

УДК 621.362; 621.315.562

ТЕПЛОВЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ ПРИ ИСКРОВОМ ПЛАЗМЕННОМ  
СПЕКАНИИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВЛ.П. Булат<sup>а</sup>, Д.А. Пшенай-Северин<sup>а, б</sup>, И.А. Нефедова<sup>а</sup>, А.В. Новотельнова<sup>а</sup>, Ю.Г. Гуревич<sup>с</sup><sup>а</sup> Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, novotelnova@yandex.ru<sup>б</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Россия<sup>с</sup> Исследовательский центр Национального политехнического института Мексики, 07738, Мехико, Мексика**Аннотация.**

**Постановка проблемы.** Повышение термоэлектрической добротности термоэлектриков связывают с использованием наноструктурированных термоэлектрических материалов, полученных из порошков методом искрового плазменного спекания. Сохранение наноструктуры порошка в процессе спекания возможно при оптимальных температурных режимах их получения. Выбор этих режимов осложнен свойствами термоэлектриков – анизотропных полупроводниковых материалов. Решение данной проблемы путем моделирования процесса спекания требует грамотного подхода к постановке задачи и корректного задания свойств термоэлектриков и материалов, входящих в рабочую установку, а также граничных условий. В представленной работе предложена работоспособная модель спекания термоэлектриков.

**Методы.** Рассматривается процесс спекания термоэлектрического материала – теллурида висмута с использованием установки SPS-511S. Учитываются температурные зависимости электро- и теплопроводности теллурида висмута, а также материалов, из которых изготовлены элементы установки. Показано, что распределение температуры в образце может быть определено в рамках стационарной задачи. Моделирование выполняется в программном продукте Comsol Multiphysics. Граничные условия включают конвективный теплообмен и излучение по закону Стефана–Больцмана.

**Результаты.** Проведено компьютерное моделирование электро- и теплофизических процессов, протекающих при искровом плазменном спекании. Получено распределение температуры и потенциала в образце при спекании. Показана определяющая роль в формировании температурного поля в образцах графитовой пресс-формы. Проанализировано влияние геометрических размеров графитовой пресс-формы на условия спекания наноструктурированных термоэлектриков.

**Практическая значимость.** Установлены оптимальные размеры цилиндрической пресс-формы для получения однородных по объему образцов на основе теллурида висмута. Показаны пути модификации процесса спекания, позволяющие создавать образцы термоэлектриков с прогнозируемыми свойствами.

**Ключевые слова:** искровое плазменное спекание, термоэлектрические материалы, наноструктуры, компьютерное моделирование, термоэлектрическая добротность, теплопроводность, тепловые и электрические поля.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Минобрнауки: субсидия № 14.579.0039 и задание № 3.912.2014/К.

THERMAL AND ELECTRIC FIELDS AT SPARK PLASMA SINTERING  
OF THERMOELECTRIC MATERIALSL.P. Bulat<sup>а</sup>, D.A. Pshenai-Severin<sup>а, б</sup>, I.A. Nefedova<sup>а</sup>, A.V. Novotelnova<sup>а</sup>, Yu.G. Gurevich<sup>с</sup><sup>а</sup> ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, novotelnova@yandex.ru<sup>б</sup> Ioffe Physical Technical Institute, 194021, Saint Petersburg, Russia<sup>с</sup> Center for Research and Advanced Studies of the National Polytechnic Institute (CINVESTAV I.P.N.), 07738, Mexico-City, Mexico**Abstract.**

**Problem statement.** Improvement of thermoelectric figure of merit is connected with the usage of nanostructured thermoelectric materials fabricated from powders by the spark plasma sintering (SPS) method. Preservation of powder nanostructure during sintering is possible at optimum temperature modes of thermoelectrics fabrication. The choice of these modes becomes complicated because of anisotropic properties of semiconductor thermoelectric materials. The decision of the given problem by sintering process simulation demands the competent approach to the problem formulation, a correct specification of thermoelectric properties, the properties of materials forming working installation, and also corrects boundary conditions. The paper deals with the efficient model for sintering of thermoelectrics.

**Methods.** Sintering process of the bismuth telluride thermoelectric material by means of SPS-511S installation is considered. Temperature dependences of electric and thermal conductivities of bismuth telluride, and also temperature dependences of installation elements materials are taken into account. It is shown that temperature distribution in the sample can be defined within the limits of a stationary problem. The simulation is carried out in the software product Comsol Multiphysics. Boundary conditions include convective heat exchange and also radiation under Stefan-Boltzmann law.

**Results.** Computer simulation of electric and thermal processes at spark plasma sintering is carried out. Temperature and electric potential distributions in a sample are obtained at the sintering conditions. Determinative role of graphite compression mould in formation of the temperature field in samples is shown. The influence of geometrical sizes of a graphite compression mould on sintering conditions of nanostructured thermoelectrics is analyzed.

**Practical importance.** The optimum sizes of a cylindrical compression mould for fabrication of volume homogeneous samples based on bismuth telluride are determined. Ways of updating for the sintering process are shown giving the

possibility to fabricating thermoelectric samples with predicted properties.

**Keywords:** spark plasma sintering, thermoelectric materials, nanostructures, computer simulation, thermoelectric figure of merit, thermal conductivity, thermal and electric fields.

**Acknowledgements.** The work is supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant № 14.579.0039 and task № 3.912.2014/К).

### Введение

Искровое плазменное спекание (spark plasma sintering, SPS-метод) все шире используется для создания самых различных функциональных материалов из микро- и нанопорошков. Спекание происходит в специальных установках путем воздействия на порошок импульсов постоянного электрического поля. Данный метод оказался очень удобным и эффективным для изготовления разного рода наноструктур и нанокомпозитов. Так, оказалось, что искровое плазменное спекание практически незаменимо для создания объемных наноструктурированных термоэлектрических материалов (см., например, [1–4]). Дело в том, что, в отличие от обычного горячего прессования, консолидация наночастиц в объемный образец с помощью искрового плазменного спекания препятствует процессам рекристаллизации [1–4]. А рекристаллизация приводит к увеличению размеров нанозерен в объемном образце от десятков до сотен нанометров, т.е. образец превращается из наноструктурного в образец с микронеоднородностями. В этом случае перестают реализовываться механизмы, которые приводят к увеличению термоэлектрической добротности материала в наноструктурах, в первую очередь речь идет об интенсивности дополнительного рассеяния фононов и носителей заряда на межзеренных границах [5, 6].

Однако искровое плазменное спекание определяется сложными быстропротекающими взаимозависимыми электрическими и тепловыми процессами. В связи с этим подбор режимов спекания на практике осуществляется эмпирическим путем, причем не только при изготовлении объемных образцов термоэлектрических наноматериалов, но и вообще при создании функциональных материалов различного назначения.

Итак, возникает вопрос о выборе таких режимов искрового плазменного спекания, которые могли бы обеспечить получение наноматериалов с оптимизированными термоэлектрическими свойствами. В настоящей работе сделан первый шаг для решения данной задачи – на примере термоэлектрических материалов на основе теллурида висмута  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  выясняется, можно ли воспроизвести полученные экспериментально значения температуры образца при заданных значениях токов и разумных параметрах материалов и характеристик установки.

Особенности моделирования спекания термоэлектрических материалов на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  заключаются в том, что они представляют собой анизотропные полупроводниковые материалы. Их электропроводность и теплопроводность существенно зависят от температуры. Исходя из этого, решение данной задачи требует грамотного подхода к ее постановке и корректного задания свойств термоэлектриков и материалов, входящих в рабочую установку, а также граничных условий. В рассматриваемом случае спекание материала должно производиться при равномерном распределении температуры по объему образца. Температура во время спекания должна обеспечивать получение термоэлектрического материала с высокой эффективностью. Эффективность термоэлектрических материалов определяется безразмерной термоэлектрической добротностью  $ZT = \frac{\alpha^2 \sigma}{\kappa} T$ , где  $\alpha$  – коэффициент термоЭДС,  $\sigma$  – коэффициент электропроводности,  $\kappa$  – коэффициент теплопроводности,  $T$  – абсолютная температура.

Для определенности расчеты выполняются для установки SPS-511S (Япония), с использованием которой производилось спекание термоэлектрических материалов на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  [1–4].

Экспериментально полученное и надежно подтвержденное наибольшее значение безразмерной термоэлектрической добротности в наноструктурированных материалах на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  представлено в работе [7]. Добротность достигала значений  $ZT = 1,23$  при  $T = 360$  К в образцах состава  $\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$ , полученных механоактивационной обработкой с последующим искровым плазменным спеканием под давлением 50 МПа при температуре спекания  $T_s = 770$  К [7]. Эти данные принимались во внимание при оценке соответствия модельных и экспериментальных результатов.

Получаемая в итоге модель спекания термоэлектриков позволит направленно модифицировать процесс спекания с тем, чтобы создавать термоэлектрические материалы с прогнозируемыми свойствами.

### Моделирование процесса искрового плазменного спекания

Установка SPS-511S состоит из вакуумной камеры с охлаждаемыми водой стальными стенками (рис. 1). Внутри установки между стальными электродами 1 и 6 размещается закрепленная графитовыми вставками 2 пресс-форма 5. Спекаемый образец 4 помещен между графитовыми пуансонами 3. Для обеспечения надежного контакта между стальными электродами и графитовыми вставками внутри пресс-формы устанавливаются прокладки 7 и 9 и трубку из графитовой фольги 8.

Отвод тепла от стальных электродов 1 и 6 происходит с помощью водяного охлаждения.

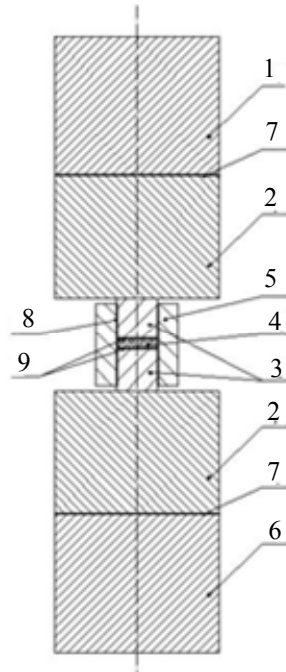


Рис. 1. Схематическая модель установки искрового плазменного спекания: 1 – верхний охлаждаемый электрод; 2 – графитовые вставки; 3 – верхний и нижний графитовые пуансоны; 4 – образец; 5 – пресс-форма; 6 – нижний охлаждаемый электрод; 7, 9 – прокладки из графитовой фольги; 8 – трубка из графитовой фольги

Использованная модель включает систему дифференциальных уравнений, описывающих распределение электрического потенциала и температуры. Плотности потоков заряда  $\mathbf{j}$  и тепла  $\mathbf{q}$  связаны с градиентами этих величин законами Ома и Фурье:

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

где  $\sigma$  и  $\kappa$  – соответственно коэффициенты электро- и теплопроводности. Законы сохранения заряда и энергии имеют следующий вид:

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = 0,$$

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{q} = Q_j, \quad (1)$$

где  $c_p$  и  $\rho$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении и плотность материала. В уравнении (1) учтен разогрев джоулевым теплом  $Q_j = \mathbf{j} \cdot (-\nabla V)$ .

Качественно данная модель учитывает протекание через прессформу и образец электрического тока, который приводит к генерации теплоты. Благодаря теплопроводности теплота распределяется по всему объему установки. Если бы пресс-форма была теплоизолирована, то температура образца в данной модели увеличивалась бы неограниченно. Практически конечная температура определяется:

- величиной тока и электропроводностями материалов, которые задают величину сгенерированного тепла;
- величинами теплопроводностей и тепловыми граничными условиями, определяющими скорость оттока теплоты.

Результаты сравнения температуры образца с полученной в эксперименте температурой должны быть довольно чувствительными к величинам кинетических коэффициентов и виду граничных условий.

В эксперименте использовался импульсный постоянный ток до 1000 А [1–4]. Длительность импульса составляла 3,3 мс, скважность – 2,2 мс. За пакетом из 12 импульсов следовали два периода отключения тока. Аналогичные параметры тока использовались в работе [8], где было показано, что при данных частотах скин-эффектом можно пренебречь. Исходя из этого, если мощность разогрева не превосходит возможностей теплоотвода, то в используемом подходе временные характеристики тока определяют только соответствующую зависимость температуры образца, но не ее конечное значение. В связи с этим максимальное значение температуры образца можно найти, решая стационарный вариант задачи (1).

Граничные условия для потенциала и тока соответствуют нулевому потенциалу на нижнем электроде и заданному значению тока через образец. В расчетах было использовано максимальное значение тока 832 А. При этом средняя температура образца достигала 770 К. Начальная температура установки

была равна  $T_0 = 300$  К. Тепловые граничные условия соответствовали излучательному отводу тепла от боковых граней пресс-формы, графитовых вставок и электродов. Было использовано выражение для излучательного переноса тепла между двумя поверхностями, находящимися при температурах  $T$  и  $T_0 < T$  [9] с коэффициентами излучения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ . Величина оттока тепла от горячей поверхности равна

$$q_{rad} = \frac{\sigma_{SB} (T^4 - T_0^4)}{\varepsilon_1^{-1} + \varepsilon_2^{-1} - 1}.$$

Здесь  $\sigma_{SB} = 5,670 \cdot 10^{-8}$  Вт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-4</sup> – постоянная Стефана–Больцмана, параметры  $\varepsilon$  для графита и стали были приняты равными 0,75 и 0,675 соответственно [10].

Для описания водяного охлаждения использовались граничные условия, соответствующие конвективному теплообмену,

$$q_{conv} = K_b (T - T_0),$$

где для контакта стали с водой был выбран коэффициент  $K_b = 370$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) [11].

Поскольку процесс искрового плазменного спекания протекает в широком диапазоне температур, при расчетах необходимо учитывать температурные зависимости кинетических коэффициентов. Эти зависимости для графита и стали, пересчитанные из [12–14], приведены на рис. 2, а, б, соответственно. Для графитовой фольги коэффициенты теплопроводности составляли 130 и 3 Вт/(м·К) вдоль и поперек плоскости соответственно, а электропроводность была равна  $10^5$  См/м [13]. Температурные зависимости для графитовой фольги были выбраны из [12] с учетом приведенных значений при комнатной температуре (рис. 2, а).

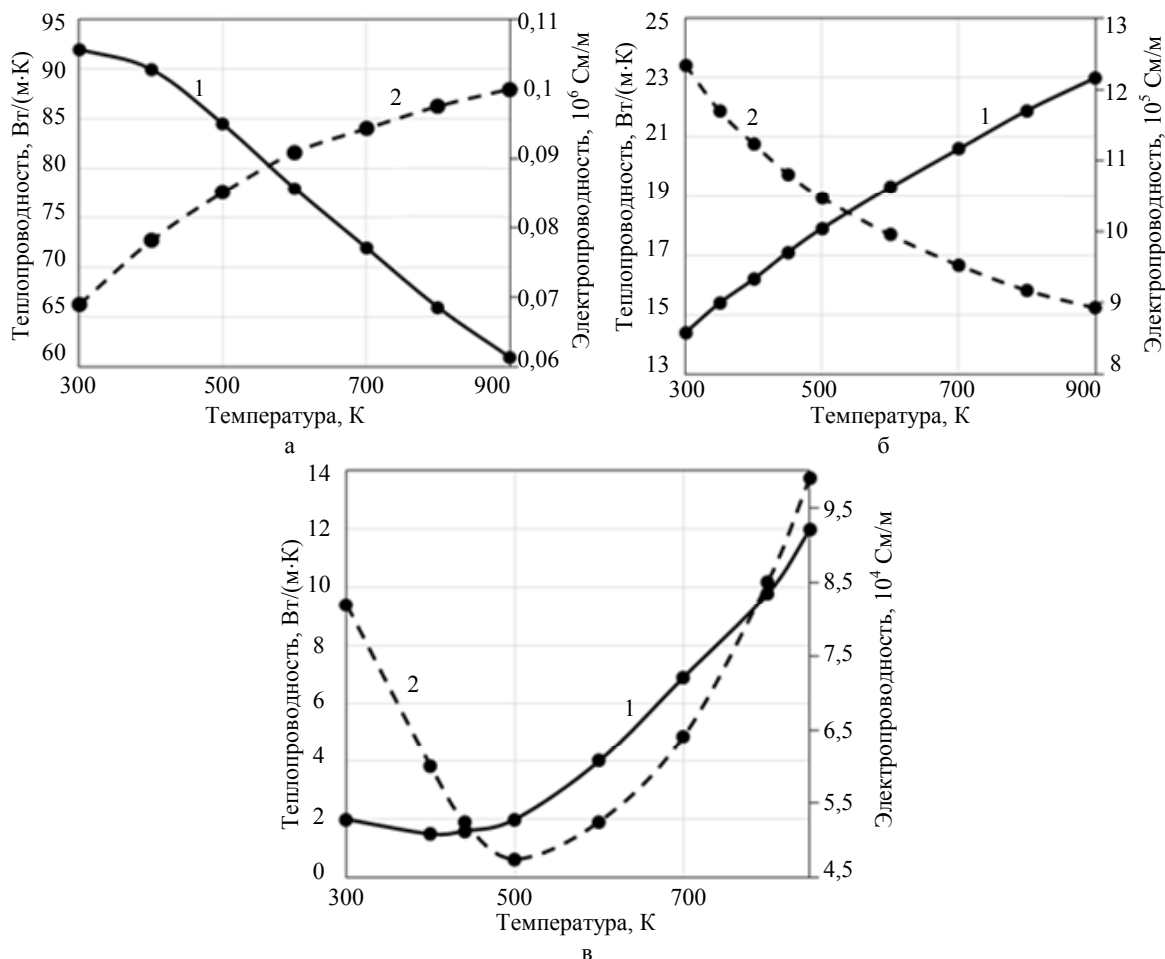


Рис. 2. Температурная зависимость теплопроводности (1) и удельного сопротивления (2): графита (а) [12]; стали (б) [14]; твердого раствора на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  (в) [15]

Кинетические коэффициенты для  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  в плоскости скола в широком диапазоне температур измерены в [15]. Эти данные были пересчитаны с учетом анизотропии электропроводности  $\sigma_{33}/\sigma_{11} = 0,36$  и теплопроводности  $\kappa_{33}/\kappa_{11} = 0,47$  [16], которые для изотропного поликристалла дают значения

$\sigma_{poly} / \sigma_{11} = 0,74$  и  $\kappa_{poly} / \kappa_{11} = 0,79$ . Указанные зависимости приведены на рис. 2, в. Реальные значения сопротивления порошка на начальной стадии неизвестны, однако в использованном здесь стационарном подходе на конечном этапе прессования значения кинетических коэффициентов должны быть близки к приведенным.

С использованием приведенных данных и схемы установки (рис. 1) построена модель и рассчитаны распределения температуры и потенциала. Заданы следующие геометрические размеры элементов установки: графитовые вставки (диаметр  $D = 80$  мм, толщина  $h = 60$  мм); графитовые пуансоны ( $D = 20$  мм,  $h = 20$  мм); графитовая фольга ( $D = 80$  мм,  $h = 0,7$  мм); прокладки и трубка из графитовой фольги ( $h = 0,2$  мм); пресс-форма (внешний диаметр – 40 мм, внутренний – 20 мм,  $h = 40$  мм); спекаемый образец ( $D = 20$  мм;  $h = 5$  мм).

Моделирование тепловых и электрических полей выполнялось с помощью метода конечных элементов в программном продукте Comsol Multiphysics. Для расчетов использовалась осесимметричная модель, т.е. система уравнений (1) решалась в цилиндрических координатах.

### Основные результаты моделирования тепловых и электрических полей

Распределения потенциала и температуры для случая граничных условий теплового излучения на боковых гранях и конвективного теплообмена с охлаждаемых электродов в условиях эксперимента приведены на рис. 3.

Температура образца, определенная путем усреднения по его объему, составила  $T_s = 792$  К, что хорошо согласуется с результатами эксперимента [7].

Рис. 3 подтверждает тот факт, что областям наибольшего изменения электрического потенциала, т.е. зонам наибольшей напряженности электрического поля, соответствует наибольшая температура.

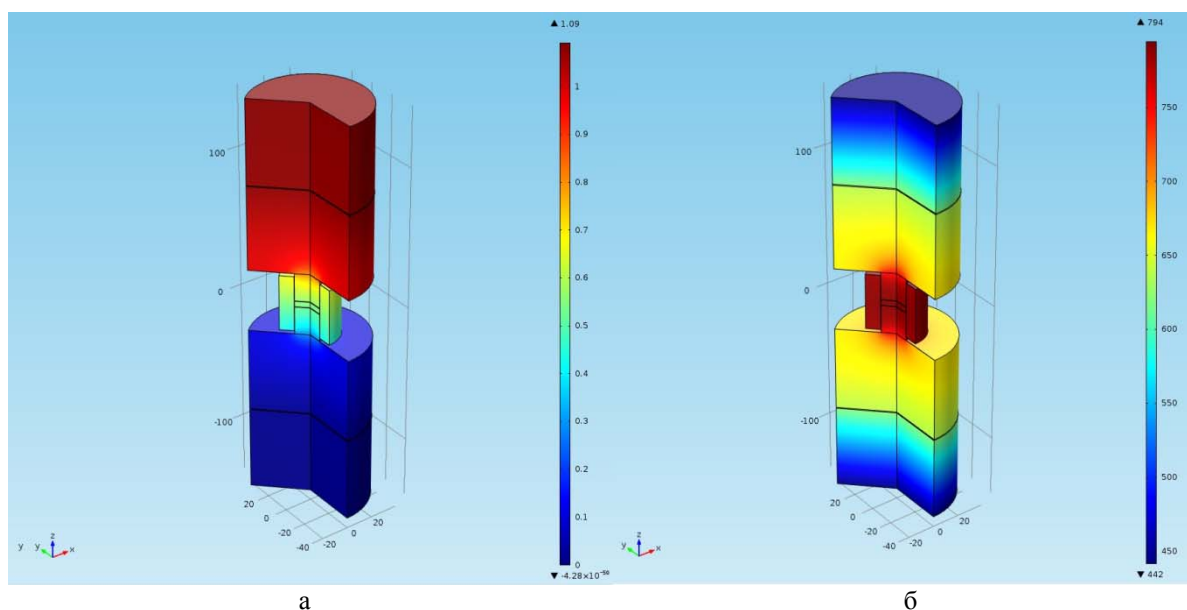


Рис. 3. Расчетное распределение потенциала (а) и температуры (б)

Экспериментальные результаты [7] показывают, что при данном химическом составе спекаемого термоэлектрического материала определяющее влияние на величину термоэлектрической добротности оказывает температура спекания  $T_s$ . С другой стороны, для практических целей важно иметь образцы с высокой степенью однородности термоэлектрических свойств, т.е. спекание всех точек образца должно проходить при одной температуре. Для проверки степени различия температуры спекания в зависимости от точки образца были проведены расчеты распределения температуры в образце в ходе искрового плазменного спекания в материалах на основе  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  близких составов в условиях эксперимента. Расчетные зависимости распределения температуры в объеме спекаемого образца приведены на рис. 4. Легко убедиться, что, по крайней мере, для типичной SPS-установки с цилиндрическими пресс-формой и пуансонами (рис. 1) различие температуры в разных точках спекаемого образца невелико.

На температурное и электрические поля внутри спекаемого образца могут оказывать существенное влияние геометрические размеры пресс-формы. В рамках предложенной модели было проанализировано влияние внешнего диаметра графитовой пресс-формы на температуру в спекаемом образце (рис. 5) и распределение потенциала.

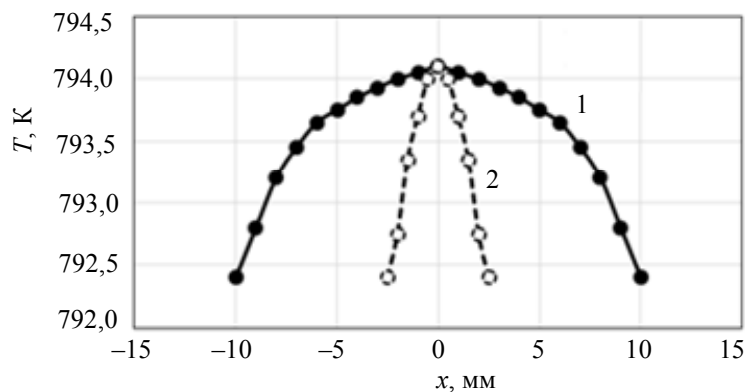


Рис. 4. Типичное распределение температуры в продольном (1) и поперечном (2) сечении образца в процессе спекания. Значению  $x=0$  соответствует центр образца

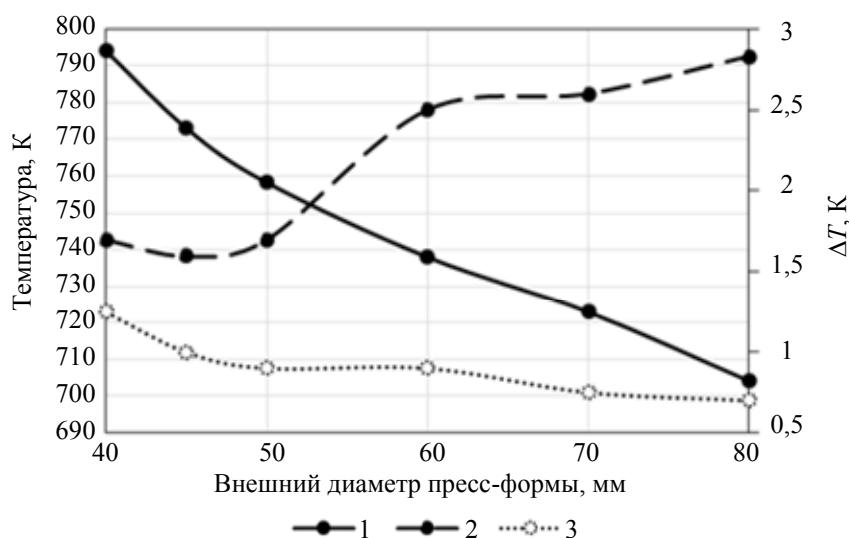


Рис. 5. Зависимость температуры в центре спекаемого образца (1) и разности температур между центральной областью образца и его внешней поверхностью в поперечном (2) и продольном (3) направлениях от внешнего диаметра пресс-формы

Из представленных на рис. 5 зависимостей видно, что увеличение диаметра пресс-формы приводит к снижению температуры в образце, при этом увеличивается перепад температуры между центром и боковыми поверхностями образца (увеличивается радиальный градиент температуры). Одновременно с этим осевой градиент температуры снижается. Разность потенциалов между верхним и нижним охлаждаемым электродом при изменении внешнего диаметра пресс-формы 40–80 мм увеличивается на 5%. Из представленных результатов видно, что существуют оптимальные геометрические размеры пресс-формы для получения однородного наноструктурированного материала. По результатам расчетов необходимых условий спекания  $\text{Vi}_2\text{Te}_3$  в установке SPS-511S удастся достичь при использовании цилиндрической пресс-формы с внешним диаметром, лежащим в диапазоне 40–45 мм.

#### Заключение

С целью выбора режимов искрового плазменного спекания, которые могли бы обеспечить получение наноматериалов с оптимизированными термоэлектрическими свойствами, в настоящей работе решена следующая задача. На примере термоэлектрических материалов на основе  $\text{Vi}_2\text{Te}_3$  выяснено, можно ли воспроизвести полученные экспериментально значения температуры образца при заданных значениях токов и разумных параметрах материалов и характеристик установки. Расчеты выполнены на примере установки SPS-511S, с помощью которой экспериментально производилось спекание термоэлектрических материалов на основе  $\text{Vi}_2\text{Te}_3$ . Используемая модель включает систему дифференциальных уравнений, описывающих распределение электрического потенциала и температуры. Учтены температурные зависимости электро- и теплопроводности  $\text{Vi}_2\text{Te}_3$ , а также графита и стали (материалов, из которых изготовлена установка). Максимальное значение температуры образца определялось в рамках стационарной задачи. Граничные условия включали конвективный теплообмен и излучение по закону Стефана–Больцмана.

Получены распределения электрического потенциала и температуры. Температура образца определенная путем усреднения по его объему, составила 792 К, что хорошо согласуется с результатами эксперимента. Для типичной SPS-установки различие температуры в разных точках спекаемого образца невелико.

Определяющую роль в формировании температурного поля в образцах играют геометрические размеры графитовой пресс-формы. Изменяя ее размеры и геометрию, можно воздействовать на условия процесса спекания, что позволит создавать образцы термоэлектриков с прогнозируемыми свойствами. Установлены оптимальные размеры графитовой пресс-формы для создания температурных условий, обеспечивающих в процессе спекания получение однородного наноструктурированного  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ .

### Литература

1. 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. Structure and transport properties of bulk nanothermoelectrics based on  $\text{Bi}_x\text{Sb}_{2-x}\text{Te}_3$  fabricated by SPS method. *Journal of Electronic Materials*, 2013, vol. 42, no. 7, pp. 2110–2113. doi: 10.1007/s11664-013-2536-9
2. Drabkin I.A., Osvenskii V.B., Sorokin A.I., Bulat L.P., Pivovarov G.I. Anizotropiya termoelektricheskikh svoystv ob"emnogo nanostrukturirovannogo materiala na osnove  $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ , poluchennyi metodom iskrovogo plazmennogo spekaniya (SPS) [Anisotropy of the thermoelectric properties of the bulk nanostructured material based on  $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ , obtained by spark plasma sintering (SPS)]. *Proc. Intergovernmental Seminar of Thermoelectrics and Their Applications*. St. Petersburg, 2013, pp. 29–34.
3. Bublik V.T., Drabkin I.A., Karataev V.V., Lavrent'ev M.G., Osvenskii V.B., Bulat L.P., Pivovarov G.I., Sorokin A.I., Tabachkova N.Yu. Ob"emnyi nanostrukturirovannyi termoelektricheskii material na osnove  $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ , poluchennyi metodom iskrovogo plazmennogo spekaniya (SPS) [Volumetric nanostructured thermoelectric material based on  $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ , obtained by spark plasma sintering (SPS)]. *Proc. Intergovernmental Seminar of Thermoelectrics and Their Applications*. St. Petersburg, 2013, pp. 23–28.
4. Drabkin I.A., Osvenski V.B., Parkhomenko Yu.N., Sorokin A.I., Pivovarov G.I., Bulat L.P. Anisotropy of thermoelectric properties of p-type nanostructured material based on  $(\text{Bi, Sb})_2\text{Te}_3$ . *Journal of Thermoelectricity*, 2013, no. 3, pp. 35–46.
5. Bulat L.P., Osvenskii V.B., Parkhomenko Y.N., Pshenay-Severin D.A. Investigation of the possibilities for increasing the thermoelectric figure of merit of nanostructured materials based on  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$  solid solution. *Physics of the Solid State*, 2012, vol. 54, no. 11, pp. 2168–2172. doi: 10.1134/S1063783412110054
6. Bulat L.P., Osvenskii V.B., Pshenay-Severin D.A. Influence of grain size distribution on the lattice thermal conductivity of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ -based nanostructured materials. *Physics of the Solid State*, 2013, vol. 55, no. 12, pp. 2442–2449. doi: 10.1134/S1063783413120081
7. Bulat L.P., Drabkin I.A., Karatayev V.V., Osvenskii V.B., Parkhomenko Yu.N., Pshenay-Severin D.A., Sorokin A.I. The influence of anisotropy and nanoparticle size distribution on lattice thermal conductivity and the thermoelectric figure of merit in nanostructured  $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ . *Journal of Electronic Materials*, 2014, vol. 43, no. 6, pp. 2121–2126. doi: 10.1007/s11664-014-2988-6.
8. Anselmi-Tamburini U., Gennari S., Garay J.E., Munir Z.A. Fundamental investigations on the spark plasma sintering/synthesis process: II. Modeling of current and temperature distributions. *Materials Science and Engineering*, 2005, vol. 394, no. 1–2, pp. 139–148. doi: 10.1016/j.msea.2004.11.019
9. Cengel Y.A., Ghajar A.J. *Heat and Mass Transfer*. 4<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill, 2011, 960 p.
10. *Total Emissivity of Various Surfaces*. 2003. Available at: <http://www.contika.dk/Download/litteratur/emission.pdf> (accessed 11.05.2014).
11. *Overall Heat Transfer Coefficients for Some Common Fluids and Heat Exchanger Surfaces*. Available at: [http://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficients-d\\_284.html](http://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficients-d_284.html) (accessed 11.05.2014).
12. Hust J.G. *Standard Reference Materials: a Fine-Grained, Isotropic Graphite for Use as NBS Thermophysical Property RM's from 5 to 2500 K*. NBS Special Publication 260-89, 1984. Available at: <http://www.nist.gov/srm/upload/SP260-89.PDF> (accessed 11.05.2014).
13. *Grafitovaya Fol'ga Grafleks* [Graphite Foil Grafleks]. 2010. Available at: [http://traverss.ru/grafitovaya\\_folga\\_graf](http://traverss.ru/grafitovaya_folga_graf) (accessed 11.05.2014).
14. Hust J.G., Giarratano P.J. *Standard Reference Materials: Thermal Conductivity and Electrical Resistivity Standard Reference Materials: Austenitic Stainless Steel, SRM's 735 and 798, from 4 to 1200 K*. NBS Special Publication 260-46, 1975. Available at: <http://www.nist.gov/srm/upload/SP260-46.PDF> (accessed 11.05.2014).
15. Magomedov Ya.B., Gadzhiev G.G., Omarov Z.M. Temperaturnaya zavisimost' teploprovodnosti i elektroprovodnosti  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  i ego rasplava [The temperature dependence of the thermal conductivity and the electrical conductivity of  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  and its melt]. *Fazovy Perekhody, Uporyadochennye Sostoyaniya i Novye Materialy*, 2013, no. 9, pp. 1–5.

16. Stecker K., Süßmann H., Eichler W., Heiliger W., Stordeur M. Martin-Luther Univ. Halle-Wittenberg. *Math-Naturwiss*, 1978, vol. 27, no. 5, p. 5.

- Булат Лев Петрович** – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, bulat@irbt-itmo.ru
- Пшенай-Северин Дмитрий Александрович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий инженер, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия; старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, Россия, d.pshenay@gmail.com
- Нефедова Ирина Александровна** – аспирант, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, nefedosita@rambler.ru
- Новотельнова Анна Владимировна** – кандидат технических наук, доцент, доцент, Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия, novotelnova@yandex.ru
- Гуревич Юрий Генрихович** – доктор физико-математических наук, профессор, профессор-исследователь, Исследовательский центр Национального политехнического института Мексики, 07738, Мехико, Мексика, gurevich@fis.cinvestav.mx
- Lev P. Bulat** – D.Sc., Professor, Department head, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, bulat@irbt-itmo.ru
- Dmitry A. Pshenai-Severin** – PhD, leading engineer, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia; senior scientific researcher, Ioffe Physical Technical Institute, 194021, Saint Petersburg, Russia, d.pshenay@gmail.com
- Irina A. Nefedova** – postgraduate, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, nefedosita@rambler.ru
- Anna V. Novotelnova** – PhD, Associate professor, ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia, novotelnova@yandex.ru
- Yuri G. Gurevich** – D.Sc., Professor-Researcher, CINVESTAV I.P.N. (Center for Research and Advanced Studies of the National Polytechnic Institute), 07738, Mexico-City, Mexico, gurevich@fis.cinvestav.mx

Принято к печати 12.05.14  
Accepted 12.05.14