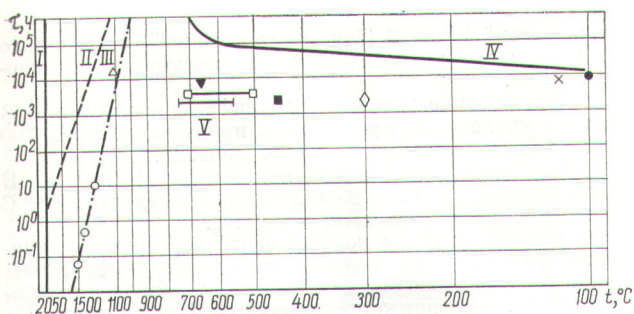




Температурно-временные границы стойкости:

I — фазовый переход; II — рост зерен; III — выделение гелиевой пористости; IV — радиационное разрушение; V — область применения BeO в реакторах: Δ , ∇ , $\blacksquare$ — [11], поток быстрых нейтронов соответственно $4,2 \cdot 10^{21}$, $4,0 \cdot 10^{21}$ и $1,1 \cdot 10^{21}$ нейтр/см²; $\square$ — [12], $1,0 \cdot 10^{21}$ нейтр/см²; $\square$ — [4], $1,2 \cdot 10^{21}$ нейтр/см²; $\diamond$ — [10], $8 \cdot 10^{20}$ нейтр/см²; $\times$ — [13], $2,8 \cdot 10^{21}$ нейтр/см²; $\bullet$ — [2], $4 \cdot 10^{21}$ нейтр/см². В первых шести случаях BeO не разрушена, в последних двух — рассыпалась в порошок.

ческой решетке. Ранее в ряде экспериментов [8, 9] было показано, что заметная подвижность атомов гелия наступает при температурах выше 1000—1200° C, когда отжигаются почти все радиационные эффекты, и прежде всего анизотропное расширение кристаллической решетки. Это дает основание полагать, что при температурах отжига 1300—1500° C на образование и рост пор не будут оказывать серьезного влияния дефекты радиационного происхождения, не связанные с существованием в кристаллической решетке атомов гелия. Одноступенчатые угольные реплики со свежих сколов облученных образцов, отожженных при температурах 1300—1500° C, просматривались в электронном микроскопе УЭМБ-100 [10]. Примерно равные по размеру и распределению на сколах поры были получены при

трех температурах и соответственно трех различных временах отжига. Эти точки нанесены на рисунке (светлые кружки) и по ним проведена штрих-пунктирная прямая. Ее можно рассматривать как температурную границу образования гелиевых пор, что подтверждается экспериментальными данными работы [11].

Построенная температурно-временная диаграмма характеризует стойкость BeO в широких интервалах температур, а также сроки эксплуатации. Можно видеть, что в области температур 900—1000° C в BeO мало проявляются эффекты, присущие как низкотемпературному, так и высокотемпературному облучению. Эту концепцию желательно проверить путем прямых экспериментов в условиях реактора.

Поступило в Редакцию 6/X 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сб. «Окись бериллия». Перев. с англ. Под ред. Р. А. Беляева, В. И. Купаковского. М., Атомиздат, 1968.
2. С. Т. Конобеевский, В. И. Клименков, В. М. Косенков. «Докл. АН СССР», 165, 524 (1965).
3. А. В. Худяков и др. «Атомная энергия», 24, 488 (1968).
4. Б. С. Хикман, А. В. Прайор. См. [1], стр. 41.
5. М. Дж. Баннистер. См. [1], стр. 295.
6. С. Б. Остерман. См. [1], стр. 232.
7. Дж. Эдстон и др. См. [1], стр. 60.
8. J. Elston. Radiation Damage in Reactor Materials, Vienna, IAEA, 1963, p. 703.
9. L. Weil, J. Aslanian. Kältetechnik, 14, No. 12, 397 (1962).
10. А. В. Худяков, З. Е. Островский, В. И. Клименков. «Атомная энергия», 23, 226 (1967).
11. Дж. В. Кейлхольтц и др. См. [1], стр. 29.
12. Р. Г. Миллз и др. См. [1], стр. 79.
13. R. Shields et al. Report. ORNL-3164 (1961).

Рений и его сплавы с бором — эффективные поглотители нейтронов

Б. Г. АРАБЕЙ, В. И. МАТВЕЕВ, В. П. СМЕРНОВ, К. И. ФРОЛОВА

УДК 669.849:621.039.562

Рений и его сплавы с бором представляют интерес в отношении их использования в системах регулирования быстрых реакторов. Как известно, область высоких энергий характеризуется относительно небольшими величинами нейтронных сечений элементов, что ограничивает выбор достаточно эффективных материалов для систем регулирования.

Наиболее эффективными поглотителями в быстрых реакторах являются материалы на основе высокообогащенного бора (по B^{10}), затем окись европия, рений и тантал; последний примерно в 2 раза менее эффективен, чем рений. Остальные материалы имеют существенно меньшую эффективность [1].

С учетом возможности получения интересных материалов, сочетающих свойства рения и бора, было проведено изучение эффективности рения и его некоторых сплавов с бором, а также оценена коррозионная стойкость таких материалов в натрии и их совместимость при нагревании с нержавеющей сталью.

В работе использован порошок электролитического рения чистотой 99,9%, бор аморфный чистотой 99,5%, а также бор 80%-ного обогащения по B^{10} . Псевдосплавы рения с бором и с вольфрамом синтезированы из элементов методом термодиффузионного взаимодействия порошков при температуре 1800° C в вакууме не ниже 10^{-3} мм рт. ст. Контролировались химический и фазовый составы псевдосплавов. Были получены композиции $ReB_3 + B$ (содержание бора 15,0 вес.%, элементарная ячейка — гексагональная, тип ReB_3 — структурный, $a = 2,95 \text{ \AA}$, $c = 13,72$, $c/a = 4,65$), а также $ReB_3 + 7 \text{ вес. \% } WB_{12}$ (состав последней контролировался только химическим анализом). Компактные образцы псевдосплавов приготовлены методом спекания под давлением до 250 кг/см² при температуре 1600—1700° C в течение 5—10 мин. Микротвердость фаз псевдосплавов лежала в пределах 2850—3100 кг/мм² при нагрузке 50 г, предел прочности на сжатие составлял 99—112 кг/мм², модуль нормальной упругости в за

висимости от состава изменялся в пределах $(35-41) \times 10^3 \text{ кГ/мм}^2$, коэффициент теплопроводности в интервале $20-650^\circ \text{C}$ составлял $(0,05-0,06) \text{ кал/(см} \cdot \text{сек} \cdot \text{град)}$, коэффициент термического расширения в интервале $20-1000^\circ \text{C}$ — $6,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$, теплоемкость при 20°C — $0,045-0,055 \text{ кал/г} \cdot \text{град}$.

Эффективность рения и его псевдосплавов с бором в отношении влияния на реактивность определялась на быстрой критической сборке, моделирующей реактор БН-350 [2]. Измерения проводились на малых образцах по периоду разгона реактора. Результаты измерений представлены в табл. 1, здесь же приведены расчетные значения эффективности, выполненные по теории возмущений на основе 18-группового диффузионного приближения с использованием микроскопических сечений [3]. Характерно, что эффективность рения и его псевдосплавов примерно в 1,5 раза выше эффективности карбида бора (B_4C) естественного обогащения. Эффективность рения по сравнению с высокообогащенным B_4C примерно в 3 раза ниже. Тем не менее экономическая оценка показывает, что стоимость единицы реактивности

композиций $\text{Re} - \text{B}$ (бор — естественный) в несколько раз ниже, чем аналогичная стоимость высокообогащенного B_4C .

Исследование совместимости псевдосплавов $\text{Re} - \text{B}$ с жидким натрием проводилось при температурах 700°C и 800°C в течение $500-10\,000 \text{ ч}$ (табл. 2).

Результаты испытания псевдосплавов $\text{ReB}_3 + \text{B}$ по сравнению с B_4C , TaB_2 и CrB_2 при температуре 800°C в течение 500 ч приведены в табл. 1.

Судя по величине коэффициента перехода A_n , равного отношению количества бора, перешедшего в натрий, к содержанию бора в образцах, сплавы рения с бором имеют в натрии коррозионную стойкость, несколько меньшую, чем B_4C , и значительно меньшую, чем CrB_2 .

С целью оценки влияния псевдосплавов $\text{Re} - \text{B}$ на структуру и свойства материала оболочки стержня проведены испытания указанных материалов в стальной трубке (X15H15M3Б). При этом зазор между образцами и трубкой заполнялся натрием или оставался воздушным. Испытания проведены при температурах 700°C и 800°C в течение $500, 5000$ и $10\,000 \text{ ч}$ (см. табл. 1 и 2).

Эффективность поглотителя и его совместимость с натрием

Таблица 1

Поглотитель	Плотность, г/см ³		Эффективность				Испытания в натрии при 800°C в течение 500 ч			
	физическая	по В10	$\frac{\Delta K}{K} \times 10^{-6}, \text{ см}^{-3}$		относительная ($\text{B}_4\text{C}_{\text{ест}}=1$)		изменение веса образца, кг/см ²	содержание бора в натрии, вес. %		
			эксперимент	расчет	эксперимент	расчет		вблизи образца	среднее в объеме	$K_{\text{п}}$
B_4C	1,8	0,264	$-8,75 \pm 0,012$	$-7,55$	1,0	0,863	Разрушился	0,19	0,17	0,0274
Re	21,0	—	$-14,0 \pm 0,69$	$-14,9$	1,6	1,7	—	—	—	—
$\text{ReB}_3 + \text{B}$ (естественный)	10,0	0,296	$-13,8 \pm 0,6$	$-14,7$	1,58	1,68	$-0,0523$	0,35	0,25	0,0352
$\text{ReB}_3 + 7\% \text{WB}_{12}$ (естественный)	9,3	0,3	$-13,9 \pm 0,093$	$-14,4$	1,59	1,65	$-0,0510$	0,32	0,21	0,0292
TaB_2	11,5	0,23	—	—	—	—	$-0,0028$	0,064	0,058	0,0105
CrB_2	5,4	0,28	—	—	—	—	$-0,0321$	0,053	0,043	0,0064
$\text{ReB}_3 + \text{B}$	10,0	1,128	—	$-39,8$	—	4,55	—	—	—	—
B_4C	2,1	1,264	$-42,5 \pm 0,38$	$-40,2$	4,85	4,58	—	—	—	—

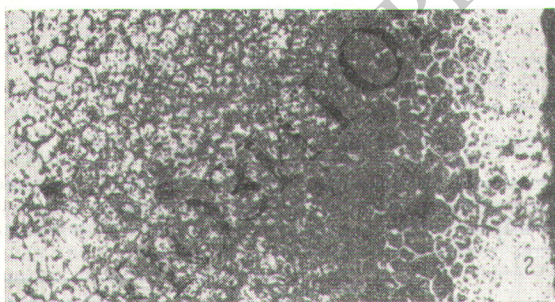
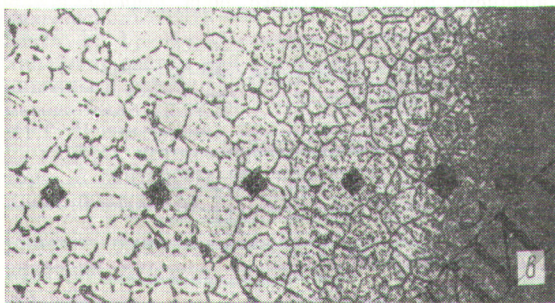
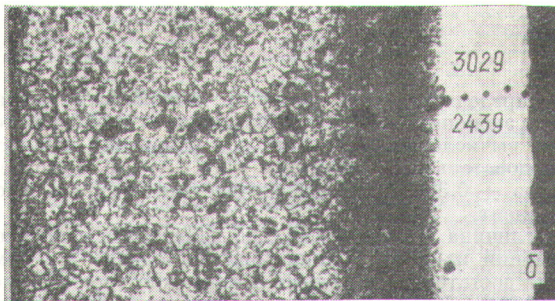
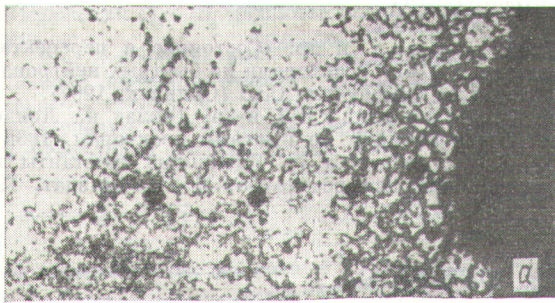
Совместимость стали X15H15M3Б* со сплавом $\text{ReB}_3 + 7\% \text{WB}_{12}$

Таблица 2

Среда в зазоре	Температура испытания, °С															
	700								800							
	Время испытания, ч															
	5000				10 000				5000				10 000			
	глубина диффузи- онного слоя, мм	σ_{σ} , кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	δ , %	глубина диффузи- онного слоя, мм	σ_{σ} , кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	δ , %	глубина диффузи- онного слоя, мм	σ_{σ} , кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	δ , %	глубина диффузи- онного слоя, мм	σ_{σ} , кг/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	δ , %
Воздух	75,0	38,4	37,1	2,6	—	39,3	34,8	8,4	110	28,8	26,0	5,2	150	30,8	30,8	7,8
Натрий	100÷150	33,5	33,5	1,1	200÷300	29,2	29,2	—	180÷200	14,7	14,7	5,6	280÷400	3,5	3,5	0

* $\sigma_{\sigma}=40$ кг/мм²; $\sigma_{0,2}=38$ кг/мм²; $\delta=10,1\%$.

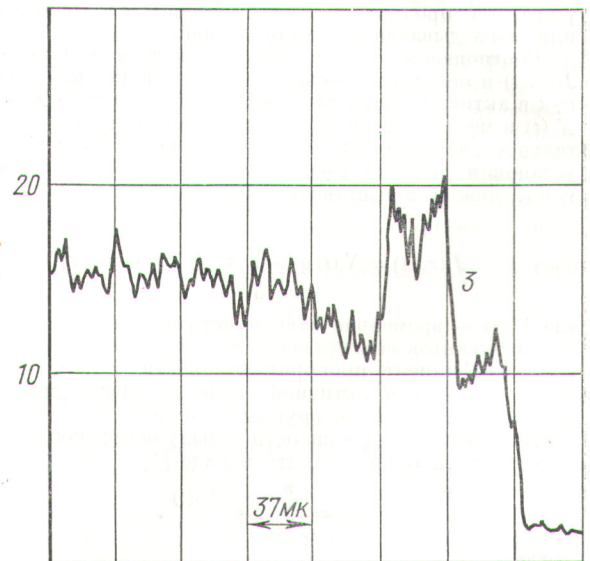
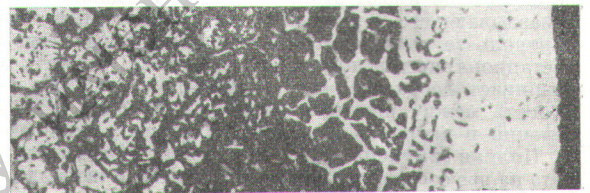
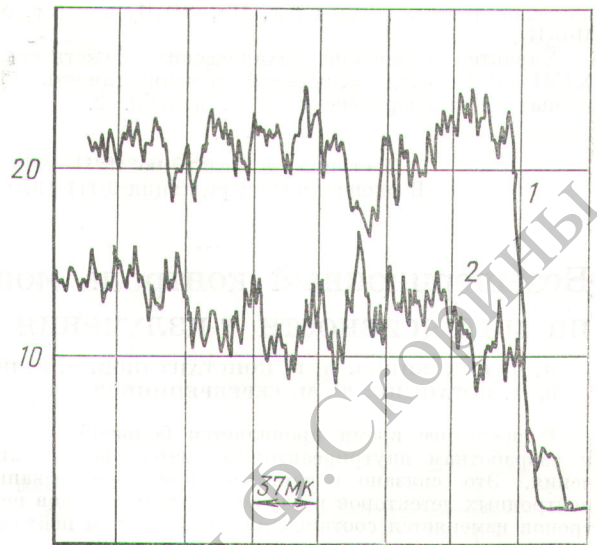
* $\sigma_{\text{с}}=40 \text{ кг/мм}^2$; $\sigma_{0,2}=38 \text{ кг/мм}^2$; $\delta=10,1\%$.



Р и с. 1. Характер изменения структуры стали X15H15M3B после испытаний в течение 5000 ч при температурах:

а — 700° С (в контакте с $\text{ReB}_3 + 7\% \text{WB}_{12}$ с воздушным зазором); б — 700° С (в контакте с $\text{ReB}_3 + 7\% \text{WB}_{12}$ с натрием); в — 800° С (в контакте с $\text{ReB}_3 + 7\% \text{WB}_{12}$ с воздушным зазором); г — 800° С (в контакте с $\text{ReB}_3 + 7\% \text{WB}_{12}$ с натрием).

На рис. 1 показано влияние взаимодействия сплавов $\text{ReB}_3 - \text{WB}_{12}$ на структуру стали X15H15M3B, а на рис. 2 — характер распределения элементов стали



Р и с. 2. Распределение железа (1), хрома (2) и никеля (3) в зонах взаимодействия стали при 800° С.

в диффузионном слое, образовавшемся за 5000 ч. Полученные результаты свидетельствуют о перераспределении компонентов стали при образовании в поверхност-

ном слое Y -фазы состава $(Cr, Mo, Ni)_4B_3$ или $(Cr, Ni, Mo)_5B_4$.

Характер изменения механических свойств стали X15H15M3Б после испытаний на совместимость при комнатной температуре показан в табл. 2.

Поступило в Редакцию 18/II 1969 г.
В окончательной редакции 9/III 1970 г.

Безынерционный контроль мощности реактора по интенсивности γ -излучения

И. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, Л. В. КОНСТАНТИНОВ, В. В. ПОСТНИКОВ,
В. И. ПОТАПКИН, Ю. М. СЕРЕБРЕННИКОВ

УДК 621.039.51

В последнее время проявляется большой интерес к разработкам внутриреакторных детекторов γ -излучения. Это связано с тем, что при использовании нейтронных детекторов в случае высоких потоков нейтронов изменяется соотношение между током нейтронного детектора и энерговыделением в реакторе из-за неодинакового выгорания детектора и топлива. Гамма-детекторы не имеют этого недостатка. Однако наличие запаздывающего γ -излучения затрудняет оперативный контроль за распределением мощности в реакторе при нестационарных режимах его работы. В связи с этим возникает необходимость установить временную зависимость между интенсивностью γ -излучения и числом делений в активной зоне или отдельных ее областях.

Полная интенсивность γ -излучения может быть разбита на две составляющие: «мгновенную» и «запаздывающую». Разбиение на «мгновенную» и «запаздывающую» группы является до некоторой степени произвольным. Ниже дан критерий, позволяющий ту или иную группу γ -квантов продуктов деления отнести к мгновенной или запаздывающей составляющей.

Соотношение между интенсивностью γ -излучения $J(r, t)$ в некоторой точке r , которая может находиться как в активной зоне, так и вне ее, и скоростью делений $N(t)$ в момент времени t в предположении, что относительное распределение скорости делений вблизи места установки датчика практически не меняется во времени, можно представить уравнением

$$J(r, t) = N(t)g + \int_0^t N(\tau) V(t-\tau) d\tau, \quad (1)$$

где $V(t)$ — временная зависимость в точке r интенсивности γ -квантов запаздывающей группы на одно деление; g — коэффициент пропорциональности между скоростью делений в активной зоне и интенсивностью γ -квантов мгновенной группы в точке r .

Изменение интенсивности γ -излучения после акта деления можно представить в виде [1]

$$V(t) = \sum_{j=1}^n A_j e^{-\lambda_j t}.$$

Тогда

$$J(r, t) = N(t)g + \int_0^t N(\tau) \sum_{j=1}^n A_j e^{-\lambda_j(t-\tau)} d\tau. \quad (2)$$

Величины g, A_j, λ_j зависят от типа реактора, от места расположения и конструкции гамма-детектора и долж-

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Орлов и др. «Состояние и перспективы развития АЭС с реакторами на быстрых нейтронах». Доклад на симпозиуме СЭВ (Обнинск, 1967).
2. А. И. Лейпунский и др. Доклад на Лондонской конференции по быстрым реакторам, 1966 г.
3. Л. П. Абагян и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1964

ны определяться для каждого конкретного случая. Число экспонент в формуле (2) зависит от требуемой точности вычисления $N(t)$. Так, для измерения мощности исследовательского реактора «TRIGA» [2] с погрешностью $\pm 0,3\%$ оказалось достаточным выбрать шесть экспонент.

Величина g будет несколько изменяться в процессе кампании из-за выгорания топлива, однако эти изменения достаточно медленные и их можно учесть расчетным путем. Уравнение (2) относительно $N(t)$ является уравнением Вольтерра второго рода, решение которого [3] имеет вид

$$N(t) = \frac{J(t)}{g} - \frac{1}{g} \int_0^t J(\tau) \sum_{j=1}^n B_k e^{-\mu_k(t-\tau)} d\tau, \quad (3)$$

где $-\mu_k = p_k$ — корни уравнения

$$g \prod_{j=1}^n (p + \lambda_j) + \sum_{j=1}^n A_j \prod_{i \neq j}^{n-1} (p + \lambda_i) = 0,$$

а B_k определяется формулой

$$B_k = \frac{\sum_{j=1}^n A_j \prod_{i \neq j}^{n-1} (p_k + \lambda_i)}{\left\{ \frac{d}{dp} \left[g \prod_{j=1}^n (p + \lambda_j) + \sum_{j=1}^n A_j \prod_{i \neq j}^{n-1} (p + \lambda_i) \right] \right\}_{p_k}}.$$

Все μ_k положительны и по порядку величины близки λ_k . С точки зрения автоматического регулирования уравнение (2) показывает, что реактор является линейной системой по каналу $N - J$, и приводит к следующим выражениям для амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик:

$$R(\omega) = \sqrt{\left(g + \sum_{j=1}^n \frac{A_j \lambda_j}{\lambda_j^2 + \omega^2} \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^n \frac{A_j \omega}{\lambda_j^2 + \omega^2} \right)^2}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \varphi(\omega) = - \frac{\sum_{j=1}^n \frac{A_j \omega}{\lambda_j^2 + \omega^2}}{g + \sum_{j=1}^n \frac{A_j \lambda_j}{\lambda_j^2 + \omega^2}}. \quad (5)$$