

Влияние аустенизации на склонность сталей X18H9 и X18H10T к ЛРОЗ (испытания при 650°С в течение 10 ч) Таблица 2

Сталь	Состояние пробы	Число циклов	Результаты люминесцентного контроля	Глубина трещин, мм
X18H9	Исходное	5	Узкие трещины	0,57
X18H9	После аустенизации	14	Надрывы	0,175
X18H10T	То же	3	Сплошные трещины	4,3
X18H10T	» »	5	То же	9,0

янии аустенизации и на стали, мало склонные к ЛРОЗ.

Таким образом, при изготовлении конструкций ядерных энергетических установок из сталей X18H9 и X16H11M3 опасность ЛРОЗ снижается до минимума, особенно при применении аустенизации.

При оценке работоспособности сталей были также проведены другие опыты, которые показали, в частности, что в интервале рабочих температур стали X16H11M3 и X18H9 обладают высокой коррозионной стойкостью в жидком натрии, не подвержены тепловому охрупчиванию и относительно мало изменяют свойства при воздействии облучения.

Подводя итоги проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что стали X18H9 и X16H11M3 должны обеспечить надежную эксплуатацию конструкций ядерных энергетических установок с натриевым теплоносителем.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Лейпунский и др. «Атомная энергия», 25, 380 (1968).
2. А. И. Лейпунский и др. Там же, 25, 403 (1968).
3. А. И. Лейпунский и др. Там же, 21, 450 (1966).
4. Ю. Ф. Баландин. Термическая усталость металлов в судовом машиностроении. Л., «Судостроение», 1967.
5. B. Langer. Welding J., 37, 411 (1958).

Оценка работоспособности оболочек твэлов быстрых реакторов

Ю. И. ЛИХАЧЕВ, А. А. ПРОШКИН, Ж. Н. ЩЕРБАКОВ (СССР)

УДК 621.039.52.034.6

При проектировании реакторов на быстрых нейтронах (СССР) возникла необходимость в создании методов расчетного определения работоспособности цилиндрических герметичных твэлов. Рассмотрены задачи оценки работоспособности цилиндрических герметичных твэлов для различных моделей совместной работы горючего и оболочки [1].

Согласно первой модели, между горючим и оболочкой в течение всего ресурса работы твэла сохраняется зазор, заполненный газом или материалом подслоя, который остается жидким во всем рабочем интервале температур (например, натрия). В этом случае оболочка нагружена наряду с внешним давлением теплоносителя, возрастающим по мере выгорания горючего внутренним давлением газа (или жидкости) и релаксирующими во времени температурными напряжениями, вызванными градиентами теплового поля. Кроме того, оболочка подвержена теплосменам (в результате расхолаживания и переходных режимов работы реактора).

При большом внешнем давлении теплоносителя (газоохлаждаемый реактор) возникает опас-

ность потери устойчивости оболочки, которая может привести к захлопыванию неподкрепленного компенсационного объема или к образованию продольного гофра на участке твэла, где овальная оболочка может опираться на тепловыделяющий сердечник.

Возможно также необратимое увеличение длины оболочки под действием теплосмен (термомеханический «храповик» [2]) после того, как овальная оболочка соприкоснется с сердечником.

В другой модели предполагается, что с некоторого момента времени или с начала эксплуатации оболочка и сердечник контактируют между собой. Поэтому оболочке в процессе работы реактора на постоянной нагрузке приходится сдерживать не только внутреннее давление газовых продуктов деления, но и давление от распухающего горючего.

При такой конструкции твэла, когда сердечник жестко связан с оболочкой (например, через прочный твердый подслон при наличии хорошего сцепления на поверхности контакта), при теплосменах в оболочке могут иметь место реверсивные пластические деформации. Тогда при определении кинетики напряженного со-

стояния оболочки необходимо учитывать изменение диаграммы деформирования материала оболочки от одного цикла теплосмены к другому [3, 4]. В этом случае из-за требований к прочности условия работы оболочки особенно тяжелы, что следует учитывать при проектировании твэла (так, необходимо согласовывать коэффициенты теплового расширения горючего и оболочки). Реверсивные пластические деформации в принципе могут быть вызваны и неравномерностями теплового поля оболочки (при весьма значительных окружающих неравномерностях температуры и одновременно больших тепловых потоках). Отметим, что для проектируемых твэлов быстрых реакторов окружающие и радиальные температурные градиенты не вызывают реверсивных пластических деформаций.

Так как напряжения в оболочке в процессе работы претерпевают весьма существенные изменения, то расчет на прочность следует проводить по накоплению повреждений с использованием известных идей Майнера [5], развитых в работах [6—9].

Учитывая повреждения материала оболочки только от длительного действия напряжений при высоких температурах, можно записать следующее условие, определяющее время t_p безопасной работы оболочки:

$$\int_0^{t_p} \frac{(\sigma_a K_\sigma)^n dt}{D} = a_B, \quad (1)$$

где $a_B \approx 0,8$ — коэффициент повреждаемости при разрушении; K_σ — условный коэффициент запаса прочности по напряжениям; $D(T)$, $n(T)$ — характеристики длительной прочности ($\delta_a^n t = D$), полученные из внутриреакторных испытаний; δ_a — эквивалентное напряжение [8], ответственное за смешанное разрушение (по границам и телу зерна).

Возможен также и такой подход к оценке работоспособности оболочки, когда критерием считается интенсивность накопленных материалом неупругих деформаций:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \leq \frac{\varepsilon_{iB}}{K_\varepsilon}, \quad (2)$$

где ε_{iB} — разрушающая деформация, полученная из внутриреакторных испытаний; K_ε — коэффициент запаса по деформациям.

Деформационный критерий целесообразно использовать при сравнительно невысоких температурах, когда расчет на длительную прочность не представлятелен.

Влияние неравномерности распределения температуры по периметру на распухание стали

Неравномерность распределения температуры по периметру, которая особенно существенна для пристеночных и угловых твэлов, может дать значительные напряжения, поэтому в некоторых случаях совершенно необходимо учитывать их влияние на работоспособность оболочки. Следует отметить, что неравномерность распределения температуры по периметру особенно влияет на работоспособность твэла при больших интегральных потоках быстрых нейтронов, поскольку она приводит к неравномерному распуханию стали. Неравномерное по периметру оболочки распухание при условии стесненной деформации твэла (вследствие малых зазоров) вызывает дополнительные напряжения и механические деформации в оболочке.

Изучению азимутальной разверки температурных полей твэла посвящено большое число экспериментальных (проливки моделей пакетов твэлов) и теоретических работ [10—12].

Искривления твэла, обусловленные полями допусков, обычно во много раз меньше температурных искривлений свободной оболочки, поэтому ось твэла можно считать практически прямой. Ввиду малости осевых градиентов температуры отдельные сечения оболочки можно рассматривать независимо друг от друга, сводя тем самым задачу к плоской.

Для выяснения кинетики напряженного и деформированного состояния оболочки при неизотермическом нагружении в условиях облучения с учетом мгновенных пластических деформаций и деформаций ползучести используется метод переменных параметров упругости, изложенный в работах И. А. Биргера [13, 14].

При этом учитывается изменение диаграмм деформирования материала оболочки, вызванное облучением. Задача сводится к рассмотрению анизотропной упругой оболочки с переменными параметрами упругости и дополнительными деформациями, температура оболочки задается функцией $T(z, \Theta, t)$.

Процесс нагружения оболочки разбивается (по времени) на ряд малых этапов, для каждого этапа определяются приращения компонент напряжения и деформации.

Для тонкостенной оболочки ($\sigma_r = 0$) записываются физические зависимости (в приращениях*) для n -го шага нагружения ($\Delta_n t = t_n - t_{n-1}$):

* Обозначения см. в работе [13].

$$\begin{aligned}\Delta_n \varepsilon_x &= \langle C_{11(n)} \rangle \Delta_n \sigma_x + \langle C_{12(n)} \rangle \Delta_n \sigma_\theta + \langle \varphi_{xT(n)} \rangle \times \\ &\times \Delta_n T + \langle \varphi_{x\eta(n)} \rangle \Delta_n \eta + \langle \varphi_{xc(n)} \rangle \Delta_n t + \frac{1}{3} \Delta_n S; \\ \Delta_n \varepsilon_\theta &= \langle C_{12(n)} \rangle \Delta_n \sigma_x + \langle C_{22(n)} \rangle \Delta_n \sigma_\theta + \langle \varphi_{\theta T(n)} \rangle \times \\ &\times \Delta_n T + \langle \varphi_{\theta\eta(n)} \rangle \Delta_n \eta + \langle \varphi_{\theta c(n)} \rangle \Delta_n t + \frac{1}{3} \Delta_n S,\end{aligned}\quad (3)$$

где параметры упругости имеют вид:

$$\begin{aligned}C_{11} &= \frac{1}{E} + (2\sigma_x - \sigma_\theta)^2 \frac{F_\sigma}{6\sigma_i}; \\ C_{22} &= \frac{1}{E} + (2\sigma_\theta - \sigma_x)^2 \frac{F_\sigma}{6\sigma_i}; \\ C_{12} &= -\frac{\mu}{E} + (2\sigma_x - \sigma_\theta)(2\sigma_\theta - \sigma_x) \frac{F_\sigma}{6\sigma_i},\end{aligned}\quad (4)$$

а функции дополнительных деформаций выражаются зависимостями:

$$\begin{aligned}\varphi_{xT} &= \frac{d(\alpha T)}{dT} - \frac{1}{E^2} \cdot \frac{dE}{dT} (\sigma_x - \mu \sigma_\theta) - \\ &- \frac{1}{E} \cdot \frac{d\mu}{dT} \sigma_\theta + \frac{2\sigma_x - \sigma_\theta}{3} F_T; \\ \varphi_{\theta T} &= \frac{d(\alpha T)}{dT} - \frac{1}{E^2} \cdot \frac{dE}{dT} (\sigma_\theta - \mu \sigma_x) - \\ &- \frac{1}{E} \cdot \frac{d\mu}{dT} \sigma_x + \frac{2\sigma_\theta - \sigma_x}{3} F_T; \\ \varphi_{x\eta} &= \frac{2\sigma_x - \sigma_\theta}{3} F_\eta; \quad \varphi_{\theta\eta} = \frac{2\sigma_\theta - \sigma_x}{3} F_\eta; \\ \varphi_{xc} &= \frac{2\sigma_x - \sigma_\theta}{3} F_c; \quad \varphi_{\theta c} = \frac{2\sigma_\theta - \sigma_x}{3} F_c;\end{aligned}\quad (5)$$

коэффициент термического расширения α , модуль упругости E и коэффициент Пуассона μ считаются известными функциями температуры T ; прирост объема материала оболочки вследствие распухания равен $\Delta_n S = S(t_n) - S(t_{n-1})$, где $S = A_s(\Phi t) e^{\frac{Q_s}{T} - \frac{Q_s^*}{T^2}}$ — экспериментальная зависимость изменения объема стали от интегрального потока быстрых нейтронов Φt и температуры [15].

Функции пластичности для активного нагружения:

$$F_\sigma(\sigma_i T_\eta) = \frac{3}{2\sigma_i} \left(\frac{1}{E_k} - \frac{1}{E} \right); \quad F_\eta(\sigma_i T_\eta) = \frac{3}{2\sigma_i} \gamma;$$

$$F_T(\sigma_i T_\eta) = \frac{3}{2\sigma_i} \left(\beta + \frac{1}{E^2} \cdot \frac{dE}{dT} \sigma_i \right);$$

для разгрузки и нейтрального деформирования [14]:

$$F_\sigma = F_T = F_\eta = 0.$$

Величина $E_k(\sigma_i T_\eta)$ представляет собой касательный модуль кривой деформирования ($\sigma_i - \varepsilon_{ip}$) при заданных температуре и уровне радиационных повреждений ($T = \text{const}$, $\eta = \text{const}$, $\sigma_i = \text{var}$); ε_{ip} — пластическая деформация, накопленная к данному моменту нагружения. Уровень радиационных повреждений материала оболочки определяется некоторой характеристикой η (например, числом смещенных атомов [16] или интегральным потоком нейтронов). Коэффициент температурной податливости материала $\beta(\sigma_i T_\eta)$, получившего заданный уровень радиационных повреждений, определяется из опытов при постоянном напряжении и переменной температуре ($\eta = \text{const}$, $\sigma_i = \text{const}$, $T = \text{var}$). Величина $\gamma(\sigma_i T_\eta)$ представляет собой коэффициент радиационной податливости материала, который должен определяться путем внутривреакторных испытаний при постоянных напряжении и температуре ($\sigma_i = \text{const}$, $T = \text{const}$, $\eta = \text{var}$). Для приближенного определения величин E_k , β и γ достаточно иметь набор кривых растяжения при различных температурах, полученных из кратковременных испытаний образцов материала оболочки, облученных до определенных уровней радиационного повреждения при рабочих температурах.

Функция ползучести, согласно теории упрочнения, имеет вид

$$F_c = \frac{3}{2} \sigma_i^{m-1} B(T, \varepsilon_{ic}), \quad (7)$$

где

$$B(T, \varepsilon_{ic}) = B_1 e^{-\frac{Q}{RT}} e^{H(T, \varepsilon_{ic})},$$

$H(T, \varepsilon_{ic}) = \frac{\varepsilon_{ic}}{\varepsilon_{ic}^*} H(T)$ для $\varepsilon_{ic} < \varepsilon_{ic}^*$ — стадии неуставившейся ползучести; $H(T, \varepsilon_{ic}) = H(T)$ для $\varepsilon_{ic} \geq \varepsilon_{ic}^*$ — стадии установившейся ползучести; $\varepsilon_{ic} = \int d\varepsilon_{ic}$ — накопленная

деформация ползучести; $\varepsilon_{ic}^* = B_2 e^{-\frac{Q^*}{RT}} \sigma_i^{m^*}$ — деформация перехода к стадии установившейся ползучести.

Исходя из данных работы [17] и учитывая, что в случае прямой оси оболочки все компоненты, кроме осевого перемещения $u = x\varepsilon_{x0}$, не должны зависеть от координаты x , запишем

дифференциальные уравнения для упругой анизотропной тонкой цилиндрической оболочки в следующем виде:

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{d^2}{d\Theta^2} \left[f_4 \Delta_n \varepsilon_{x0} + \frac{f_5 \Theta}{r^2} \left(\frac{d^2 \Delta_n w}{d\Theta^2} + \frac{d \Delta_n v}{d\Theta} \right) \right] - \frac{1}{r} \left[f_2 \Delta_n \varepsilon_{x0} + \frac{f_1 \Theta}{r} \left(\frac{d \Delta_n v}{d\Theta} - \Delta_n w \right) \right] = -\Delta_n p + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d^2 (\Delta_n T_{2\Theta})}{d\Theta^2} - \frac{1}{r} \Delta_n T_{1\Theta}; \quad (8)$$

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{d}{d\Theta} \left[f_4 \Delta_n \varepsilon_{x0} + \frac{f_5 \Theta}{r^2} \left(\frac{d^2 \Delta_n w}{d\Theta^2} + \frac{d \Delta_n v}{d\Theta} \right) \right] + \frac{1}{r} \cdot \frac{d}{d\Theta} \left[f_2 \Delta_n \varepsilon_{x0} + \frac{f_1 \Theta}{r} \left(\frac{d \Delta_n v}{d\Theta} - \Delta_n w \right) \right] = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d (\Delta_n T_{2\Theta})}{d\Theta} + \frac{1}{r} \frac{d (\Delta_n T_{1\Theta})}{d\Theta}, \quad (9)$$

где $\Delta_n v$, $\Delta_n w$ — приросты окружного и радиального перемещений; r — радиус оболочки; $\Delta_n p$ — прирост избыточного давления. Положение основной поверхности оболочки определяется

из уравнения $\int_{-\delta_1}^{\delta_2} E^* \mu_{\Theta} z dz = 0$. В уравнениях (8), (9) введены коэффициенты:

$$\begin{aligned} f_{1\Theta} &= \int_{-\delta_1}^{\delta_2} E^* \mu_{\Theta} dz; & f_2 &= \int_{-\delta_1}^{\delta_2} E^* dz; \\ f_4 &= \int_{-\delta_1}^{\delta_2} E^* z dz; & f_{5\Theta} &= \int_{-\delta_1}^{\delta_2} E^* \mu_{\Theta} z^2 dz; \\ \Delta_n T_{1\Theta} &= \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \Delta_n \sigma_{\Theta}^* dz; & \Delta_n T_{2\Theta} &= \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \Delta_n \sigma_x^* z dz; \end{aligned} \quad (10)$$

$$E^* = \frac{C_{12}}{C_{12}^2 - C_{11}C_{22}}; \quad \mu_{\Theta} = \frac{C_{11}}{C_{12}}; \quad \mu_x = \frac{C_{22}}{C_{12}};$$

$$\Delta \sigma_x^* = E^* (\mu_x \Delta \varepsilon_x^* - \Delta \varepsilon_{\Theta}^*); \quad \Delta \sigma_{\Theta}^* =$$

$$= E^* (\Delta \varepsilon_x^* - \mu_{\Theta} \Delta \varepsilon_{\Theta}^*);$$

$$\Delta \varepsilon_j^* = \langle \varphi_{jT} \rangle \Delta T + \langle \varphi_{j\eta} \rangle \Delta \eta + \langle \varphi_{jc} \rangle \Delta t + \frac{1}{3} \Delta S \quad (j = x, \Theta).$$

Постоянные интегрирования системы уравнений (8), (9) находятся из условия периодичности:

$$\Delta_n w(\Theta) = \Delta_n w(\Theta + 2\pi); \quad \Delta_n v(\Theta) = \Delta_n v(\Theta + 2\pi) \quad (11)$$

и условий произвольного поступательного перемещения и поворота твэла как единого целого:

$$\Delta_n w(\Theta = \Theta_0) = \Delta_n w_0; \quad (12)$$

$$\Delta_n \varphi(\Theta = \Theta_0) = \Delta_n \varphi_0.$$

Кроме того, выполняется условие равновесия:

$$r \int_0^{2\pi} d\Theta \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \Delta_n \sigma_x dz = \Delta_n N_x, \quad (13)$$

где N_x — продольная сила,

Приросты напряжений определяются из выражений:

$$\Delta_n \sigma_x = E^* \left[\mu_x \Delta_n \varepsilon_{x0} + \Delta_n \varepsilon_{\Theta 0} + \frac{z}{r} \cdot \frac{d \Delta_n \varphi}{d\Theta} \right] - \Delta_n \sigma_x^*; \quad (14)$$

$$\Delta_n \sigma_{\Theta} = E^* \left[\mu_{\Theta} \Delta_n \varepsilon_{\Theta 0} + \Delta_n \varepsilon_{x0} + \mu_{\Theta} \frac{z}{r} \cdot \frac{d \Delta_n \varphi}{d\Theta} \right] - \Delta_n \sigma_{\Theta}^*;$$

$$\Delta_n \varepsilon_{\Theta 0} = \frac{1}{r} \left(\frac{d \Delta_n v}{d\Theta} - \Delta_n w \right);$$

$$\frac{d \Delta_n \varphi}{d\Theta} = \frac{1}{r} \left(\frac{d^2 \Delta_n w}{d\Theta^2} + \frac{d \Delta_n v}{d\Theta} \right);$$

$\varepsilon_{\Theta 0}$, ε_{x0} — деформация срединной поверхности.

Система уравнений (8), (9) решается аналитически путем разложения в ряды Фурье определенных сочетаний коэффициентов (10).

В каждом этапе нагружения определяются приросты компонент напряжения с использованием значений напряжений в конце предыдущего этапа, причем параметры упругости уточняются методом последовательных приближений [13].

Разработаны программы для ЭЦВМ, позволяющие изучать кинетику напряженного и деформированного состояний оболочки твэла как в переходных режимах, так и для стационарных режимов работы реактора.

Результаты расчетов

Оценка работоспособности оболочек твэлов с учетом напряжений только от неравномерного распределения температуры по периметру (без учета распухания стали) показала, что роль этой неравномерности весьма значительна при сравнительно невысоких температурах и малых давлениях. При больших давлениях и высоких температурах напряжения от возникшего неравномерного распределения температуры по периметру твэла быстро релаксируют и дают малый вклад в повреждаемость.

Если неравномерность распределения температуры по периметру твэла мала (центральные твэлы), то близкое к осесимметричному распухание стали в случае газовой модели почти не влияет на механические деформации оболочки и вносит только определенный вклад в напряжения вследствие неравномерного распухания от перепада температуры по толщине оболочки.

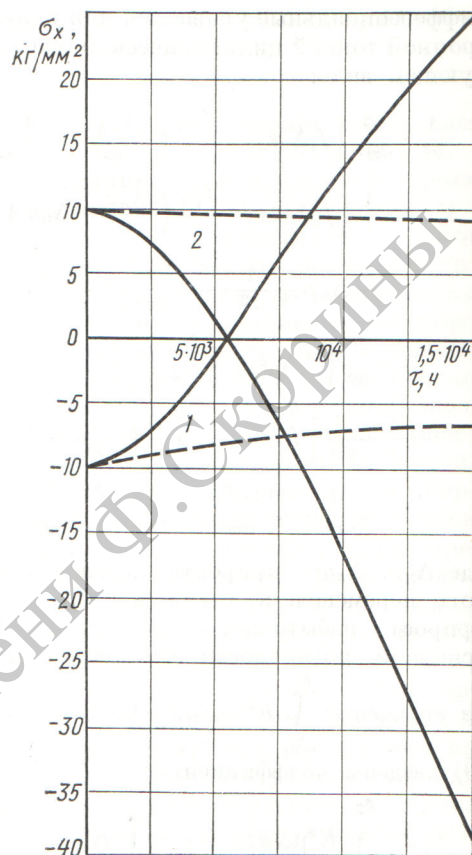
В случае жесткого контакта горячего и оболочки осесимметричное распухание стали может дать существенный вклад, который приведет к уменьшению механических деформаций и напряжений в оболочке.

Неравномерность распухания стали по периметру твэла для обеих моделей вызывает дополнительные механические деформации и напряжения.

Приведем результаты оценки работоспособности оболочек пристеночных твэлов монокарбидной зоны реактора БР-5 с учетом неравномерного распухания стали. Рассматриваются цилиндрические стержневые твэлы с топливом УС в виде спеченных таблеток и с оболочкой из стали ОХ18Н9Т. Между топливом и оболочкой был оставлен достаточно большой зазор, который сохранялся до конца кампании. Амплитуда окружной неравномерности температуры по периметру твэла составила 70°C [12], что соответствует возникновению в прямых твэлах осевых напряжений, равных 10 кг/мм^2 . Расчет проведен для выгорания 5%, интегральный поток по быстрым нейтронам $E > 0,1\text{ Мэв}$ составлял $\sim 3 \cdot 10^{22}\text{ нейтр/см}^2$.

Характер изменения осевых напряжений в процессе эксплуатации на горячей и холодных сторонах оболочки для среднего сечения по длине твэла, подсчитанных по приведенной выше теории, показан на рисунке. Сплошными линиями представлено изменение напряжений с учетом неравномерного распухания стали, вызванного облучением; пунктирными линиями показано изменение во времени напряжений без учета неравномерного распухания стали. Как видно из рисунка, вследствие неравномерного распухания картина напряженного состояния оболочки в процессе кампании существенно изменяется.

Анализ работоспособности оболочки твэла показал, что неравномерное распухание стали ухудшает работоспособность оболочки твэла; коэффициент запаса по напряжениям уменьшается от $K_\sigma = 2,1$ (без учета распухания стали) до 1,04. Близкая к единице величина коэффициента запаса свидетельствует о возможном



Изменение осевых напряжений в процессе эксплуатации на горячей (550°C , кривая 1) и холодной (500°C , кривая 2) сторонах оболочки для среднего сечения по длине твэла:

— с учетом неравномерного распухания стали; — без учета неравномерного распухания стали.

разрушению твэла. Действительно, как показала массовая проверка герметичности пакетов [18], в которых оболочки твэлов были выполнены из стали ОХ18Н9Т (выгорание $\geq 4,5\%$), все они имели дефектные твэлы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. И. Лихачев, В. В. Вахромеева. Длительная прочность и ползучесть оболочек твэлов быстрых реакторов. Сборник трудов Симпозиума СЭВ по быстрым реакторам. Т. 2. Обнинск, 1968, стр. 812.
2. E. Duncome, I. Goldberg. Nucl. Appl. and Technol., 9, 47 (1970).
3. В. В. Москвитин. Пластичность при переменных нагружениях. М., Изд-во МГУ, 1965.
4. Сборник «Сопrotивление деформированию и разрушению при малом числе циклов нагружения» М., «Наука», 1967.

5. M. Miner. J. Appl. Mech., 12, No. 3, A-159; Trans. ASME, 67, 159 (1945).
6. С. В. Серенсен и др. «Заводская лаборатория», № 3, 337 (1953); № 11, (1958); «Вестник машиностроения», № 1, 11 (1962).
7. С. Н. Журков и др. ЖТФ, 23, № 10, 1677 (1953); Докл. АН СССР, 101, № 2, 237 (1955); «Вестник АН СССР» № 11, 78 (1957); ЖТФ 28; № 8 (1958).
8. Ю. Н. Работнов. Ползучесть элементов конструкций. М., «Наука», 1966.
9. Ю. И. Лихачев. В сб. «Прочность при малом числе циклов нагружения», М., «Наука», 1969, стр. 205.
10. В. И. Субботин и др. «Атомная энергия», 9, 461 (1960).
11. П. А. Ушаков. «Атомная энергия», 13, 162 (1962).
12. Сборник «Жидкие металлы». М., Атомиздат, 1967.
13. И. А. Биргер. «Изв. АН СССР. Механика», № 2, 113 (1965).
14. И. А. Биргер, И. В. Демьянушко. «Механика твердого тела», № 6, 70 (1968).
15. T. Claudson and al. Nucl. Appl. and Technol., 9, 10 (1970).
16. W. Sheely. Nucl. Sci. and Engineering, 29, 165 (1967).
17. И. А. Биргер. Круглые пластинки и оболочки вращения. М., Оборонгиз, 1961.
18. Н. Н. Аристархов и др. Экспериментальные исследования методов обнаружения пакетов с негерметичными твэлами на реакторе БР-5. Доклад научно-технической конференции стран — членов СЭВ (г. Ульяновск, 1970).

Исследование перспективных топливных композиций на основе карбида урана и плутония для быстрых реакторов

И. С. ГОЛОВНИН, Т. С. МЕНЬШИКОВА, Ф. Г. РЕШЕТНИКОВ, И. Г. ЛЕБЕДЕВ, В. И. КУЗЬМИН, Б. Д. РОГОЗКИН, В. В. АРТАМОНОВ, Р. Б. КОТЕЛЬНИКОВ, В. С. БЕЛЕВАНЦЕВ, С. Н. БАШЛЫКОВ, Ю. К. БИБИЛАШВИЛИ, В. С. МУХИН, Г. В. КАЛАШНИК, А. С. ПИСКУН, Л. К. ДРУЖИНИН, Г. В. ТИТОВ (СССР)

УДК 621.039.542.344

В первых промышленных аппаратах на быстрых нейтронах используется в качестве горючего двуокись урана, а также смесь двуокиси урана и двуокиси плутония, которые обеспечивают надежность работы твэлов в весьма напряженных условиях (высокая плотность энерговыделения, довольно высокие температуры и высокие выгорания).

Однако по ядернофизическим характеристикам окисное горючее не является наилучшим.

Расчетами было показано, что использование карбидного горючего может снизить время удвоения примерно в полтора раза. Поэтому в последнее время проводятся серьезные исследования карбидного горючего как в Советском Союзе, так и за рубежом.

В ряде стран (Франция, Англия, ФРГ, США и др.) осуществляются широкие программы исследования карбидного горючего, а также разработаны проекты реакторов с карбидным горючим (MFR, KNK).

Опыт эксплуатации карбидной зоны реактора БР-5 в нашей стране показал реальную возможность использования карбидного горючего в быстрых реакторах. Вместе с тем стала очевидной необходимость совершенствования методов получения монокарбидов составов, близких к стехиометрическому, исследования возможности подавления вредного влияния угле-

рода легированием или нанесением защитных покрытий, изучения зависимости процессов газовыделения и распухания от температуры и выгорания.

Преимущества карбидного горючего по сравнению с окисным заключаются в более высокой теплопроводности и повышенном содержании делящегося изотопа. Недостатком является более сильное по сравнению с окисным распухание под облучением при температурах выше 1500° С. Поэтому реализовать преимущества карбидного горючего можно только при соответствующей конструкции твэла. Целесообразно для уменьшения распухания применять подслои с хорошей теплопроводностью (например, натрия) между сердечником и оболочкой, который существенно снижает перепад температур и соответственно температуру в центре сердечника. Но применение натрия связано с новой проблемой — переносом избыточного углерода на оболочку и карбидизацией последней.

Однако есть возможность избавиться от отрицательного влияния углерода, отработав технологию получения карбида стехиометрического состава, легируя карбид элементами, связывающими свободный углерод, или вводя защитные покрытия. Какой из этих путей более действенный — необходимо проверить в условиях облучения.