

РАЗРАБОТКА НАСАДОЧНЫХ СТРУКТУР АБСОРБЦИОННЫХ АППАРАТОВ С ПРОГНОЗИРУЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ПОР

Д. А. Егорова, Е. С. Навасардян

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

Ключевые слова: гироид; минимальная поверхность; пористость; пористые материалы; регулярная структура.

Аннотация: Рассмотрено использование пористых структур в насадочных устройствах газоочистного оборудования. Дано описание параметров, необходимых для исследования пористого материала. С помощью программы Autodesk Fusion 360 смоделирована пористая структура типа гироид. Представлены результаты расчета характеристик полученной структуры и проведено сравнение с известными пористыми материалами. Создана модель гироида методом 3D-печати, в качестве материала использован PLA-пластик.

Введение

Аддитивные технологии (*англ.* Additive Fabrication) – это технологии создания изделий по данным CAD-модели (или цифровой модели) методом добавления материала послойно.

На текущий момент аддитивные технологии – одна из стремительно развивающихся областей, происходит их экспоненциальный рост. Аналитическое агентство Statista в 2020 году оценило мировой рынок аддитивного производства примерно в 12,6 млрд долларов США, а к 2026 году стоит ожидать объема в \$37,2 млрд [1].

С помощью аддитивных технологий появляется возможность изготавливать детали без использования трудоемких операций (таких как пайка, сварка) и конструировать деталь со сложными поверхностями и пустотами (например, различные пористые структуры на основе трижды периодических минимальных поверхностей, имеющие перспективы для дальнейшего практического применения в качестве материалов для насадочных устройств для абсорбционной очистки газов).

Егорова Дарья Андреевна – студент, e-mail: eda1601@icloud.com; Навасардян Екатерина Сергеевна – доктор технических наук, профессор кафедры «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия.

Цель работы – разработка структуры с прогнозируемой геометрией пор. Для этого необходимо создать пористую структуру с помощью программы Autodesk Fusion 360, рассчитать характеристики и сравнить их с характеристиками известных пористых материалов (ПМ).

Виды пористых материалов

Пористые материалы нашли широкое применение в различных областях науки и техники. Их отличает проницаемость и меньшая плотность по сравнению с компактными материалами. К ним относятся: пористые порошковые (ППМ), пористые волоконные (ПВМ), пористые сетчатые (ПСМ), высокопористые ячеистые (ВПЯМ) материалы, которые отличаются друг от друга видом исходного материала (порошок, волокна, сетка), технологией изготовления и свойствами [2].

Пористые материалы часто применяются в качестве фильтров в системах газо- и водоочистки.

Пористые порошковые материалы получают формированием и спеканием порошков меди, железа, бронзы, никеля и его сплавов, коррозионноустойчивой стали и алюминия.

По применению ППМ условно делятся на фильтрующие пористые порошковые материалы и капиллярно-пористые. Первые обладают высоким значением коэффициента проницаемости и минимальными размерами пор. Капиллярно-пористые – имеют одновременно высокими значениями величин капиллярного потенциала и коэффициента проницаемости. Существенным недостатком в данном случае является невысокая технологичность при производстве деталей сложной конфигурации [3].

Высокопористые ячеистые материалы – материалы с проницаемой сетчато-ячеистой структурой, получаемые методами порошковой металлургии. Общая пористость структуры – сеть мелких каналов, которая располагается внутри перегородок крупных каналов и составляет 1,6 – 2,5 % объема образца. Сложная пространственная структура при значениях пористости 0,8...0,98 демонстрирует достаточно высокие показатели прочности.

Объем ячеистой пористости определяется упаковкой пор, их распределением по размерам, формой, толщиной перегородок между ними. Максимальной пористости можно достигнуть при условии геометрически правильной укладки [4].

Пористые волоконные материалы получают в результате формирования и спекания волокон. В этом случае применимо понятие критической толщины, до которой пористая структура материала является нерегулярной. При меньшей пористости и наиболее тонких волокнах сохраняется наименьшая критическая толщина. В области регулярной структуры материал характеризуется равновесной величиной максимального размера пор. Повышение регулярности пористой структуры при увеличении толщины образцов приводит к уменьшению коэффициента извилистости пор. Наибольшее влияние на характеристики ПВМ оказывает пористость, с увеличением которой уменьшается прочность и пластичность материала.

Пористые волокнистые материалы применяются в качестве фильтров для газоочистки, сорбирующих и аккумулирующих материалов, теплоизоляционных, термо- и огнестойких материалов, материалов вибро- и звукопоглощения, герметиков и наполнителей, катализаторов различных химических процессов и т.д. Благодаря пористой структуре ПВМ, имеется возможность вводить различные химические вещества по всему объему изделия для создания различных композиционных материалов с разнообразными свойствами [5].

Пористые сетчатые материалы изготавливают из металлических сеток, структура которых обеспечивает организованность строения и высокие прочностные характеристики. Для них характерны широкий диапазон гидравлических и фильтрационных характеристик, высокая пористость, проницаемость и однородность структуры. Пористые сетчатые материалы, как правило, обладают малой толщиной и стабильными размерами пор.

Преимущество ПСМ, по сравнению с порошковыми и волокнистыми материалами, заключается в использовании сеток в качестве исходного материала, так как они имеют строго упорядоченную геометрию расположения проволок [6 – 10].

Минимальные поверхности. Периодические минимальные поверхности состоят из повторяющихся элементов с минимально возможной площадью; сочетают поверхности с положительной и отрицательной кривизной. Примером таких поверхностей являются гироиды – бесконечные, трижды периодические структуры (периодичность вдоль трех осей (рис. 1). Поверхность гироида впервые получена в 1970 году Аланом Шоном, математиком НАСА [11]. Гироид относится к семейству поверхностей Шварца D и P [12].

Структура имеет строгое математическое уравнение, с помощью которого можно варьировать параметры периодичности и, как следствие, свойства получаемых материалов [13, 14]:

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

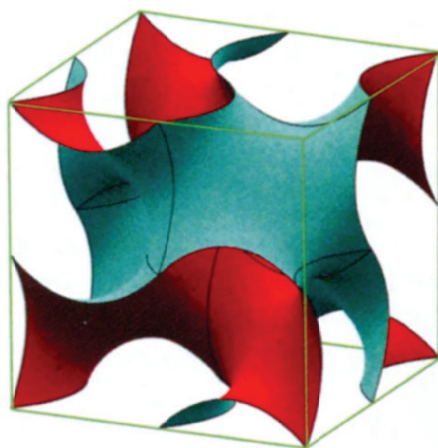


Рис. 1. Элементарная ячейка гироида

В настоящей работе на начальном этапе исследования свойств гироида с помощью программы Autodesk Fusion 360 смоделированы образцы для дальнейшего изготовления из пластика методом 3D-печати. Такой вариант изготовления в настоящее время пока является единственно приемлемым и позволяет удешевить стадию оптимизации топологии гироида перед изготовлением изделий из требуемого конструкционного материала.

Характеристики пористых структур

По геометрическим признакам пористые тела можно разделить на регулярные (с правильным чередованием пор в объеме) и нерегулярные, в которых форма, размеры, ориентация, взаимное расположение и взаимосвязи пор случайные.

Для исследования пористой структуры необходимо знать несколько параметров, которыми она характеризуется: пористость, удельную поверхность, просвет, характерные размеры и распределение пор по размерам [15].

Пористость характеризует размеры и количество пор в теле структуры. Она равна отношению свободного объема V_c , не заполненного элементарными структурными частицами, к общему объему тела V

$$\Pi = \frac{V_c}{V} = 1 - \frac{V_t}{V}, \quad (2)$$

где V_t – объем твердого скелета.

Объем пор складывается из открытых, тупиковых и закрытых объемов, соответственно, пористость – из открытой, тупиковой и закрытой.

При пористости $\Pi \leq 0,5$ тела считаются малопористыми, а при $\Pi \geq 0,5$ – высокопористыми. Верхняя граница пористости $\Pi \approx 0,7...0,9$ ограничивается пределом сохранения устойчивой связности структурных элементов по всему объему скелета, выше которой наступает разрушение. Нижняя граница связана с возможностью экспериментального определения пор как дефектов структуры.

Удельная площадь поверхности $S_{уд}$ характеризует внутреннюю поверхность пористых тел, образованную поверхностью раздела структурных частиц и пор. Определяется как отношение общей (суммарной) поверхности пористого тела S к его массе m

$$S_{уд} = \frac{S}{m}, \quad (3)$$

Просветом (или поверхностной пористостью) называется отношение площади пор к общей площади сечения структуры

$$T = \frac{S_{п}}{S} = 1 - \frac{S_t}{S}, \quad (4)$$

где $S_{п}$, S_t , S – площади соответственно пор, твердого тела, ячейки.

Построение трижды периодической минимальной поверхности с топологией гироида. Для исследования построена модель гироида в программе Autodesk Fusion 360 (рис. 2). В результате получены два образца

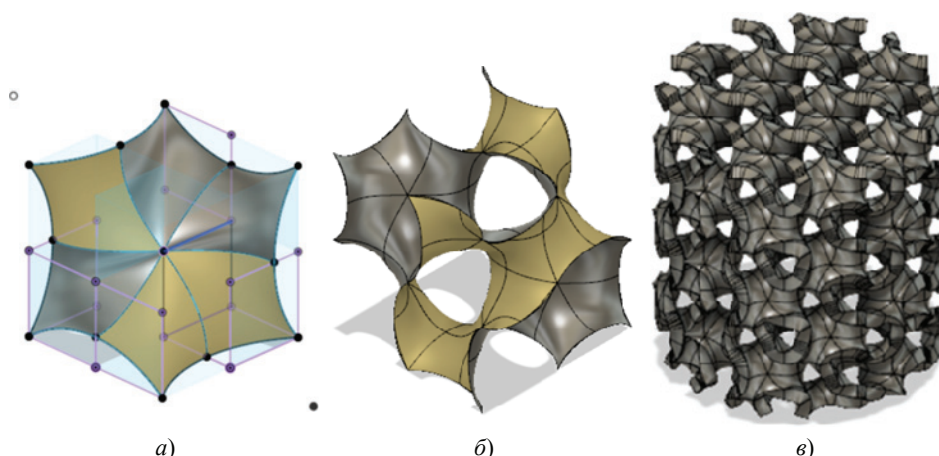


Рис. 2. Модель гироида в программе Autodesk Fusion 360:

a – создание пространственного поверхностного элемента; *б*, *в* – сшивание соответственно полученных элементов по кубу в элементарную ячейку и элементарных ячеек в пористую структуру с заданной толщиной стенки

с разной толщиной стенки. В таблице 1 представлены параметры структуры, полученные в программе. Далее с помощью формул (2) – (4) рассчитаны необходимые характеристики рассматриваемой модели (табл. 2).

Сравнение характеристик пористых структур. Для сравнения полученной структуры с другими пористыми материалами используем рассчитанные характеристики (табл. 3).

Таблица 1

Значения параметров образцов при разной толщине стенки

Параметр	Значение	
	Толщина 1 мм	Толщина 2 мм
Высота, мм	80	80
Диаметр, мм	80	80
Масса, г	397,6	1549
Плотность, г/мм ³	0,008	0,008
Объем структуры, мм ³	50641,2	197 300
Площадь структуры, мм ²	103 400	103 400

Таблица 2

Характеристики образцов при разной толщине стенки

Параметр	Значение	
	Толщина 1 мм	Толщина 2 мм
Объем пор, мм ³	351 482,6	204 823,9
Пористость	0,87	0,509
Удельная площадь поверхности, мм ² /г	261,1	66,75
Просвет	0,73	0,65

Таблица 3

Сравнение характеристик пористых структур

Показатель	Гироид	ППМ	ПВМ	ПСМ	ВПЯМ
Пористость	0,5...0,87	0,3...0,6	0,67...0,8	0,2...0,5	0,8...0,98
Просвет	0,65...0,73	0,1	0,1...0,2	0,2...0,3	0,95
Удельная поверхность, м ² /г	$(66,75...261,1) \cdot 10^{-6}$	0,01...1	0,12	0,1...0,3	180...250
Размер пор, мм	7...10	0,001...0,5	0,01...0,02	0,1...0,2	0,6...3,6

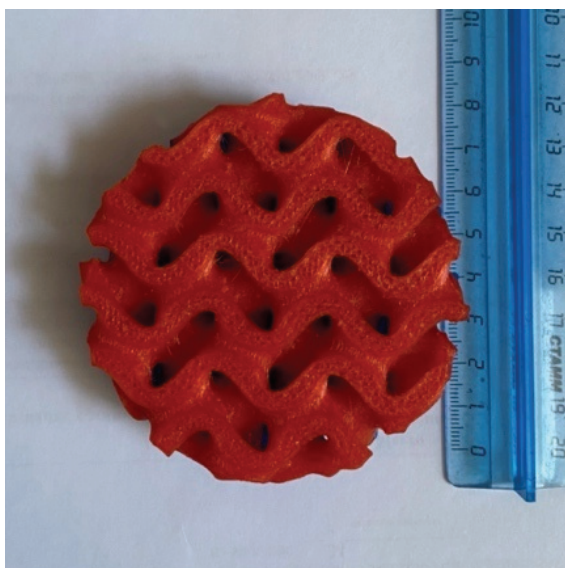


Рис. 3. Образец регулярной структуры

Создание пористой структуры методом 3D-моделирования. С помощью технологий 3D-моделирования получен образец гироида с указанными ранее характеристиками (рис. 3). Параметры печати: температура печати – 230 °С; размер проволоки – 1,75 мм; диаметр экструдера – 0,4 мм; материал – PLA-пластик.

Заключение

По итогам научной работы смоделирован и напечатан продукт, рассчитаны его характеристики. Таким образом, методом CAD-моделирования можно создавать регулярные структуры с различными значениями характеристик. В данном случае разработанная структура типа гироид сравнима с известными пористыми материалами, а в некоторых случаях превосходит их по значениям. Следовательно, можно сделать вывод о перспективах развития данного направления. В дальнейших исследованиях стоит изучить вопрос использования подобных структур в абсорбционных и ректификационных колоннах.

Список литературы

1. Global 3D printing products and services market size from 2020 to 2026. – Текст : электронный // Statista. – URL : <https://www.statista.com/statistics/315386/global-market-for-3d-printers/> (дата обращения: 11.05.2022).
2. Пелевин, Ф. В. Технология изготовления пористых материалов / Ф. В. Пелевин // Вестник Московского государственного университета сервиса. – 2007. – № 3. – С. 46 – 51.
3. Игошин, Д. Е. Проницаемость пористой среды периодической структуры с разветвляющимися каналами / Д. Е. Игошин, О. А. Никонова // Вестн. Тюменского гос. ун-та. – 2015. – Т. 1, № 2. – С. 131 – 141.
4. Пористые проницаемые материалы / С. В. Белов, П. А. Витязь, В. К. Шелиг [и др.]. – М. : Metallurgia, 1987. – 335 с.
5. Юров, Ю. Л. Высокоэффективные аэрозольные фильтры на основе волокнистых материалов ФП / Ю. Л. Юров, В. А. Девисилов, П. И. Басманов. – Краснодар : КубГТУ, 2004. – 94 с.
6. Пористые сетчатые материалы / Ю. И. Синельников, А. Ф. Третьяков, Н. И. Матурин [и др.]. – М. : Metallurgia, 1983. – 64 с.
7. Девисилов, В. А. Металлические проволоочные сетки для фильтрования жидкостей и газов. Часть 1. Структурные характеристики и их расчет / В. А. Девисилов, В. С. Спиридонов // Безопасность в техносфере. – 2009. – № 3. – С. 46 – 55.
8. Девисилов, В. А. Улавливание аэрозольных частиц фильтрами из пористых сетчатых металлов / В. А. Девисилов, В. С. Спиридонов, А. Е. Крыловский // Безопасность в техносфере. – 2016. – Т. 5, № 2. – С. 63 – 68. doi: 10.12737/20796
9. Большаков, В. А. Фильтровальные перегородки из спеченных металлических сеток для встроенных фильтров авиационных гидросистем / В. А. Большаков, В. С. Спиридонов, Ю. М. Новиков // Безопасность в техносфере. – 2015. – Т. 4, № 4. – С. 39 – 45. doi: 10.12737/14433
10. Третьяков, А. Ф. Механические свойства тканых металлических сеток, применяемых для изготовления пористых сетчатых материалов из стали 12Х18Н10Т / А. Ф. Третьяков // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. – 2018. – № 2 (695). – С. 42 – 49. doi: 10.18698/0536-1044-2018-2-42-49
11. Schoen, A. H. Infinite Periodic Minimal Surfaces without Self-Intersections. – Текст : электронный / А. Н. Schoen // National Aeronautics and Space Administration. – Washington, D. C., 1970. – 99 p. – URL : <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19700020472/downloads/19700020472.pdf> (дата обращения: 11.05.2022).
12. Исследование прочностных характеристик ячеистых образцов, изготовленных аддитивным способом / В. А. Акушевич, А. И. Зыков, И. Г. Толмачева [и др.] // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. – 2019. – № 5. – С. 424 – 431.
13. Лорд, Э. Э. Новая геометрия для новых материалов / Э. Э. Лорд, А. Л. Маккей, С. Ранганатан ; пер. с англ. Л. П. Мезенцевой ; под ред. В. Я. Шевченко, В. Е. Дмитриенко. – М. : Физматлит, 2010. – 264 с.
14. Физико-механические свойства модельного материала с топологией трижды периодических поверхностей минимальной энергии типа гироид в форме куба / С. В. Дьяченко, Л. А. Лебедев, М. М. Сычев, Л. А. Нефедова // Журнал технической физики. – 2018. – Т. 88, № 7. – С. 1014 – 1017. doi: 10.21883/JTF.2018.07.46169.2555
15. Фандеев, В. П. Методы исследования пористых структур / В. П. Фандеев, К. С. Самохина // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – Т. 7, № 4 (29). – 11 с. – URL : https://elibrary.ru/download/elibrary_24312485_58964364.pdf (дата обращения: 11.05.2022).

References

1. <https://www.statista.com/statistics/315386/global-market-for-3d-printers/> (accessed 11 May 2022).
2. Pelevin F.V. [Technology for the manufacture of porous materials], *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta servisa* [Bulletin of the Moscow State University of Service], 2007, no. 3, pp. 46-51. (In Russ.)
3. Igoshin D.Ye., Nikonova O.A. [Permeability of a porous medium with a periodic structure with branching channels], *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Tyumen State University], 2015, vol. 1, no. 2, pp. 131-141. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Belov S.V., Vityaz' P.A., Shelig V.K. [et al.] *Poristyye pronitsayemye materialy* [Porous permeable materials], Moscow: Metallurgiya, 1987, 335 p. (In Russ.)
5. Yurov Yu.L., Devisilov V.A., Basmanov P.I. *Vysokoeffektivnyye aerol'nyye fil'try na osnove voloknistykh materialov FP* [Highly efficient aerosol filters based on fibrous materials FP], Krasnodar: KubGTU, 2004, 94 p. (In Russ.)
6. Sinel'nikov Yu.I., Tret'yakov A.F., Maturin N.I. [et al.] *Poristyye setchatyye materialy* [Porous mesh materials], Moscow: Metallurgiya, 1983, 64 p. (In Russ.)
7. Devisilov V.A., Spiridonov V.S. [Metallic wire meshes for filtering liquids and gases. Part 1. Structural characteristics and their calculation], *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in the Technosphere], 2009, no. 3, pp. 46-55. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Devisilov V.A., Spiridonov V.S., Krylovskiy A.Ye. [Capture of aerosol particles by filters made of porous mesh metals], *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in the Technosphere], 2016, vol. 5, no. 2, pp. 63-68, doi: 10.12737/20796 (In Russ., abstract in Eng.)
9. Bol'shakov V.A., Spiridonov V.S., Novikov Yu.M. [Filtering partitions made of sintered metal meshes for built-in filters of aviation hydraulic systems], *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in the Technosphere], 2015, vol. 4, no. 4, pp. 39-45, doi: 10.12737/14433 (In Russ., abstract in Eng.)
10. Tret'yakov A.F. [Mechanical properties of woven metal meshes used for the manufacture of porous mesh materials from steel 12X18H10T], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [News of higher educational institutions. Engineering], 2018, no. 2 (695), pp. 42-49, doi: 10.18698/0536-1044-2018-2-42-49 (In Russ., abstract in Eng.)
11. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19700020472/downloads/19700020472.pdf> (accessed 11 May 2022).
12. Akushevich V.A., Zykov A.I., Tolmacheva I.G., Tsarenkov A.I., Belobrova I.A. [Study of the Strength Characteristics of Cellular Samples Manufactured by the Additive Method], *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki* [Proceedings of the Tula State University. Technical science], 2019, no. 5, pp. 424-431. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Lord E.E., Makkey A.L., Ranganatan S., Shevchenko V.Ya., Dmitriyenko V.Ye. [Eds.] *Novaya geometriya dlya novykh materialov* [New geometry for new materials], Moscow: Fizmatlit, 2010, 264 p. (In Russ.)
14. D'yachenko S.V., Lebedev L.A., Sychev M.M., Nefedova L.A. [Physical and mechanical properties of a model material with the topology of three times periodic surfaces of minimum energy of the cube-shaped gyroid type], *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics], 2018, vol. 88, no. 7, pp. 1014-1017, doi: 10.21883/JTF.2018.07.46169.2555 (In Russ., abstract in Eng.)
15. https://elibrary.ru/download/elibrary_24312485_58964364.pdf (accessed 11 May 2022).

Development of Packed Structures of Absorption Apparatus with Predicted Pore Geometry

D. A. Egorova, E. S. Navasardyan

*Bauman Moscow State Technical University
(National Research University), Moscow, Russia*

Keywords: gyroid; minimum surface; porosity; porous materials; regular structure.

Abstract: The use of porous structures in packed devices of gas cleaning equipment is considered. A description of the parameters required for the study of a porous material is given. Using the Autodesk Fusion 360 program, a porous structure of the gyroid type was modeled. The results of calculating the characteristics of the resulting structure are presented and compared with known porous materials. A model of a gyroid was created by 3D printing, PLA plastic was used as a material.

© Д. А. Егорова, Е. С. Навасардян, 2022