

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ЯЧЕЙКИ
НА ФИЗИКОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ
С ТОПОЛОГИЕЙ “ПРИМИТИВ ШВАРЦА”© 2021 г. А. И. Макогон^{1, 2, *}, С. В. Балабанов¹, М. М. Сычев^{1, 2}¹Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН,
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия²Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
Московский проспект, 26, Санкт-Петербург, 190013 Россия

*e-mail: makogon422833@gmail.com

Поступила в редакцию 11.03.2021 г.

После доработки 01.06.2021 г.

Принята к публикации 07.06.2021 г.

Целью работы было установление зависимости механической прочности изделий с геометрией Р-поверхности Шварца от числа и размера элементарных ячеек. Изделия изготавливались с помощью селективного лазерного спекания на 3Д принтере EOS Formiga P110 из полиамида-12. Для моделирования образцов был разработан Grasshopper-скрипт. Grasshopper – визуальный язык программирования, интегрированный в САД-программу Rhinoceros 3D. Изготовленные образцы имели одинаковые габариты (вписаны в кубы размером 60 × 60 × 60 мм) и одинаковую степень заполнения пространства. Характер разрушения и области, в которых скапливаются максимальные напряжения в образцах были установлены с помощью метода конечных элементов в программе Comsol Multiphysics. Была выдвинута гипотеза, согласно которой, при увеличении числа элементарных ячеек растет удельная прочность образцов и предложена математическая модель, описывающая этот феномен. Механические испытания подтвердили эту гипотезу.

Ключевые слова: сотовые структуры, трижды периодические поверхности минимальной энергии, 3D печать, метод конечных элементов

DOI: 10.31857/S0132665121050103

ВВЕДЕНИЕ

Трижды периодические поверхности минимальной энергии (ТППМЭ) – поверхности, имеющие нулевую среднюю кривизну и инвариантные относительно трансляций в решетке третьего ранга [1]. Наиболее известной подобной поверхностью является Р-поверхность Шварца. Эту поверхность можно описать аппроксимационным уравнением (1)

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

Важным свойством ТППМЭ является нулевая средняя кривизна, что означает, такие поверхности способны рассеивать энергию, приложенную под любым углом наилучшим образом, так как у них отсутствуют концентраторы напряжений.

ТППМЭ являются неограниченными поверхностями, так как вокруг них невозможно описать сферу с конечным радиусом. Следствием этого является то, что изде-

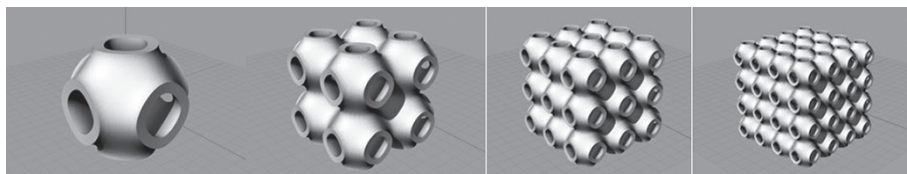


Рис. 1. Рендеры образцов.

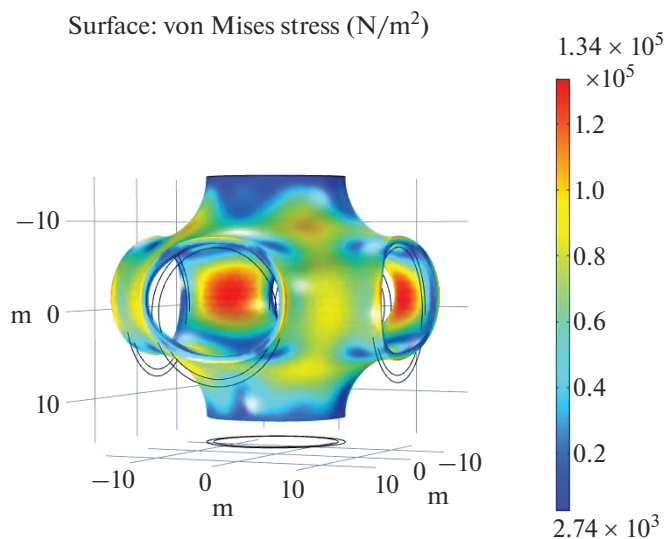


Рис. 2. Распределение напряжений в элементарной ячейке образца с топологией “примитив Шварца”.

для с геометрией ТППМЭ не могут в полной мере проявлять свойства ТППМЭ, а только приближаются к ним.

Трижды периодические поверхности минимальной энергии известны с XVII в., практическое применение их стало возможным только в последние десятилетия, так как их изготовление возможно только с применением аддитивных технологий [2].

В работе [3] показано, что ТППМЭ способны рассеивать различные виды энергии наиболее эффективным образом, в работе [4] показано, что по удельным характеристикам они превосходят традиционные сотовые структуры.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ

Для моделирования образцов был разработан скрипт на визуальном языке программирования Grasshopper, который позволяет генерировать ТППМЭ, а также манипулировать их геометрией (рис. 1). Дальнейшие этапы моделирования осуществлялись в CAD-программе Rhinoceros 3D.

Для установления поведения изделий под нагрузкой и определения областей, в которых накапливаются наибольшие напряжения, использовался метод конечных элементов [5] с использованием программы Comsol Multiphysics. Было установлено, что наибольшие напряжения скапливаются в середине ячеек (рис. 2).

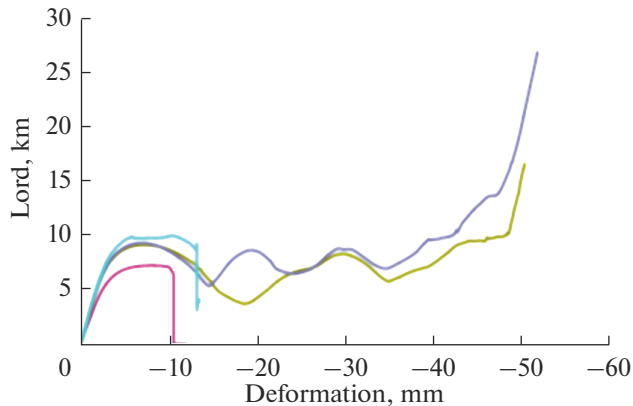


Рис. 3. Деформационные кривые образцов.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ

Образцы были изготовлены с помощью селективного лазерного спекания на 3Д принтере EOS Formiga P110 из полиамида-12 [6]. Образцы вписывались в куб размером $60 \times 60 \times 60$ мм. Степень заполнения пространства образцов составляет $\phi = 0.18$. Площадь сечений, в которых скапливаются наибольшие напряжения, составила 5.1 см^2 . Размер элементарных ячеек образцов варьировался от 60 до 15 мм, число ячеек в грани образцов изменялось от 1 до 4. Была выдвинута гипотеза, согласно которой, удельные механические свойства будут расти по мере уменьшения размера элементарных ячеек.

ПРОВЕДЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Механические испытания образцов проводились в соответствии с ГОСТ 4651-2014 (ISO 604-2002) [7]. Поведение полимерных материалов под нагрузкой описывается деформационными кривыми. Форма деформационных кривых (рис. 3) обуславливается геометрией образцов. Каждый экстремум на кривых соответствует разрушению одного слоя элементарных ячеек перпендикулярно оси нагружения. Первый пик на деформационной кривой соответствует переходу образца в область пластической деформации, его значение принималось за предел прочности.

Механические испытания подтвердили гипотезу. На рис. 4 представлена зависимость прочности от числа элементарных ячеек.

Максимальные напряжения концентрируются на краях образцов в граничных ячейках, что объясняет обнаруженную закономерность. В этих областях начинается разрушение (рис. 5). Прочность растет вместе с числом элементарных ячеек. Причиной этого является изменение соотношения между незамкнутыми ячейками на границах образцов и замкнутыми в объеме. Это соотношение описывается выражением (2)

$$X(n) = \frac{(n-1)^2}{n^2} + 1, \quad (2)$$

где $X(n)$ — соотношение количества объемных ячеек к общему количеству ячеек, n — количество ячеек в грани образца.

Если умножить полученное соотношение на прочность одной элементарной ячейки, можно получить выражение (3), связывающее число элементарных ячеек и механическую прочность образцов:

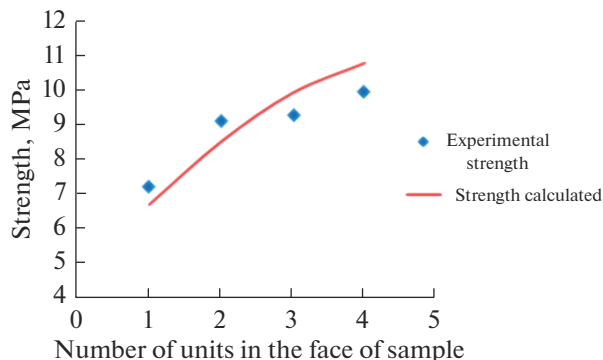


Рис. 4. Прочность образцов.

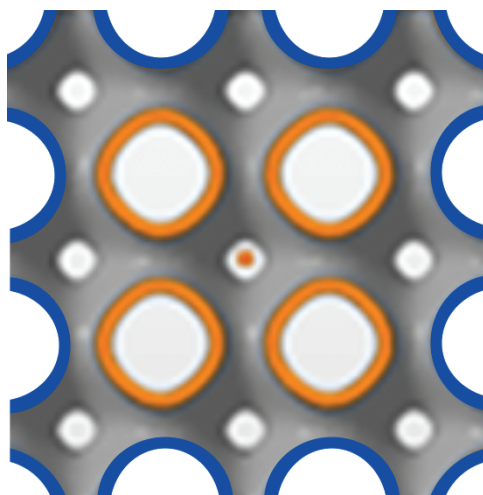


Рис. 5. Закрытые (оранжевые) и открытые (синие) ячейки в образце.

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{(n-1)^2}{n^2} + 1 \right), \quad (3)$$

где σ_0 – прочность образца с одной элементарной ячейкой, σ – прочность образца.

Корреляция между расчетными значениями прочности и значениями, полученными в ходе физико-механических испытаний составила 0.96.

Установлено, что при росте числа элементарных ячеек растут удельные механические характеристики в соответствии с выражением (3), следовательно, при проектировании изделий, в основе которых лежат ТППМЭ, необходимо стремиться к уменьшению размера элементарных ячеек, однако уменьшение имеет технологические границы, обусловленные разрешением 3Д принтеров, при слишком маленьком размере элементарных ячеек существенную роль будут играть дефекты 3Д печати.

Механические свойства образцов с топологией “примитив Шварца” выше традиционных сотовых структур. Это делает объекты с такой топологией очень перспективными [8].

Исследование механических свойств конструкций и разработка топологий выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-73-10171). Разработка методики моделирования механических свойств выполнена в рамках Госзадания ИХС РАН (номер госрегистрации темы АААА-А19-119022290092-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schwarz H.A.* Gesammelte Mathematische Abhandlungen. Springer, Berlin. 1933.
2. *Shahrubudin N., Lee T.C., Ramlan R.* An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications // *Procedia Manufacturing*. 2019. V. 35. P. 1286–1296.
3. *Abueidda D.W., Elhebeary M., Shiang C.S., Pang S., Abu Al-Rub R.K.* Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study // *Materials & Design*. 2019. V. 165. № 107597.
4. *Shevchenko V.Ya., Sychev M.M., Lapshin A.E., Lebedev L.A.* Ceramic Materials with the Triply Periodic Minimal Surface for Constructions Functioning under Conditions of Extreme Loads // *Glass Physics and Chemistry*. 2017. V. 43(6). P. 605–607.
5. *Zienkiewicz O.C.* The finite element method in engineering science, second ed. McGraw-Hill, New York. 1971.
6. *Wolfgang G., Djavid R.* Nylon 12-Preparation, Properties, and Applications // *Ind. Eng. Chem*. 1970. V. 62. P. 16–22.
7. ISO 604:2002. Plastics. The technique of compressive strength measurements. (ISO 604:2002, MOD).
8. *Sychev M.M., Lebedev L.A., Dyachenko S.V., Nefedova L.A.* Mechanical properties of energy-absorbing structures with triply periodic minimal surface topology // *Acta Astronautica*. 2018. V. 150. P. 81–84.