

05

3D-печать и механические свойства полиамидных изделий с топологией „примитив Шварца“

© С.В. Балабанов,¹ А.И. Макогон,¹ М.М. Сычев,^{1,2} А.А. Evstratov,³ А. Regazzi,³ J.M. Lopez-Cuesta³

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

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
190013 Санкт-Петербург, Россия

³ IMT Mines Ales, France

e-mail: sergeybalabanov@yahoo.com

Поступило в Редакцию 20 мая 2019 г.

В окончательной редакции 11 сентября 2019 г.

Принято к публикации 11 сентября 2019 г.

Приведены результаты исследования физико-механических свойств сотового материала, изготовленного из полиамида-12, представляющего собой повторяющиеся в трех направлениях структурные элементы, имеющие геометрическую форму „примитив Шварца“. Образцы в форме куба (размер $30 \times 30 \times 30$ mm) получены методом послойного спекания порошкового материала на 3D-принтере типа SLS (selective laser sintering). Испытания образцов различной геометрии на сжатие показали, что при уменьшении характеристического размера повторяющегося структурного элемента прочность образцов возрастает. Согласно выполненным методом конечных элементов расчетам, это связано с увеличением площади опасного сечения. Показана возможность существенного увеличения удельной прочности материала при сохранении его плотности.

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

DOI: 10.21883/JTF.2020.02.48813.209-19

Введение

В настоящей работе исследованы физико-механические свойства сотового материала, изготовленного из полиамида-12, представляющего собой повторяющиеся в трех направлениях структурные элементы, имеющие геометрическую форму „примитив Шварца“. Сотовые конструкции дают возможность оптимизировать соотношение между прочностью материала и весом. В работах [1,2] академиком В.Я. Шевченко высказана идея использования подобных изделий с геометрией трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ) для условий экстремальных нагружений. Наиболее технологичным методом получения изделий с такой сложной геометрией является метод 3D-печати [3,4].

Изделия, имеющие геометрию трижды периодических поверхностей минимальной энергии (ТППМЭ), состоят из повторяющихся элементов с минимально возможной площадью [5]. Они сочетают поверхности с положительной и отрицательной кривизной. Примером таких поверхностей являются „примитив Шварца“ — бесконечные, трижды периодические структуры (с периодичностью вдоль трех осей) (рис. 1). Образующая поверхность описывается строгим математическим уравнением, с помощью которого можно варьировать геометрию, а следовательно, и свойства получаемых материалов

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

За счет уникальной структуры материалы, имеющие ТППМЭ геометрию, представляют собой композиционный материал из двух взаимопересекающихся фаз, в данном случае одна из фаз — воздух. Такие объекты обладают рядом интересных свойств, в том числе механических [6]. Например, материалы с геометрией ТППМЭ способны эффективно рассеивать механическую энергию [7]. Таким образом, данный тип материала может применяться в качестве элементов поглощающих энергию ударов и взрывов, в составе бронезащиты или в качестве основы энергопоглощающих элементов транспортных средств.

В настоящий момент практически отсутствуют теоретические подходы, позволяющие прогнозировать механические свойства подобных материалов, поэтому в настоящей работе реализована экспериментальная оптимизация геометрических параметров сотового материала со структурой „примитив Шварца“ с точки зрения достижения максимальной прочности и способности к поглощению ударной энергии.

Задача настоящей работы — изготовление материалов с геометрией ТППМЭ и изучение их физико-химических свойств.

Экспериментальная часть

На первом этапе были созданы 3D-модели образцов с топологией примитива Шварца с отличающимся значением параметра t (рис. 1). Увеличение значения t

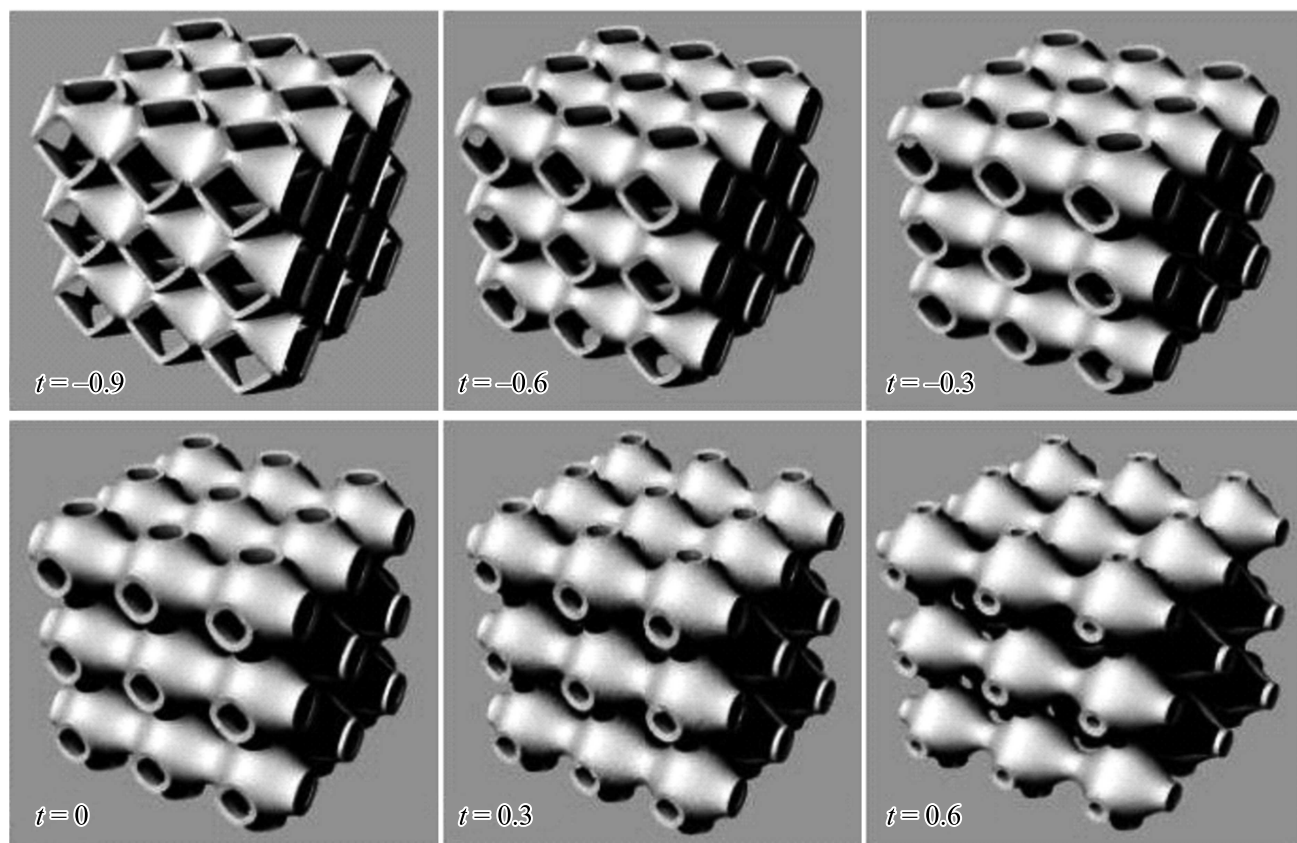


Рис. 1. Изменение геометрии образцов в зависимости от значения параметра t в уравнении (1).

приводит к уменьшению характеристического размера повторяющегося структурного элемента. 3D-модели создавались в программе для параметрического моделирования Rhinoceros 6 с плагином Grasshopper и сохранялись в STL-формате, используемом устройствами 3D-печати. Программа Autodesk Netfabb использовалась для исправления ошибок в STL-файлах. Для подготовки моделей для SLS-печати была использована EOS Parameter Editor.

По созданным 3D-моделям были изготовлены образцы, полученные методом селективного лазерного спекания (SLS-технология) на 3D-принтере фирмы EOS (модель FORMIGA P110).

Селективное лазерное спекание — 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 $100\ \mu\text{m}$, температура стола 169.5°C , температура камеры 150°C . После печати образцы очищались 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. Темпера-

тура плавления ненаполненных марок $173\text{--}180^\circ\text{C}$. Температура стеклования $35\text{--}37^\circ\text{C}$. Степень кристалличности $40\text{--}70\%$. Характеризуется высокой стойкостью к растрескиванию, высокой износостойкостью, имеет низкое влагопоглощение, высокую стабильность размеров и хорошие диэлектрические свойства [8].

Изготовленные образцы состоят из 27 элементарных ячеек (рис. 1). Толщина стенок образцов составляет $0.8\ \text{mm}$. Габариты образцов $30 \times 30 \times 30\ \text{mm}$. Для исследования физико-механических свойств образцы испытывали на прочность на сжатие в соответствии с ГОСТ 4651–2014 на электромеханической машине марки Walter⁺ bai с максимально возможной нагрузкой до $400\ \text{kN}$ при температуре воздуха 26°C и скорости нагружения $5\ \text{mm/min}$ [9]. Известно, что изделия, изготовленные методом 3D-печати, имеют механические свойства, отличающиеся в зависимости от направления испытания [10], поэтому испытания прочности для всех образцов проводили в направлении „выращивания“ образцов (вдоль оси Z).

Моделирование механических свойств образцов осуществлялось методом конечных элементов в программном пакете ComsolMultiphysics. Метод конечных элементов — это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении за-

дач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твердого тела, теплообмена, гидродинамики и электродинамики [11].

Результаты и их обсуждение

Особенности поведения полимерных материалов, подвергнутых вынужденноэластическим деформациям, обычно рассматривают с помощью кривых сжатия (деформационных кривых). Деформационные кривые, полученные при испытании образцов, имеют свою специфику, обусловленную сложной геометрией. В результате физико-механических испытаний образцов получены зависимости приложенной нагрузки от степени деформации (рис. 2). В соответствии с ГОСТ 4651–2014 за прочность образцов принимали первый пик на деформационной кривой, который соответствует переходу образца в область пластической деформации. Кривые имеют три ярко выраженных экстремума (пика), каждый из которых соответствует разрушению одного из слоев ячеек, лежащих в плоскости, перпендикулярной оси нагружения.

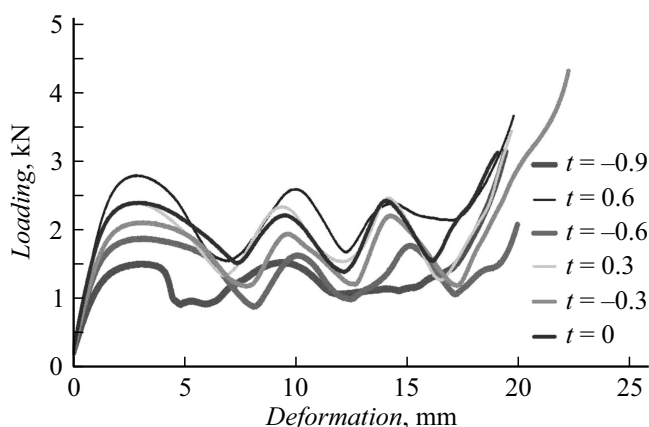


Рис. 2. Деформационные кривые.

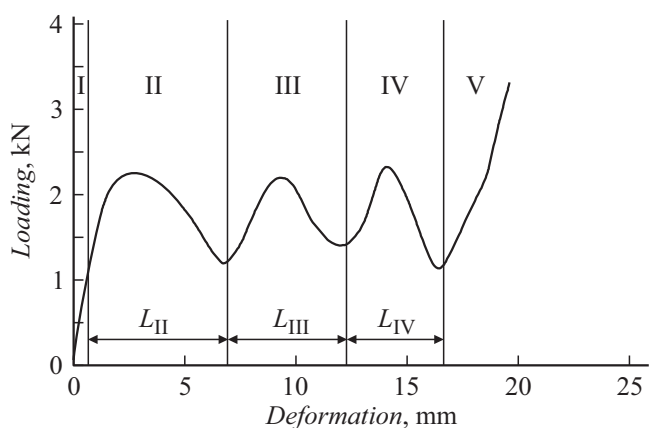


Рис. 3. Анализ деформационной кривой.

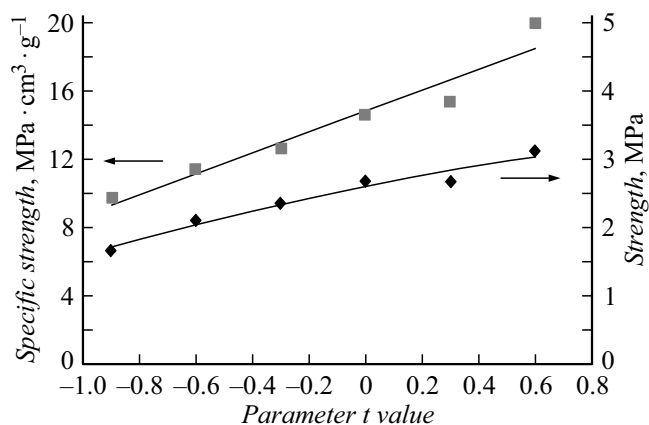


Рис. 4. Прочность образцов в зависимости от их геометрии.

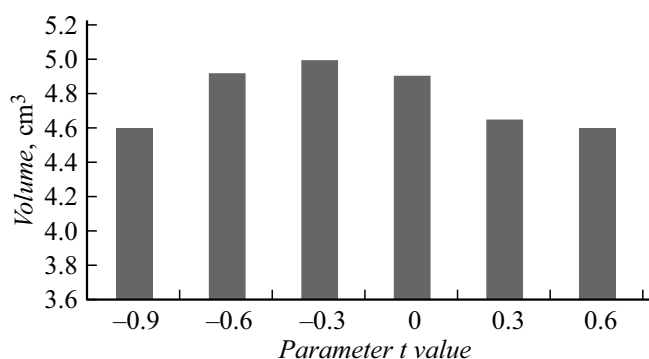


Рис. 5. Объем образцов в зависимости от значения параметра t .

Для анализа деформационной кривой удобно разбить ее на типовые участки. Мы разбили деформационные кривые на 5 участков (рис. 3).

I участок характерен тем, что при деформировании образца напряжение резко возрастает. На этом участке выполняется закон пропорциональности (закон Гука). Это участок упругой деформации, в конце I участка закон Гука перестает соблюдаться. Далее следует три участка упруго-пластической деформации, которые взаимно-подобны друг другу. На II участке имеется максимум, в точке экстремума начинает стремительно деформироваться первый слой ячеек. Далее напряжение падает при быстром росте деформации. В конце II–начале III участка первый слой ячеек окончательно „схлопывается“. III и IV участки качественно повторяют участок II, но можно заметить, что длина участков $L_{II} > L_{III} > L_{IV}$ (степень деформации) последовательно уменьшается. В конце IV–начале V участка третий слой ячеек окончательно „схлопывается“. На V участке начинается экспоненциальный рост нагрузки — это участок пластической деформации.

Положение точек максимума на кривой зависит от множества факторов: структуры полимера, от его молекулярного веса, температуры, скорости сжатия, условий приложения нагрузки и так далее. Количество пиков

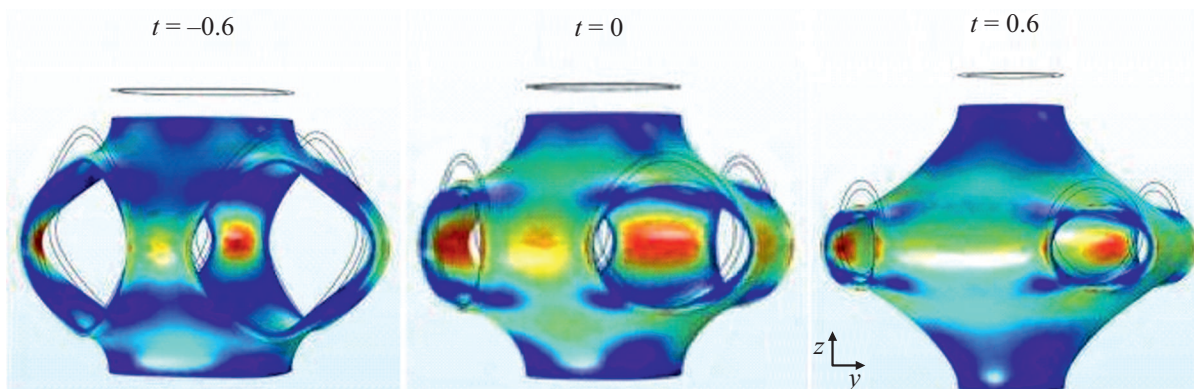


Рис. 6. Распределение напряжений в единичных ячейках образцов.

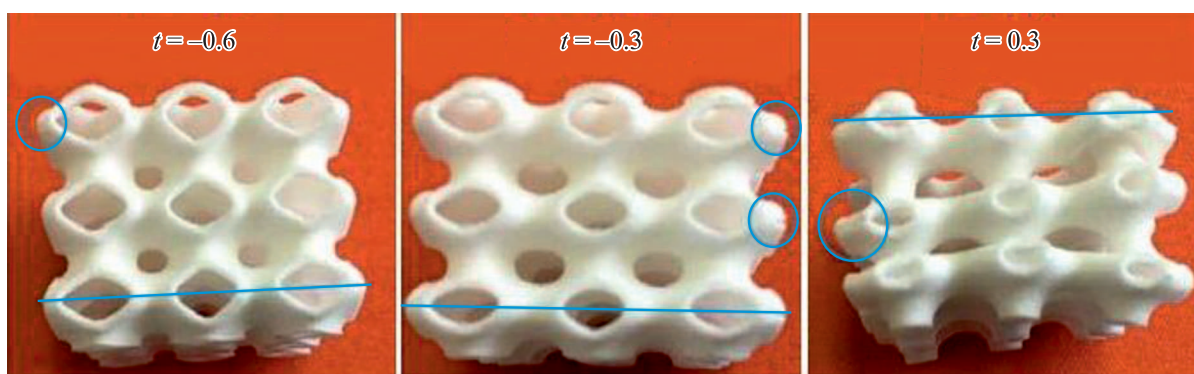


Рис. 7. Образцы после испытаний. Окружности указывают места возникновения трещин.

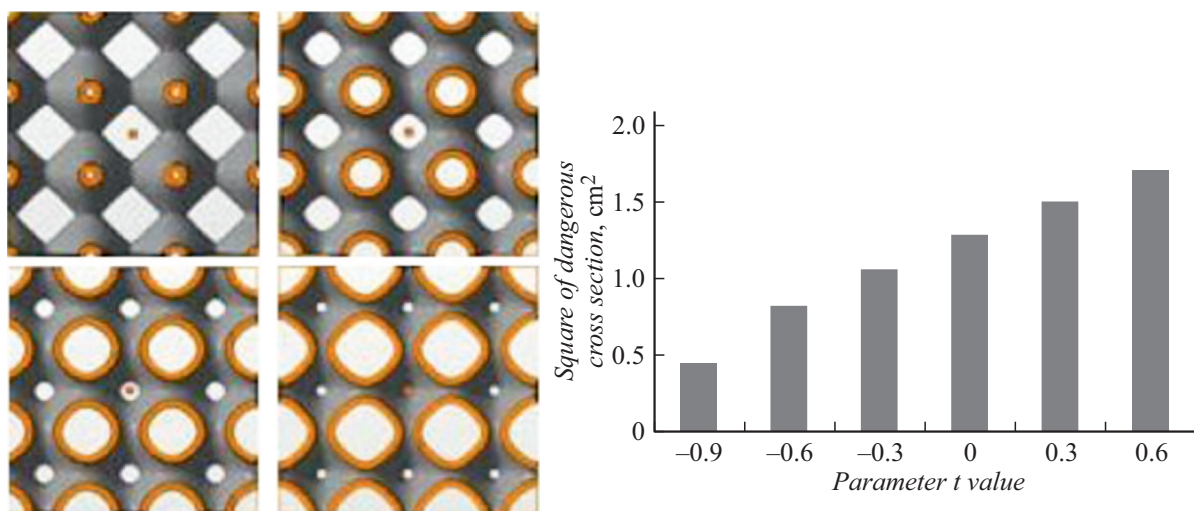


Рис. 8. Изменение площади опасного сечения в зависимости от параметра t .

(максимумов) на деформационной кривой соответствует количеству слоев ячеек, расположенных перпендикулярно оси нагружения.

Из анализа деформационных кривых следует, что при увеличении параметра t прочность образцов повышается почти линейно (рис. 4). При этом объем образцов нелинейно зависит от величины t (рис. 5), поэтому

вид зависимости удельной прочности от t несколько отличается от соответствующей зависимости прочности: для удельной прочности наблюдается линейный рост с увеличением t (рис. 4).

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

ляются в образцах неравномерно (рис. 6). Наибольших значений величина механических напряжений достигает в центральных сечениях ячеек. Именно в этих областях конструкция обладает наименьшей прочностью. Эти расчеты подтверждаются экспериментальными данными. При визуальном исследовании образцов после испытаний выявлены трещины (рис. 7) именно в областях, соответствующих максимальной нагрузке по данным расчетов (рис. 6).

При увеличении параметра t возрастает площадь опасного сечения (рис. 8). За счет этого снижаются напряжения в опасном сечении и увеличивается прочность образцов.

Необходимо отметить, что плотность исследованных образцов в 5–6 раз ниже, чем у монолитных образцов из такого же материала.

Исходя из работы [12], сотовые элементы обладают низкой плотностью и высокой деформацией при нагрузке, отвечая свойствам пластичного материала [8]:

1) $\rho_1 = 0.38 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_1 \approx 6 \text{ МПа}$, $\varepsilon_{\text{lim}1} \approx 55\%$, $\sigma_{\text{спец}1} \approx 15.8 \text{ МПа} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$;

2) $\rho_2 = 0.73 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_2 \approx 6 \text{ МПа}$, $\varepsilon_{\text{lim}2} \approx 28\%$, $\sigma_{\text{спец}2} \approx 17.8 \text{ МПа} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$.

Таким образом, оптимизация геометрии материала с ТППМЭ структурой позволила при плотности 0.16 g/cm^3 достичь удельной прочности $20 \text{ МПа} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ — это превосходит и классические сотовые структуры [12], и результат, полученный в работе [7].

Заключение

1. Методом SLS 3D-печати получены образцы с топологией трижды периодической поверхности минимальной энергии типа „примитив Шварца“ с различным значением параметра t .

2. Установлено, что с увеличением t удельная прочность образцов возрастает в 2 раза с 10 до $20 \text{ МПа} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. Это связано с тем, что при увеличении параметра t возрастает площадь опасного сечения (рис. 8), за счет чего снижаются напряжения в опасном сечении и увеличивается прочность образцов.

3. Оптимизация геометрии материала с ТППМЭ структурой позволила при плотности 0.16 g/cm^3 достичь удельной прочности $20 \text{ МПа} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, что превосходит классические сотовые структуры.

4. Плотность образцов ТППМЭ типа „примитив Шварца“ в 5–6 раз ниже, чем у сплошных литых образцов из такого же материала, значит, масса таких изделий, при одинаковом размере и форме, будет меньше, что позволит использовать разработанные материалы с периодической структурой в качестве энергопоглощающих элементов конструкции морских и речных судов, космических и летательных аппаратов, в автомобилестроении.

Благодарности

Авторы выражают признательность Л.А. Лебедеву и С.В. Дьяченко за помощь в проведении механических испытаний при проведении настоящего исследования.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Шевченко В.Я., Сычев М.М., Лапшин А.Е., Лебедев Л.А. // ФХС. 2017. Т. 43. № 6. С. 640–643.
- [2] Шевченко В.Я., Сычев М.М., Лапшин А.Е., Лебедев Л.А. // ФХС. 2017. Т. 43. № 6. С. 644–648.
- [3] Abueidda Diab Bakir, Mete Abu Al-Rub, Rashid Bergström, Jörgen Sobh, Nahil Jasiuk, Iwona. // Materials & design. 2017. 122. P. 255–267.
- [4] Abueidda, Diab Elhebeary, Mohamed Shiang, Cheng-Shen & Pang, Siyuan & Abu Al-Rub, Rashid & Jasiuk, Iwona. // Materials & Design. 2019. Vol. 165. P. 107597.
- [5] Лорд Э.Э., Маккей А.Л., Ранганатан С. // Новая геометрия для новых материалов. М.: Физматлит, 2010. С. 264.
- [6] Qu Jingyuan Muamer, Kadic Naber, Andreas Wegener Martin // Scientific Reports. 2016. Vol. 7. N 10. P. 1038.
- [7] Sychoy M., Lebedev L., Dyachenko S.V., Nefedova L.A. // Acta Astronautica. 2018. Vol. 150. P. 81–84.
- [8] Wolfgang Griehl, Djavid Ruestem // Industrial & Engineering Chemistry. 1970. Vol. 62. P. 16–22.
- [9] ГОСТ 4651–2014 (ISO 604:2002). М.: Стандартинформ, 2014.
- [10] Дьяченко С.В., Лебедев Л.А., Сычев М.М., Неведова Л.А. // ЖТФ. 2018. Т. 88. Вып. 7. С. 1014–1017.
- [11] Zienkiewicz O.C. The finite element method in engineering science. McGraw-Hill. 1971. 2nd edition.
- [12] Марков В.А., Пусев В.И., Селиванов В.В. // Вопросы оборонной техники. 2012. № 7–8. С. 54–62.