

05:06

Повышение эффективности термоэлектрических нагревателей при использовании неоднородных ветвей

© М.А. Коржув

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова (ИМЕТ),
119991 Москва, Россия
Email: korzhuev@ultra.imet.ac.ru

(Поступило в Редакцию 12 декабря 2008 г.)

Установлена возможность повышения на 20% и более отопительного коэффициента L термоэлектрических нагревателей (ТЭН) при использовании неоднородных по длине ветвей. Выявлены особенности работы неоднородных ветвей в ТЭН по сравнению с термоэлектрическими генераторами и охладителями.

PACS: 85.80.Fi

Ранее для термоэлектрических преобразователей энергии (ТЭП) с неоднородным распределением термоЭДС α по длине l ветвей наблюдался рост параметра эффективности Z на 10–20% и соответственно КПД $\eta = A/Q_1$ термоэлектрических генераторов (ТЭГ), а также максимального перепада температур $\Delta T_c = \frac{1}{2} Z T_1^2$ и холодильного коэффициента $K = Q_0/A = (T_0/\Delta T)(M - T_0/T_1)/(M + 1)$ охладителей (ТЭО). Здесь $A = (Q_1 - Q_0)$ — работа, произведенная рабочим током I , Q_1 и Q_0 — тепло, выделяемое на горячем и поглощаемое на холодном спае, $M = (1 + Z(T_0 + T_1)/2)^{1/2}$, T_0 и T_1 — температура основания и рабочего спае модулей [1,2].

При изменении направления рабочего тока термоэлектрические охладители (ТЭО) превращаются в термоэлектрические нагреватели (ТЭН), последние характеризуются перепадом температур при нагреве ΔT_h и отопительным коэффициентом $L = Q_1/A$, связанным с холодильным коэффициентом ТЭО соотношением $L = K + 1$ [1]. Отсюда следует, что при использовании неоднородных ветвей характеристики ТЭН также могут улучшаться, однако ранее этот вопрос подробно не исследовался [2,3].

В настоящей работе показано, что при использовании неоднородных ветвей отопительный коэффициент L ТЭН может повыситься на 20% и более, что представляет практический интерес.

Эксперимент

Для измерений использовались „низкоомные“ (200/–200), „высокоомные“ (260/–260) и неоднородные (260/200/–200/–260) модули (табл. 1), собранные из двух термопар с p - и n -ветвями одинаковых размеров ($1.4 \times 1.4 \times 2.5$ mm). Ветви вырезались из однородных или „градиентных“ монокристаллов халькогенидов висмута и сурьмы (ХВС) [4], последние имели спад термоЭДС $|\Delta\alpha| \sim 60 \mu\text{V/K}$, по форме близкий к ступенчатому ($x/l \sim 1/2$) в направлении от „холодных“ к „горячим“ стыкам модулей. Модули включались в

термоэлектрические цепи в установке ТЭО ($\nabla\alpha \uparrow\uparrow I$) или ТЭН ($\nabla\alpha \uparrow\downarrow I$) (здесь ∇ — оператор градиента) [5].

В интервале температур $T = 90\text{--}350$ К при остаточном давлении воздуха в ячейке < 10 Pa исследовались перепады температуры ΔT ; точность измерений температуры T составляла 0.5 К, перепада температуры ΔT — 0.2 К, тока I — 3% [4,5].

Для расчетов использовались экспериментальные зависимости термоЭДС α , удельной электропроводности σ и теплопроводности κ соответствующих сплавов ХВС [4,5]. Применялась двухсегментная модель с подвижными границами сегментов $x = [0, l]$, результаты для однородных „низкоомных“ и „высокоомных“ ветвей получались при $x = 0$ и $x = l$ [5].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены значения измеренных перепадов температуры $\Delta T_{c,h}$ и указаны соответствующие рабочие токи I при условии $I\text{-const}$ между перепадами температур при нагреве для различных модулей наблюдается соотношение

$$\Delta T_h(2) \geq \Delta T_h(3) > \Delta T_h(1), \quad (1)$$

т.е. величина нагрева для неоднородного модуля оказывается несколько меньшей, чем для „высокоомного“ модуля с тем же суммарным перепадом термоЭДС $\Delta\alpha_\Sigma$ (табл. 1).

Перепад температуры при нагреве для двухсегментной модели дается выражением

$$\Delta T_h = \left((\bar{\alpha} T_1 + \Delta\alpha T^*) I + \frac{1}{2} I^2 R \right) / K. \quad (2)$$

Здесь $\bar{\alpha} = (\alpha_p - \alpha_n)$ и $\Delta\alpha = \Delta\alpha_n + \Delta\alpha_p$ — перепады термоЭДС на стыках термопар и на сегментах ветвей, T_1 и T^* — температуры рабочего стыка ТЭН и границы сегментов, R и K — электрическое сопротивление и теплопроводность ветвей модуля [4]. Выражение (2)

Таблица 1. Характеристики исследованных модулей в режимах охлаждения (*c*) и нагрева *h* ($T_0 = 300$ К, (*) — расчет)

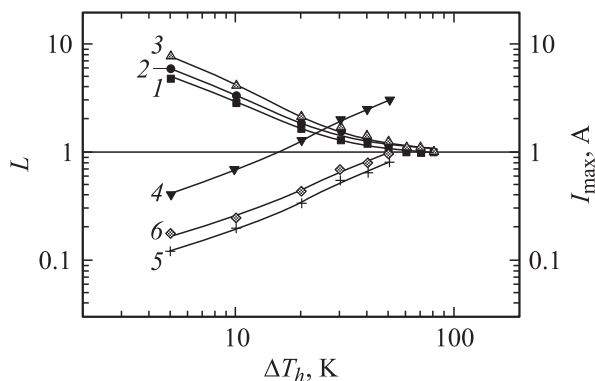
№ модуля	Перепад термоЭДС $\Delta\alpha_\Sigma$, $\mu\text{V/K}$	Электро-сопротивление, R , Ω	Теплопроводность, $K \cdot 10^3$, W/K	Термоэлектрическая эффективность, $Z \cdot 10^3$, K^{-1}	Перепады температуры/токи	
					ΔT_c , К I_0 , А	$\Delta T_h/I$, К/А ($I \rightarrow 0$)
1	400	0.035	4.86	2,6	68/ 2.9	25 (24*)
2	520	0.166	3.78	2,3	51/ 2.0	42 (44*)
3	520	0.101	4.32	3,2	75/ 3.2	35 (35*)

* Модули: 1 — (200/ – 200); 2 — (260/ – 260); 3 — (260/200/ – 200/ – 260).

объясняет полученные данные различиями теплопроводностей модулей K , суммарных перепадов термоЭДС $\Delta\alpha_\Sigma$ (модули 1 и 2) и температур стыков ($T_1 < T^*$) (модули 2 и 3). В табл. 1 приведены примеры расчетов по формуле (2) коэффициентов термоэлектрического нагрева $\Delta T_h/I$ модулей, соответствующих малым рабочим токам ($I \rightarrow 0$).

На рисунке показаны зависимости отопительного коэффициента $L = (T_1/\Delta T)^*(M - T_0/T_1)/(M + 1)$ и оптимального тока нагрева $I_{\max} = (\bar{\alpha}T_1 + \Delta\alpha T^*) \times \Delta T_h M / ((M + 1)R)$, рассчитанные по данным, полученным для ТЭО и ТЭН (см. табл. 1). Значения добротности Z модулей определялись из экспериментальных величин ΔT_c (табл. 1), температуры T^* измерялись термопарами в точках $x/l \sim 1/2$, а также рассчитывались методом кусочно-линейной интерполяции с учетом различной теплопроводности сегментов ветвей [5].

Из рисунка видно, что при $I = I_{\max}$ отопительный коэффициент L для неоднородного модуля (кривая 1) оказывается на $\sim 20\%$ большим, чем для лучшего из однородных — „высокоомного“ модуля (кривые 2,3), — что связано с увеличением его параметра эффективности ($Z(3) > Z(2)$) (см. табл. 1). Однако конфигурация ветвей и сегментов, использованная в настоящей работе для сравнения параметров различных модулей (см. табл. 1), не является оптимальной для получения максимума Z [1,2]. Поэтому для определения верхнего предела увеличения Z различных модулей (табл. 1)



Зависимости отопительного коэффициента L (1–3) и тока нагрева I_{\max} (4–6) от перепада температуры при нагреве ΔT_h ($T_0 = 300$ К). Модули: 1,4 — (200/ – 200); 2,5 — (260/ – 260); 3,6 — (260/200/ – 200/ – 260).

Таблица 2. Оптимальные поперечные сечения ветвей и сегментов модулей на основе ХВС ($x_1/l = x_2/l = 1/2$, 1 — высокоомный сегмент; 2 — низкоомный сегмент) и потери на рассогласование при использовании ветвей одинаковых сечений

Модуль	p_1	p_2	n_1	n_2	Потери на рассогласование, δZ , %
(200/ – 200)	–	1	–	0.80	4
(260/ – 260)	1	–	0.68	–	2
(260/200/ – 200/ – 260)	1	0.5	0.77	0.43	16

была проведена оптимизация ветвей по поперечному сечению и по положению границы сегментов и оценены соответствующие потери в Z (табл. 2) [1,2].

Найдено, что оптимальное положение границы „высокоомного“ сегмента для ТЭН составляет $x/l = 0.25–0.33$, что соответствует случаю ТЭГ и ТЭО [2,5], соответствующий резерв роста Z (3) (см. табл. 1) составляет 4%. Резерв роста Z (3) за счет оптимизации поперечных сечений ветвей и сегментов составляет $\sim 14\%$ (см. табл. 2). В результате при использовании „оптимизированных“ неоднородных ветвей можно ожидать суммарного роста L до $\sim 30\%$. Заметим, что увеличение Z , наблюдавшееся при переходе от однородных к неоднородным ветвям, а также в процессе оптимизации размеров ветвей и сегментов в различных типах ТЭП [1,2], имеет одну и ту же физическую природу, связанную с уменьшением относительного вклада необратимых процессов (выделения тепла Джоуля и теплопроводности) в общий баланс энергии модуля при нарушении пространственной симметрии ветвей.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе показано, что при использовании неоднородных ветвей отопительный коэффициент L ТЭН может быть повышен на 20% и более, что представляет практический интерес. При этом правило подключения неоднородных ветвей в термоэлектрические цепи ТЭН ($\nabla\alpha \uparrow \downarrow I$) отличается от случая ТЭГ и ТЭО ($\nabla\alpha \uparrow \uparrow I$). В то же время правило оптимизации модулей по поперечному сечению ветвей

и сегментов и по относительной длине сегментов в ветвях оказывается одинаковым для всех ТЭП. Полученные данные подтверждают принцип „универсальной“ применимости параметра Z к различным типам ТЭП [1], однако для неоднородных ветвей указанный принцип требует „надлежащего“ включения ветвей в термоэлектрические цепи. Известные соотношения между энергетическими характеристиками ТЭГ, ТЭО и ТЭН ($\eta \leq 0.1-0.2 \ll K < L$, а также возможность работы ТЭН в „энергосберегающем“ режиме $L > 1$) [1], делают ТЭН наиболее эффективными приборами для преобразования энергии, в частности, для решения актуальных проблем современности — утилизации энергии низкопотенциальных источников тепла и борьбы с „тепловым загрязнением“ окружающей среды [2].

Автор выражает благодарность к.т.н. Свечникову Т.Е., к.т.н. Иванову Л.Д. за предоставленные образцы ХВС, РФФИ — за финансовую поддержку (грант № 06-08-00084).

Список литературы

- [1] *Иоффе А.Ф.* Полупроводниковые термоэлементы. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1956. 104 с.
- [2] *Анатычук Л.И.* Термоэлектричество. Т. 2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. 376 с.
- [3] *Kuznetsov V.I.* Thermoelectric Handbook. Macro to Nano / Ed. By D.M. Rowe. London-NY: Taylor&Francis, 2006. P. 38-1–38-12.
- [4] *Коржуев М.А., Иванова Л.Д., Петрова Л.И.* // Сб. докл. междунар. научн. конф. „Актуальные проблемы физики твердого тела“ (ФТТ-2007). Минск. 2007. Т. 2. С. 104–107.
- [5] *Korzhuev M.A., Ivanova L.D., Petrova L.I., Granatkina Yu.V., Svechnikova T.E.* // Proc. 5th Europ. Conf. Thermoelectrics. Odessa, 2007. P. 148–151.