



Научно-исследовательский институт  
атомных реакторов им. В.И.Ленина

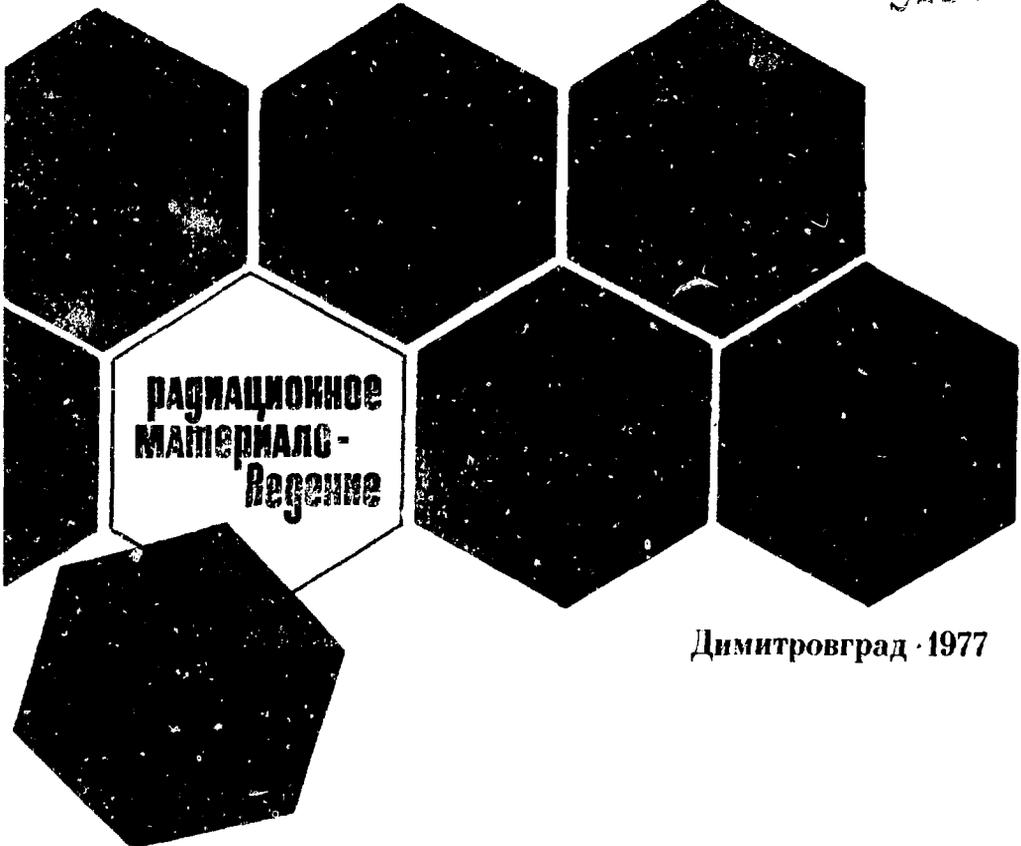
П-23(317)

В.И.Прохоров, А.Г.Финько, Р.И.Минеев

547805253

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
РАБОЧЕЙ ДЛИНЫ  
КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ  
ИЗ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ  
ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ  
РАСТЯЖЕНИИ**

В25.8.111



радиационное  
материалс -  
Ведение

Дмитровград · 1977

## Н А С Т О Я Ш Е Е   И З Д А Н И Е   Н И И А Р

ЯВЛЯЕТСЯ самостоятельной, не всегда дублирующей в последствии в других изданиях ПУБЛИКАЦИЕЙ отдельных оригинальных научных трудов НИИАР, на которую можно ссылаться в других публикациях, указывая при этом авторов, наименование, порядковый номер (НИИАР, П-...), год и место издания (Димитровград).

ИЗДАЕТСЯ с целью более быстрой или более полной информации по сериям:

1. Ядерные реакторы
2. Методика и техника облучения
3. Радиационное материаловедение
4. Радиохимия
5. Ядерная физика
6. Ядерная электроника
7. Вычислительная математика
8. Информатика и управление

ПЕЧАТАЕТСЯ на ротапринтере НИИАР тиражом 170 экз.

РАССЫЛАЕТСЯ в научные организации, научно - технические библиотеки и отдельным лицам на основе обмена и за плату.

Научно-исследовательский институт атомных реакторов  
им. В.И.Ленина

---

НИИАР П-23 (317)

В.И.Прохоров, А.Г.Финько, Р.И.Мягков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ ДЛИНЫ  
КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ  
ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Дмитровград  
1977

## Р е ф е р а т

Исследована деформация кольцевых образцов диаметром 6-10 мм, толщиной стенки 0,3-0,65 мм и высотой 1,5-3 мм из сталей 0Х16Н15М3Б, 00Х16Н15М3Б, сплава 00Х20Н40Б и из циркониевых сплавов  $Zr + 1\% Nb$  и  $Zr + 2,5\% Nb$ , а также кольцевых образцов с окнами из тех же материалов в необлученном состоянии и после облучения при температуре 70°C интегральным потоком  $1 \cdot 10^{21}$  быстр. нейтр./см<sup>2</sup> ( $E \geq 0,85$  МэВ) в зависимости от диаметра и вида опор. Установлено, что при использовании полукруглых опор рабочая длина кольцевого образца, необходимая для расчета относительной равномерной и общей деформации, может быть определена по формуле

$$l = \frac{\pi}{2} [D_{cp} - k(d_o + t)], \quad \text{причем } k = 0,65.$$

Для испытаний необходимо использовать опоры, диаметр которых составляет 80-95% от внутреннего диаметра кольца. Испытание мало пластичных кольцевых образцов на полукруглых опорах со срезами или на опорах, диаметр которых значительно меньше внутреннего диаметра кольца, недопустимо.



## I. ВВЕДЕНИЕ

Для определения величины изменения механических свойств оболочек тепловыделяющих и поглощающих элементов после их работы в атомном реакторе в настоящее время наиболее часто используют кольцевые образцы [1-3]. Такие образцы диаметром 6-15 мм, толщиной стенки 0,3-0,9 мм и высотой 2-3 мм вырезают из оболочек отработавших тепловыделяющих элементов или из оболочечных труб и облучают. Испытания образцов на растяжение осуществляют на оправках с полукруглыми консольными опорами (рис. I). В результате подобных испытаний достаточно правильно определяется предел прочности и предел текучести исследуемого материала и очень неточно - относительное равномерное и общее удлинение. Это связано с тем, что сила трения между образцом и опорами вызывает непостоянное по длине образца растягивающее усилие, падающее к его верхней и нижней точкам. Так, в работах [4,5] показано, что отношение растягивающих усилий в образце на участке свободного деформирования между опорами ( $P_0$ ) и в точке на опоре под углом  $\alpha$  ( $P_\alpha$ , рис. I) выразится

$$P_0/P_\alpha = e^{\mu\alpha} \quad (I)$$

где

$\mu$  - коэффициент трения между опорой и образцом;  
 $\alpha$  - угол между горизонтальным радиусом и радиусом, проведенным к рассматриваемой точке кольца.  
При  $\alpha = 90^\circ = 1,57$  радиан и  $\mu = 0,2$   $P_0/P_\alpha = 1,37$   
(при  $\mu = 0,1$   $P_0/P_\alpha = 1,17$ .)

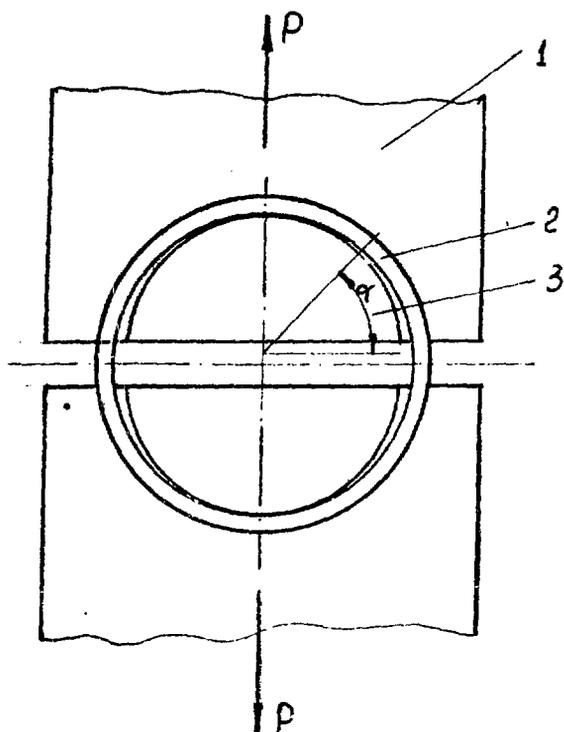


Рис. 1. Оправки для испытания на растяжение кольцевых образцов: 1 - собственно оправка; 2 - кольцевой образец; 3 - полукруглая консольная опора оправки

Как видно, различие в напряжениях по длине кольца достаточно велико. Еще более значительной будет разница в величинах деформации различных участков кольца, что необходимо иметь в виду при обработке получаемых диаграмм растяжения кольцевых образцов.

Пластическая деформация происходит только в тех точках кольца, для которых выполняется соотношение

$$\frac{\sigma_{\theta}}{\sigma_{\alpha 2}} \geq \frac{P_0}{P_{\lambda}} = \epsilon^{m_{\lambda}}, \quad (2)$$

где

$\sigma_B$  и  $\sigma_{a\alpha}$  - соответственно пределы прочности и текучести материала кольца (трубы) в тангенциальном направлении.

Чтобы качественно оценить распределение деформации по длине, были проведены испытания на растяжение кольцевых образцов  $\phi 46 \times 0,4 \times 8$  мм из стали Х18Н10Т на полукруглых опорах диаметром 42 мм при комнатной температуре. Перед испытанием на образцы были нанесены метки и измерены расстояния между ними (в пределах 1-2 мм). По увеличению расстояния между метками на испытанных образцах рассчитывались величины деформации в различных точках по длине колец (рис. 2). Пластическая деформация (рис. 2) происходит во всех точках образца, однако её величина уменьшается по мере увеличения угла  $\alpha$  и при  $\alpha = 90^\circ$  (в верхней и нижней точках кольца) в 4-5 раз меньше, чем в точках, соответствующих углу  $\alpha = 10^\circ$ . В данном случае для всех величин угла  $\alpha$  выполняется соотношение (2), т.е.

$$\frac{\sigma_B}{\sigma_{a\alpha}} = 1,8 > e^{m\alpha} = 1,57$$

при  $m = 0,2$  и  $\alpha = 90^\circ$ .

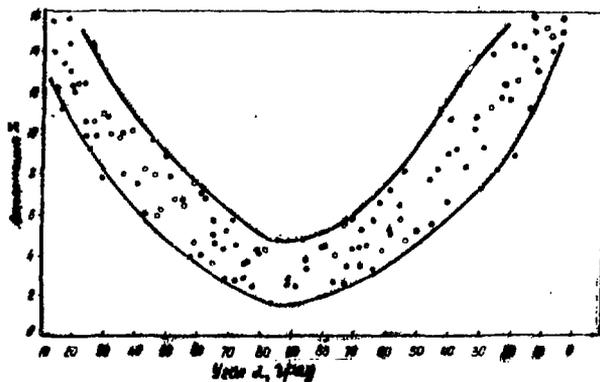


Рис. 2. Распределение деформации по длине кольцевых образцов из стали Х18Н10Т на участке контакта их с опорами (образец  $\phi 46 \times 0,4 \times 8$  мм, опоры  $d_0 = 42$  мм,  $20^\circ\text{C}$ )

Рассмотренному примеру (когда во всех точках кольцевого образца происходит пластическая деформация) соответствует схема I (рис. 3) распределения деформации по длине образца. В то же время может быть и такой случай, когда условие (2) пластической деформации выполняется до определенных величин угла  $\alpha$ , причем  $0 < \alpha < \alpha_1$ , тогда как для углов  $\alpha > \alpha_1$  это условие не выполняется, и эти участки кольца пластически не деформируются. Этому случаю соответствует схема II (рис. 3).

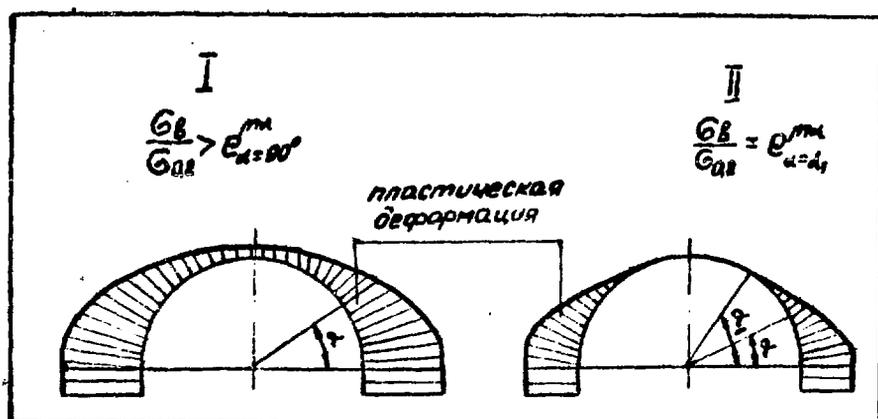


Рис. 3. Возможные варианты распределения деформации по длине кольца на участке контакта его с опорой

Непостоянство деформации по длине кольцевого образца приводит к тому, что становится неопределенной относительная деформация, так как не известно, какую часть кольца принимать за рабочую длину. В настоящее время предложены два способа определения расчетной длины кольцевых образцов малых диаметров при испытании их на растяжение на полукруглых опорах.

В ИАЭ при испытании циркониевых колец применяют эмпирическую формулу

$$l = \frac{\pi}{2} (D_{cp} - k d_0), \quad (3)$$

где  $D_{cp} = D_{нар} - t$ ;

$D_{нар}$  и  $t$  - наружный диаметр и толщина отенки кольца соответственно;

$d_o$  - диаметр опоры, причем  $K = 0,85$ .

Предполагается, что пластически деформируется в основном участок кольца между опорами и небольшой участок на опоре, что соответствует случаю II (рис. 3), причем  $\alpha_1 \approx 20^\circ$ .

В НИИАРе использовалась та же формула, но при  $K = 0$ , поэтому расчетная длина определялась как

$$l = \frac{\pi}{2} D_{cp}. \quad (4)$$

Это соответствует случаю I (рис. 3) распределения деформации по длине кольца. Здесь предполагается, что пластическая деформация кольца на опорах такая же, как и на участках между опорами.

При сравнении формул (3) и (4) видно, что эти два способа отражают практически две крайности в определении рабочей длины. Так как для испытаний применяют обычно опоры, диаметр которых близок к внутреннему диаметру кольца, т.е.  $d_o \approx D_{cp} - t$ , то в первом случае расчетная длина равна  $l_1 \approx \frac{\pi}{2} 0,15 D_{cp}$  и приблизительно в 6 раз меньше, чем длина во втором случае. Таким образом получается, что при одной и той же величине абсолютной деформации (из диаграммы деформирования кольца в координатах нагрузка-абсолютное удлинение) относительная деформация в первом случае приблизительно в 6 раз больше, чем во втором.

В то же время достаточно правильное знание относительной деформации кольцевых образцов совершенно необходимо. Это вызвано тем, что при правильном расчете по полученным в результате этих испытаний величинам можно судить о запасе пластичности отработавших твэлов или просто облученных кольцевых образцов, а также путем сравнения о деформацией до разрушения обычных цилиндрических или плоских образцов и трубок под внутренним давлением можно оце-

нивать влияние типа образца и испытания на величины деформационной способности оболочечных материалов.

С учетом вышеизложенного мы провели серию экспериментов для выбора достоверных формул расчета рабочей длины (а отсюда и относительной деформации) кольцевых необлученных и облученных образцов. Кроме того, используя полукруглые опоры со срезами (рис. 4, б), позволяющие увеличить длину участка кольца, который располагается между опорами и деформируется свободно без трения между образцом и опорами, мы оценили вклад деформации этого участка в общую деформацию и влияние изгибов в образце на получаемые величины механических свойств.

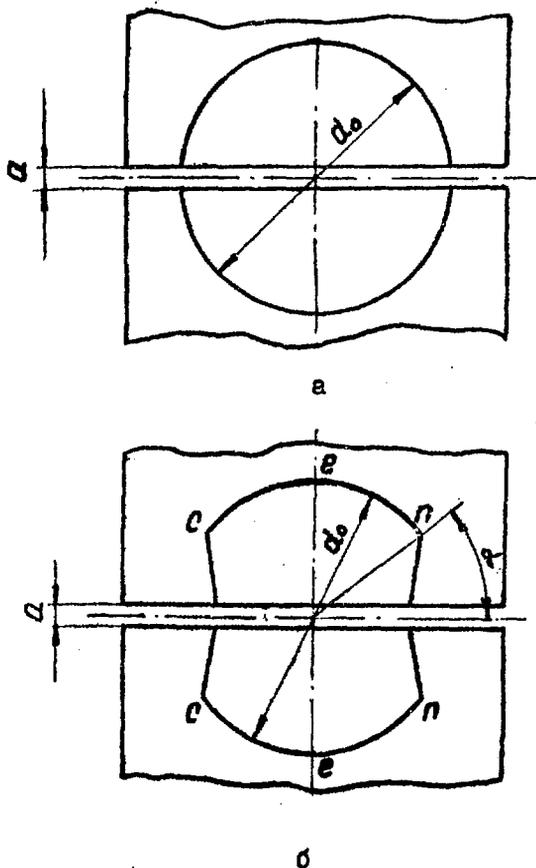


Рис. 4. Типы использованных опор для испытания кольцевых образцов:

а - полукруглые:

$$d_{01}=7,6 \text{ мм};$$

$$d_{02}=6,5 \text{ мм};$$

$$d_{03}=5 \text{ мм};$$

$$d_{04}=3,5 \text{ мм};$$

$$a = 0,2-0,4 \text{ мм};$$

б - полукруглые со срезами:

$$d_{01}=7,6 \text{ мм}; \alpha_1=62^\circ;$$

$$d_{02}=5 \text{ мм}; \alpha_2=48^\circ;$$

$$a = 0,2-0,4 \text{ мм}$$

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Рабочая длина кольцевого образца более правильно, чем по формуле (3), может быть определена выражением

$$l = \frac{\pi}{2} [D_{cp} - \kappa (d_0 + t)]. \quad (5)$$

С использованием этой формулы относительная равномерная деформация кольцевого образца равна

$$\delta = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta l}{\frac{\pi}{2} [D_{cp} - \kappa (d_0 + t)]}, \quad (6)$$

где

$\Delta l$  - абсолютная величина равномерной деформации.

Как отмечалось, основная трудность использования этой формулы состоит в неопределенности коэффициента  $\kappa$ , который можно определить по результатам испытаний одних и тех же кольцевых образцов на полукруглых опорах двух различных диаметров:

$$\kappa = \frac{D_{cp} (\Delta l_1 - \Delta l_2)}{\Delta l_1 (d_{02} + t) - \Delta l_2 (d_{01} + t)}, \quad (7)$$

где

$\Delta l_1$  и  $\Delta l_2$  - величины абсолютной деформации образцов при испытании на опорах диаметром  $d_{01}$  и  $d_{02}$  соответственно. При проведении этих испытаний мы использовали опоры диаметром 7,6; 6,5; 5 и 3,5 мм (рис. 4, а).

Коэффициент  $\kappa$  может быть также определен по результатам испытаний обычных кольцевых образцов и кольцевых образцов с окнами (рис. 5). Образцы с окнами готовили следующим образом. На опорах со срезами диаметром 5 мм (рис. 4, б) растягивали кольцо при комнатной температуре так, чтобы участки кольца между опорами становились прямолинейными. При этом максимальные величины растягивающих напряжений, возникающих в кольце, были существенно ниже предела текучести материала кольца. Далее металл с обеих сторон прямолинейных участков кольца удаляли до тех пор,

пока высота кольца на рабочем участке не становилась равной  $b$ , причем  $b < \frac{\sigma_{d2}}{\sigma_b} \cdot h$ , где  $h$  - высота исходного кольца (рис. 5). Длина рабочего участка такого кольца ( $l_p$ ) была в пределах 4-6 мм. После этого образец испытывали на полукруглых опорах со срезами диаметром 5 мм, следя за тем, чтобы рабочие участки кольца не заходили на опоры. При испытании этого кольца определяли относительную равномерную деформацию металла кольца в тангенциальном направлении  $\delta_T$  ( $\delta_T = \frac{\Delta l_i}{l_p}$ ). Приравняв эту деформацию к относительной равномерной деформации обычного кольца при испытании на полукруглых опорах, определенной по формуле (6), можно рассчитать коэффициент  $K$ :

$$K = \frac{\frac{\pi}{4} D_{cp} \cdot \delta_T - \Delta l_i}{\frac{\pi}{4} \delta_T (d_{o1} + t)}, \quad (8)$$

где  $\Delta l_i$  - абсолютное удлинение кольцевого образца при испытании на опорах диаметром  $d_{o1}$ .

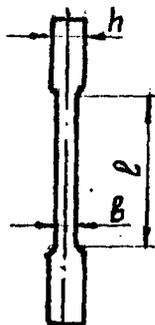


Рис. 5. Кольцевой образец с окнами:

$$h = 2-3 \text{ мм};$$

$$l = 4-6 \text{ мм};$$

$$b < \frac{\sigma_{d2}}{\sigma_b} \cdot h$$

Первоначально относительную равномерную деформацию  $\delta$  кольцевых образцов определяли по формуле (4). С учетом этого формулы (7) и (8) для определения коэффициента  $K$  преобразуются в формулы (9) и (10) соответственно:

$$K = \frac{D_{cp} (\delta_1 - \delta_2)}{\delta_1 (d_{o2} + t) - \delta_2 (d_{o1} + t)}, \quad (9)$$

$$K = \frac{D_{ce} (\delta_T - \delta_i)}{\delta_T (d_{oi} + t)}. \quad (10)$$

Опоры со срезами (рис. 4, б) имели диаметры 7,6 и 5 мм и угол  $\alpha$ , равный 62 и 48° соответственно, в пределах которого кольцевые образцы деформировались как плоские, т.е. не касались опор.

Испытывали кольца из стали ОХ16Н15МЗБ диаметром 6 мм и высотой 1,5–2 мм и из стали ООХ16Н15МЗБ, сплава ООХ20Н40Б, а также из циркониевых сплавов  $Zr + 1\% Nb$  и  $Zr + 2,5\% Nb$  диаметром 8–10 мм и высотой 2–3 мм. Облученные кольцевые образцы из стали ОХ16Н15МЗБ и из сплава  $Zr + 1\% Nb$  были приготовлены из центральной части твэлов, отработавших кампании в реакторе БОР-60 ( $\sim 3,6 \cdot 10^{22}$  быстр. нейтр./см<sup>2</sup>, температура  $\sim 650^\circ C$ ) и в реакторе ВВЭР-365 II блока Нововоронежской АЭС ( $\sim 1 \cdot 10^{21}$  быстр. нейтр./см<sup>2</sup>, температура  $\sim 300^\circ C$ ) соответственно. Образцы из стали ООХ16Н15МЗБ и сплавов  $Zr + 1\% Nb$  и  $Zr + 2,5\% Nb$  были облучены в канале ДЭК реактора СМ-2 ( $\sim 9 \cdot 10^{20}$  быстр. нейтр./см<sup>2</sup>, температура  $\sim 70^\circ C$ ). Все испытания проведены на машинах ММ-150Д при скорости движения активного захвата 1 мм/мин.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. I представлены величины равномерной деформации необлученных и облученных кольцевых образцов при испытании их на различных опорах. При испытании достаточно пластичных колец на опорах различного диаметра (необлученные кольца  $\phi 6 \times 0,3$  из стали ОХ16Н15МЗБ,  $\phi 8 \times 0,3$  из стали ООХ16Н15МЗБ и  $\phi 9,1 \times 0,65$  и  $\phi 10,2 \times 0,65$  из сплава  $Zr + 1\% Nb$ ) получены практически одинаковые величины предела прочности. Равномерная деформация образцов увеличивается по мере уменьшения диаметра опор и является максимальной для кольцевых образцов с окнами (табл. I, рис. 6). По величинам равномерной деформации таких образцов определены значения

Таблица I

Величины относительной равномерной деформации (в процентах) кольцевых образцов при испытании на различных опорах

Материал и размеры образцов, мм	Состояние	T <sub>исп.</sub> , °C	Полукруглые опоры				Полукруглые со срезами				
			Обычные образцы				с окнами	обычные			
			Диаметр, мм								
			7,6	6,5	5	3,5	5	7,6	5		
12 OX16H15M3E ∅ 6x0,3	необл.	20	-	-	18,7	24,8	40,5	-	27,7		
	"	650	-	-	6,8	8,8	15	-	10		
	облуч.	20	-	-	5,2	(6,4)	-	-	(0,7)		
	"	3,6·10 <sup>22</sup> 650	-	-	1,1	(0,4)	-	-	(0,4)		
OOX16H15M3E ∅ 8x0,3	необл.	300	-	8,9	-	-	21,2	-	-		
	"	650	-	6,4	-	-	22,9	-	-		
	облуч.	300 8,4·10 <sup>20</sup>	-	3,1	-	(3,8)	9,0	-	-		
OOX16H15M3E ∅ 10x0,3	облуч.	300	4,0	-	-	5,8	-	-	-		

00X20H40B	необлуч.	20	1,2	-	-	2,0)	3,0	(1,8)	-
∅ 9x0,5	-"-	650	1,3	-	-	(2,6)	4,0	(0,65)	-
2r+1%N6	необлуч.	300	5,6	-	-	-	15,2	-	-
∅ 9,1x0,65	-"-	450	3,7	-	-	-	8,3	-	-
	облуч.	300	-	0,8	-	(0,9)	2,6	-	-
	8,4 · 10 <sup>20</sup>	450	-	1,0	-	-	1,8	-	-
	облуч.	300	1,6	-	-	2,7	-	(0,7)	-
	1 · 10 <sup>21</sup>	20	1,9	-	-	(2,5)	-	(1,3)	-
2r+1%N6	необлуч.	20	4,2	-	5,4	6,3	-	6,1	-
СИ ∅ 10,2x0,65									
2r+2,5%N6	облуч.								
∅ 9,1x0,65	9,6 · 10 <sup>20</sup>	20	1,0	-	-	1,9	-	(0,7)	-

Примечания: 1. Каждая величина является средней из испытаний 2-5 образцов.

2. В скобках приведены величины деформации для тех образцов, которые имели пониженные значения предела прочности.

3. При расчете относительной деформации применяли  $\epsilon = \frac{F}{2} \cdot D_{\text{ср}}$  (обычные кольца) и  $\epsilon \approx 4-6$  мм (кольца с окнами).

коэффициента  $K$ . При испытании мало пластичных материалов (необлученные кольца  $\phi$  9x0,5 из сплава ООХ20Н4ОБ, облученные кольца  $\phi$  6x0,3 из стали ОХ16Н15МЗБ,  $\phi$  8x0,3 из стали ООХ16Н15МЗБ, а также  $\phi$  9,1x0,65 из сплава  $Zr + 1\% Nb$ ) на опорах значительно меньшего диаметра, чем диаметр кольцевых образцов, наблюдается снижение предела прочности, а иногда и равномерного удлинения. Так, например, предел прочности сплава ООХ20Н4ОБ снизился при переходе от испытания на опорах диаметром 7,6 мм к испытанию на опорах диаметром 3,5 мм с 89 до 79 кг/мм<sup>2</sup> (температура испытания 20°C) и с 50 до 41,5 кг/мм<sup>2</sup> (температура испытания 650°C). Относительная деформация при этом хотя и увеличилась с 1,2 до 2,0% (20°C) и с 1,3 до 2,6% (650°C), однако определенная по этим результатам величина коэффициента  $K$  являлась заниженной и не принималась в расчет. Значительное изменение механических свойств наблюдается при испытании облученных колец  $\phi$  6x0,3 из стали ОХ16Н15МЗБ на опорах различных диаметров. Так, при температуре 650°C предел прочности стали равен 51 кг/мм<sup>2</sup>, а равномерная деформация - 1,1% (опоры  $\phi$  5 мм) и соответственно 14 кг/мм<sup>2</sup> и 0,4% (опоры  $\phi$  3,5 мм).

Еще большее охрупчивание и снижение предела прочности наблюдается при испытании мало пластичных колец на опорах со срезами. Так, например, при испытании на опорах со срезами колец  $\phi$  9x0,5 из сплава ООХ20Н4ОБ при температуре 650°C равномерное удлинение снизилось в два раза по сравнению с удлинением, полученным при испытании на опорах без среза диаметром 7,6 мм (табл. I), а предел прочности при этом уменьшился на 25%. Подобное охрупчивающее влияние опор со срезами наблюдается и для колец, приготовленных из циркониевой оболочки отработавшего твэла (табл. I). При этом образцы разрушаются, как правило, в месте перегиба (точки с и л, рис. 4,б). В то же время при испытании достаточно пластичных кольцевых образцов (например, из необлученных стали ОХ16Н15МЗБ и сплава  $Zr + 1\% Nb$ ) на опорах со срезами не наблюдается охрупчивающего влияния срезов

(табл. I). Расчет показывает, что в этом случае пластическая деформация осуществляется в основном только на участках кольца между опорами (участки *об* и *пт*, рис. 4).

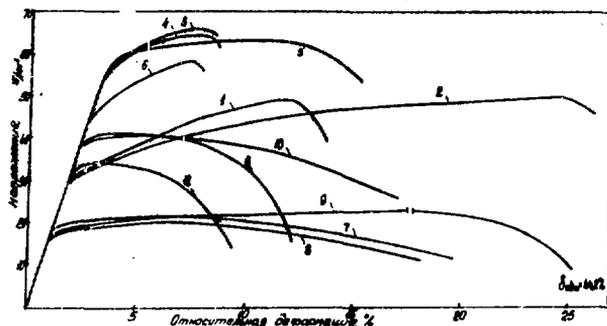


Рис. 6. Диаграммы деформирования необлученных и облученных ( $8,6 \cdot 10^{20}$  быстр. нейтр./ $\text{см}^2$ ,  $70^\circ\text{C}$ ) кольцевых образцов  $\phi 8 \times 0,3$  из стали 00Х16Н15М3Б и  $\phi 9,1 \times 0,65$  из сплава  $\text{Zr} + 1\% \text{Nb}$  при температуре  $300^\circ\text{C}$ :

1-6 - сталь; 7-12 - сплав; 1,2,7-9 - необлученные, 3-6, 10-12 - облученные; 1,3,7,11 - кольца высотой 3 мм, опоры  $d_0 = 6,5$  мм; 4,8 - кольца высотой 2 мм; 6,12 - кольца высотой 3 мм, опоры  $d_0 = 3,5$  мм; 2,5,9,10 - кольца с окнами, опоры  $d_0 = 5$  мм со срезами.

Для обычных колец  $l_{\text{раб}} = \frac{\pi}{2} D_{\text{ср}}$ ; для колец с окнами  $l_{\text{раб}} = 5$  мм.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что использование опор со срезами, а также полукруглых опор, диаметр которых существенно меньше диаметра кольца, допустимо только при испытании достаточно пластичных материалов; использование таких опор при испытании мало пластичных кольцевых образцов приводит к значительному снижению пластических и прочностных характеристик. Экспериментальные результаты показывают также, что как пластические, так и прочностные характеристики необлученных и облученных мате-

риалов не зависят от высоты кольцевых образцов в пределах 1,5-2 мм при диаметре 6 и 2-3 мм при диаметре 8-10 мм.

Средние значения коэффициентов  $K$ , рассчитанные по формулам (9), (10), приведены в табл. 2. Они равны для сталей 0,66 и 0,63 необлученной и облученной соответственно, а для сплавов циркония - 0,66; 0,62. Из этих результатов видно, что коэффициент  $K$  практически не зависит от температуры испытания, материала и от того, испытывался ли материал в необлученном или облученном состояниях. Среднее значение коэффициента  $K$  для обеих групп материалов равно 0,64, эту величину можно округлить до 0,65.

Таким образом, из полученных результатов вытекает следующая эмпирическая формула для определения рабочей длины кольцевого образца при испытании его на разрыв на полу-круглых опорах

$$l = \frac{1}{K} [D_{cp} - 0,65(\alpha_0 + t)]. \quad (II)$$

Необходимо отметить, что правильность формулы (II) для определения рабочей длины кольцевых образцов из стали и циркониевых сплавов после низкотемпературного облучения не вызывает сомнения, так как она получена из прямых экспериментов с образцами, облученными достаточно высоким интегральным потоком ( $10^{21}$  обстр. нейтр./см<sup>2</sup>). В то же время прямых экспериментальных результатов, обосновывающих справедливость применения этой формулы при расчете диаграмм деформирования образцов, облученных при высоких температурах высокими дозами нейтронов, мы не имели. Однако коэффициент  $K$  определен для необлученных кольцевых образцов  $\phi$  9x0,5 из сплава 00Х20Н40Б, механические свойства которого близки к механическим свойствам кольцевых образцов  $\phi$  6x0,3 из стали 0Х16Н15М3Б, проработавшей в качестве оболочки твэла реактора БОР-60 до выгорания ~5% ( $3,6 \cdot 10^{22}$  обстр. нейтр./см<sup>2</sup>) при температуре ~650°C. Так, при температуре 650°C  $\sigma_{0,2} = 45$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_b = 51$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\delta_p = 2,8\%$  (сталь 0Х16Н15М3Б, опоры  $\phi$  5 мм) и  $\sigma_{0,2} = 45$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\sigma_b = 50$  кг/мм<sup>2</sup>,  $\delta_p = 3,4\%$  (сплав 00Х20Н40Б, опоры  $\phi$  7,6 мм). Это дает основание полагать, что предлагаемая формула (II)

Таблица 2

Величины коэффициента  $K$  для различных материалов в необлученном и облученном состояниях

Материал, размеры	Состояние	Температура, °C			
		20	300	450	650
OXI6HI5M3E ∅ 6x0,3	необлуч.	0,58	-	-	0,59
OOXI6HI5M3E ∅ 10x0,3	облуч.	-	0,57	-	-
OOXI6HI5M3E ∅ 8x0,3	необлуч.	-	0,66	-	0,81
	облуч.	-	0,69	-	-
OOX20B40E ∅ 9x0,5	необлуч.	0,63	-	-	0,71
Zr+1% Nb ∅ 10,2x0,65	необлуч.	0,58	-	-	-
Zr+1% Nb ∅ 9,1x0,65	необлуч.	-	0,75	0,65	-
	облуч.	-	0,73	0,52	-
	облуч.	-	0,59	-	-
Zr+2,5% Nb ∅ 9,1x0,65	облуч.	0,66	-	-	-

применима и для определения рабочей длины кольцевых образцов из оболочек отработавших твэлов быстрых реакторов.

То, что коэффициент  $K$  практически одинаков для стальных и циркониевых образцов в необлученном и облученном состоянии и особенно при различных отношениях предела прочности к пределу текучести (в пределах  $1,60-1,03$ ) является несколько неожиданным фактом. Коэффициент ( $K=0,65$ ) свидетельствует о том, что пластическая деформация доходит в кольце, по крайней мере, до точки, соответствующей углу  $\alpha = (1-K) \cdot \frac{\pi}{2} = 31,5^\circ = 0,55$  радиан. Для этой точки согласно формуле (I) имеем следующее отношение растягивающих усилий:  $P_b/P_a = 1,12$  (при  $\mu = 0,2$ ) и  $P_b/P_a = 1,07$  (при  $\mu = 0,1$ ). Однако для ряда образцов отношение  $G_b/G_{a2} < 1,07$  (например, для облученных колец из сплава  $Zr + 1\% Nb$   $G_b/G_{a2} = 1,03$ ), т.е. пластическая деформация не должна доходить до угла  $\alpha = 31,5^\circ$ . Это, возможно, свидетельствует о том, что коэффициент трения в рассматриваемых условиях меньше  $0,1$  или, скорее всего, отношение  $G_b/G_{a2}$  занижено благодаря более высокому пределу текучести, определяемому из диаграммы деформирования кольцевого образца.

Оценим величину ошибки при расчете рабочей длины кольцевого образца в зависимости от точности определения коэффициента  $K$ . Из формулы (II) получаем следующее выражение для расчета относительной ошибки при определении рабочей длины:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{(d_0 + t) \Delta K}{D_{cp} - K(d_0 + t)}, \quad (12)$$

где  $\Delta K$  — ошибка в определении коэффициента  $K$ .

Из сравнения отдельных значений коэффициента  $K$ , например, для сплава  $Zr + 1\% Nb$  в необлученном и облученном состоянии при различных температурах с принятием  $K = 0,65$ , видно (табл. 2), что максимальное различие равно  $0,13$  (одно значение из шести). Если проводить испытания

циркониевых кольцевых образцов  $\phi$  9,1x0,65 на опорах, диаметр которых близок к внутреннему диаметру кольца, например,  $d_0 = 7,5$  мм, то максимальная ошибка в определении рабочей длины равна 34%. Средняя ошибка в определении коэффициента  $K$  существенно ниже и составляет 0,06, что соответствует ошибке 16% в определении рабочей длины кольцевых образцов из сплавов циркония. Подобные ошибки в определении рабочей длины наблюдаются и для стальных образцов. Полученные ошибки в определении расчетной длины (а отсюда и относительной деформации) являются небольшими, особенно если иметь в виду, что отличие отдельных абсолютных величин деформации кольцевых образцов из мало пластичных материалов от среднего значения нередко достигает 20% и более.

Ошибка в определении рабочей длины, связанная с неточностью определения коэффициента  $K$ , может быть уменьшена путем использования опор, диаметр которых несколько меньше внутреннего диаметра кольца. Однако такие опоры можно применять при испытании только достаточно пластичных материалов. Причем здесь играет роль как величина равномерной деформации, так и сосредоточенной. Так, циркониевые кольца, облученные сравнительно высоким потоком нейтронов  $\sim 1 \cdot 10^{21}$  быстр. нейтр./см<sup>2</sup>, хотя имеют низкую равномерную деформацию ( $\sim 2-3\%$ ), но, по-видимому, из-за достаточно высокой величины сосредоточенной деформации 10-15% не склонны к охрупчиванию при растяжении на опорах, диаметр которых значительно меньше внутреннего диаметра кольца. Для таких образцов можно смело использовать опоры, диаметр которых составляет 80-95% от внутреннего диаметра кольца: например, для колец  $\phi$  9,1x0,65 можно использовать опоры  $\phi$  6,5 мм. В то же время результаты испытаний кольцевых образцов циркониевых оболочек твэлов, облученных интегральным потоком более  $3 \cdot 10^{21}$  быстр. нейтр./см<sup>2</sup>, свидетельствуют о значительной потере равномерной и сосредоточенной деформации вследствие наводороживания [6]. Стальные кольцевые образцы, как правило, уже в исходном состоянии имеют низкие величины сосредоточенной деформации ( $\sim 5\%$ ), а после облучения потоком  $10^{21}$  быстр. нейтр./см<sup>2</sup> и выше у них на-

блюдается резкое снижение равномерной деформации (табл. I). Для испытания подобных образцов значительное уменьшение диаметра опор недопустимо. В этом случае необходимо использовать опоры, диаметр которых составляет 90-95% от внутреннего диаметра кольца.

Необходимо отметить, что если для расчета рабочей длины использовать предлагаемую формулу (II), то практически все величины относительной равномерной деформации кольцевых образцов, приведенные нами в работах нашего института [I], должны быть увеличены в  $n$  раз, где

$$n = \frac{D_{cp}}{D_{cp} - 0,65(d_0 + t)} \quad (12)$$

При испытании колец  $\phi 6 \times 0,3$  на опорах  $\phi 5$  мм  $n = 2,53$ , а при испытании колец  $\phi 9,1 \times 0,65$  на опорах  $\phi 7,6$  мм  $n = 2,73$ .

Эти данные наглядно свидетельствуют о том, что сопоставление деформационной способности материалов с использованием кольцевых образцов возможно только в том случае, если известны размеры образцов, диаметры опор, на которых осуществлялось растяжение, и формулы, по которым определялась рабочая длина.

В противоположность относительной равномерной деформации величина условного предела текучести в наших экспериментах практически не зависит от того, определялась ли рабочая длина по формуле (4) или по формуле (II). Дело в том, что жесткость машины ММ-150Д, на которой испытываются кольцевые образцы, невысокая, о чем свидетельствует малый угол наклона участка упругости диаграмм деформирования образцов к оси деформаций (рис. 6). Кроме того, участок упругости диаграмм деформирования кольца является небольшим из-за появления значительных пластических деформаций изгиба в образце при его обжатии на опорах (эти участки на рис. 6 не показаны). По этим причинам участок малых пластических деформаций ( $\delta \leq 0,5\%$ ) на диаграмме деформирования кольцевого образца записывается неточно. Если при ис-

пытании стального кольца  $\phi 8 \times 0,3$  мм рабочую длину определять по формуле (4), то она равна 12,1 мм. Предел текучести находится как точка на диаграмме деформирования, отстоящая на расстоянии 0,2% от линии упругого нагружения. При испытании такого кольца на опорах диаметром 6,5 мм рабочая длина, определенная по формуле (II), равна 5,15 мм. На той же диаграмме (рис. 6) условный предел текучести в этом случае определяется точкой, отстоящей на расстоянии  $0,2/12,1 \cdot 5,15 = 0,085\%$  от линии упругого нагружения. Пределы текучести при этом отличаются не более чем на 1 кг/мм<sup>2</sup> (рис. 6), что составляет 3% от предела текучести стали в необлученном состоянии ( $\sigma_{0,2} = 30$  кг/мм<sup>2</sup>). Еще меньшее относительное изменение пределов текучести будет наблюдаться для облученной стали. Такая же картина наблюдается при определении пределов текучести кольцевых образцов других материалов, если испытания проводятся на машинах, похожих по величине жесткости на машину ММ-150Д. Это означает, что различие пределов текучести вследствие разницы в величинах рабочей длины кольцевых образцов при использовании для расчета формул (4) и (II) незначительно и им можно пренебречь.

Имеющиеся экспериментальные результаты для необлученных материалов свидетельствуют о том, что пределы текучести, полученные из диаграмм деформирования как стальных, так и циркониевых кольцевых образцов на машине ММ-150Д являются обычно более высокими, чем пределы текучести, определенные на трубчатых образцах при нагружении их внутренним газовым давлением.

Полученные данные свидетельствуют также о том, что абсолютная величина сосредоточенной деформации практически не зависит от высоты кольца в пределах 1,5-2 мм при диаметре 6 мм и 2-3 мм при диаметре 8-10 мм.

Определим соответствие фактической рабочей длины кольцевого образца рабочей длине, требуемой по ГОСТу 9651-73 (табл.3). Согласно этому стандарту пятикратные образцы должны иметь рабочую длину, равную  $l = 5,65\sqrt{F_0}$ , где  $F_0$  - площадь

поперечного сечения образца. Так как в нашем случае два участка кольцевого образца по обе стороны опор деформируются независимо, то  $F_0 = h \cdot t$ .

Из табл. 3 видно, что фактическая рабочая длина близка к требуемой по ГОСТу при высоте кольца 1,5–2 мм ( $\phi 6 \times 0,3$ ) и 2 мм ( $\phi 9,1 \times 0,65$ ) и меньше, чем требуется по ГОСТу, для колец большей высоты. Так как раньше было отмечено, что абсолютная величина сосредоточенной деформации практически не зависит от высоты кольца в определенных пределах, то можно считать, что и для кольца  $\phi 9,1 \times 0,65$  высотой 3 мм (именно такой высоты кольца наиболее часто применяются для испытания циркониевых сплавов) фактическая рабочая длина соответствует ГОСТу. Таким образом, для кольцевых образцов  $\phi 6 \times 0,3 \times 2$  и  $9,1 \times 0,65 \times 3$  мм, испытываемых на опорах диаметром 5 и 6,5 мм соответственно, общая относительная деформация может быть определена с использованием той же рабочей длины, которая применяется для расчета равномерной относительной деформации.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ результатов испытания кольцевых образцов диаметром 6–10 мм, толщиной стенки 0,3–0,65 мм и высотой 1,5–3 мм из сталей 0Х16Н15М3Б, 00Х16Н15М3Б, сплава 00Х20Н40Б и из циркониевых сплавов  $Zr + 1\% Nb$  и  $Zr + 2,5\% Nb$  в необлученном и облученном состояниях позволил установить следующее:

1. При испытании на полукруглых опорах рабочая длина кольцевого образца, необходимая для расчета относительной равномерной и общей деформации, может быть определена по формуле

$$l = \frac{\pi}{2} [D_{cp} - k(d_0 + t)],$$

причем  $k = 0,65$ .

2. Для испытания стальных облученных и необлученных образцов можно использовать опоры, диаметр которых состав-

Таблица 3

Фактическая рабочая длина кольцевых образцов  
и рабочая длина согласно ГОСТу 9651-73

Размеры кольца, мм	Диаметр опор, мм	Рабочая длина по формуле (II), мм	Рабочая длина по ГОСТу при высоте кольца, мм			
			1,5	2	2,5	3
∅ 6x0,3	5	3,96	3,79	4,37	-	-
∅ 9,1x0,65	6,5	6,54	-	6,45	7,19	7,89

ляет 90-95% от внутреннего диаметра кольца (например, для колец ∅ 6x0,3 наиболее подходящими являются опоры диаметром 5 мм). Для циркониевых образцов можно использовать опоры, диаметр которых составляет 80-95% от внутреннего диаметра кольца (например, для колец ∅ 9,1x0,65 наиболее подходящими являются опоры диаметром 6,5-7 мм).

3. Испытание мало пластичных кольцевых образцов на полукруглых опорах со срезами, а также на опорах, диаметр которых значительно меньше внутреннего диаметра кольца, недопустимо.

Для сопоставления деформационной способности материалов по результатам испытаний кольцевых образцов необходимо в публикациях сообщать размеры образцов, диаметр опор, на которых осуществлялось растяжение, и расчетную формулу, использованную для определения рабочей длины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белокопытов В.С. и др. Радиационное упрочнение сплава  $Zr + 1\% Nb$  в интервале температур 285-350°C - В сб.: Опыт эксплуатации АЭС и пути дальнейшего развития атомной энергетики. Обнинск, 25-27 июня 1974 г., т.2, с.78.
2. Амаев А.Д. и др. Обоснование выбора циркониевого сплава для оболочек твэлов серийных энергетических реакторов ВВЭР-440.- В сб. трудов СЭВ "Атомная энергетика, топлив-

- ные циклы, радиационное материаловедение", Ульяновск, 5-10 октября 1970 г. М., 1971, т. Ш, с. 503.
3. Вотинов С.Н. и др. Радиационная стойкость стержней СУЗ реактора БОР-60 и оценка их работоспособности.-Сб.: Обмен опытом по созданию и освоению установок с быстрыми реакторами на основе реактора БОР-60 . Димитровград, 1973, с. 125.
  4. Балашов В.Д., Суханов Н.Л. Распределение напряжения в тонкостенных кольцевых образцах, деформируемых на растяжение. Препринт НИИАР, П-89, Мелекесс, 1970.
  5. Кошён И.М. и др. Испытание композиционных материалов на кольцевых образцах. "Проблемы прочности". № 8, 1973, с. 120.
  6. Вотинов С.Н. и др. Обзор основных результатов изучения состояния штатных твэлов водо-водяных энергетических реакторов. Препринт НИИАР, П-199, Димитровград, 1973.

Рукопись поступила в ОПИНТИ 20.12.75,  
обработана 23.03.76.  
Окончательно подготовлена авторами  
06.06.77.

Редактор М.К.Белова

Корректор Л.Н.Кривошеева

---

Подписано к печати 15.07.77. Т-12541. Формат 60х90 1/16.  
Бумага писчая № 0. 1,5 п.л. 1,3 уч.-изд.л.  
Тираж 170 экз. Индекс 3624. Заказ 1290. Цена 13 коп.

---

Отпечатано на роталпринте НИИАРа, август 1977 г.  
г. Димитровград



Цена 13 коп.

Индекс 3624

