УДК 536.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ, ОСНОВАННЫХ НА ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ МИНИМАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ GYROID

♦♦♦♦♦

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY OF MATERIALS BASED ON THE TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACE GYROID

Попкова Ангелина Сергеевна
студентка кафедры промышленная теплоэнергетика,
Самарский государственный технический университет
angelinaapopkova@gmail.com

Брагин Дмитрий Михайлович
аспирант кафедры промышленная теплоэнергетика,
Самарский государственный технический университет
Dimabragin2204@yandex.ru

Зинина Софья Алексеевна
аспирант кафедры промышленная теплоэнергетика,
Самарский государственный технический университет
sofazinina4@gmail.com

Аннотация. В статье проведено исследование пористых материалов, основанных на упорядоченной структуре трижды периодической минимальной поверхности Gyroid. На установке ИТП-МГ 100 экспериментально определенна теплопроводность образцов с разной пористостью. Геометрические параметры, такие как толщина стенок, пористость, и размер ячейки оказывают значительное влияние на теплофизические свойства материалов. Для образцов с максимальной пористостью (φ = 0,873) значение λ составило 0,071 Вт $м^{-1}·К^{-1}$. Для изготовления опытных образцов использовался материал Anycubic Basic Resin, с теплопроводностью 0.217 Вт $м^{-1}·К^{-1}$, определенной в рамках текущего исследования.

Ключевые слова: пористый материал, Gyroid, трижды периодическая минимальная поверхность, теплопроводность.

Popkova Angelina Sergeevna
Student of the Department
of Industrial Thermal Power Engineering,
Samara State Technical University
angelinaapopkova@gmail.com

Bragin Dmitry Mikhailovich
Postgraduate Student of the Department
of Industrial Thermal Power Engineering,
Samara State Technical University
Dimabragin2204@yandex.ru

Zinina Sofya Alekseevna
Postgraduate student of the Department
of Industrial Thermal Power Engineering,
Samara State Technical University
sofazinina4@gmail.com

Annotation. This article presents a study of porous materials based on the ordered structure of the triply periodic minimal surface Gyroid. The thermal conductivity of samples with different porosity levels was experimentally determined using the ITP-MG 100 setup. Geometric parameters such as wall thickness, porosity, and cell size have a significant influence on the thermophysical properties of the materials. For samples with maximum porosity (φ = 0.873), the λ value was 0.071 $W·m^{-1}·K^{-1}$. The test samples were fabricated using Anycubic Basic Resin, which has a thermal conductivity of 0.217 $W·m^{-1}·K^{-1}$, as determined in the current study.

Keywords: porous material, Gyroid, triply periodic minimal surface, thermal conductivity.

***Благодарности**: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10044, rscf.ru/project/23-79-10044/.*

Введение

Разработка материалов с заданными свойствами является одной из ключевых задач современной науки и инженерии [1]. Такие материалы могут открывать новые возможности для научных и промышленных разработок в различных отраслях энергетики, химических технологий и машиностроения.

В качестве материалов с заданными свойствами могут быть использованы пористые материалы. Пористые материалы представляют значительный научный и технологический интерес для хранения энергии [2]. Пористые материалы обладают значительными преимуществами по сравнению со сплошными материалами благодаря большой площади поверхности, настраиваемой структуре пор, низкой массе. Благодаря внутренним пустотам, снижается плотность материала, что позволяет использовать такие материалы в теплоизоляции, когда сплошные материалы менее эффективны [3].

Среди пористых материалов особого внимания заслуживают материалы, основанные на TPMS-структуре (от англ. Triply periodic minimal surface). Одним из таких ма-

териалов являются пористые структуры на основе Gyroid. Материалы на основе Gyroid превосходят классические пористые материалы по таким параметрам как прочность, низкая масса, удельная площадь поверхности и др [4]. В частности, одной из особенностей материалов на основе TPMS является способность делить пространство на два не пересекаемых объема/лабиринта, что позволяет разрабатывать новые рекуперативные теплообменные устройства с большей площадью поверхности. На сегодняшний день исследования теплообменных устройств со структурой TPMS активно ведутся с помощью численного моделирования. Такие структуры демонстрируют значительное улучшение теплопередачи – до 7,5 раз выше, чем у обычных пластинчатых теплообменников. Эта структура обеспечивает прирост теплопередачи на 30–80 %, и в целом превосходит традиционные теплообменники PCHE на 15–100 % [5–7].

Свойства материала, основанного на TPMS, могут быть изменены на стадии изготовления путем выбора геометрических параметров ячеек. Основные изменения геометрических параметров основаны на параметрических уравнениях самих TPMS структур, в частности изменениях периода поверхности уровня и параметре смещения эквидистантных поверхностей уровня (толщина ячейки). Так, например, структура Schwarz Primitive описывается уравнением 1, а период поверхности или длина ячейки (a) и параметр смещения поверхности уровня или толщина (δ) что влияет на механические характеристики и теплофизические свойства материала [8]:

$$\cos(\frac{2\pi x}{a}) + \cos(\frac{2\pi y}{a}) + \cos(\frac{2\pi z}{a}) = \pm\frac{\delta}{2}\cdot \quad (1)$$

На текущий момент внедрение структур TPMS в энергетику ограничено из-за неясности их теплофизических свойств, что затрудняет точное прогнозирование теплопереноса и оптимизацию теплообменных процессов. В ходе численных исследований и анализов полученных результатов были получены эмпирические линейные зависимости коэффициента теплопроводности от относительной толщины стенки ячейки Schwarz I WP [9].

Исследование гидродинамических свойств TPMS материалов экспериментальными методами позволило выявить отклонение до 70 % от численных моделей [10]. Очевидно, что в рамках эффективной теплопроводности также могут наблюдаться отклонения от предложенных эмпирических зависимостей, полученных по численным моделям переноса тепла. В связи с этим ставится вопрос о проведении экспериментального исследования теплопереноса в TPMS материалах. Эксперименты позволяют получить данные о теплопроводности, учитывающие все физические особенности структуры, что необходимо для практического применения в энергетике.

Формирование геометрии

TPMS формируются как математические поверхности с минимальной площадью и обладают периодической структурой в трех измерениях. Такие структуры создают с помощью поверхностей уровня или специальных уравнений, где параметр $\frac{\delta}{2}$ формирует толщину поверхности, а параметр «*a*» изменяет размер ячейки. Среди наиболее известных структур TPMS выделяют поверхности Schwarz P, Schwarz D и Gyroid. Геометрия TPMS определяется тригонометрическим уравнением, параметрами ячейки a, толщиной стенок δ и пористостью φ. Эти характеристики существенно влияют на механические и теплофизические свойства материала.

Пористость – это доля объёма пор в общем объёме пористого тела, выражаемая как безразмерная величина от 0 до 1, которая показывает, какая часть объёма материала занята пустотами, которые могут быть заполнены газом, жидкостью. Пористость рассчитывается по формуле:

$$\varphi = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{общ}}}, \quad (2)$$

где $V_{\text{пор}}$ – объём пор; $V_{\text{общ}}$ – общий объем образца.

Формирование TPMS-структуры для опытных образцов осуществлялось через построение поверхности в Surface Evolver, обработку в SolidWorks, создание твердотельной модели и финальную подготовку в SpaceClaim Direct Modeler (SCDM Ansys). После формирования САПР модели образцы изготавливались методом 3D-печати на принтере Phrozen Sonic Mighty 4K 3D с технологией LCD (от англ. Liquid Crystal Display). После тщательной постобработки материалов измерялась фактическая пористость образца как отношение массы опытного образца к массе сплошного образца такого же объема. Для изготовления образцов использовался фотополимер Anycubic Basic Resin. Теплопроводность материала определялась на сплошной пластине, изготовленной из этого материала и в рамках эксперимента составила 0.217 Вт $м^{-1} \cdot К^{-1}$.

Образцы, представленные на рисунке 1, использовались для проведения экспериментов на сертифицированной экспериментальной установке ИТП-МГ 100 (рис. 2).

Рисунок 1 – Опытные образцы материала, основанного на поверхности Gyroid

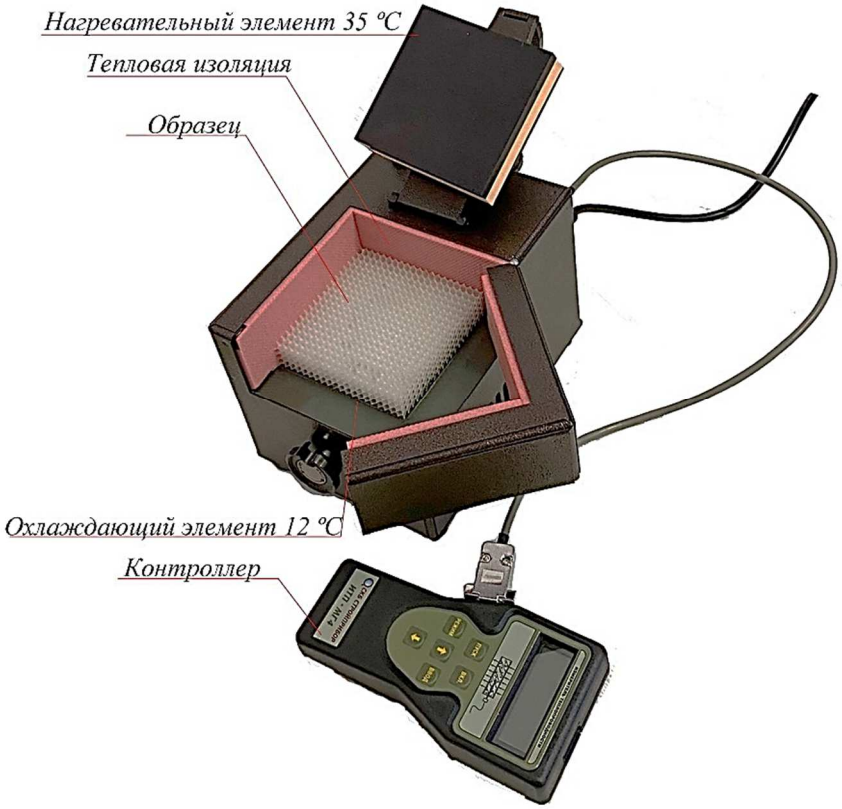

Рисунок 2 – Экспериментальная установка ИТП-МГ 100

Основными элементами этого аппарата являются нагревательный элемент, система охлаждения, термоизолированный короб и контроллер. В ходе эксперимента предварительно подготовленный образец помещался между нагревательной и охлаждающей плитами внутри термоизолированной камеры. После достижения стационарного теплового потока осуществлялись измерения температуры на гранях образца, плотности теплового потока и толщины материала. На основании этих данных рассчитывались коэффициент теплопроводности и термическое сопротивление исследуемого материала. Испытания проводились до достижения стационарного режима, что обычно занимало не более 30 минут. Верхняя сторона образца нагревалась с помощью нагревательного элемента до постоянной температуры 35° ± 0.5 °C, а нижняя сторона охлаждалась до температуры 12° ± 0.5 °C с помощью системы охлаждения. Результаты эксперимента сведены в таблице 1 и рисунке 3.

Таблица 1 – Геометрические параметры образцов

№ образца	φ	Масса, гр	Пористость факт.	a, мм	δ, мм	q, Вт/м^2	λ, Вт м$^{-1}$·К$^{-1}$
1	0	237	–	–	–	239	0.217
2	0.82	40	0.83	5	0.3	79	0.069
3	0.7	70	0.71	5	0.5	97	0.085
4	0.42	137	0.42	5	1	150	0.131
5	0.87	30	0.87	10	0.4	81	0.071
6	0.7	72	0.70	10	1	106	0.093
7	0.42	134	0.43	10	2	165	0.144

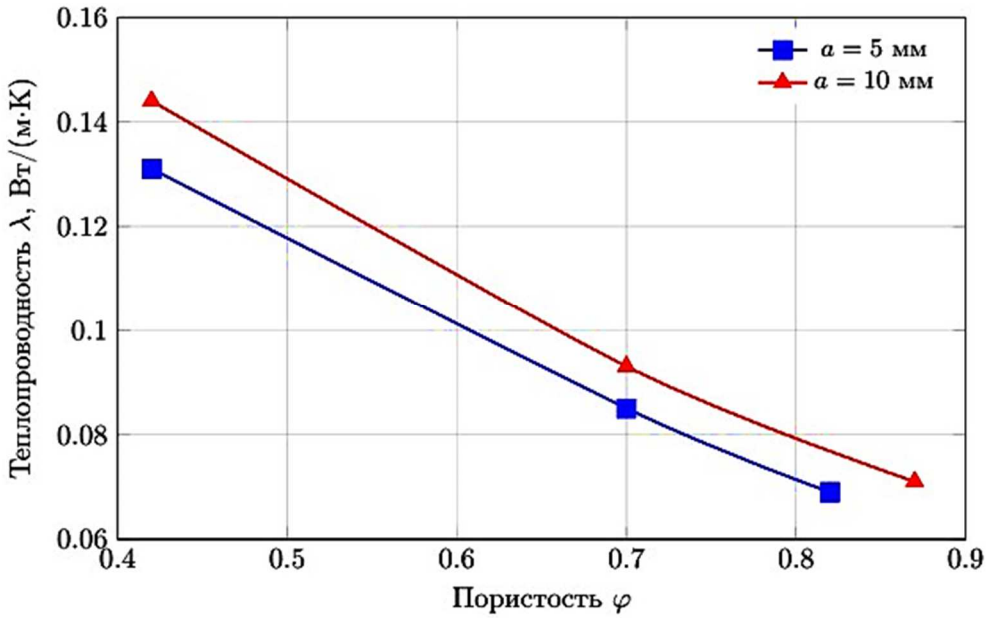

Рисунок 3 – Зависимость теплопроводности от пористости

Из рисунка 3 видно, что по результатам эксперимента с увеличением пористости материала коэффициент теплопроводности снижается. Однако при одной и той же пористости материала, образцы с большим размером ячейки демонстрируют увеличение теплопроводности до 10 %, что может быть вызвано влиянием конвекции. Для образцов с максимальной пористостью (φ = 0.873) значение λ составило 0.071 Вт м$^{-1}$·К$^{-1}$.

Заключение

В ходе экспериментального исследования было определено влияние пористости и структуры образцов на их теплопроводность. Также установлено, что увеличение размеров пор приводит к росту теплопроводности, что может быть вызвано влиянием конвекции. Полученные значения теплового потока для каждого образца позволяют количественно оценить термические характеристики материалов со структурой Gyroid. Однако

для полного понимания теплофизических свойств этих структур необходимы дальнейшие исследования влияния воздуха в межпоровом пространстве на теплоперенос конвекцией и излучением.

Литература

1. Rashidi S. Porous materials in building energy technologies – a review of the applications, modelling and experiments / S. Rashidi, J.A. Esfahani, N. Karimi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 91. – P. 229–247.
2. Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report) / J. Rouquerol [et al.] // Pure and applied chemistry. – 1994. – Vol. 66. – № 8. – P. 1739–1758.
3. Кудрявцев П.Г. Основные пути создания пористых композиционных материалов // Нанотехнологии в строительстве. – 2020. – Т. 12. – № 5. – С. 256–269.
4. Исследование свойств регулярных структур, полученных аддитивными технологиями в сочетании с методами порошковой металлургии / Ю.И. Гордеев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2023. – № 10(763). – С. 28–43.
5. Dynamics and heat transfer characteristics of isolated liquid film in spray cooling / X. Zhao [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2022. – Vol. 183. – P. 122037.
6. A thermoacoustic refrigerator with multiple-bypass expansion cooling configuration for natural gas liquefaction / X. Wang [et al.] // Applied Energy. – 2022. – Vol. 313. – P. 118780.
7. Jo J.G. Thermal radiation attenuation performance of fine water spray using twin-fluid nozzles with multiple holes / J.G. Jo, C.Y. Lee // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2023. – Vol. 37. – № 10. – P. 5431–5440.
8. 3D-печать и механические свойства полиамидных изделий с топологией «примитив Шварца» / С.В. Балабанов [и др.] // Журнал технической физики. – 2020. – Т. 90. – № 2. – С. 223–227.
9. Еремин А.В. Исследование теплопереноса в пористом материале на основе трижды периодических поверхностей минимальной энергии / А.В. Еремин, С.А. Зинина, О.Д. Олатуйи // Вестник Югорского государственного университета. – 2023. – № 1(68). – С. 60–66.
10. Thermo-hydraulic performance evaluation through experiment and simulation of additive manufactured Gyroid-structured heat exchanger / K. Yan [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2024. – Vol. 241. – P. 122–402.

References

1. Rashidi S. Porous materials in building energy technologies – a review of the applications, modelling and experiments / S. Rashidi, J.A. Esfahani, N. Karimi // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 91. – P. 229–247.
2. Recommendations for the characterization of porous solids (Technical Report) / J. Rouquerol [et al.] // Pure and applied chemistry. – 1994. – Vol. 66. – № 8. – P. 1739–1758.
3. Kudryavtsev P.G. The Main Ways of Creating Porous Composite Materials // Nanotechnology in Construction. – 2020. – Vol. 12. – № 5. – P. 256–269.
4. Research of the Properties of Regular Structures Obtained by Additive Technologies in Combination with Powder Metallurgy Methods / Yu.I. Gordeev [et al.] // Izvestiya of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering. – 2023. – № 10(763). – P. 28–43.
5. Dynamics and heat transfer characteristics of isolated liquid film in spray cooling / X. Zhao [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2022. – Vol. 183. – P. 122037.
6. A thermoacoustic refrigerator with multiple-bypass expansion cooling configuration for natural gas liquefaction / X. Wang [et al.] // Applied Energy. – 2022. – Vol. 313. – P. 118780.
7. Jo J.G. Thermal radiation attenuation performance of fine water spray using twin-fluid nozzles with multiple holes / J.G. Jo, C.Y. Lee // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2023. – Vol. 37. – № 10. – P. 5431–5440.
8. 3D printing and mechanical properties of polyamide products with a «Schwarz primitive» topology / S.V. Balabanov [et al.] // Journal of Technical Physics. – 2020. – Vol. 90. – № 2. – P. 223–227.
9. Eremin A.V. Investigation of heat transfer in a porous material based on three-periodic minimum-energy surfaces / A.V. Eremin, S.A. Zinina, O.D. Olatuyi // Bulletin of Yugra State University. – 2023. – № 1(68). – P. 60–66.
10. Thermo-hydraulic performance evaluation through experiment and simulation of additive manufactured Gyroid-structured heat exchanger / K. Yan [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2024. – Vol. 241. – P. 122–402.