

**Накопление Pu<sup>238</sup> и Np<sup>238</sup> при облучении Np<sup>237</sup> и U<sup>235</sup> для режима с многократной перегрузкой топлива \***

Таблица 9

<i>t</i> , день	$\frac{Pu^{238} + Np^{238}}{U^{235}_0}$ , %	<i>t</i> , день	$\frac{Pu^{238} + Np^{238}}{Np^{237}_0}$ , %
12,1	0,0019	4	5,10
24,2	0,0165	8	8,81
36,3	0,0474	12,1	11,5
48,4	0,0887	16,1	13,0
60,5	0,133	20,1	13,9
72,5	0,174	24,2	14,3
84,6	0,210	28,2	14,5
96,7	0,239	32,2	14,4
109	0,262	36,3	13,8
121	0,278	40,3	13,5
133	0,289	44,3	12,9
145	0,297	48,4	12,1
157	0,300	52,4	11,6
169	0,300	56,4	11,1
181	0,299	60,5	10,2
193	0,296	64,5	9,71
205	0,291	68,5	9,13
218	0,285		
230	0,279		

\* В начале кампании поток составлял 0,667 · 10<sup>15</sup> нейтр/см<sup>2</sup> · сек, γ = 0,10.

чения с многократной перегрузкой топлива. Перегрузка осуществлялась по достижении половинного выгорания топлива, что соответствовало уменьшению γ с 0,10 до 0,05 и увеличению потока нейтронов в два раза.

В заключение отметим, что приведенные значения выходов Pu<sup>238</sup> и Np<sup>238</sup>, а также оптимальное время облучения для реально существующих в реакторах величин γ значительно отличаются от данных работы [1]. Понижение максимума выхода Pu<sup>238</sup> и Np<sup>238</sup> с ростом потока нейтронов вызвано увеличением скорости реакции (n, γ)U<sup>237</sup> и (n, f)Np<sup>238</sup> по отношению к β-распаду этих изотопов. Все расчеты проводились с помощью специальной программы на ЭВМ М-20.

Поступило в Редакцию 29/1 1974 г.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. М. А. Бак и др. «Атомная энергия», 23, 561 (1967).
2. В. М. Горбачев и др. Основные характеристики изотопов тяжелых элементов. М., Атомиздат, 1970.
3. А. С. Кривоухатский, Ю. В. Романов. Получение трансурановых и актиноидных элементов при облучении нейтронами. М., Атомиздат, 1970.
4. Westcott et al. Atomic Energy Reven. Vol. VII. Vienna, IAEA, No. 4, 1959.
5. M. Drake, Nucl. 24, No. 8, 108 (1966).
6. A. Carlson et al. Nucl. Phys., A 141, 577 (1970).
7. N. Bauman. Trans. Amer. Nucl. Soc., 10, 264 (1967).
8. W. Corman et al. NSE, 31, 149 (1968).
9. G. Spansere, N. Bauman. Trans. Amer. Nucl. Soc., 12, 284 (1969).

Специальные расчеты, результаты которых приведены в табл. 9, подтвердили правомерность такого приближения. Данные табл. 9 соответствуют режиму облу-

**Состав карбидной фазы в сплавах урана с цирконием и ниобием**

Л. И. ГОМОЗОВ, Э. М. ЛЮТИНА, В. А. МАХОВА, О. С. ИВАНОВ

УДК 669.014

Легирование урана цирконием и ниобием представляет интерес в связи с их благоприятными ядерными свойствами. В данной работе было исследовано взаимодействие циркония и ниобия с основной примесью урана — углеродом, содержание которого в техническом металле составляет 1 ат.% или более. Монокарбиды циркония и ниобия характеризуются [1] более низкими термодинамическими потенциалами образования, чем UC (соответственно —43,4; —32,6; —22,0 ккал/г·моль). В связи с этим цирконий и ниобий вытесняют уран из карбидной фазы в сплавах [2], однако направление конод в состав сосуществующих фаз в области твердых растворов уран — цирконий и уран — ниобий не установлены.

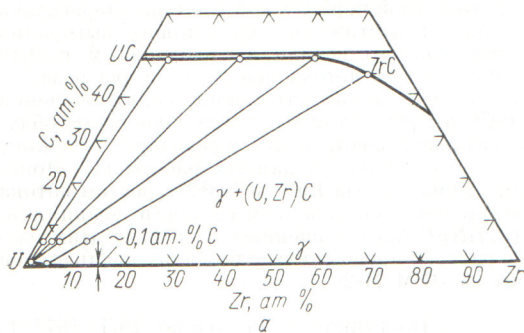
Сплавы были приготовлены аргоно-дуговой плавкой графитовой крупки и урана, содержащего (в вес.%): углерода — 0,05; железа — 1,8 · 10<sup>-2</sup>; кремния — 8,6 · 10<sup>-3</sup>; алюминия — 3,3 · 10<sup>-3</sup> (рис. 1, табл. 1, 2). Содержание металлических элементов во включениях и матрице определяли с помощью рентгеновского мик-

роанализатора MS-46 фирмы «Камека». Диаметр электронного зонда равен 1 мк. Напряжение во время эксперимента составляло 15 кВ. При определении содержания циркония или ниобия съемку вели по линиям L-серии. Расчет поправок на взаимное поглощение

**Составы сплавов с цирконием и сосуществующих в них фаз**

Таблица 1

Номер сплава	Химический состав сплава, ат.%		Термообработка	Содержание циркония, ат.%	
	цирконий	углерод		в матрице	в карбидах
254	1,12	5,1	950° С,	0,4	3,5—5,5
255	3,20	5,0	240 ч	0,6	18,5—21,5
251	4,71	4,9	закалка	0,6	33—36
256	10,21	5,0	в воде	3,9	45—50



(U — Zr — C) или 1000° С (U — Nb — C) в течение 100 и 240 ч состав карбидов выравнивался. Содержание ниобия в карбидах повышалось по сравнению с литым состоянием и почти не изменялось при увеличении выдержки при указанных температурах от 100 до 240 ч. Это показывает, что принятая длительность отжига (240 ч) достаточна для достижения равновесия с матрицей карбидных включений относительно малого размера.

Система U — Zr — C при 950° С (см. рис. 1, а) характеризуется сосуществованием γ-фазы, содержащей не более 0,1 ат. % углерода [4], с твердым раствором (U, Zr)C; коноды направлены к цирконию уже при содержании в матрице 4 ат. % циркония. При малых содержаниях циркония выделяется почти нелегирован-

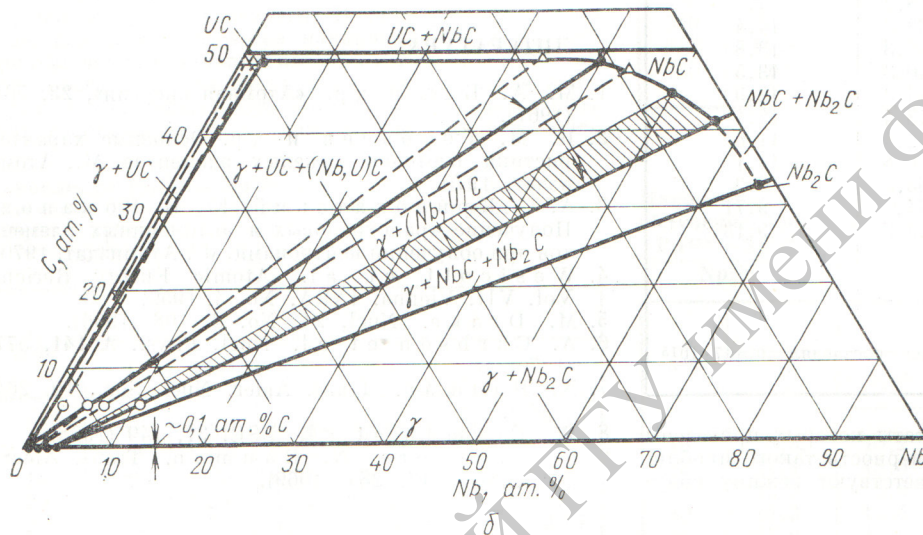


Рис. 1. Изотермические сечения диаграмм состояния U—Zr—C при 950° С (а) и диаграммы U—Nb—C при 1000° С (б).

Пунктирными линиями соединены составы фаз для литых сплавов.

и атомный номер элемента проводили по известной методике [3].

Средний размер частиц карбидов был наименьшим для сплавов U — Nb — C. В литых сплавах частицы неоднородны по сечению, но после отжигов при 950° С

новый карбид урана. Это вызвано стабилизацией (U, Zr)C по сравнению с ZrC благодаря энтропии смешения. Состав карбидной фазы в этих сплавах в пределах погрешности определения одинаков для литого и отожженного состояний.

Составы сплавов с ниобием и сосуществующих в них фаз

Таблица 2

Номер сплава	Химический состав сплава, ат. %		Содержание ниобия в зависимости от термической обработки, ат. %					
	ниобий	углерод	в матрице			в карбидах		
			литой	950° С, 240 ч	1000° С, 240 ч	литой	950° С, 240 ч	1000° С, 240 ч
257	1,05	4,9	0,48—0,87	0,69—0,74	0,18 0,38	0,3	—	2 и 40
258	3,68	4,9	1,8—2,3	—	0,18 0,32	1 и 36	—	2 и 40
252	4,95	4,8	—	1,52—2,55	0,39	1,7 и 35	—	2 и 40—44
259	9,92	5,2	2,55—5,3	—	3,0—3,25	44	48	50—57 и 66

Изотермическое сечение системы U — Nb — C при 1000° С (см. рис. 1, б) обнаруживает расслоение в псевдобинарной системе UC — NbC. Это связано, по-видимому, с относительно большим различием (10%) параметров решетки UC и NbC. При высоких температурах они образуют непрерывный ряд твердых растворов.

В отличие от сплавов U — Zr — C для сплавов с ниобием наблюдается существенное обогащение карбидной фазы ниобием при отжиге. Поскольку температура солидуса для изученных сплавов превышает температуру отжига лишь на 100—200° С, это явление, по-видимому, обусловлено неравновесной кристаллизацией карбидов при затвердевании.

Результаты исследования связывания легирующих элементов в сплавах, содержащих 3 ат. % углерода (что характерно, например, для индукционной плавки в графитовых тиглях), показаны на рис. 2. Особенности изотермических сечений определяют характер зависимостей между составом матрицы и сплава, непосредственно показывающих, что первоначальное введение циркония и ниобия в уран, содержащий углерод, приводит к соответствующему возрастанию содержания их в матрице лишь до 0,4—0,6 ат. %. Далее идет переход присадок в карбиды, который прекращается лишь после израсходования всего углерода. Совместное легирование двумя карбидообразующими элементами при соотношении 1 : 1 приводит к их связыванию приблизительно пропорционально теплоам образования карбидов (см. кривые 3 и 4 на рис. 2).

Поступило в Редакцию 16/X 1969 г.  
В окончательной редакции 26/IV 1971 г.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Термодинамические свойства неорганических веществ. Под ред. А. П. Зефинова. М., Атомиздат, 1965.

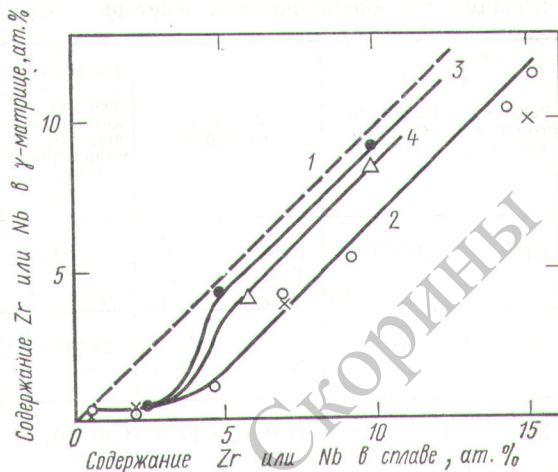


Рис. 2. Зависимость содержания циркония и ниобия в  $\gamma$ -матрице при 1000° С от состава сплавов, содержащих 3 ат. % углерода:

1 — соотношение при отсутствии связывания в карбиды; 2 — для сплавов U — Zr (x), U — Nb, U — Zr — Nb (соотношение Zr : Nb = 1 : 3, связывание ниобия), U — Nb — Mo (o); 3 — связывание ниобия в сплавах U — Zr — Nb при отношении Zr : Nb = 1 : 1; 4 — связывание циркония в тех же сплавах.

2. F. Benesovsky, E. Rudy. Planseeber. Pulvermetallurgie, 9, 65 (1961).  
3. В. И. Рудник, И. Б. Боровский. «Заводская лаборатория», № 8, 955 (1967).  
4. В. Blumenthal. J. Nucl. Mat., 2, No. 3, 197 (1960).

**Активация продуктов коррозии надтепловыми нейтронами в реакторах с водой под давлением**

А. М. МИТЕРЕВ, А. И. КАСИРОВИЧ, Н. В. БЫЧКОВ

УДК 539.172.4:621.039.5

Методам расчета активации продуктов коррозии в реакторных установках посвящено несколько работ [4—7]. Как правило, в этих работах учитывалась активация тепловыми нейтронами и не рассматривались реакции вида  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, 2n)$ . Исключение составляет работа [6], в которой исследовалось накопление  $Co^{58}$  и  $Mn^{54}$  в предположении, что спектр быстрых нейтронов  $\sim 1/E$ . Это грубое допущение, так как реакции типа  $(n, p)$  являются пороговыми  $E_{пор} > 0,5 \text{ МэВ}$ , кроме того, в реакторе спектр нейтронов с энергией выше пороговой ближе к спектру деления.

В настоящей работе на основании известных данных [8] по реакциям образования радиоактивных изотопов оценен вклад активации продуктов коррозии надтепловыми нейтронами.

Уравнение накопления  $i$ -го радиоактивного изотопа в первом контуре ядерного реактора с водой под давлением в соответствии с работой [7] можно записать в виде (индекс  $i$  опущен)

$$\frac{dq}{dt} = -\lambda q + Q(t) S R q_{e0} \exp(-\lambda t) +$$

$$+ \sum_j \frac{N_0 f_s^j f_n^j S R}{\lambda M^j} Q(t) [1 - \exp(-\lambda t)] \int_E \sigma_a^j(E) \Phi(E) dE +$$

$$+ \sum_j \frac{N_0 f_s^j f_n^j S R}{M^j} \int_0^t Q(\tau) d\tau \int_E \sigma_a^j(E) \Phi(E) dE, \quad (1)$$

где  $\sigma_a^j(E)$  — микроскопическое сечение образования  $i$ -го изотопа из  $j$ -го изотопа-мишени в результате реакций  $(n, \gamma)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, 2n)$ ;  $\Phi(E) dE$  — поток нейтронов с энергией в интервале  $(E, E + dE)$ , усредненный по геометрии зоны;  $q_{e0}$  — исходное число ядер  $i$ -го изотопа в единице массы материала активной зоны;  $f_s^j$  — содержание активируемого элемента в материале активной зоны;  $f_n^j$  — содержание активируемого изотопа в природной смеси;  $f_c^j$  — содержание активируемого элемента в продуктах коррозии. Остальные обозначения приведены в работе [7].

Если принять, что контур изготовлен из однородного материала и материал корродирует однородно и го-