

пользована для управления движением полупроводниковым микродиодом с плоским p - n -переходом посредством градиентной электромагнитной волны достаточной интенсивности.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Конвергенция-2025» Республики Беларусь и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф23РНФ-049).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Грачев, А.И. Передача крутящего момента проводящей частице с использованием силы Лоренца / А.И. Грачев // ФТП. – 2022. – Т. 56, № 1. – С. 76–79.
2. Латыпов, З.З. О возможности разделения поляризуемых молекул в электрических полях / З.З. Латыпов // ЖТФ. – 2014. – Т. 84, № 6. – С. 21–25.
3. Солунин, С.А. О силах, действующих на заряженную частицу в переменном электрическом поле / С.А. Солунин, А.М. Солунин, М.А. Солунин // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35, № 14. – С. 48–53.
4. Болотовский, Б.М. Особенности движения частиц в электромагнитной волне / Б.М. Болотовский, А.В. Серов // УФН. – 2003. – Т. 173, № 6. – С. 667–678.
5. Эшкин, А. Давление лазерного излучения / А. Эшкин // УФН. – 1973. – Т. 110, № 1. – С. 101–116.
6. Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 832 с.
7. Гапонов, А.В. О потенциальных ямах для заряженных частиц в высокочастотном электромагнитном поле / А.В. Гапонов, М.А. Миллер // ЖТФ. – 1958. – Т. 34, № 1. – С. 242–243.
8. Экстром, Ф. Изолированный электрон / Ф. Экстром, Д. Вайнлэнд // УФН. – 1981. – Т. 134, № 4. – С. 711–730.

ТЕРМОНАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕЛЛУРИДА ВИСМУТА В ПРОЦЕССЕ ЭКСТРУЗИИ НА УСТАНОВКЕ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ

А. И. Простомолотов¹, Н. А. Вerezуб¹, М. Г. Лаврентьев², Н. Ю. Табачкова³

¹⁾ *Институт проблем механики им. А.Ю. Иилинского РАН, пр. Вернадский 101/1,
119526 Москва, Россия, e-mail: aprosto@inbox.ru*

²⁾ *ООО "РМТ", Варшавское ш. 46, Москва, 115230, Россия, e-mail: lavrentev.mihail@gmail.com*

³⁾ *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, Москва, 119991 Москва,
Россия, e-mail: ntabachkova@gmail.com*

Анализируются процессы термомеханики применительно к получению термоэлектрического материала на основе теллурида висмута в процессе экструзии на установке искрового плазменного спекания. Конструкция рабочего объема установки, предназначенная для традиционного спекания исходного материала, была заменена на фильеру традиционного метода горячей экструзии. Через фильеру осуществлялось продавливание материала из исходной заготовки в виде шайбы. Под действием нагрева и продавливания материал становился пластическим, в результате чего формировалась новая структура и свойства продавливаемого материала. На пластическое формирование, кроме температуры, существенное влияние оказывали геометрия фильеры и скорость пресса. Изучалось влияние конусности фильеры, создающей обжатие пластического материала, на его термонапряженное состояние, формирова-

ние кристаллической структуры и ориентацию зерен в результате рекристаллизации материала.

Ключевые слова: термоэлектрические материалы; теплопроводность; рекристаллизация; искровое плазменное спекание; экструзия; моделирование.

THERMAL STRESS STATE OF BISMUTH TELLURIDE DURING EXTRUSION IN SPARK PLASMA SINTERING UNIT

A. I. Prostomolotov¹, N. A. Verezub¹, M. G. Lavrentiev², N. Yu. Tabachkova³

¹⁾ *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Vernadskii av. 101/1, 119526 Moscow, Russia*

²⁾ *"RMT" LLC, Varshavskoe road 46, 115230 Moscow, Russia*

³⁾ *Prokhorov General Physics Institute RAS, Vavilov St. 38, 119991 Moscow, Russia*

Corresponding author: A. I. Prostomolotov (aprosto@inbox.ru)

The article analyzes thermomechanical processes as applied to obtaining a bismuth telluride-based thermoelectric material during extrusion in a spark plasma sintering unit. The design of the unit's working volume intended for traditional sintering of the initial material was replaced by a die of the traditional hot extrusion method. The material was extruded through the die from the initial blank in the form of a washer. Under the action of heating and extrusion, the material became plastic, as a result of which a new structure and properties of the extruded material were formed. In addition to temperature influence, the geometry of the die and press rate had a significant effect on plastic formation. The influence of die conic, creating compression of the plastic material, on its thermally stressed state, the formation of crystalline structure and the grain orientation as a result of recrystallization was studied.

Key words: thermoelectric materials; thermal conductivity; recrystallization; spark plasma sintering; extrusion; modeling.

ВВЕДЕНИЕ В МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ПРОЦЕСС СПЕКАНИЯ

Искровое плазменное спекание (ИПС) – относительно недавно разработанный процесс спекания материалов, тем не менее имеющий свое происхождение с 1930-х годов. Широкое распространение этот метод получил только в 2000-х с появлением мощных высокоамперных генераторов импульсного тока. ИПС представляет собой модифицированное одноосное горячее вакуумное прессование. Давление прикладывается к материалу с помощью верхнего и нижнего пуансона в пресс-форме, нагрев осуществляется за счет непосредственного протекания высокоамплитудного тока через материал, пуансоны и пресс-форму. Импульсный ток производит электрический разряд в пространстве между частицами спекаемого материала, что приводит к возникновению искры и моментальному локальному образованию плазмы с температурами до тысяч Кельвина. Такие температуры приводят к оплавлению и испарению материала с поверхностей частиц и способствуют массопереносу и спеканию материала. Указанные особенности ИПС позволяют добиваться сверхвысоких скоростей нагрева до 300 К/мин, и следственно очень короткого времени спекания (единицы – десятки минут для халькогенидов висмута и сурьмы), что является наибольшим преимуществом ИПС по сравнению с остальными методами получения материала. Процесс проводится в вакуумной камере в инертной атмосфере. Пуансоны служат

также электродами, подведенными к материалу, и обычно принудительно охлаждаются.

В случае применения ИПС-установки для процесса горячей экструзии (ГЭ) делается существенная модификация графитовой оснастки, нижний пуансон заменяется на фильеру, и модифицированная ИПС-ГЭ установка приобретает вид, показанный на рисунке 1, а. Установка ИПС-установка состоит из вакуумной камеры с охлаждаемыми водой стальными стенками. Внутри установки между стальными электродами и размещается закрепленная графитовыми вставками пресс-форма. Спекаемый образец помещен между графитовым пуансоном и фильерой. Для обеспечения надежного контакта между стальными электродами и графитовыми вставками внутри пресс-формы устанавливают прокладки и трубку из графитовой фольги. Отвод тепла от стальных электродов и происходит с помощью водяного охлаждения.

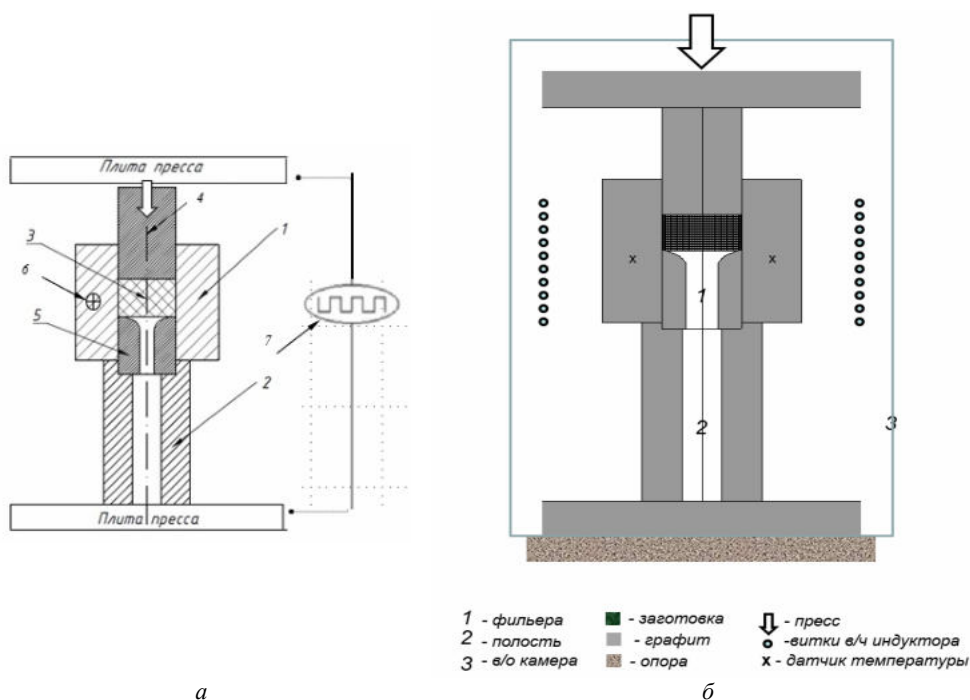


Рис. 1. а – Схема модифицированного теплового узла для ГЭ-процесса в ИПС-установке: 1, 2 – графитовые вставки, 3 – пресс-заготовка на основе Bi_2Te_3 , 4 – графитовый пуансон, 5 – графитовая фильера, 6 – термопара, 7 – импульсный генератор, стрелка – направление пресса; б – математическая модель модифицированного процесса ИПС-ГЭ

Размеры исходной пресс-заготовки для экструзии (состав $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$): высота – 10 мм; диаметр – 20 мм. Использованы две фильеры, имеющие одинаковый угол конусности – 130 град., на разные диаметры выходных трубок: 5 и 8 мм. Оснастка для ГЭ помещалась между нижней и верхней стальными плитами пресса с последующим приложением давления. После дополнительной прессовки порошка оснастку размещали в установке ИПС. Нагрев вещества происходил путем пропускания импульсов электрического тока через пуансоны и через заготовку для ГЭ. Температура спека-

ния контролировалась термопарой. Параметры процесса были следующими: температура 748–773 К, усилие сжатия 20–25 кН, скорость пресса 0.13 мм/мин.

В ИПС-ГЭ технологии принято предварительное проведение упрочнения пресс-заготовки с помощью обычного ИПС процесса. Поэтому пресс-заготовка может рассматриваться наряду с графитовой оснасткой – как сплошное твердое тело, в котором выделяется индукционное тепло при протекании высокочастотного тока. Допустима замена импульсного тока на синусоидальный с сохранением частоты и силы тока. Аналогичный подход представлен при моделировании процесса очистки карбида кремния [1]. Схема математической модели ИПС-ГЭ процесса представлена на Рис.16. Предполагается, что графитовая оснастка теплового узла нагревается высокочастотным индуктором. Индуктор воздействует посредством переменного электромагнитного поля, которое индуцирует переменный ток и нагревает электропроводящий графит и пресс-заготовку. Расчет индукционного энерговыделения позволяет определить условия нагрева для последующего решения задачи теплопроводности. Расчет энерговыделения осуществляется на основе решения задачи определения индукционных токов, возбуждаемых индуктором, расположенным аксиально-симметрично относительно графитовой оснастки, которая рассматривается как аксиально-симметричное проводящее тело. В данной работе была реализована методика расчета индукционного нагрева, представленная в [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИПС-ГЭ ПРОЦЕССА

Расчеты температурного поля и термонапряженного состояния материала проведены методом конечных элементов по программе CRYSTMO/MARC [3]. Результаты расчетов температурного поля в базовой геометрии приведены на рис. 2, а. Можно отметить, что графитовая оснастка, окружающая пресс-заготовку и фильеру находятся в значительно нагретом состоянии до температуры 780 К. Понижение температуры происходит кверху и к низу (660, 540, 420, 300 К), где значительный сток тепла объясняется контактами с водоохлаждаемой камерой. Методический подход основан на твердотельном подходе и совместном использовании приближений упругого и пластического тела согласно основным положениям теории упругости и пластичности [4]. Для процесса ГЭ термическими напряжениями можно пренебречь. Подробное обоснование для выбора данного приближения содержится в обзоре [5]. Данные об альтернативном подходе на основе механики реологической жидкости содержатся в работе [6] для процесса холодной экструзии высокопластичных материалов. Физико-механические параметры материала Bi_2Te_3 выбраны согласно работе [7]: $E = 40$ ГПа – модуль Юнга; $\nu = 0.3$ – коэффициент Пуассона; $\sigma_0 = 102$ МПа – критическое напряжение Мизеса для перехода из упругого в пластическое состояние материала.

В ГЭ процессе пластическое течение материала возникает за счет его нагрева (до температуры 780 К, которая примерно на 10 % ниже температуры плавления Bi_2Te_3 – 860 К) и одновременного его сдавливания между прессом и искривленной поверхностью фильеры при средних напряжениях (по Мизесу) превосходящих экспериментально известный порог ($\sigma_0 = 102$ МПа). Считается, что возникающее пластическое течение материала способствует его рекристаллизации в направлении выдавливания при ГЭ процессе (т.е. в осевом направлении). При ГЭ процессе в местах, где возникает пластическое течение материала, для соблюдения точности и устойчивости расчета первоначально заданная регулярная сетка адаптивно изменяется в областях наи-

больших напряжений. Иллюстрация таких адаптивных изменений сетки и векторов возникающего пластического течения показана на рисунке 2, б и в.

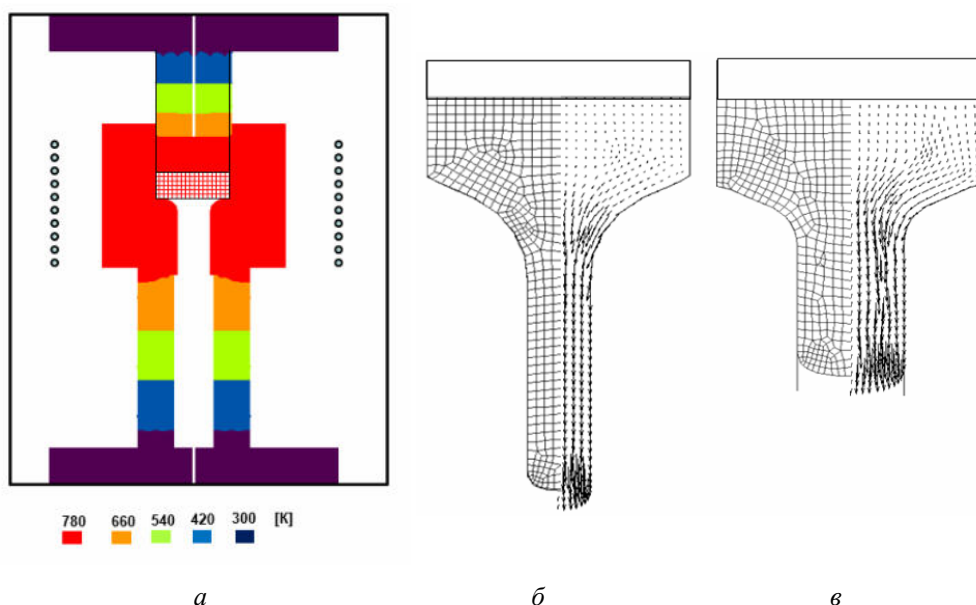


Рис. 2. а – Температурное поле в модели ИПС-ГЭ установки; адаптивная сетка (слева от оси) и векторы пластического течения (справа от оси) для фильер с выходным диаметром: б – 5 мм, в – 8 мм

Изолинии напряжений Мизеса в фильерах с разным выходным диаметром (5 и 8 мм) показаны на рисунке 3, а и б. Можно отметить, что величина напряжений в фильере с меньшим диаметром 5 мм существенно выше (примерно в 1.5 раз). На рис. 3, б и в показаны изолинии пластической деформации для 2-х фильер (5 и 8 мм). Сравнение показывает, что максимум пластической деформации примерно на 20 % выше в фильере с меньшим диаметром (5 мм) из-за большего объема сдавливаемой массы материала.

Таким образом, анализ возможностей ИПС установки для проведения ГЭ процесса теллурида висмута показал, что это требует разумных затрат по модернизации теплозащитной оснастки этой установки для размещения ростовых фильер. Такая модернизация была сделана для двух типов фильер, отличающихся диаметром выпускного отверстия (5 и 8 мм). В методике ГЭ процесса на предварительном этапе был использован оригинальный ИПС процесс для упрочнения исходной пресс-заготовки. Это позволило на следующем шаге самого ГЭ процесса считать пресс-заготовку уже не рыхлым (пористым) материалом, а твердым телом, таким же как материал оснастки – графит. Поэтому искровым энерговыделением пренебрегается, а учитывается энерговыделение, создаваемое переменным электромагнитным полем индуктора. Импульсный характер поля заменен на синусоидальный с идентичной ему частотой. Для расчета индукционного энерговыделения была написана программа на Фортране, которая в совокупности с программой для расчета теплопроводности в ИПС-ГЭ тепловом узле, позволила рассчитать температурное поле, соответствующее ГЭ про-

цессу. Показания датчика температуры, смонтированного в графитовой оснастке, соответствовали расчетным значениям температуры. Расчеты термонапряженного состояния материала в ГЭ процессе показали, что при выдавливании исходной пресс-заготовки через фильеры с разным диаметром выпускного отверстия напряжения отличаются. В фильере с меньшим диаметром напряжения Мизеса существенно выше критического порога для возникновения пластического течения. Это соответствует большим значениям пластической деформации и скорости ее изменения. Сравнение для обеих фильер проведено при остальных одинаковых параметрах. Для усиления пластического течения можно также повысить температуру ГЭ процесса, увеличить угол конуса фильеры, а также покрыть внутренние стенки фильеры пленкой, снижающей трение.

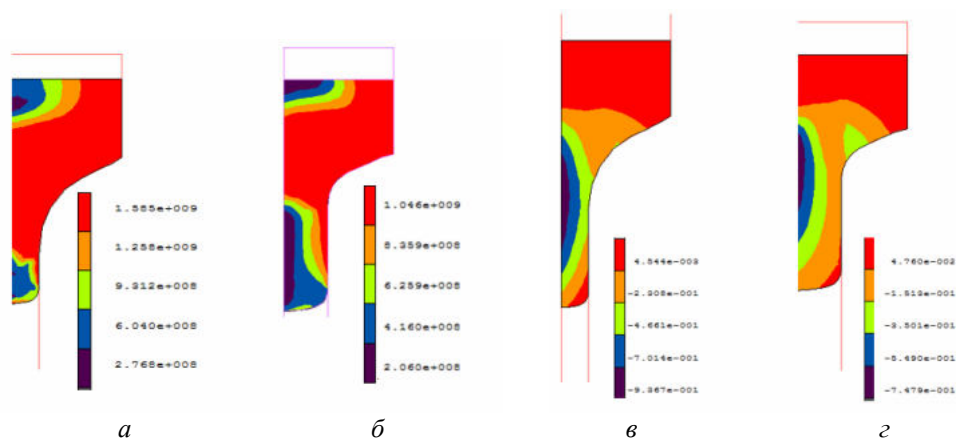


Рис. 3. Напряжение Мизеса $\sigma \times 10^7$ [МПа] в фильерах с выходным диаметром: а – 5 мм, б – 8 мм; пластическая деформация в фильерах с выходным диаметром: в – 5 мм, з – 8 мм.

Компьютерное моделирование выполнено по теме государственного задания (№ госрегистрации 124013000674-0).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Fan, G. Study on purification technology of silicon carbide crystal growth powder / G. Fan, T. Li, L. Zhao, S. Zhang // *Materials*. – 2022. – V. 15. No. 22. – P. 8190.
2. Атабеков, Г.И. Теоретические основы электротехники (Часть 1) – М.: Изд-во «Энергия», 1970. – 592 с.
3. Prostomolotov, A. *Crystmo/Net* remote access code for Czochralski crystal growth modelling / A. Prostomolotov, N. Ilyasov, N. Verezub // *Science and Technology*. – 2013. – V. 3, № 2A. – P. 18–25.
4. Егер, Дж. К. Упругость, прочность и текучесть. – М: Машгиз, 1961. – 170 С.
5. Horrobin, D.J. Die entry pressure drops in paste extrusion / D.J. Horrobin, R.M. Nedderman // *Chemical Engineering science*. – 1998. – V. 53. No. 18. – P. 3215–3225.
6. Tiernan, P. Modelling of cold extrusion with experimental verification / P. Tiernan, M.T. Hillery, B. Graganesu, M. Gheorghe // *J. Materials Processing Technology* – 2005. – V. 168. – P. 360–366.
7. Yang, J. Microstructure control and thermoelectric properties improvement to n-type bismuth telluride, based materials by hot extrusion / J. Yang, R. Chen, X. Fan, W. Zhu, S. Bao, X. Duan // *J. Alloys and Compounds* – 2007. – V. 429. – P. 156–162.