

12

Градиентные датчики для высокотемпературной теплотметрии

© С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, С.А. Можайский

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: serg.sapozhnikov@mail.ru

Поступило в Редакцию 24 декабря 2007 г.

Созданы новые градиентные датчики теплового потока, термостойкость которых повышена путем использования тугоплавких металлов и сплавов, образующих слоистую гетерогенную микроструктуру. Датчики позволяют измерять тепловой поток на поверхности и в среде при температуре до 1300 К.

PACS: 44.90.+c

Для измерения теплового потока все шире используют градиентные датчики теплового потока (ГДТП), выполненные в виде батареи термоэлементов из монокристаллического висмута [1,2 и др.]. Действие ГДТП основано на поперечном эффекте Зеебека: выходной сигнал (термоэдс) линейно связан с тепловым потоком, проходящим через датчик. Вольт-ваттная чувствительность ГДТП из висмута составляет 5–20 мВ/Вт, а верхняя границы термостойкости датчиков определяется точкой плавления висмута (544 К), что ограничивает их применение при более высокой температуре [1–4].

Идею искусственной гетерогенной структуры для ГДТП (рис. 1) впервые высказал Л. Гайлинг (Geiling) [5]. Он утверждал, что при несимметричном нагреве пластины толщиной H , выполненной из чередующихся слоев материалов 1 и 2, наклоненных к поверхностям пластины под углом θ , возникает термоэдс, которую можно измерить

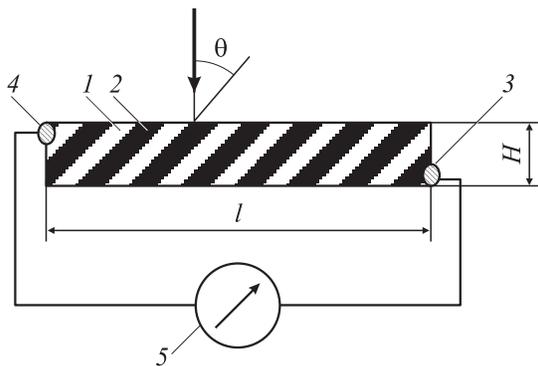


Рис. 1. Схема ГДТП из чередующихся слоев материалов с различными физическими свойствами.

прибором 5, подключенным к контактам 3 и 4. При этом плотность теплового потока

$$q = \frac{e}{S_0 F} \text{ W/m}^2,$$

где e — термоэдс, мВ; S_0 — вольт-ваттная чувствительность ГДТП, мВ/Вт; F — площадь ГДТП в плане, м².

Термоэдс такого датчика, отнесенная к его длине l :

$$\frac{e}{l} = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2\lambda_1} q \frac{k_\delta(k_\lambda - k_\rho)}{(k_\delta + k_\rho)(k_\delta + k_\lambda)} \sqrt{\frac{k_\delta + k_\lambda}{1 + k_\delta k_\lambda} \frac{1}{k_\lambda}},$$

где индексы 1 и 2 относятся к слоям материала 1 и 2 соответственно; ε — коэффициент термоэдс, мВ/К; λ — теплопроводность, Вт/(м·К); ρ — электропроводность, $\Omega \cdot \text{m}$; $k_\delta = \frac{\delta_2}{\delta_1}$; $k_\lambda = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$; $k_\rho = \frac{\rho_2}{\rho_1}$.

Из структуры формулы следует, что вклад величин ε , λ , ρ в уровень термоэдс неоднозначен, а потому следует рассмотреть достаточно широкий перечень материалов.

Попытки Р.А. Дерриберри и Б.С. Манна создать композиции из висмута и титана, а также теллурида висмута и висмута также не позволили повысить термостойкость. Термостойкость ГДТП [6,7], выполненных из анизотропных пленок YBaCo , $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_{7-8}$ и $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CoCu}_2\text{O}_8$ (так называемых ALTP = Atomic Layer Thermopile) также не превышает

350 К. Аналогичным недостатком обладают датчики, которые исследовал А.Б. Опаричев [8]. В работе Р.-М. Сьюджей (Sujoy Raphael-Mabel) [9] представлен датчик из спаянных пластин стали и латуни, который был использован как многослойная дифференциальная термопара; его термостойкость определяется свойствами припоя, поэтому также сравнительно невысока. Композиция медь–константан, созданная Т. Занером (Zahner Th.) и др. [10], работоспособна на воздухе до 700 К.

Мы предлагаем использовать гетерогенные слоистые макроструктуры на основе тугоплавких металлов, соединенных методом диффузионной сварки. К настоящему времени созданы ГДТП на основе композиций сталь 12Х18Н9Т–никель, сталь 65Х13–никель, хромель–алюмель и железо–константан. Эти ГДТП применимы до 1300 К.

Технология производства ГДТП состоит в следующем (рис. 1). Нарезают металлические пластины 1 и 2 (никель–сталь и др.). Свариваемые поверхности должны быть обезжиренными, с высотой микронеровностей в 1–10 мкм. Стопку чередующихся пластин помещают в электрическую печь, сжимают давлением 0.1–0.2 МПа и нагревают до температуры, составляющей 0.5–0.7 от абсолютной температуры точки солидус менее тугоплавкого материала (для чистых металлов — точки плавления). Время выдержки при этой температуре составляет 60–900 с. Нагрев можно вести в вакууме до 10^{-4} мм Hg, однако получение качественных заготовок возможно и при нагреве без использования вакуума или защитных сред. В результате образуется многослойный брусок с анизотропией тепло-, электрофизических и термоэлектрических свойств. После охлаждения брусок разрезают на пластины, расположенные под углом от 20 до 45° к его плоскостям. Затем присоединяют выводы 3 и 4 из материала с достаточной термостойкостью. Изготовленные таким образом датчики градуируют абсолютным методом [1,2]. Вольт-ваттная чувствительность датчиков при температуре около 300 К показана в таблице.

Вольт-ваттная чувствительность датчиков при температуре около 300 К

Композиция	Чувствительность, mV/W
Никель–сталь 12Х18Н9Т	0.40
Хромель–алюмель	0.35
Титан–молибден	0.02

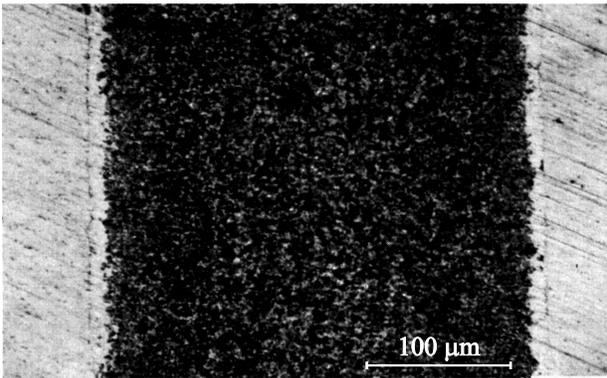


Рис. 2. Микроструктура соединения слоев стали 12X18H9Т и никеля.

Качество соединения на микроуровне контролировалось металлографически (на рис. 2 показана микроструктура одной из композиций), а также с помощью микроанализатора „Сamebaх-Microbeam“ фирмы Самеса (Франция). Наблюдение проводилось в оптическом микроскопе ($\times 400$) и во вторичных электронах в режиме сканирования электронным зондом ($\times 100-20\,000$). Состав определялся методом количественного рентгеноспектрального микроанализа с помощью спектрометров с волновой дисперсией. Условия анализа: энергия электронного пучка — 10 keV, ток — 10 nA, система элементов — Ni–Fe, аналитические линии — NiK_{α} , FeK_{α} , эталоны — металлические никель и сталь, используемые при получении композита. Точность анализа 5% относительных; пространственное разрешение: поперечное (диаметр анализируемой области) — 1.5–2.5 μm , продольное (по глубине) — 0.7 μm . Анализ показал, что ширина зоны диффузии составляет около 5 μm , что обеспечивает механическую прочность соединения и не затрагивает исходные материалы на 90–95% их толщины.

Считаем, что создание новых ГДТП со слоистой гетерогенной макроструктурой позволяет: повысить термостойкость, снизить трудоемкость изготовления и управлять термическим сопротивлением, чувствительностью и толщиной датчиков.

Авторы благодарны д.т.н., проф. О.А. Барабановой и н.с. С.В. Набатчикову за помощь в выполнении диффузионной сварки в вакууме.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 08-08-00414-а и 08-08-00801-а).

Список литературы

- [1] Дивин Н.П. Датчик теплового потока // Св-во на полезную модель № 9959 с приоритетом от 10.08.1998 / Дивин Н.П. Российское агентство по патентам и товарным знакам. 16.05.99. Бюллетень. Полезные модели. № 5.
- [2] Divin N., Sapozhnikov S. // Proceeding of International Symposium in Power Machinery. Moscow, 1995. P. 79.
- [3] Сапожников С.З. Градиентные датчики теплового потока: моногр. / Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. СПб.: СПбГПУ, 2003. 169 с.
- [4] Сапожников С.З., Митяков А.В., Митяков В.Ю. // Наука Кубани. Проблемы физико-математического моделирования. Естественные и технические науки. 1998. № 2. С. 17–21.
- [5] Geiling L. // Zschr. F. Angew. Phys. Bd. 3. P. 12.
- [6] Пиенай-Северин Д.А., Равич Ю.И., Ведерников М.В. // Физика и техника полупроводников. 2000. Т. 34. В. 10. С. 1265–1269.
- [7] Chang C.L., Kleinhammes A., Moulton W.G., Testardi L.R. // Physical Review B. 1990. V. 41. N 16. P. 11 564–11 567.
- [8] Опаричев А.Б. Исследование наклонноконденсированных пленочных материалов для термоэлектрических преобразователей лазерного излучения: дис. . канд. техн. наук: 05.27.06. М., 2006. 149 с.
- [9] Sujay Raphael-Mabel. Design and Calibration of Novel High Temperature Heat Flux Sensor. Thesis for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005.
- [10] Zahner Th., Forg R., Lengfellner H. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. N 10. P. 1364–1366.