

## УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ ПОЛЯМИ ПРИ ИСКРОВОМ ПЛАЗМЕННОМ СПЕКАНИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИКОВ

Булат Л.П.<sup>1</sup>, Драбкин И.А.<sup>2</sup>, Новотельнова А.В.<sup>1</sup>, Освенский В.Б.<sup>2</sup>,  
Пшеная-Северин Д.А.<sup>3</sup>, Сорокин А.И.<sup>2</sup>, Тукмакова А.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, Санкт Петербург, <sup>2</sup>ОАО ГИРЕДМЕТ, Москва,  
<sup>3</sup>Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе  
E-mail: novotelnova@yandex.ru

Изготовление термоэлектрических материалов, функциональные свойства которых систематически изменяются по объему образца, представляет собой сложную технологическую задачу [1]. Одним из путей решения этой задачи является искровое плазменное спекание нанопорошков (Spark Plasma Sintering – SPS) [2]. В настоящей работе рассматривается возможный способ изменения в процессе спекания температурного поля в образце на основе твердого раствора теллурида висмута.

С этой целью может быть переработана конструкция графитовой матрицы пресс-формы, используемой в рабочей камере SPS-установки типа SPS-511S (Япония). Данная установка состоит из вакуумной камеры с охлаждаемыми водой стальными стенками, внутри которой находится пресс-форма, закрепленная графитовыми вставкам между охлаждаемыми электродами (рис.1).

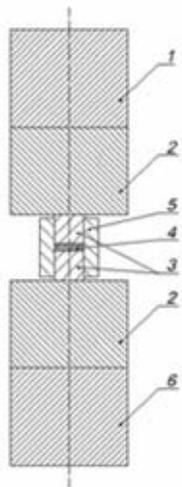


Рис. 1. Схематическая модель установки SPS с цилиндрической матрицей пресс-формы: 1 – верхний охлаждаемый электрод ( $d=80$  мм,  $h=60$  мм); 2 – графитовые вставки ( $d=80$ мм,  $h=60$ мм); 3 – верхний и нижний графитовые пуансоны ( $d=20$ мм,  $h=20$ мм); 4 – образец ( $d=20$ мм,  $h=5$ мм); 5 – матрица пресс-формы ( $d_{int}=40$  мм,  $d_{ext}=20$ мм,  $h=40$ мм); 6 – нижний охлаждаемый электрод ( $d=80$ мм,  $h=30$ мм)

Для исследования влияния геометрии графитовой матрицы пресс-формы выполнялось компьютерное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

Основные уравнения задачи включают уравнение сохранения электрического заряда и уравнение баланса энергии

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{j} &= 0, \\ c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{q} + \mathbf{j} \nabla \varphi &= 0, \end{aligned}$$

где плотности тока  $\mathbf{j}$  и теплоты  $\mathbf{q}$  определяются градиентами электрического потенциала и температуры соответственно

$$\mathbf{j} = -\sigma \nabla \varphi, \quad \mathbf{q} = -\kappa \nabla T.$$

Здесь  $\sigma$  и  $\kappa$  – коэффициенты электропроводности и теплопроводности,  $c_p$  – удельная теплоемкость,  $\rho$  – плотность материала.

Тепловые граничные условия задавались из следующих соображений: от боковых поверхностей происходит радиационный отвод тепла,

$$-\mathbf{n}(-\kappa \nabla T) = \varepsilon \sigma_{SB} (T_{amb}^4 - T_0^4),$$

$\varepsilon$  – коэффициенты излучения поверхности для графита и стали, равные 0.75 и 0.657,  $\sigma_{SB}=5.670 \cdot 10^{-8} \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$  – постоянная Стефана Больцмана,  $T_{amb}$  – температура окружающей среды, которая принималась равной 300 К.

Верхняя поверхность верхнего охлаждаемого электрода и нижняя поверхность нижнего электрода подвергаются водяному охлаждению, для описания которого использовалось уравнение:

$$\mathbf{n}(\kappa \nabla T) = h \cdot (T_{ext} - T),$$

где  $h$  – коэффициент теплоотдачи; его значение принималось равным 370 Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ).

Модель учитывает протекание через пресс-форму и образец электрического тока. Для SPS процесса используется импульсный постоянный ток, длительность импульса составляет 3.3 мс, скважность 2.2. За пакетом из 12 импульсов следует 2 периода отключения тока [3,4]. В установившемся режиме максимальную температуру образца можно

найти, решая стационарную задачу. В качестве граничных условий при моделировании на верхней границе стального охлаждаемого электрода задавалась нормальная плотность постоянного тока  $J=1,6 \cdot 10^5$  А/м<sup>2</sup>. На нижней границе нижнего охлаждаемого электрода был задан нулевой потенциал. Боковые поверхности принимались электроизолированными.

Верхний и нижний охлаждаемые электроды выполнены из стали NIST; пуансон, матрица пресс-формы и вставка – из графита МПГ-8. При расчетах учитывались температурные зависимости электро- и теплопроводности для графита и стали. Методика изложена в [5, 6].

В работе [6] было установлено, что появлению осевого градиента температуры в процессе спекания способствует электрический контакт матрицы пресс-формы с нижней графитовой вставкой, поэтому и здесь считаем, что это условие выполнено.

Используемая для SPS матрица пресс-формы, как правило, имеет цилиндрическую форму (дет 5, рис.1). Здесь же анализируется влияние на температурное поле внутри спекаемого образца замены цилиндрической конструкции матрицы пресс-формы на матрицу «гофрированной» вида, т.е. цилиндрическую матрицу, основание которой увеличено введением ступеньки высотой  $h_s$  (рис.2). Диаметр верхней цилиндрической части составлял 40 мм. Основание данной матрицы принималось равным 80 мм. Высота  $h_s$  варьировала от 0 (цилиндрическая матрица) до 25 мм.

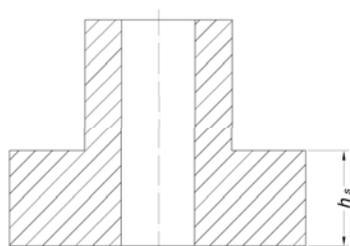


Рис. 2. Схематическая модель «гофрированной» матрицы.

Распределение температуры по толщине образца, рассчитанное вдоль осевой линии, приведено на рис. 3. Нулевому значению координаты  $z$  на графике соответствует нижняя граница образца.

Видно, что видоизменение геометрической формы матрицы-пресс-формы приводит к понижению температуры спекаемого образца и увеличению осевого градиента температуры (рис. 4).

Наибольшие значения градиента температуры имеют место в том случае, когда верхняя граница ступенчатого уширения совпадает или находится несколько ниже положения нижней границы образца (рис.5).

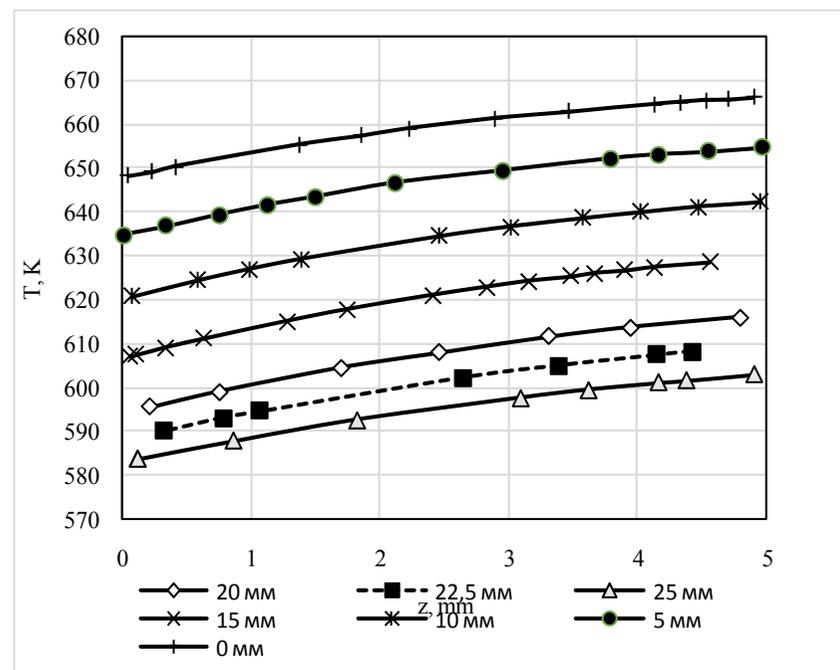


Рис. 3. Распределение температуры по толщине образца

Таким образом, установлено, что модификация конструкции матрицы пресс-формы установки обеспечивает возникновение осевого градиента температуры в образце. Данное обстоятельство позволяет целенаправленно модифицировать температурное поле для получения функционально градиентных материалов для термоэлектрических применений.

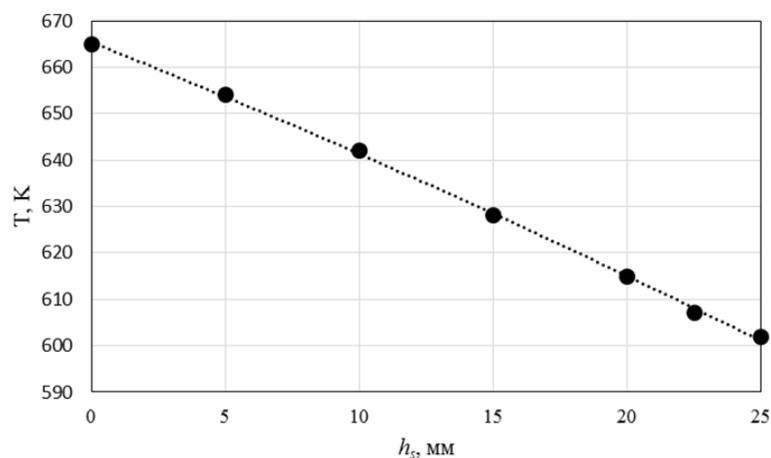


Рис. 4. Зависимость максимального значения температуры в образце при спекании от высоты  $h_s$

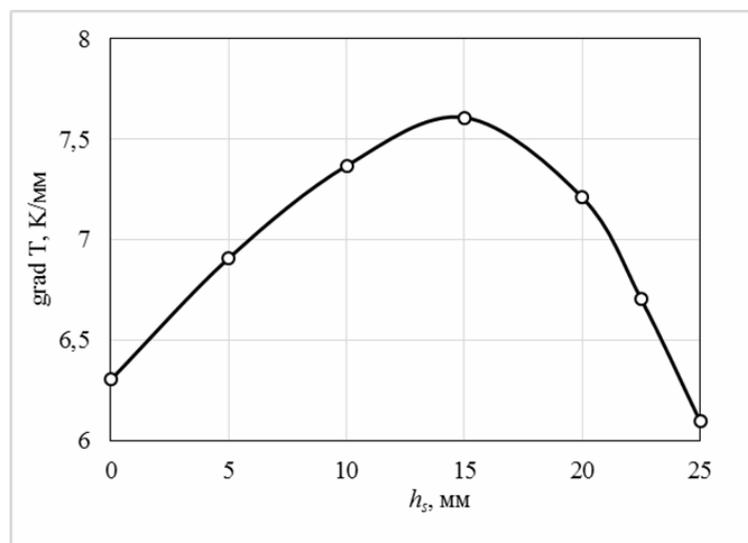


Рис. 5. Зависимость градиента температуры в образце при спекании от высоты  $h_s$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Л.И.Анатычук, Л.Н.Вихор. Функционально градиентные термоэлектрические материалы. Институт термоэлектричества, 2012, Украина. 180 с.
2. Bulat L.P., Drabkin I.A., Karatayev V.V., Osvenskii V.B, Parkhomenko Yu.N., Lavrentev M.G., Sorokin A.I., Pshenai-Severin D.A., Blank V.D., Pivovarov G.I., Bublik V.T., Tabachkova N.Yu. // Journal of Electronic Materials. – 2013. – V. 42. – № 7. – P.2110-2113.
3. Бублик В., Драбкин И., Каратаев В., Лаврентьев М., Освенский В., Булат Л.П., Пивоваров Г., Сорокин А., Табачкова Н. / Термоэлектрики и их применения. – СПб: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 2013. - С. 23-28.
4. Bulat L.P., Drabkin I.A., Karatayev V.V., Osvenskii V.B, Parkhomenko Yu.N., Pshenai-Severin D.A., Sorokin A.I. // Journal of Electronic Materials. – 2014. – V. 43. – № 6. – P.2121-2126
5. Булат Л.П., Новотельнова А.В., Нефедова И.А., Пшенай-Северин Д.А., Гуревич Ю.Г. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – СПб, 2014. - Вып. 93. - № 5. - С. 38-45.
6. Булат Л.П., Драбкин И.А., Новотельнова А.В., Освенский В.Б., Пархоменко Ю.Н., Пшенай-Северин Д.А., Сорокин А.И., Нефедова И.А. Письма ЖТФ, 2014. - Т. 40. - № 21. - С. 79-87.