

### ДИНАМИКА ПРОЦЕССА СОЗДАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИКОВ В ИМПУЛЬСНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

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>3,4</sup>, Сорокин А.И.<sup>2</sup>, Опря К.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Университет ИТМО, <sup>2</sup> ОАО ГИРЕДМЕТ, <sup>3</sup> Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, <sup>4</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет  
E-mail: novotelnova@yandex.ru

Объемные образцы термоэлектриков с высокими значениями добротности могут быть получены путем создания микро- или нанопорошков механоактивационным способом с их последующим искровым плазменным спеканием (Spark Plasma Sintering – SPS). Однако получение образцов с прогнозируемыми свойствами невозможно без понимания физической картины происходящих при этом процессов. В настоящей работе анализируется динамика SPS-спекания на примере твердого раствора на основе теллурида висмута.

Схематическая модель установки SPS-спекания типа SPS-511S (Япония) представлена на рис. 1.

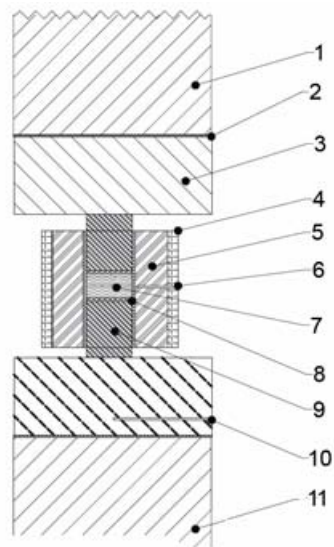


Рис. 1. Конфигурация установки искрового плазменного спекания  
1 – верхний охлаждаемый электрод ( $d=80$  мм,  $h=60$  мм); 2, 8- графитовые прокладки; 3 – графитовые вставки ( $d=80$  мм,  $h=60$  мм); 4- графитовый войлок; 5 – матрица пресс-формы ( $d_{int}=40$  мм,  $d_{ext}=20$  мм,  $h=40$  мм; 6 - «Канал 1»; 7 – образец ( $d=20$  мм,  $h=5$  мм); 9 – верхний и нижний графитовые пуансоны ( $d=20$  мм,  $h=20$  мм); 10 - «Канал 2»; 11 – нижний охлаждаемый электрод ( $d=80$  мм,  $h=30$  мм)

В процессе SPS-спекания через верхний и нижний водоохлаждаемые электроды пропускается импульсный ток. Длительность импульса составляет 3.3 мс, скважность 2.2. За пакетом из 12 импульсов следует 2 периода отключения тока. Амплитуда импульсов изменяется в процессе спекания, благодаря чему происходит изменение эффективной плотности тока (рис.2). За величину тока спекания принимается значение, соответствующее выходу временной зависимости тока на плато. Джоулево тепло производит нагрев образца до температур, при которых начинается спекание наночастиц.

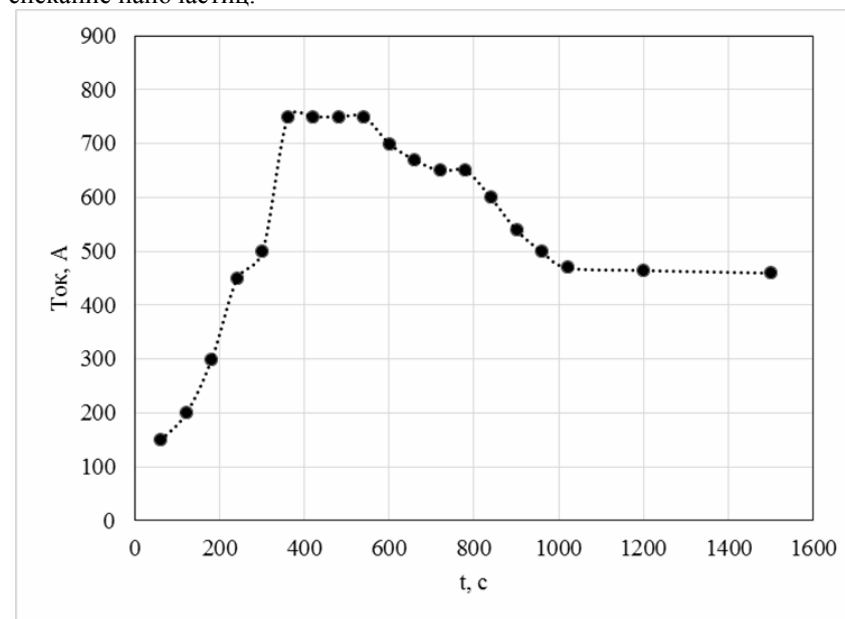


Рис. 2. Экспериментальные временные зависимости эффективного тока в процессе спекания нанопорошка теллурида висмута.

В установке в каналах 1 и 2 располагаются термопары Т1 и Т2, с помощью которых во время эксперимента контролировалось распределение температуры внутри установки.

Моделирование процесса спекания выполнялось методом конечных элементов в программном комплексе COMSOL Multiphysics [1,2]. В качестве граничных условий были использованы конвективный

теплообмен верхнего и нижнего электродов и излучение по закону Стефана-Больцмана. На верхнем электроде задавалась нормальная временная плотность тока, обеспечивающая протекание через установку тока в соответствии с зависимостью на рис.2. На нижнем электроде задавался потенциал равный нулю.

Были учтены температурные зависимости электро- и теплопроводности теллурида висмута, а также материалов, из которых изготовлены элементы установки. При задании свойств графитовых деталей были приняты во внимание изменения теплофизических свойств графита при эксплуатации его в составе электропечей [3].

Использованная модель включает систему дифференциальных уравнений, описывающих распределение электрического потенциала  $\varphi$  и температуры  $T$ . Плотности потоков заряда  $\mathbf{j}$  и тепла  $\mathbf{q}$  определяются законами Ома и Фурье

$$\mathbf{j} = -\sigma \nabla \varphi, \quad \mathbf{q} = -\kappa \nabla T, \quad (1)$$

где  $\sigma$  и  $\kappa$  – соответственно коэффициенты электро- и теплопроводности.

Законы сохранения заряда и энергии имеют вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{j} &= 0 \\ c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{q} + \mathbf{j} \nabla \varphi &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$\rho$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении и плотность материала. В уравнении (2) учтен разогрев джоулевым теплом.

Результаты измерения температур с помощью термопар T1 и T2 и полученные путем моделирования в COMSOL Multiphysics температурные поля хорошо согласуются (рис.3).

Анализировалось изменение температуры в образце теллурида висмута в процессе спекания. Радиальное распределение температуры рассчитывалось в поперечном сечении в центре образца (рис.4). Нулю на графиках соответствует точка геометрического центра образца. Из приведенных зависимостей следует, что в процессе спекания во всех временных сечениях температура в образце распределяется практически равномерно.

На рис. 5 приведено распределение плотности тока в поперечном сечении образца и графитовой матрицы. Видно, распределение плотности тока неоднородно по площади сечения и это распределение изменяется во времени.

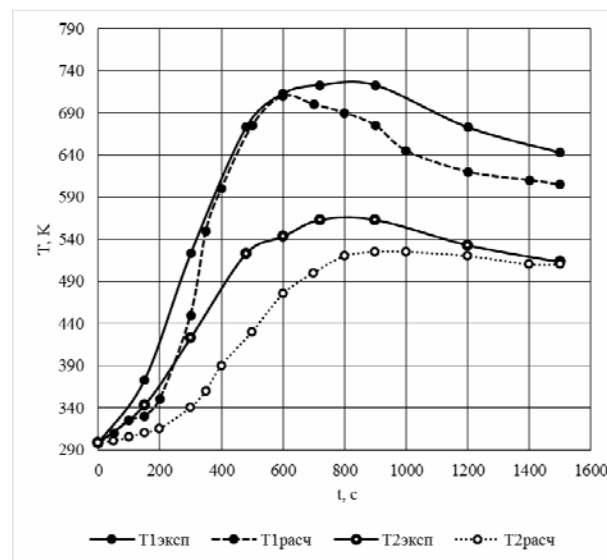


Рис. 3. Временные зависимости температуры, измеряемые термопарами T1 и T2 экспериментально и определенные с помощью модели.

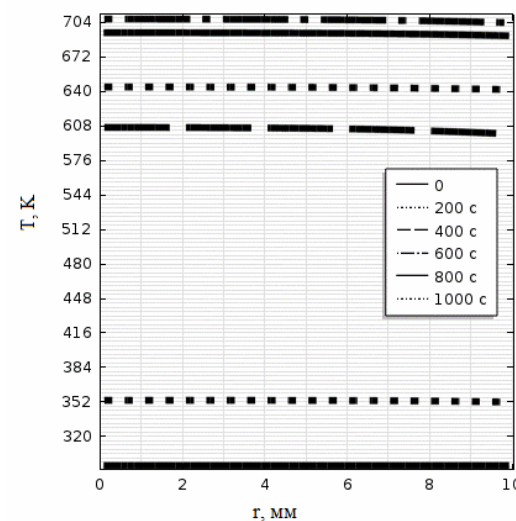


Рис.4. Радиальное распределение температуры в поперечном сечении образца

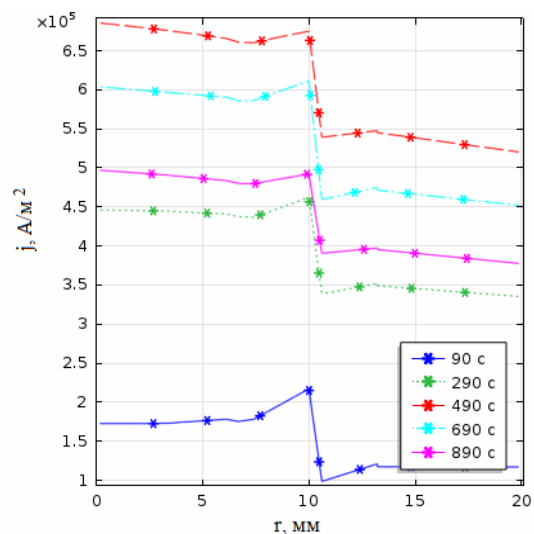


Рис.5. Распределение плотности тока в образце и графитовой матрице для различных промежутков времени

Наличие неоднородности распределения тока во время спекания может приводить к появлению пространственной неоднородностей структуры и термоэлектрических свойств в образце.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Булат Л.П., Новотельнова А.В., Нефедова И.А., Пшеннай-Северин Д.А., Гуревич Ю.Г. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – СПб, 2014. - Вып. 93. - № 5. - С. 38-45.
2. Булат Л.П., Драбкин И.А., Новотельнова А.В., Освенский В.Б., Пархоменко Ю.Н., Пшеннай-Северин Д.А., Сорокин А.И., Нефедова И.А. Письма ЖТФ. - Санкт-Петербург, 2014. - Т. 40. - № 21. - С. 79-87.
3. А.Н. Кулик, А.Н. Бугай, Ю.В. Рогульский, О.Б. Лысенко // Вісник Сумського державного університету. Серія Фізика, математика, механіка. - 2004. - №10(69). - С. 96-101