



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала: <http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 536.2

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА СО СТАЛЬНОЙ РЕШЕТКОЙ НА ОСНОВЕ TPMS ТИПА SCHOEN'S GW И МАТРИЦЕЙ ИЗ КЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

**Брагин Д.М., <sup>1</sup>Зинина С.А., Попов А.И., Мустафин Р.М., Кечин Н.Н.**  
ФГБОУ ВО «САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,  
Самара, Россия, (443100, Самарская область, город Самара, Молодогвардейская ул., д.244 ),  
e-mail: <sup>1</sup>sofazinina4@gmail.com

В работе рассмотрен композиционный материал с стальной решеткой на основе TPMS типа Schoen's GW и матрицей из керамического материала. Результаты моделирования переноса тепла подтверждают анизотропность свойств рассмотренного композиционного материала. Определена зависимость эффективной теплопроводности от относительного объема стальной решетки TPMS при распространении тепла в направлении декартовых координат. Термическое сопротивление композиционного материала при переносе тепла в направлении OY и OX выше, что увеличивает плотность теплового потока по сравнению с переносом тепла в направлении OZ на 11-15%. Уравнение Максвелла демонстрирует усредненное значение теплопроводности без учета направления переноса тепла в композиционных материалах на основе TPMS. Результаты работы демонстрируют необходимость учета геометрических особенностей композита при проектировании тепловой защиты и изоляционных систем.

Ключевые слова: Теплоперенос, анизотропность, композиционный материал, Schoen's GW, Triply Periodic Minimal Surface.

## THERMAL CONDUCTIVITY OF A COMPOSITE MATERIAL WITH A STEEL LATTICE BASED ON TPMS OF SCHOEN'S GW TYPE AND A MATRIX MADE OF CERAMIC MATERIAL

**Bragin D.M., <sup>1</sup>Zinina S.A., Popov A.I., Mustafin R.M., Kuchin N.N.**  
SAMARA STATE TECHNICAL UNIVERSITY, Samara, Russia, (443100, Samara region, Samara,  
Molodogvardeyskaya str., 244 ), e-mail: <sup>1</sup>sofazinina4@gmail.com

The paper considers a composite material with a steel lattice based on TPMS of Schoen's GW type and a matrix made of ceramic material. The results of heat transfer modeling confirm the anisotropy of the properties of the considered composite material. The dependence of the effective thermal conductivity on the relative volume of the TPMS steel grating during heat propagation in the direction of the Cartesian coordinates is determined. The thermal resistance of the composite material during heat transfer in the OY and OX directions is higher, which increases the heat flux density compared to heat transfer in the OZ direction by 11-15%. The Maxwell equation demonstrates the average value of thermal conductivity without taking into account the direction of heat transfer in TPMS-based composite materials. The results of the work demonstrate the need to take into account the geometric features of the composite when designing thermal protection and insulation systems.

Keywords: Heat transfer, anotropy, composite material, schoen's gw, triply periodic minimal surface.

Многокомпонентные материалы, известные как композиционные материалы, применяются при изготовлении кузовных деталей автомобиля, строительных конструкциях, ветряных турбинах, корпусах электроники и т.д. [1]. Очевидно, применение сфер не

ограничивается автомобилестроением, строительством и энергетикой. Композиционные материалы продолжают находить все новые сферы применения благодаря возможности точного подбора их свойств под конкретные задачи и условия эксплуатации [2].

В ряде задач, связанных с переносом тепла, а в частности при проектировании тепловой защиты и изоляции систем, необходим точный подбор теплопроводности конструкции [3]. На данный момент существуют экспериментальные методы определения теплопроводности материалов, среди которых метод стационарного теплового потока, метод горячей нити, тепловизионный метод и другие [4,5]. Каждый из методов имеет свои особенности и ограничения, поэтому выбор конкретного метода зависит от типа материала, его структуры, толщины, а также от требуемой точности. Однако в случае, когда необходимо определить теплопроводность материала на стадии проектирования до изготовления композита применяются аналитические методы. На данный момент прогнозирование свойств теплопроводности конструкций доступно при помощи параллельной модели (1) и уравнения Максвелла (2).

$$\lambda_{||} = \lambda_1 \varepsilon_1 + \lambda_2 \varepsilon_2 \quad (1)$$

$$\lambda = \lambda_1 \frac{(2\lambda_1 + \lambda_2 - 2\varepsilon_1(\lambda_1 - \lambda_2))}{(2\lambda_1 + \lambda_2 + \varepsilon_1(\lambda_1 - \lambda_2))} \quad (2)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность композиционного материала, Вт м<sup>-1</sup> °С<sup>-1</sup>;  $\lambda_i$  – теплопроводность компонента композита, Вт м<sup>-1</sup> °С<sup>-1</sup>;  $\varepsilon$  – объемная доля компонента композита.

Использование параллельной модели демонстрирует максимальные значения теплопроводности при параллельном расположении элементов композита. При более сложной структуре используются уравнения Максвелла. Однако уравнения Максвелла могут быть использованы для композитов с изотропными свойствами. В композиционных материалах с сотовым сердечником свойства чаще всего анизотропны, а теплопроводность описывается тензором теплопроводности (3). В этом случае термическое сопротивление материала зависит от направления распространения тепла, что не учитывается в параллельной модели и уравнениях Максвелла.

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \lambda_{zx} & \lambda_{zy} & \lambda_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

В текущем исследовании представлен метод численного эксперимента, реализованного в программном комплексе Ansys, который позволяет определять теплопроводность анизотропного композиционного материала.

На рис. 1 представлена геометрическая модель сердечника композиционного материала. Комбинирование сердечников и последующее заполнения межпорового пространства (матрицы) позволяет получить композиционный материал требуемого масштаба. В качестве стального сердечника используется структура, основанная на TPMS (от англ. Triply Periodic Minimal Surface) типа Schoen's GW [6], а матрица композиционного материала заполнена керамикой.

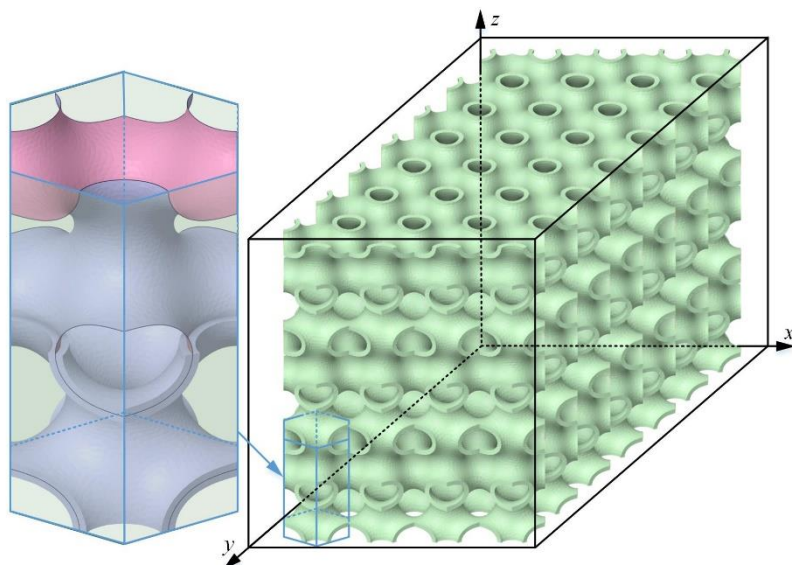


Рисунок 1. - Стальной сердечник композиционного материала, основанный на TPMS типа Schoen's GW

Таблица 1.- Геометрические размеры RVE объема

| № | Длина x, мм | Ширина z, мм | Высота y, мм | Относительный объем |        |
|---|-------------|--------------|--------------|---------------------|--------|
|   |             |              |              | Керамика            | Металл |
| 1 | 13,1        | 10,1         | 11,7         | 89%                 | 11%    |
| 2 | 13,1        | 10,1         | 11,7         | 93%                 | 7%     |
| 3 | 13,1        | 10,1         | 11,7         | 98%                 | 2%     |

Для исследования теплофизических свойств неоднородных материалов с упорядоченной структурой применяется метод репрезентативного элементарного объема (REV-метод – от англ. representative elementary volume) [7]. Согласно REV-методу, выбирается минимальный объем, воспроизводящий свойства исследуемой системы. В рамках исследования был определен объем RVE, свойства которого могут быть обобщены на весь объем композиционного материала. Размеры расчетных моделей RVE представлены на рисунке 2 и в таблице 1. Теплопроводящие свойства конструкции приняты постоянными и независимыми от температуры. Объемная доля решетки TPMS (сердечника композиционного материала) варьировалась от 2% до 11%.

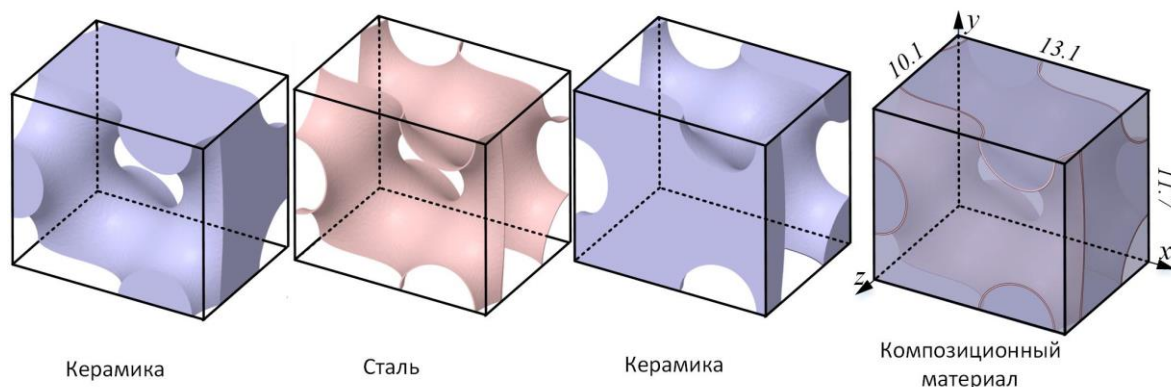


Рисунок 2. - Объем RVE композиционного материала с стальным сердечником и матрицей из керамики

Введем систему координат так, как показано на Рисунке 1 и Рисунке 2. Теплопроводящие свойства конструкции в направлении оси OX, OY, OZ могут отличаться из-за геометрических особенностей. Таким образом в работе рассматривается три модели переноса тепла в направлении оси OX, OY, OZ. Для исследования используется численный эксперимент методом стационарного теплового потока. На противоположных границах ячеек задаются температуры T1 (20°C) и T2 (50°C). После определения теплового потока, проходящего через структуру в установившемся режиме, определяется эффективная теплопроводность конструкции исходя из закона Фурье (4).

$$\begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \lambda_{zx} & \lambda_{zy} & \lambda_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \partial T / \partial x \\ \partial T / \partial y \\ \partial T / \partial z \end{pmatrix} \quad (4)$$

Результаты моделирования переноса тепла подтверждают анизотропность свойств рассмотренного композиционного материала. Основные результаты представлены на Рисунке 3.

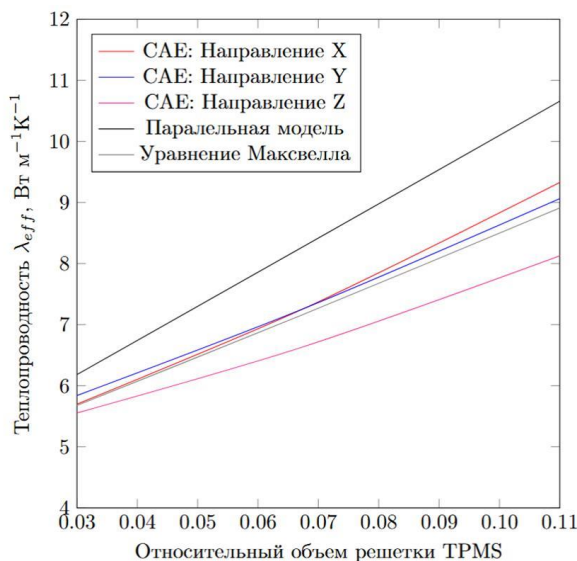


Рисунок 3. - Зависимость теплопроводности композиционного материала от относительного объема стального сердечника полученная в ходе САЕ моделирования, Параллельной модели и уравнения Максвелла.

При увеличении относительного объема стальной решетки эффективная теплопроводность композиционного материала возрастает почти линейно во всех направлениях. Это связано с тем, что добавление стали с высокой теплопроводностью в композиционный материал улучшает общие теплофизические свойства системы.

Теплопроводность в направлении осей OX, OY и OZ имеет различные значения, что подтверждает наличие анизотропии в структуре. Исходя из зависимости эффективной теплопроводности от относительного объема решетки TPMS в направлении оси OZ наблюдается минимумы теплопроводности. Термическое сопротивление композиционного материала при переносе тепла в направлении OX и OY значительно ниже, что увеличивает плотность теплового потока в этих направлениях на 11-15%. Параллельная модель ожидаемо демонстрирует верхнюю границу для теплопроводности, поскольку она предполагает идеальный случай, при котором теплопроводность компонента распределяется параллельно по всему объему материала. Эта модель дает наибольшие значения теплопроводности, так как игнорирует сопротивление на границах между компонентами. Модель Максвелла для изотропных материалов демонстрирует усредненное значение теплопроводности без учета направления переноса тепла. Модель Максвелла может использоваться для определения усредненной теплопроводности по различным направлениям, однако при необходимости более точного понимания свойств могут применяться численные или натурные эксперименты.

Для использования композитов, основанных на сердечнике Schoen's GW, важно учитывать направление теплового потока и структурную анизотропию материала. Выбор ориентации композита существенно влияет на эффективность теплопередачи, что может быть использовано при оптимизации термических характеристик конструкции.

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

*The study was funded by a grant from the Russian Science Foundation No 23-79-10044, <https://rscf.ru/project/23-79-10044/>*

## Список литературы

1. Khan F. et al. Advances of composite materials in automobile applications—A review //Journal of Engineering Research. – 2024.
2. Ozturk F., Cobanoglu M., Ece R. E. Recent advancements in thermoplastic composite materials in aerospace industry //Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2024. – Т. 37. – №. 9. – С. 3084-3116.
3. Huang C. et al. Enhanced tough recyclable hemiaminal dynamic covalent network with boron nitride composites material with high thermal conductivity at low filler content //Journal of Cleaner Production. – 2024. – Т. 448. – С. 141657.
4. Федоров А. А., Кораблев В. А., Федоров А. В., Ковальский И. С., Волков С. М., Андреева А. Метод нагреваемой нити для измерения теплопроводности вязких жидкостей // Вестник Международной академии холода. 2022. № 3. С. 66–73.
5. Корнилов Т. А., Эверстова В. Н. Оценка теплозащитных свойств наружных стен из полистиролбетонных блоков каркасно-монолитного здания //Academia. Архитектура и строительство. – 2024. – №. 3. – С. 137-144.
6. Chen D. et al. Interface structure of the dark conglomerate liquid crystal phase //Soft Matter. – 2011. – Т. 7. – №. 5. – С. 1879-1883.
7. Kanit T. et al. Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach //International Journal of solids and structures. – 2003. – Т. 40. – №. 13-14. – С. 3647-3679.

## References

1. . Khan F. et al. Advances of composite materials in automobile applications—A review //Journal of Engineering Research. – 2024.
2. Ozturk F., Cobanoglu M., Ece R. E. Recent advancements in thermoplastic composite materials in aerospace industry //Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2024. – Т. 37. – №. 9. – pp. 3084-3116.
3. Huang C. et al. Enhanced tough recyclable hemiaminal dynamic covalent network with boron nitride composites material with high thermal conductivity at low filler content //Journal of Cleaner Production. – 2024. – Т. 448. – pp.141657.
4. Fedorov A. A., Korablev V. A., Fedorov A. V., Koval'skiy I. S., Volkov S. M., Andre-eva A. Metod nagrevaemoj niti dlya izmereniya teploprovodnosti vyazkix zhidkostej // Vestnik Mezhdunarodnoj akademii xoloda. 2022. № 3. pp. 66–73.
5. Kornilov T. A., E`verstova V. N. Ocenka teplozashhitny`x svojstv naruzhny`x sten iz polistirolbetonny`x blokov karkasno-monolitnogo zdaniya //Academia. Arxitektura i stroitel`stvo. – 2024. – №. 3. – pp. 137-144.
6. Chen D. et al. Interface structure of the dark conglomerate liquid crystal phase //Soft Matter. – 2011. – Т. 7. – №. 5. – pp. 1879-1883.

Теплопроводность композиционного материала со стальной решеткой на основе TPMS типа SCHOEN'S GW и матрицей из керамического материала / Брагин Д.М., Зинина С.А., Попов А.И. и др. // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2024. – Т. 9 № 12(50) с. 144–150

---

7. Kanit T. et al. Determination of the size of the representative volume element for random composites: statistical and numerical approach //International Journal of solids and structures. – 2003. – Т. 40. – №. 13-14. – pp. 3647-3679.
-