

## ИЗМЕРЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ПОМОЩИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ВИСМУТТЕЛЛУРОВЫХ ДАТЧИКОВ

С.С. МОИСЕЕВ, Л.И. ЖМАКИН, И.В. КОЗЫРЕВ

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)  
E-mail: office@msta.ac.ru

*Описана оригинальная технология изготовления тонкопленочного термопарного датчика теплового потока на основе полиимидной пленки с металлизированными слоями из висмута и теллура.*

*The original manufacturing technique of the thin-film thermopair sensor of a thermal torrent on the basis of polyamide film with the metallized layers made of bismuth and tellurium is described.*

**Ключевые слова:** измерение теплового потока, висмуттеллуровые датчики, полиимидная подложка, датчик теплового потока.

В настоящее время особенно широкое распространение в энергетическом комплексе получило измерение теплового потока и его поверхностной плотности непосредственно на исследуемом объекте. Для решения поставленной задачи предлагается оригинальная методика измерения при помощи тонкопленочных термопарных висмуттеллуровых датчиков теплового потока (ДТП), изготовленных методом вакуумного термического напыления.

Тепловая модель ДТП основывается на измерении теплового потока методом вспомогательной стенки. Элементарная теория данного метода использует стационарные решения первой краевой задачи теплопроводности для неограниченной пластины, согласно которому плотность теплового потока в любом сечении такой пластины постоянна. Также действие ДТП основано на продольном эффекте Зеебека, в результате чего данное устройство генерирует термо-ЭДС пропорционально перепаду температур горячего и холодного спаев в направлении вектора теплового потока [1].

Оригинальная конструкция тонкопленочного ДТП (рис. 1) представляет собой полиимидную подложку (1) с нанесенными на нее металлизированными слоями висмута (2) и теллура (3) толщиной 55 нм в определенной последовательности на ус-

тановке ВУП-5 со специально разработанной рабочей ячейкой. Осаждение металлизированных тонких пленок осуществляется при помощи метода вакуумного термического напыления, основанного на нагреве вещества в условиях высокого вакуума до температуры испарения с последующей конденсацией его паров на подложку [2].

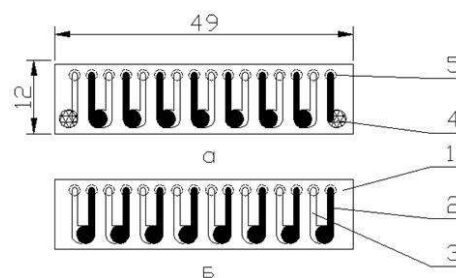


Рис. 1

Для получения давления остаточного газа порядка 10...5 мм рт. ст. разработана классическая вакуумная система с применением механического насоса для получения предварительного вакуума и паромасляного высоковакуумного насоса. Расплавление и испарение вышеперечисленных материалов осуществлялось при помощи испарителя типа «лодочка» размерами 34×5 мм из вольфрамовой фольги толщиной 20 мкм, изготовленного в лабораторных условиях. Во время проведения испарения рабочего вещества с испарителя

на подложку в рабочей ячейке включается нагреватель рабочей поверхности и поверхность конденсации достигает температуры  $60^{\circ}\text{C}$ , что значительно влияет на рост пленки.

Формирование рисунков в тонких пленках происходит через профилирующие маски заданной формы, изготовленные методом лазерной резки на производстве. Также на готовый образец наносится контактная группа (4) из серебра для присоединения внешних проводов способом обычной "оловянной" пайки. При испытаниях на прочность установлено, что внешний провод должен обладать высокой гибкостью из-за малой толщины металлического слоя с целью предотвращения разрушения пайки. Заключительным этапом сборки датчика является нанесение на рабочую поверхность ДТП диэлектрической пленки, предохраняющей от окисления материалов и механических повреждений. Конструктивной особенностью данного типа ДТП является наличие сквозных отверстий в теле подложки (5), через которые соединяются слои полупроводниковых материалов лицевой (а) и обратной (б) сторон.

С целью повышения адгезии металлизированного слоя с полиимидной пленкой до металлизации пленка подвергается термической обработке, а затем химической в растворе, содержащем воду, бихромат натрия и серную кислоту, при температуре  $60\dots 80^{\circ}\text{C}$  в течение  $3\dots 5$  мин [3]. Также для создания центров зародышеобразования и улучшения адгезии к подложке слои проводников наносились на предварительно напыленный подслои хрома толщиной  $13 \text{ \AA}$ .

Датчики данного типа градуируют абсолютным методом по джоуль-ленцеву тепловому потоку. Опыты проводились на экспериментальном стенде, где в качестве генератора свободноконвективного потока являлась пластина из нихрома размерами в плане  $99 \times 6 \times 0,2$  мм. Его мощность определялась по силе тока (I) и падению напряжения ( $\Delta U$ ) и контролировалась при помощи компенсационного резистора. Торцевые потери теплоты нагревателя не превышают 1%. Градуировочная характери-

стика стенда представлена на рис. 2.

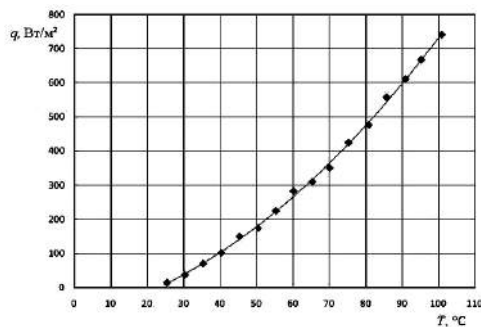


Рис. 2

С учетом того, что градуировка и эксплуатация датчика осуществляются после закрепления на жестком основании, принципиальное значение имеет способ крепления датчика на изделие. Стабильность показаний тонкопленочного ДТП достигается при монтаже образца на двухсторонней липкой ленте толщиной  $40 \text{ мкм}$  (МРТУ №6-05-111-6-68). Потери между основанием датчика и изделием незначительны и обусловлены характеристиками соединяющего клея ленты.

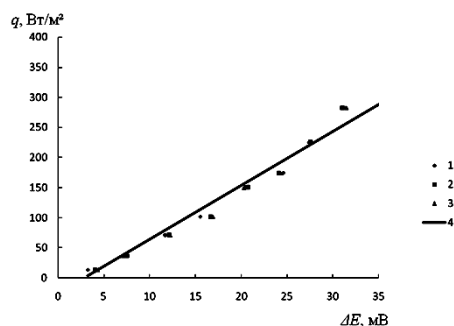


Рис. 3

Из градуировочной кривой датчика, представленной на рис. 3 (результаты градуировки тонкопленочного ДТП: 1...3 – опытные точки; 4 – градуировочная кривая), следует, что тонкопленочный ДТП генерирует «гладкую» (без изломов) термо-ЭДС, практически линейно связанную с удельным тепловым потоком в поперечном сечении датчика. Угол наклона прямой  $\Delta E(q)$  не зависит от уровня температур на большей части диапазона, в которой используется датчик. Максимальная мощность, выделенная на нагревателе, состав-

вила 0,33 Вт, что в пересчете на площадь ДТП соответствует плотности теплового потока 282,7 Вт/м<sup>2</sup>. Тепловые потери при такой градуировке, по нашим оценкам, не превышают 1%. Разброс экспериментальных точек от усредненной линейной характеристики в диапазоне температур от 25...60°C лежит в пределах 9%. Существенным достоинством датчиков данного типа является высокая чувствительность, составляющая 0,52 мВ/К, и относительно малое омическое сопротивление, порядок которого составляет 4 МОм. Исследование метрологических характеристик ДТП показало, что пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения не превышают ±5%.

Обработка сигналов ДТП ничем принципиально не отличается от обработки сигналов термопар. Аппаратура для их измерения не требует переналадки и дополнительных каскадов усиления, что является одним из важных практических достоинств ДТП.

Данные ДТП могут быть использованы для диагностики тепловых потерь через теплоизоляцию технологического оборудования и трубопроводов на предприятиях текстильной промышленности.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана технология изготовления тонкопленочных висмуттеллуридных датчиков для измерения стационарных тепловых потоков.

2. Показано, что гибкость конструкции датчика позволяет монтировать его в труднодоступных местах и на тонких объектах без механической обработки.

3. Изготовлены и испытаны в лабораторных условиях тонкопленочные ДТП на базе полиимидной пленки толщиной 60 мкм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Градиентные датчики теплового потока. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003.

2. Технология тонких пленок (справочник) // Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга. Нью-Йорк, 1970 / Пер. с англ. Под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Сомоко. Т.1. – М.: Сов. Радио, 1977.

3. Казарян А.А. Пленочные датчики давления. – М.: Изд-во «Бумажная Галерея», 2006.

Рекомендована кафедрой промышленной теплоэнергетики. Поступила 09.04.10.