

# ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Я. Стависский, В. А. Толстиков. «Труды Второй всесоюзной конференции по ядерным реакциям при малых и средних энергиях, июль 1960 г.» М., Изд-во АН СССР, 1962, стр. 562.
2. Neutron Cross Section, Suppl. No. 2. Second Edition. Vol. II. A. Z 21 to 40. BNL-325, 1966.
3. Neutron Cross Section, Suppl. No. 2. Second Edition. Vol. III. A. Z 88 to 98. BNL-325, 1965.
4. W. Davey. Nucl. Sci. and Engng, **26**, 149 (1956).
5. A. Chaudhary, M. Sehgal. Phys. Rev., **152**, 1055 (1966).
6. В. А. Толстиков и др. «Атомная энергия», **17**, 505 (1964).
7. В. А. Толстиков и др. «Атомная энергия», **21**, 45 (1966).
8. Б. С. Дзелянов, Л. К. Пекер. Схемы распада радиоактивных ядер. А < 100. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1966.
9. И. В. Гордеев, Д. А. Кардашев, А. В. Малышев. Ядерно-физические константы. М., Госатомиздат, 1963.
10. А. В. Малышев. ЖЭТФ, **45**, 311 (1963).
11. W. Mannhart, H. Vonach. Progress Report on Nuclear Data Research in the Euratom Community (January 1 to December 31, 1966). Belgium, European-American Nuclear Data Committee, January 1967, p. 44.

## Выделение энергии при радиоактивном распаде некоторых изотопов трансурановых элементов

Ю. Ф. РОМАНОВ, А. С. КРИВОХАТСКИЙ

УДК 546.79

В настоящее время в достаточно больших количествах получают некоторые долгоживущие изотопы трансурановых элементов. В связи с этим интересно оценить выделение энергии весовыми количествами изотопов, обладающих сравнительно высокой удельной активностью. К таким изотопам прежде всего относятся  $\text{Pu}^{238}$  ( $T_\alpha = 86,4$  года,  $T_f = 5 \cdot 10^{10}$  лет),  $\text{Cm}^{242}$  ( $T_\alpha = 162,7$  года,  $T_f = 7,2 \cdot 10^6$  лет),  $\text{Cm}^{244}$  ( $T_\alpha = 17,59$  года,  $T_f = 1,4 \cdot 10^7$  лет),  $\text{Cf}^{252}$  ( $T_\alpha = 2,55$  года,  $T_f = 82$  года).

Энергия, выделяющаяся в единицу времени за счет  $\alpha$ -распада ( $\lambda_\alpha$ ) и спонтанного деления ( $\lambda_f$ ), определяется выражением

$$W = \lambda_\alpha N E_\alpha + \lambda_f N E_f,$$

где  $N$  — число ядер изотопа в момент времени  $t$ ;  $E_\alpha$  и  $E_f$  — энергия  $\alpha$ -распада и спонтанного деления соответственно. В случае  $\text{Pu}^{238}$ ,  $\text{Cm}^{242}$  и  $\text{Cm}^{244}$  отношения величин  $\lambda_f$  и  $\lambda_\alpha$  пренебрежимо малы, т. е. выделением энергии из-за спонтанного деления можно пренебречь. Распад  $\text{Cm}^{242}$  приводит к образованию  $\text{Pu}^{238}$ , причем

к моменту времени  $t$  накапливается следующее число ядер  $\text{Pu}^{238}$ :

$$N_{\text{Pu}} = N_{\text{Cm}}^0 \frac{\lambda_{\text{Cm}}}{\lambda_{\text{Pu}} - \lambda_{\text{Cm}}} (e^{-\lambda_{\text{Cm}} t} - e^{-\lambda_{\text{Pu}} t}).$$

Здесь  $N_{\text{Cm}}^0$  — исходное число ядер  $\text{Cm}^{242}$ .

Энергия  $\alpha$ -распада  $\text{Pu}^{238}$ ,  $\text{Cm}^{242}$ ,  $\text{Cm}^{244}$ ,  $\text{Cf}^{252}$  соответственно равна 5,585; 6,213; 5,899 и 6,211 Мэв. Можно принять, что в одном акте деления  $\text{Cf}^{252}$  в среднем выделяется энергия 185 Мэв (кинетическая энергия осколков). Отсюда выделение энергии в 1 г изотопа в 1 сек равно:  $\text{Pu}^{238}$  — 0,580 вт,  $\text{Cm}^{242}$  — 122 вт,  $\text{Cm}^{244}$  — 2,93 вт,  $\text{Cf}^{252}$  — 39,7 вт. Выделение энергии в  $\text{Cf}^{252}$  примерно наполовину связано со спонтанным делением (19,1 вт). Таким образом, 1 г  $\text{Cm}^{242}$  энергетически эквивалентен 210 г  $\text{Pu}^{238}$ , 42 г  $\text{Cm}^{244}$  и 3,1 г  $\text{Cf}^{252}$ . Зависимость величины  $W$  от времени описывается следующими выражениями:

$$W(\text{Pu}^{238}) = 0,580 e^{-2,55 \cdot 10^{-10} t};$$

$$W(\text{Cm}^{242}) = 122 e^{-4,93 \cdot 10^{-8} t} +$$

Зависимость энерговыделения в секунду  $W$  и интегрального энерговыделения  $Q$  в 1 г\* изотопа от времени

| Время    | W, вт             |                   |                   |                   | Q, дж             |                   |                   |                   |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|          | Pu <sup>238</sup> | Cm <sup>242</sup> | Cm <sup>244</sup> | Cf <sup>252</sup> | Pu <sup>238</sup> | Cm <sup>242</sup> | Cm <sup>244</sup> | Cf <sup>252</sup> |
| 0        | 0,580             | 122               | 2,93              | 39,7              | 0                 | 0                 | 0                 | 0                 |
| 1 месяц  | 0,580             | 107               | 2,92              | 38,8              | $1,50 \cdot 10^6$ | $2,94 \cdot 10^8$ | $7,58 \cdot 10^6$ | $1,03 \cdot 10^8$ |
| 2 месяца | 0,580             | 94,6              | 2,91              | 37,9              | $2,99 \cdot 10^6$ | $5,51 \cdot 10^8$ | $1,51 \cdot 10^7$ | $2,05 \cdot 10^8$ |
| 3 »      | 0,580             | 83,5              | 2,90              | 37,0              | $4,54 \cdot 10^6$ | $7,90 \cdot 10^8$ | $2,27 \cdot 10^7$ | $2,98 \cdot 10^8$ |
| 0,5 года | 0,578             | 55,9              | 2,87              | 34,5              | $9,08 \cdot 10^6$ | $1,34 \cdot 10^9$ | $4,61 \cdot 10^7$ | $5,85 \cdot 10^8$ |
| 1 год    | 0,576             | 26,2              | 2,81              | 30,0              | $1,82 \cdot 10^7$ | $1,97 \cdot 10^9$ | $9,22 \cdot 10^7$ | $1,09 \cdot 10^9$ |
| 3 года   | 0,566             | 1,68              | 2,60              | 17,1              | $5,47 \cdot 10^7$ | $2,50 \cdot 10^9$ | $2,65 \cdot 10^8$ | $2,54 \cdot 10^9$ |
| 5 лет    | 0,557             | 0,60              | 2,42              | 9,8               | $9,08 \cdot 10^7$ | $2,56 \cdot 10^9$ | $4,16 \cdot 10^8$ | $3,36 \cdot 10^9$ |
| 20 »     | 0,494             | 0,49              | 1,33              | 0,1               | $3,36 \cdot 10^8$ | $2,80 \cdot 10^9$ | $1,28 \cdot 10^9$ | $4,44 \cdot 10^9$ |
| 100 »    | 0,260             | 0,26              | 0,06              | —                 | $1,25 \cdot 10^9$ | $3,71 \cdot 10^9$ | $2,30 \cdot 10^9$ | $4,46 \cdot 10^9$ |

\* Имеется в виду начальный вес.

$$+ 0,574 (e^{-2,55 \cdot 10^{-10}t} - e^{-4,93 \cdot 10^{-8}t});$$

$$W(\text{Cm}^{244}) = 2,93e^{-1,25 \cdot 10^{-9}t};$$

$$W(\text{Cf}^{252}) = 39,7e^{-8,89 \cdot 10^{-9}t},$$

где  $t$  выражено в секундах,  $W$  — в ваттах.

Путем интегрирования этих уравнений по времени можно найти энергию, выделяющуюся за интервал времени  $t$ :

$$Q(\text{Pu}^{238}) = 2,27 \cdot 10^9 (1 - e^{-2,55 \cdot 10^{-10}t});$$

$$Q(\text{Cm}^{242}) = 2,46 \cdot 10^9 (1 - e^{-4,93 \cdot 10^{-8}t}) + 2,25 \cdot 10^9 (1 - e^{-2,55 \cdot 10^{-10}t});$$

$$Q(\text{Cm}^{244}) = 2,34 \cdot 10^9 (1 - e^{-1,25 \cdot 10^{-9}t});$$

$$Q(\text{Cf}^{252}) = 4,46 \cdot 10^9 (1 - e^{-8,89 \cdot 10^{-9}t}),$$

где  $Q$  выражено в джоулях.

Результаты расчета величин  $W(t)$  и  $Q(t)$  представлены в таблице.

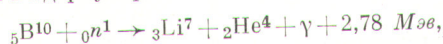
Поступило в Редакцию 26/IX 1967 г.

## Исследование радиационной стойкости боридов

Г. В. САМСОНОВ, М. С. КОВАЛЬЧЕНКО, В. В. ОГОРОДНИКОВ, А. Г. КРАЙНИЙ

УДК 621.039.553:546.271

Борсодержащие материалы, имеющие высокие поперечные сечения захвата медленных нейтронов, применяются в регулирующих устройствах и защитных блоках ядерных реакторов [1]. Медленные нейтроны, вступая в ядерную реакцию с атомами бора:



вызывают деление ядер бора на два легких осколка — ядра лития и гелия с энергиями 0,59 и 1,77 Мэв соответственно. Объем пары атомов лития и гелия почти в 10 раз больше объема материнского атома бора, поэтому каждый акт деления сопровождается сильным «распиранием» решетки. Вследствие большого поперечного сечения реакции деления ядер  $\text{B}^{10}$  (4010 барн) и высокой концентрации этих ядер в естественной смеси изотопов (19%) облучение боридов нейтронами приводит к быстрому накоплению лития и гелия в решетке. Это вызывает серьезное повреждение борсодержащих материалов (разрушение изделий из бора и карбида бора), поэтому необходимо установить, какие из этих материалов являются наиболее радиационностойкими.

Образцы боридов (диаметр 8 мм и высота 10–15 мм) облучались в вертикальном водоохлаждаемом канале ядерного реактора ВВР-М, расположенном в зоне отражателя. Температура облучения не превышала 100°С. Доза облучения всех материалов составляла  $10^{20}$  тепл. нейтр/см<sup>2</sup>.

Было обнаружено, что облучение приводит к появлению трещин в  $\text{TiB}_2$  и  $(\text{Ti}, \text{Cr})\text{B}_2$ , представляющем сплав  $\text{TiB}_2$  с 20 мол. %  $\text{CrB}_2$ , причем в  $(\text{Ti}, \text{Cr})\text{B}_2$  трещин больше, чем в  $\text{TiB}_2$ . Образцы  $\text{ZrB}_2$ ,  $\text{CrB}_2$  и  $\text{LaB}_6$  разрушились на осколки размером от одного до нескольких миллиметров.

Радиационная стойкость хрупких боридов в основном определяется способностью материала выдерживать высокие упругие напряжения, поскольку возможности снятия напряжений посредством пластической деформации в этом случае очень ограничены. Поэтому можно ожидать определенной корреляции между радиационной стойкостью и модулем нормальной упругости  $E$  или, в случае неодинакового размера зерен  $d$ , отношением  $E/\sqrt{d}$ , определяющим напряжение, необходимое для распространения трещины из одного зерна в другое. Из сравнения полученных данных следует (табл. 1), что такая корреляция действительно существует.

Причиной образования трещин и разрушения образцов боридов является накопление гелия в области несовершенств кристаллической структуры. Поэтому радиационная стойкость, как показано в работе [2,3], зависит от условий, контролирующих диффузию (в данном

случае микродиффузию) гелия в решетке боридов, т. е. от характера химической связи и кристаллической структуры.

Кристаллическая структура диборидов характеризуется чередованием слоев металла и бора. Поэтому диффузия атомов гелия между слоями будет зависеть от прочности химической связи  $\text{Me} - \text{B}$ .

Для характеристики прочности этой связи можно использовать предложенную ранее [4,5] модель, согласно которой наиболее прочные связи образуются при максимальной локализации валентных электронов у осотов атомов с образованием этими электронами энергетически устойчивых (стабильных) конфигураций. Для переходных металлов, атомы которых в изолированном состоянии имеют на  $d$ -оболочке пять или меньше электронов, наиболее устойчивой конфигурацией является  $d^5$ . При образовании боридов переходных металлов IV группы периодической системы, атомы которых являются преимущественно донорами электронов и имеют относительно невысокий статистический вес  $d^5$ -конфигураций, происходит переход нелокализованной части валентных электронов от атомов металлов к атомам бора. Это сопровождается стабилизацией  $sp^2$ -конфигураций атомов бора и локализацией у их осотов ранее нелокализованных электронов металла, что вызывает общую энергетическую стабилизацию всей системы, т. е. боридов. Атомы же переходных металлов V и VI групп являются преимущественно акцепторами электронов и нару-

Связь радиационной стойкости с модулем нормальной упругости

Таблица 1

| Соединение                         | $E$ ,<br>кн/мм <sup>2</sup> | $d$ ,<br>мкм | $E/\sqrt{d}$ | $l$ , мм      | $R$ ,<br>балл |
|------------------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| $\text{TiB}_2$                     | 530                         | 25           | 106          | Не разрушился | 5             |
| $(\text{Ti}, \text{Cr})\text{B}_2$ | 566                         | 30           | 103          | То же         | 4             |
| $\text{LaB}_6$                     | 398                         | 15           | 102          | 5             | 3             |
| $\text{CrB}_2$                     | 241                         | 9            | 70           | 3             | 2             |
| $\text{ZrB}_2$                     | 343                         | 38           | 55           | 2             | 1             |

Примечание.  $E$  — модуль нормальной упругости;  $d$  — средний размер зерна;  $l$  — средний размер осколка разрушившегося образца;  $R$  — радиационная стойкость в условных единицах.