

Р и с. 2. Зависимость времени релаксации от сопротивления изоляции детектора

заряда $n(x)$ в сечении x диэлектрика и для плотности тока смещения $i_c(x)$:

$$n(x) = \left[c + q \int \exp\left(-\int \frac{dt}{\tau}\right) dt \right] \exp\left(-\int \frac{dt}{\tau}\right); \quad (1)$$

$$i_c(x) = \left(x - \frac{\delta}{2}\right) \left[q - \frac{c}{\tau} \exp\left(-\int \frac{dt}{\tau}\right) - \frac{q}{\tau} \times \right. \\ \left. \times \exp\left(-\int \frac{dt}{\tau}\right) \int \exp\left(\frac{dt}{\tau}\right) dt \right], \quad (2)$$

где q — заряд, сообщаемый единице объема диэлектрика в единицу времени; δ — толщина диэлектрика; c — постоянная интегрирования; τ — время релаксации, определяемое как ε/σ (здесь ε — диэлектрическая проницаемость; σ — удельная проводимость диэлектрика). В стационарном режиме $i_c = 0$ и $n = q\tau$.

Измеряемый ток ДПЗ пропорционален числу электронов, достигающих коллектора. Поэтому можно записать:

$$I = I_0 - I_c(\delta), \quad (3)$$

где I_0 — ток ДПЗ в стационарном режиме; $I_c(\delta)$ — ток смещения на границе диэлектрик — коллектор ($x = \delta$).

При возрастании температуры растет проводимость диэлектрика, что приводит к уменьшению времени релаксации. В этом случае наблюдается переход от большей плотности объемного заряда к меньшей, ток смещения отрицателен и увеличивает измеряемый ток детектора. Стационарный режим устанавливается тем быстрее, чем меньше время релаксации (больше проводимость диэлектрика). Экспериментальная зависимость времени релаксации от сопротивления изоляции ДПЗ приведена на рис. 2.

По экспериментальным данным о сопротивлении изоляции ДПЗ были получены расчетные значения тока

смещения. Результаты расчета с учетом влияния термо-ЭДС в кабеле приведены на рис. 1 ($I_{\text{расч}}$). Значение q для расчета определялось так: $q = \mu I_0$, где μ — коэффициент линейного ослабления β -частиц в материале диэлектрика. Из рис. 1 следует, что расчетное значение тока смещения хорошо совпадает с экспериментальными данными.

Эффективную диэлектрическую проницаемость для медленно меняющихся полей можно записать в виде суммы двух компонентов, соответствующих переменной и постоянной поляризации диэлектрика [6]. Последняя является функцией мощности дозы облучения, так как определяется центрами поляризации, возникающими в диэлектрике при облучении его электронами:

$$\varepsilon_{\text{эф}} = \varepsilon + k_1 i_0, \quad (4)$$

где k_1 — коэффициент, зависящий от проводимости диэлектрика.

Удельная проводимость диэлектрика зависит как от температуры, так и от мощности дозы излучения [4]:

$$\sigma = \sigma_0(T) + k_2 i_0, \quad (5)$$

где $\sigma_0(T)$ — проводимость диэлектрика при отсутствии облучения; k_2 — коэффициент пропорциональности.

Тогда формулу (2) можно записать в виде

$$i_c = \frac{\delta i_0 \mu}{2} \left(1 - \frac{i_0}{i} \frac{\varepsilon_0 + k_1 i_0}{\varepsilon + k_1 i} \frac{\sigma + k_2 i}{\sigma_0 + k_2 i_0} \right) \exp\left(-\int \frac{dt}{\tau}\right). \quad (6)$$

Из анализа этой формулы следует, что ток смещения возрастает при увеличении толщины диэлектрика и коэффициента линейного ослабления β -частицы. Кроме того, влияние температуры уменьшается с увеличением проводимости и уменьшением температурного коэффициента проводимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Л. Г. и др. «Атомная энергия», 1976, т. 41, вып. 5, с. 354.
2. Дубовский Б. Г. и др. Там же, 1974, т. 36, вып. 3, с. 171.
3. Mochizuki K., Shiroyoma S. In: Proc. IAEA Symp. «Nuclear Power Plant Control and Instrumentation». Prague, 22–26 Jan. 1973, N G6.
4. Емельянов И. Я. и др. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 1, с. 72.
5. Gross B. «Z. Physik», 1959, Bd 155, N 4, S. 479.
6. Gross B. «J. Appl. Phys.», 1965, v. 36, N 5, p. 1635.
7. Альбинов З. А., Веретенников А. И., Козлов О. В. Детекторы импульсного ионизирующего излучения. М., Атомиздат, 1978.

Поступило в Редакцию 23.04.79
В окончательной редакции 14.09.79

УДК 621.039.531

Исследование радиационной ползучести стали 09X16N15M3B при облучении в ядерном реакторе БР-10

КРУГЛОВ А. С., БУЛЬКАНОВ М. Г., БЫКОВ В. Н., ПЕВЧИХ Ю. М.

Прямое внутрореакторное изучение радиационной ползучести материалов связано с определенными трудностями, обусловленными как сложностью техники эксперимента, так и условиями облучения в ядерном реакторе. К настоящему времени разработаны методики и устройства для внутрореакторных испытаний [1, 2], получены данные о радиационной ползучести сталей, используемых в реакторостроении [3–5].

Среди отечественных исследовательских ядерных реакторов одним из наиболее перспективных в отношении проведения экспериментов о влиянии чисто радиационных эффектов на длительные механические свойства материалов является БР-10. Достаточно высокая плотность нейтронного потока, например, до $2 \cdot 10^{15}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ при $\bar{E} = 0,8$ МэВ в центральном петлевом канале (ЦПК) и приемлемый уровень температуры (570–800 К) обеспечивают

проведение экспериментов по изучению закономерностей радиационной ползучести.

Испытания на ползучесть цилиндрического образца из стали 09X16H15M3B в аустенизированном состоянии проводились в ЦПК БР-10 на установке ИПР-60 [6] при одноосном растяжении с непрерывной регистрацией деформации и температуры. После загрузки испытательного устройства в ЦПК образец был подвергнут предварительному облучению (без приложения нагрузки) до флюенса $6,2 \cdot 10^{21}$ нейтр./см². Затем образец нагрузили до напряжения (301 ± 3) МПа, что не превышало предела текучести [7]. При этом напряжении образец находился до момента его разрушения. Общее время испытания образца в реакторе составило около 4700 ч, из них под нагрузкой 1370 ч при флюенсе $7,7 \cdot 10^{21}$ нейтр./см² к моменту разрушения.

В процессе эксперимента изучалось влияние плотности нейтронного потока на скорость радиационной ползучести. С этой целью периодически изменялась и поддерживалась на требуемом уровне мощность реактора, что и обеспечивало различную плотность потока нейтронов. Результаты испытания, представленные в таблице, позволяют

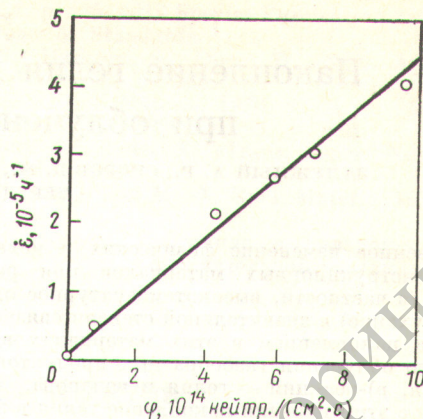
Условия испытания и значения скорости установившейся радиационной ползучести образца из стали 09X16H15M3B во время облучения в ЦПК БР-10 при напряжении 301 МПа и флюенсе $(6,2-7,7) \cdot 10^{21}$ нейтр./см²

Температура испытания, К	Плотность потока, 10^{14} нейтр./(см ² ·с)	Время испытания, ч	Скорость радиационной ползучести, 10^{-5} ч ⁻¹
653±5	4,3	50	2,1
706±7	5,7	230	2,7
560±10	0,95	100	0,4
740±7	6,7	90	3,0
540±15	0	270	0,0
765±5	9,5	60	4,0

проследить деформацию ползучести в течение всего времени эксперимента. Из приведенных данных видно, что скорость ползучести образца изменяется в соответствии с изменениями плотности нейтронного потока и практически не подчиняется закономерностям тепловой ползучести. Так, при повышении температуры от 560 до 765 К скорость термоактивируемой ползучести у стали 09X16H15M3B должна была возрасти примерно в 10^8 раз, в то время как в условиях эксперимента она увеличилась всего в 10 раз. Кроме того, известно, что скорость тепловой ползучести сталей типа 09X16H15M3B при температуре ниже 770 К [5, 8] в 10^2-10^3 раз ниже зарегистрированной в опыте. Эти факты позволяют предположить, что наблюдаемая деформация контролируется воздействием нейтронного облучения, т. е. является радиационно-стимулированной ползучестью.

Отметим, что расчет деформации проводили на основании показаний измерителей перемещения только в периоды, когда температурный и мощный режимы реактора были стабильными. Таким образом, неопределенности при измерении деформации, связанные с изменением термического расширения узлов устройства при переходных режимах, не рассматривались.

На рисунке показано, как зависит скорость установившейся радиационной ползучести от плотности нейтронного



Зависимость скорости установившейся радиационной ползучести стали 09X16H15M3B от плотности нейтронного потока с $E \geq 0,1$ МэВ при напряжении 301 МПа в интервале температуры 540—765 К (○ — эксперимент)

потока. Эта зависимость может быть аппроксимирована при доверительной вероятности 95% соотношением

$$\epsilon = (0,45 \pm 0,05) \cdot 10^{-19} \phi,$$

где ϵ — скорость установившейся радиационной ползучести, ч⁻¹; ϕ — плотность нейтронного потока при $E \geq 0,1$ МэВ, нейтр./(см²·с).

Наблюдаемая линейная зависимость скорости радиационной ползучести от плотности потока нейтронов согласуется с результатами аналогичных исследований [9, 10] в рассматриваемом диапазоне температур для сталей, однотипных со сталью 09X16H15M3B. Таким образом, результаты экспериментов с учетом ранее известных данных [4, 5] позволяют сделать вывод, что сталь 09X16H15M3B при облучении в активной зоне БР-10 подвержена радиационно-стимулированной ползучести, параметры которой близки к полученным для зарубежных сталей, испытывавшихся в сходных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверьянов П. Г. и др. В кн.: Сборник докладов Всесоюз. школы по внутриреакторным методам исследований. Димитровград, изд. НИИАР, 1978, с. 86.
2. Наскидашвили И. А. Там же, с. 26.
3. Писаренко Г. С. и др. «Проблемы прочности», 1974, № 4, с. 3.
4. Воейков В. П., Шамардин В. К., Красноселов В. А. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Радиационное материаловедение, методика и техника облучения. Вып. 1 (8). Димитровград, изд. НИИАР, 1977, с. 26.
5. Круглов А. С., Бульканов М. Г., Певчих Ю. М. [1], с. 137.
6. Бульканов М. Г. и др. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Топливные и конструкционные материалы. Вып. 2 (5). М., изд. ВНИИНМ, 1976, с. 31.
7. Займовский А. С. и др. Препринт ФЭИ-375. Обнинск, 1974.
8. Closs K. e.a. «Nucl. Mater.», 1977, v. 65, p. 244.
9. Gilbert E. e.a. Ibid., 1968, v. 26, p. 105.
10. Harries D. Ibid., 1977, v. 65, p. 157.

Поступило в Редакцию 07.05.79