

Влияние излучения на погрешности термоэлектрических преобразователей

КОРОТЕНКО М. Н., СЛЕСАРЕВСКИЙ С. О., ЛЮБАРСКИЙ В. С., ПАВЛЕНКО В. П.

Термоэлектрические преобразователи (термопары) — одно из наиболее распространенных средств внутриреакторного контроля температуры. Такие преобразователи сами подвергаются облучению, что приводит к возникновению дополнительных погрешностей, которые подразделяют [1, 2] на переходные (т. е. наблюдаемые только при облучении) и остаточные. В настоящей работе рассматриваются остаточные погрешности хромель-алюмелевых (ХА) и хромель-копелевых (ХК) термоэлектрических преобразователей.

Известно, что основными причинами, обуславливающими появление остаточных погрешностей при длительном облучении, являются изменения в химическом составе и кристаллической структуре термоэлектродных материалов. Изменение химического состава термоэлектродов оценивали аналитически. Для расчета плотность потока тепловых нейтронов принимали равной $1 \cdot 10^{14}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, время облучения 10^6 с, 10^7 с и 10^8 с. Результаты расчета приведены в таблице. Из нее следует, что изменения исходного состава хромеля и алюминия при флюенсе тепловых нейтронов $\leq 1 \cdot 10^{21}$ нейтр./ см^2 0,001—0,01%, что находится в пределах допуска на химический состав сплавов по ГОСТ 492-73. Для копеля изменение термо-э. д. с. за счет увеличения содержания никеля на $\sim 0,1\%$ частично компенсируется влиянием примесей цинка [3]. Заметного изменения термо-э. д. с. вследствие изменения состава сплавов следует ожидать при флюенсе нейтронов $> 1 \cdot 10^{22}$ нейтр./ см^2 .

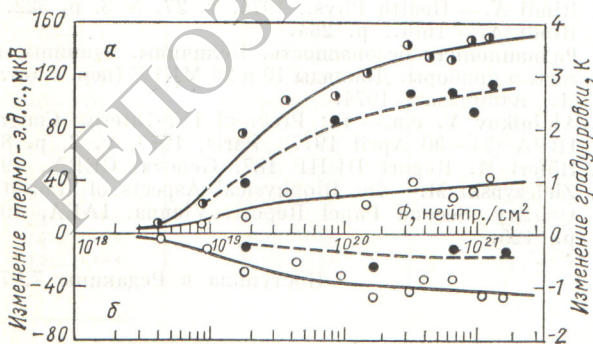
Экспериментальные исследования остаточных изменений термо-э. д. с. ХА- и ХК-преобразователей проведены при флюенсе $4 \cdot 10^{18} \div 1,3 \cdot 10^{21}$ нейтр./ см^2 ($E \geq 1,15$ МэВ). Испытывали 67 ХА- и 54 ХК-термоэлектрических преобразователя лабораторного и промышленного производства с диаметром термоэлектродов $0,1 \div 0,7$ мм. Конструкции промышленных преобразователей описаны в работе [4]. Индивидуальные градуировки термопреобразо-

вателей до облучения, а также после набора заданного значения флюенса нейтронов проводили с помощью метода сличения. Для некоторых преобразователей ($\sim 20\%$) градуировку выполняли по методу постоянных точек (при температуре таяния льда, кипения воды, затвердевания олова и свинца). При градуировках облученных преобразователей все внешние условия (глубина погружения, условия тепловода, порядок расположения и др.) были строго идентичны условиям первоначальной градуировки. Средняя квадратическая погрешность градуировки оценивается в 0,2 и 0,7 К для 0 и 450 °С соответственно при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$. Следует отметить, что учитывали результаты только для преобразователей, сопротивление изоляции которых было $\geq 4 \cdot 10^5$ Ом.

Облучение проводили на реакторе ВВР-М при плотности потока нейтронов $\Phi_T \approx 9 \cdot 10^{13}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$; $\Phi_0 \approx 3,5 \cdot 10^{13}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ и $E \geq 1,15$ МэВ. Для изучения влияния температуры термоэлектрические преобразователи облучали при 50—500 °С в одинаковых условиях. При этом сборки из 3—6 термоэлектрических преобразователей

Изменение состава термоэлектродных материалов по отношению к массе сплава, %

Элемент	Флюенс тепловых нейтронов, нейтр./ см^2		
	$1 \cdot 10^{20}$	$1 \cdot 10^{21}$	$1 \cdot 10^{22}$
Копель; $42,5 \div 44,0\%$ Ni + $0,6 \div 1,2\%$ Co + $0,1 \div 1,0\%$ Mn + Cu остальное (примеси; $0,15\%$ Fe + $0,1\%$ Si + $0,1\%$ C + $0,05\%$ Mg + $0,01\%$ S)			
Cu	-0,0184	-0,19	-1,91
Zn	0,0089	0,094	0,99
Ni	0,0095	0,098	0,92
Хромель; $9,0 \div 10,0\%$ Cr + $0,4 \div 1,2\%$ Co + Ni остальное (примеси; $0,4\%$ Si + $0,3\%$ Mn + $0,3\%$ Fe + $0,25\%$ Cu + $0,2\%$ C + $0,05\%$ Mg + $0,01\%$ S)			
Ni	-0,00016	-0,0016	-0,021
Cu	0,00016	0,0016	0,021
Cr	-0,00008	-0,0042	-0,065
V	0,00008	0,0042	0,064
Mn			0,0009
Fe			0,0001
Алюмель; $1,6 \div 2,4\%$ Al + $1,8 \div 2,7\%$ Mn + $0,85 \div 1,5\%$ Si + $0,6 \div 1,2\%$ Co + Ni остальное (примеси; $0,3\%$ Fe + $0,25\%$ Cu + $0,1\%$ C + $0,05\%$ Mg + $0,01\%$ S)			
Ni	-0,00016	-0,0017	-0,022
Cu	0,00016	0,0017	0,22
Mn	-0,0026	-0,013	-0,12
Fe	0,0026	0,013	0,12
Al	-0,0001	-0,001	-0,01
Si	0,00008	0,0008	0,008

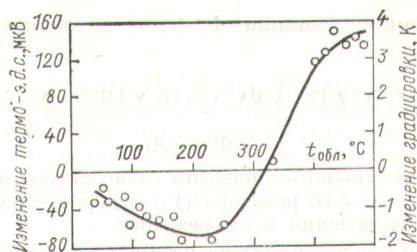


Р и с. 1. Зависимость остаточных изменений термо-э. д. с. ХА-преобразователей от флюенса быстрых нейтронов при температуре облучения ~ 450 °С (а) и ~ 110 °С (б) и температуре градуировки 100 (○), 300 (●), 400 (◐) °С

периодически (после набора промежуточного значения флюенса нейтронов) извлекали из активной зоны реактора и градуировали в диапазоне от 0° до температуры, не превышающей температуру облучения. Исследования проведены при недельных циклах работы реактора.

На рис. 1, а показана зависимость остаточных изменений термо-э. д. с. ХА-преобразователей от флюенса быстрых нейтронов. Температура облучения ~450 °С, результаты представлены для температуры градуировки 100, 300 и 400 °С. Видно, что облучение преобразователей при данной температуре приводит к положительным остаточным изменениям термо-э. д. с., значения которых линейно увеличиваются с возрастанием температуры градуировки. Для преобразователей, облученных при ~110 °С, остаточные изменения термо-э. д. с. отрицательны (см. рисунок 1, б). Характер изменения термо-э. д. с. в этом случае сложным образом зависит от температуры градуировки, превышающей температуру облучения, отрицательные изменения термо-э. д. с. (не превышающие 1%) наблюдались до 220—260 °С. Отжиг радиационных дефектов в процессе градуировки при > 350 °С восстанавливал термо-э. д. с. до своих исходных значений. Подобный характер изменения термо-э. д. с. получен также в работе [5] при облучении термопреобразователей до флюенса 1·20²⁰ нейтр./см² и температуре ~100 °С.

Зависимость остаточных изменений термо-э. д. с. ХА-преобразователей от температуры облучения приведена на рис. 2 (флюенс быстрых нейтронов 2—3·10²⁰ нейтр./см²). Изменения термо-э. д. с. определены для градуировки преобразователей при температуре, равной температуре облучения. Из этого рисунка следует, что она в значительной степени влияет не только на абсолютное значение, но и на знак остаточных изменений термо-э. д. с. Облучение термоэлектрических преобразователей при 50—260 °С приводит к снижению термо-э. д. с. Для диапазона температуры 300—350 °С характерно минимальное изменение термо-э. д. с. Облучение термопреобразователей при температуре >400 °С приводит к увеличению их исходной термо-э. д. с. Такой характер изменения последней можно объяснить влиянием процессов рекристаллизации, проте-



Р и с. 2. Влияние температуры облучения на остаточные изменения термо-э. д. с.

кающих в сплавах при этих значениях температуры. Аналогичные зависимости получены и для ХК-термоэлектрических преобразователей.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что в исследованном диапазоне температуры и флюенса быстрых нейтронов погрешности ХА- и ХК-термоэлектрических преобразователей, вызванные остаточными изменениями термо-э. д. с., не превышают 1% температуры. Незначительные изменения химического состава, а также восстановление термо-э. д. с. при отжиге указывают на то, что в данном случае изменения термо-э. д. с. преимущественно вызваны влиянием быстрых нейтронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bianchi G., Moretti S. — Energia Nucl., 1964, N 41, p. 426.
2. Маркина Н. В. Автореферат дис. Димитровград, 1974.
3. Агафонов А. К. и др. — В кн.: Исследование сплавов для термопар. Вып. 22. М., Металлургия, 1964, с. 5.
4. Коротенко М. Н., Слесаревский С. О. — Атомная энергия, 1977, т. 43, вып. 1, с. 47.
5. Правдюк Н. Ф., Иванов А. Н., Дубровин Н. П. — Там же, 1968, т. 25, вып. 3, с. 233.

Поступило в Редакцию 26.06.79

УДК 621.039.51

О точечном приближении в теории связанных реакторных систем

ЛУКИН А. В.

Впервые теория связанных реакторных систем в точечном приближении развита Р. Эйвери в работе [1]. Однако полученные в ней уравнения не учитывают взаимодействие каждого из связанных реакторов с самим собой через окружающее вещество и длительность нейтронного взаимодействия во времени; они сложны и поэтому малопримодны для анализа кинетики связанных реакторов. Позднее в работах [2, 3] делались попытки упростить уравнения Р. Эйвери и учесть отмеченные эффекты, но сделать это в полной мере не удалось.

Цель настоящей работы — формулировка условно-критической задачи и вывод свободных от недостатков работ [1—3] уравнений кинетики связанных реакторных систем в точечном приближении. При этом использовали точное уравнение переноса нейтронов и проводили анализ условий применимости одноточечного приближения для таких систем.

Условно-критическая задача. Рассмотрим систему N связанных реакторов, расположенных в неделяющейся среде. Условно-критическое уравнение для такой системы имеет вид

$$\frac{\mathbf{v}}{v} \nabla \Phi + \Sigma_t \Phi = \int d\mathbf{v}' \Sigma_s(\mathbf{r}, \mathbf{v}' \rightarrow \mathbf{v}) \Phi(\mathbf{r}, \mathbf{v}') + \frac{\chi(\mathbf{v})}{K} \int d\mathbf{v}' \nu \Sigma_f(\mathbf{r}, \mathbf{v}') \Phi(\mathbf{r}, \mathbf{v}'); \quad (1)$$

$$\Phi(\mathbf{r}, \mathbf{v})|_{\Gamma} = 0; \quad \mathbf{v}\mathbf{n} < 0.$$

Запишем сопряженную условно-критическую задачу для i-го изолированного реактора:

$$-\frac{\mathbf{v}}{v} \nabla \Phi_i^+ + \Sigma_t \Phi_i^+ = \int d\mathbf{v}' \Sigma_s(\mathbf{r}, \mathbf{v} \rightarrow \mathbf{v}') \times \times \Phi_i^+(\mathbf{r}, \mathbf{v}') + \frac{\nu \Sigma_f(\mathbf{r}, \mathbf{v})}{K_i} \int d\mathbf{v}' \chi(\mathbf{v}') \Phi_i^+(\mathbf{r}, \mathbf{v}'); \quad (2)$$

$$\Phi_i^+(\mathbf{r}, \mathbf{v})|_{\Gamma_i} = 0; \quad \mathbf{v}\mathbf{n}_i > 0.$$

В уравнениях (1), (2) K, K_i — эффективные коэффициенты размножения нейтронов во всей системе и в i-м реакторе соответственно; Γ, n и Γ_i, n_i — внешние поверхности и нормали к ним всей системы и i-го реактора. Остальные обозначения взяты из работы [4].