

**МУЛЬТИФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПОРИСТЫХ МЕТАМАТЕРИАЛАХ И НА МЕТАПОВЕРХНОСТЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ**

**RADIANT HEAT TRANSFER IN THE POROUS METAMATERIALS AND AT THE METASURFACES OBTAINED BY THE SELECTIVE LASER FUSION: MULTIPHYSICS SIMULATION APPROACH**

**А.С.Борейшо<sup>1</sup>, А.А.Моисеев<sup>1</sup>, С.Б.Нестеров<sup>2</sup>, А.В.Савин<sup>1</sup>, П.Г.Смирнов<sup>3</sup>, С.С.Смоленцев<sup>1</sup>, А.А. Филатов<sup>4</sup>**

**A.S.Boreyshaw, A.A. Moiseev, S.B.Nesterov, A.V.Savin, P.G.Smirnov, A.A.Smolentsev, A.A. Filatov**

<sup>1</sup>БГТУ «Военмех», г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup>РНТВО им. академика С.А.Векшинского, г. Москва

<sup>3</sup>АО «Лазерные Системы», г. Санкт-Петербург

<sup>4</sup>ООО «НПО Гелиосфера», г. Санкт-Петербург

*В настоящей работе исследуется лучистый теплообмен для одного из видов метаматериалов, имеющего микрогеометрию типа героида. Эта структура имеет простое аналитическое описание [5] и может быть выращена методом селективного лазерного сплавления. Исследованы особенности лучистого теплообмена в массиве с героидной микроструктурой. Показано, что применение метаматериала героидного типа в теплообменных устройствах открывает широкие возможности управления теплообменом. Обнаружено, что излучательная способность поверхности такого метаматериала может быть значительно выше, чем излучательная способность поверхности исходного металла.*

*In this work, we investigate radiant heat transfer for one of the types of metamaterials with a gyroid-type microgeometry. This structure has a simple analytical description and can be grown by selective laser fusion. The features of radiant heat transfer in a massif with a gyroid microstructure are investigated. It is shown that the use of a metamaterial of the gyroid type in heat exchange devices opens up wide possibilities for controlling heat transfer. It has been found that the emissivity of the gyroid microstructure surface can be much higher than the emissivity of the parent metal surface.*

**Ключевые слова:** *Селективное лазерное сплавление, метаматериалы, радиационный теплообмен, излучательная способность.*

**Key words:** *selective laser fusion, metamaterials, radiative heat transfer, emissivity.*

Метаматериалы, то есть такие материалы, свойства которых в большей степени определяются не свойствами самого материала на молекулярном уровне масштабов, а геометрией на микро- и нано-уровне, в настоящее время интенсивно исследуются. Установлено, например, что механические свойства (прочность, ударная вязкость) металлических метаматериалов могут быть значительно выше, чем у сплошных металлов [1, 2]. Микро- и нано-структурированные поверхности по аналогии можно назвать метаповерхностями. Аддитивные технологии, особенно – селективное лазерное сплавление металлических порошков [3], открывают новые возможности создания металлических метаматериалов и метаповерхностей с произвольной геометрией. Это в принципе позволяет программировать свойства изделий и объектов.

## **ОСОБЕННОСТИ ВЫРАЩИВАНИЯ ГЕРОИДНОЙ СТРУКТУРЫ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ**

Вообще говоря, изделия, поверхности которых имеют отрицательные углы наклона к плоскости горизонта, могут быть выращены на SLM-машинах только со специальными поддержками. При этом макроскопический характер масштаба соответствующих элементов изделия определяется его отношением к характерному размеру частиц порошка. Опыт показывает, что, если это отношение не превышает  $\sim 102$ , то существуют варианты стратегии выращивания, которые позволяют получить качественные структуры героидного типа без поддержек. В абсолютных единицах для металлического порошка с размером частиц 40 мкм это соответствует масштабу структуры в единицы миллиметров. На рис. 1 приведены фото образцов героидной структуры с характерными масштабами от 0.5 до 5 мм, выращенных на SLM-машине M250 [3] из стали AISI-316.

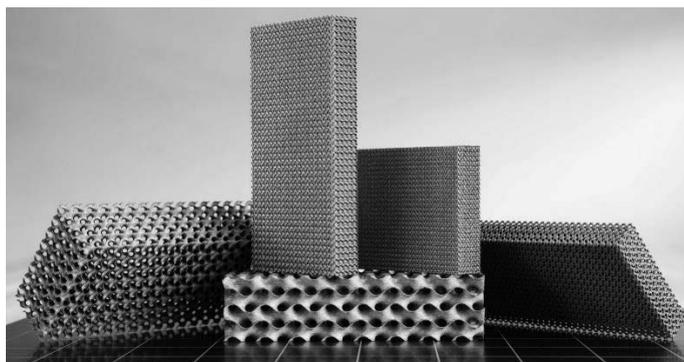


Рис. 1. Героидные структуры с характерными масштабами от 0.5 до 5 мм, выращенные из нержавеющей стали AISI-316.

## **ЛУЧИСТАЯ ТЕПЛОТДАЧА ОТ ПОВЕРХНОСТИ ГЕРОИДНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА В ОКРУЖАЮЩЕЕ ПРОСТРАНСТВО**

Из-за того, что пористый материал имеет большую удельную поверхность, лучистая теплоотдача от его поверхности должна быть больше, чем от соответствующей плоской поверхности. Для количественного исследования этого вопроса использовались те же фрагменты героидной структуры (рис. 1, 2). В основе методики – аналогия между процессами излучения и поглощения, поэтому исследование проводилось двумя методами.

В первом подходе каждая ячейка поверхностной сетки излучает как диффузная ламбертовская поверхность. Энергия излучения определяется законом Стефана-Больцмана и коэффициентом излучательной способности поверхности. Падающие на поверхность лучи частично поглощаются, при этом коэффициент поглощения равен излучательной способности. Оставшаяся непоглощенной часть энергии рассеивается диффузно по закону Ламберта. Поверхность тела имеет фиксированную температуру  $T_w = 300\text{K}$ . Ее излучательная способность варьируется от 0.2 до 1. Входная и выходная поверхности расчетной области (рис. 2) имеют фиксированные температуры 300K и  $T_{inf} = 4\text{K}$  соответственно, их излучательная способность равна 1. Дискретизация производится с использованием метода дискретных ординат (DO, [2]). Вычисления осуществляются в среде CFD-пакета Ansys Fluent 16.2. Свободный от твердого тела объем расчетной области заполнен газом с теплопроводностью 10-15 Вт/м/К и давлением 10 Па. По результатам моделирования вычисляется суммарный тепловой поток с поверхности героидного тела и его распределение по глубине структуры. За счет большой удельной поверхности пористой структуры излучается больше энергии, чем с эквивалентной плоской поверхности. Вводится понятие эффективной излучательной способности.

Во втором подходе используется метод трассировки лучей. Исследуется рассеивание и поглощение излучения, падающего на поверхность от внешнего источника. Коэффициент отражения варьируется от 0 до 1. Отражение полагается диффузным. За счет

многократных отражений доля поглощенного излучения должна быть больше, чем поглощение при однократном отражении. Таким образом можно ввести понятие эффективного коэффициента поглощения. Вычисления проводятся в среде пакета Comsol. Контролируется распределение поглощенной энергии по глубине структуры.

Сопоставление результатов двух описанных подходов позволяет верифицировать результаты моделирования.

На рис. 2 показано распределение величины результирующего теплового потока по поверхности героидной структуры. В глубине пористой структуры, вдали от ее границы, суммарный поток стремится к нулю, так как излучение в порах находится в равновесии с поверхностью. Вблизи границы пористого тела, обращенной к холодной стороне, тепловой поток с поверхности положительный. Относительная эффективная излучающая поверхность определяется следующим образом:

$$s(z) \equiv \frac{\int_0^z dz \int q(x, y, z) ds}{\sigma \varepsilon (T_w^4 - T_{inf}^4) F}$$

где  $x, y, z$  – координаты (см. рис. 7),  $ds$  – элемент длины контура тела в сечении  $z = const$ ,  $q(x, y, z)$  – суммарный тепловой поток в точке поверхности,  $\varepsilon$  – излучательная способность,  $F$  – площадь поперечного сечения выделенного элемента героидной структуры. Здесь в числителе – тепловая мощность, излучаемая слоем героидной структуры толщиной  $z$ , в знаменателе – мощность, излучаемая соответствующим участком плоской поверхности. При этом тепловой поток, излучаемый торцевой поверхностью, из интегрирования исключается. На рис. 3 приведены зависимости относительной излучаемой мощности  $s/s_\infty$  от безразмерной глубины  $\bar{z}/\Delta\bar{z}$ ;  $\bar{z} = z/H$  ( $H$  – шаг структуры,  $\Delta\bar{z}$  – характерная глубина). Вычисления приведены для структуры длиной 5 периодов.

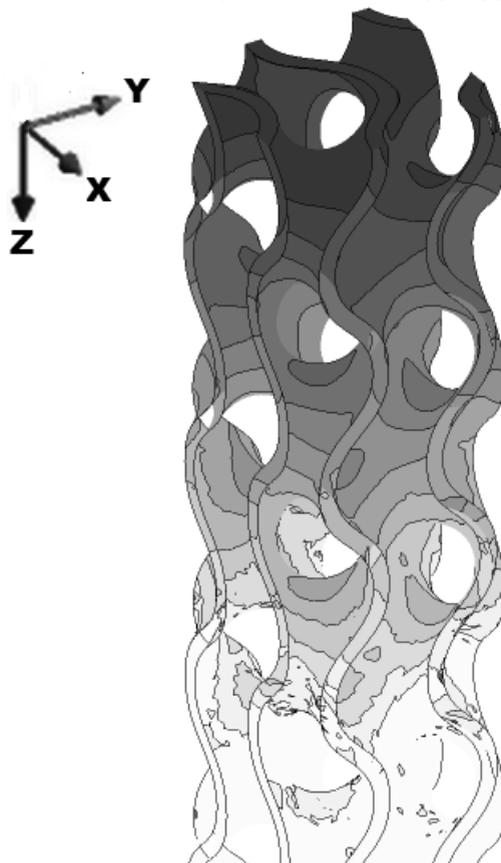


Рис. 2. Распределение теплового потока по поверхности героидной структуры ( $\varepsilon=0.2$ ).

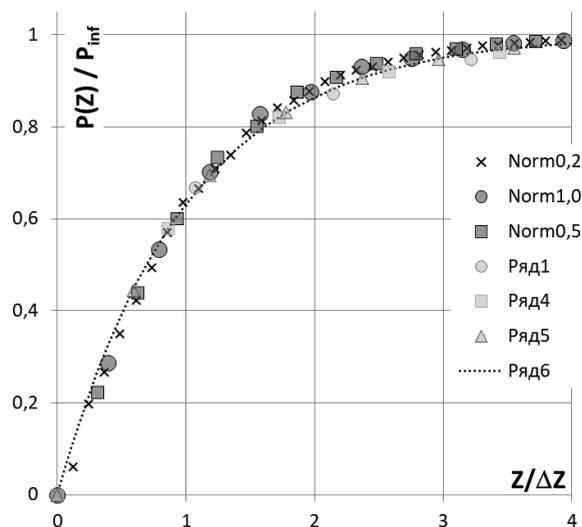


Рис. 3. Зависимость относительной излучаемой мощности от глубины: 1, 2, 3 – степень черноты  $\epsilon=1, 0.5, 0.2$ ; зависимости поглощаемой мощности от глубины: 4, 5, 6 -  $\epsilon=1, 0.5, 0.2$ ; линиями показана аппроксимация (%%).

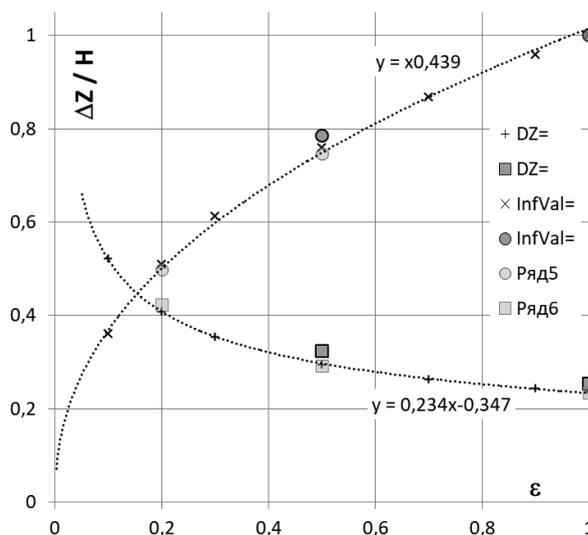


Рис. 4. Зависимость полной безразмерной излучаемой / поглощаемой мощности от степени черноты поверхности, 1-3:  $\epsilon=1, 0.5, 0.2$ ; 4-6: зависимость относительной характерной глубины от степени черноты.

При увеличении степени черноты увеличивается протяженность зоны неравновесного излучения и растет эффективная излучающая поверхность. Так, для  $\epsilon=0.2$  протяженность излучающей зоны – порядка периода структуры, эффективная излучающая поверхность в  $\sim 2$  раза превышает площадь поперечного сечения метаматериала. Зависимость  $s(z)$ , определенная по численному решению, аппроксимируется выражением:

$$s(z) \approx s_{\infty} \left( 1 - \exp\left(-\frac{\bar{z}}{\bar{\Delta z}}\right) \right)$$

где  $\bar{z} = z/H$  – безразмерная координата в направлении по нормали к поверхности структуры,  $\bar{\Delta z}$  – относительная глубина проникновения,  $s_{\infty}$  – эффективная относительная излучающая поверхность. На рис. 8 показана обобщенная зависимость для любой степени

черноты. Видно, что аппроксимация (%%) хорошо работает в широком диапазоне параметров, при этом  $s_\infty$  и  $\overline{\Delta z}$  – функции  $\varepsilon$ , приведенные на рис. 4.

На рис. 3 и 4 приведены результаты моделирования поглощения диффузного излучения героидной структурой. Видно, что закономерности, характерные для теплового излучения, полностью повторяются и для поглощения. Таким образом осуществляется верификация метода вычислений и конкретной вычислительной процедуры.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Героидные структуры [1, 4], имеющие большую удельную поверхность, малую плотность, большую жесткость и прочность, перспективны как конструкционные метаматериалы для применения в различных теплофизических устройствах. В настоящей работе исследуется лучистый теплообмен в таких структурах. Моделирование радиационного теплообмена позволило найти аппроксимацию для эффективной относительной излучающей поверхности. Показано, что героидная микроструктура метаповерхности позволяет существенно увеличить лучистую теплоотдачу, особенно для материалов с малой излучательной способностью.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. А.В. Савин, П.Г. Смирнов. Полуаналитическое описание микроструктуры метаматериала типа «героид». Математическое моделирование, 2020.
2. M.F.Modest., Radiative heat transfer. Second Edition. Academic Press. 2003
3. Фотоника, т.12, № 6 (74), 2018, с. 542-548, DOI: 10.22184/1993-7296.2018.12.6.542.548
4. A.H. Schoen. INFINITE PERIODIC MINIMAL SURFACES WITHOUT SELF-INTERSECTIONS. NASA TN D-5541, 1970, 92 pp.