метод конечных элементов, механическое напряжение, механическая деформация, полиамид, трижды периодическая поверхность минимальной энергии

DOI: 10.1134/S0132665119060027

ВВЕДЕНИЕ

Решетчатые структуры обеспечивают относительно низкую плотность, сочетающуюся с высокой прочностью, энергопоглощающей способностью и теплопроводностью, потенциально могут применяться в аэрокосмической, автомобильной и биомедицинской областях [1, 2]. Изготовление таких структур традиционными методами сопровождается высокой стоимостью конечных изделий, а это, в свою очередь, сдерживает их массовое применение.

Трижды периодические поверхности минимальной энергии (ТППМЭ) типа “примитив Шварца” имеют строгое математическое уравнение, с помощью которого можно варьировать геометрию, а следовательно, и свойства получаемых изделий, изготавливаемых с использованием данной топологии:

$$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = t, \quad (1)$$

где x , y и z – координаты, t – изменяемый параметр.

Цель данного исследования – создание изделий с использованием топологии типа “примитив Шварца” из полиамида-12 методом 3D-печати, изучение их механических свойств экспериментально, а также расчетным методом (метод конечных элементов).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Были созданы 3D-модели образцов с топологией “примитива Шварца” с разной величиной параметра t . Образцы получены методом селективного лазерного (SLS технология) спекания на 3D-принтере фирмы EOS (модель FORMIGAP110). Селективное лазерное спекание (SLS) – метод аддитивного производства, используемый для создания функциональных прототипов и мелких партий готовых изделий. Технология основана на последовательном спекании слоев порошкового материала с помощью лазеров высокой мощности. Условия печати: высота слоя 100 мкм, температура стола: 169.5°C, температура камеры: 150°C. После печати образцы очищали от остатков неспеченного порошка обработкой в пескоструйном аппарате.

Материал печати полиамид-12 (марка PA2200). Полиамид 12 представляет собой продукт полимеризации додекалактама. Это конструкционный кристаллизующийся материал с повышенной эластичностью. Температура плавления ненаполненных марок: 173–180°C, температура стеклования 35–37°C, степень кристалличности 40–70%. Этот материал характеризуется высокой стойкостью к растрескиванию, высокой износостойкостью, имеет низкое влагопоглощение, высокую стабильность размеров и хорошие диэлектрические свойства [3].

Образцы состояли из залитых 27 элементарных ячеек с топологией “примитив Шварца”. Габариты образцов 30 × 30 × 30 мм. Для исследования физико-механических свойств, образцы испытывали на прочность на сжатие в соответствии с ГОСТ 4651–2014 на электромеханической машине марки Walter + bai с максимальной возможной нагрузкой до 400 кН, при температуре воздуха 26°C и скорости нагружения 5 мм/мин [4]. Изделия, изготовленные методом 3D печати, имеют различные механические свойства, в зависимости от направления испытания [5]. Испытания прочности для всех образцов проводили в направлении “выращивания” образцов (вдоль оси Z).

За прочность образцов брали точку перегиба, которая соответствует окончательному сминанию структуры ($t = 0–25$ МПа, $t = 0.6–30$ МПа). В процессе механических испытаний образец с $t = 0.6$ разрушился, это связано с излишне тонкими перемычками между ячейками, в которых возникают большие напряжения.

В данной работе с использованием метода компьютерного моделирования в среде COMSOL [6] проведено исследование распределения напряжения в объектах с формой на основе трижды периодических поверхностей минимальной энергии. В работе был использован пример программного пакета COMSOL Multiphysics “распределение напряжений в ободе колеса при статическом и динамическом нагружении”. Данный пример был модифицирован для задач проекта: получения распределения напряжения в структурах различной топологии (в данном случае ТППМЭ). Было произведено импортное моделирование трехмерных моделей нескольких ТППМЭ (“примитив Шварца”, гидроид) в программный пакет COMSOL Multiphysics, построена сетка, проведена постановка задачи и получено распределение напряжений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Особенности поведения полимерных материалов, подвергнутых эластическим деформациям, обычно рассматривают с помощью кривых сжатия (деформационных кривых). Деформационные кривые, полученные при испытании образцов, имеют свою специфику, обусловленную сложной геометрией образцов. В результате физико-механических испытаний образцов получены зависимости напряжений от степени деформации (рис. 1–3).

При сравнении экспериментальных деформационных кривых установлено, что при уменьшении характерного размера повторяющегося структурного элемента (при увеличении параметра t) прочность образцов уменьшается. Это связано с уменьшением

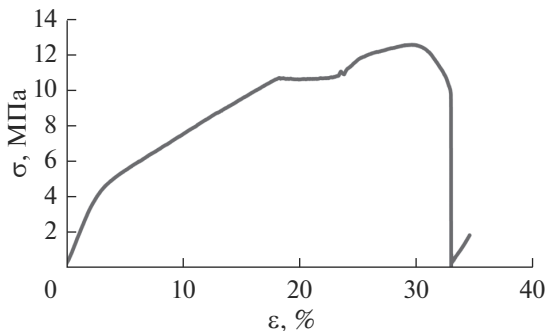


Рис. 1. Деформационная кривая для образца с $t = 0.6$.

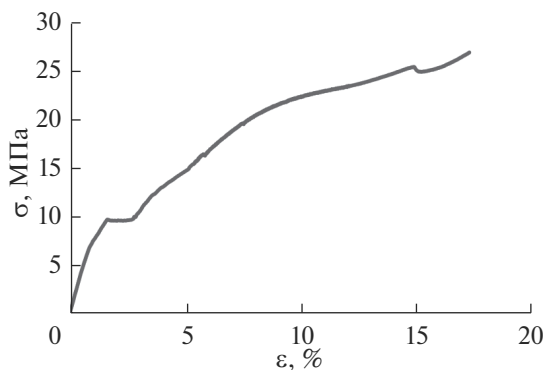


Рис. 2. Деформационная кривая для образца с $t = 0$.

площади опасного сечения. Под термином “опасное сечение” подразумевается поперечное сечение, в котором действуют наибольшие внутренние напряжения.

Согласно результатам компьютерного моделирования в программе ComsolMulti-physics, при приложении сжимающей нагрузки механические напряжения распреде-

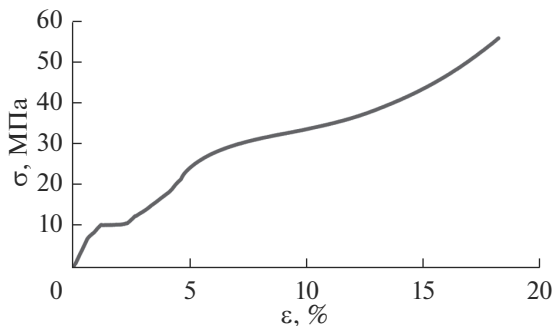


Рис. 3. Деформационная кривая для образца с $t = -0.6$.

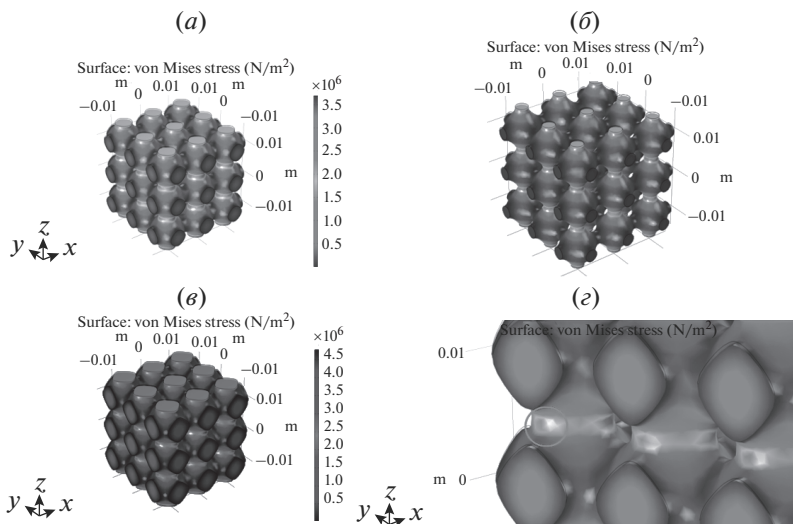


Рис. 4. Распределение механических напряжений в объекте с формой на основе примитива Шварца с залитым внутренним объемом (ячейки $3 \times 3 \times 3$) со значениями параметра $t = 0$ (а), $t = 0.6$ (б), $t = -0.6$ (в, г).

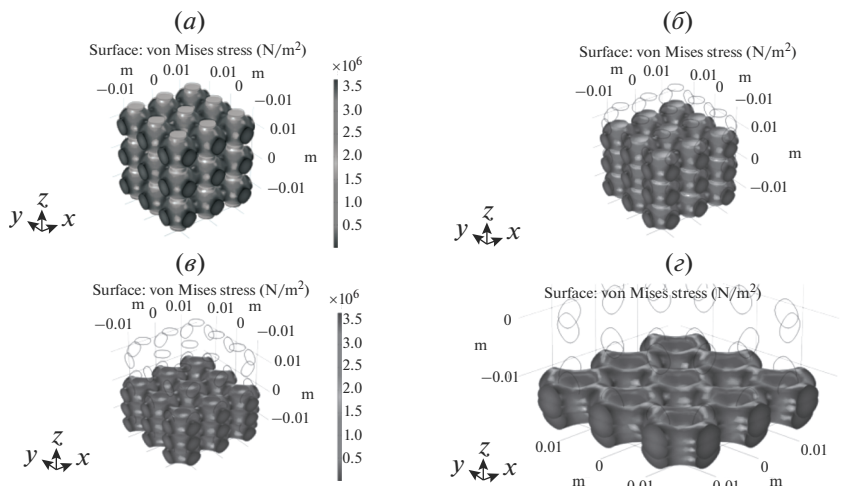


Рис. 5. Распределение механических напряжений в объекте с формой на основе примитива Шварца с залитым внутренним объемом со значением параметра $t = 0$ (ячейка $3 \times 3 \times 3$) (а). Вид ячейки размером $3 \times 3 \times 3$ при относительной деформации 0,2, 0,5 и 0,9, соответственно (б–г).

ляются в образцах неравномерно (рис. 4). Наибольшие значения механических напряжений достигается между ячейками, в наиболее узких частях перемычек.

Анализ распределения механических напряжений в объекте с формой на основе примитива Шварца с залитым внутренним объемом (ячейка $3 \times 3 \times 3$) (рис. 5) показывает, что наиболее сильно подверглись деформации участки, в которых наблюдалась

наибольшая концентрация напряжений (перешейки), при этом малонагруженные имеют большую способность к сохранению формы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования выявлено, что при уменьшении характерного размера повторяющегося структурного элемента (при увеличении параметра t) прочность образцов уменьшается. Экспериментальные данные хорошо коррелируют с результатами компьютерного моделирования выявлено, что при приложении сжимающей нагрузки механические напряжения распределяются в образцах неравномерно. Наибольших значений величина механических напряжений достигает между ячеек, в наиболее узких частях перемычек. Наибольшей пластической деформации подвергаются участки, которые содержат большую концентрацию напряжений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-13-01382).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Evans A.G., Hutchinson J.W., Fleck N.A., Ashby M.F., Wadley H.N.G.* The topological design of multifunctional cellular metals // *Prog. Mater. Sci.* 2001. V. 46. P. 309–327.
2. *Zhang J., Chaisombat K., He S., Wang C.H.* Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures // *Mater. Des.* 2012. V. 36. P. 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.006>
3. *Griehl W., Ruestem D.* Nylon-12-Preparation, Properties, and Applications // *Ind. Eng. Chem.* 1970. V. 62. P. 16–22. <https://doi.org/10.1021/ie50723a005>
4. *Пластмассы. Метод испытания на сжатие (ISO 604:2002, MOD), Стандартинформ, Москва, 2014.*
5. *Дьяченко С.В., Лебедев Л.А., Сычев М.М., Нефедова Л.А.* Физико-механические свойства модельного материала с топологией трижды периодических поверхностей минимальной энергии типа гироид в форме куба // *Журн. технической физики.* 2018. V. 88. P. 1014–1017. <https://doi.org/10.21883/jtf.2018.07.46169.2555>
6. <https://www.comsol.ru/>, <https://www.comsol.ru/>