

сравнительно большом флюенсе нейтронов влияет не только первоначальное состояние поверхности эмиттера, но и изменение этого состояния при воздействии излучения реактора и осколков деления. Кроме того, при переходе к большому флюенсу может меняться характер обнаруженного [6, 8, 9], конгломератного распыления материалов под действием осколков деления и нейтронов энергией 14 МэВ, что должно отразиться на коэффициенте эжекции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конобеевский С. Т. Действие излучения на материалы. М., Атомиздат, 1967.

2. Гольданский В. И. и др. «Изотопы в СССР», 1963, № 12, с. 17.
3. Бессонов В. А. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 1, с. 52.
4. Rogers M., Adam J. «J. Nucl. Mater.», 1962, v. 6, N 2, p. 182.
5. Fleischer R., Price P., Walker R. «Science», 1965, v. 149, N 3862, p. 383.
6. Бессонов В. А. и др. «Атомная энергия», 1976, т. 40, вып. 5, с. 395.
7. Nilsson G. «J. Nucl. Mater.», 1966, v. 20, N 1, p. 215, 231.
8. Kaminski M., Das S. «J. Nucl. Mater.», 1974, v. 53, N 1, p. 162.
9. Biersack J., Fink D., Mertens P. «J. Nucl. Mater.», 1974, v. 53, N 1, p. 194.

Поступила в Редакцию 24.12.76
В окончательной редакции 17.11.78

УДК 669.296 + 621.039.531 + 621.791.72

Влияние облучения на сопротивление разрушению сплава Zr—2,5% Nb

ШАТСКАЯ О. А., РИВКИН Е. Ю., ВАСИЛИН А. М., КЛЮШИН В. В., КОЗЛОВ А. В., НАЛЕСНИК В. М., РОДИН М. Е.

Охрупчивание циркониевых сплавов под действием облучения и наводороживания [1] привлекает особое внимание в связи с тем, что из таких сплавов изготавливают трубы технологических каналов, которые должны обладать необходимым сопротивлением хрупкому разрушению.

Для исследования изменения характеристик прочности циркониевых сплавов в процессе эксплуатации из реактора первого блока Белоярской АЭС после работы в течение 1100 эф. сут был извлечен опытный технологический канал, в состав которого входила труба из сплава Zr—2,5%Nb наружным диаметром 63 мм и толщиной стенки 4 мм. Параметры ее облучения приведены в табл. 1. Образцы для исследований вырезали из участков

с координатами 0,2—0,5 м; 3,2—3,5 м и 6,5—6,8 м по длине извлеченной трубы технологического канала.

Для определения механических свойств кольца шириной 6 мм испытывали при 293 и 573 К. Во всех случаях вязкому разрушению предшествовала значительная деформация и изменение формы образца. Временное сопротивление σ_b определяли по разрушающей нагрузке, предел текучести $\sigma_{0,2}$ и относительное удлинение δ — по диаграмме усилия — перемещение захвата. Согласно данным табл. 2, облучение увеличивает временное сопротивление и предел текучести и снижает относительное удлинение.

Для испытаний на ударную вязкость из трубы технологического канала были вырезаны ориентированные в продольном направлении надрезанные образцы размером $55 \times 10 \times 4$ мм. Надрез глубиной 2 мм и радиусом в вершине $\sim 0,1$ мм располагался по направлению высоты образца (10 мм). Испытания, проводившиеся на маятниковом копре типа КМД-30 в диапазоне температуры 293—573 К, позволили сделать два вывода:

облучение не изменяет ударную вязкость, полученную для материала в исходном состоянии. Это выгодно отличает отожженный сплав Zr—2,5%Nb от подвергнутого тройной обработке (закалка, холодная деформация, отжиг), для которого сдвиг критической температуры хрупкости может достигать 100—150 К при флюенсе $(2-5) \cdot 10^{20}$ нейтр./см²;

ударная вязкость не зависит от флюенса в диапазоне от $3,2 \cdot 10^{19}$ до $4,8 \cdot 10^{21}$ нейтр./см².

Количественная оценка сопротивления хрупкому разрушению может быть проведена в рамках механики разрушения с использованием в каче-

Таблица 1

Основные характеристики условий облучения технологического канала ($E \geq 0,2$ МэВ)

Координаты участков от низа активной зоны, м	Плотность потока, нейтр./см ² ·с	Флюенс, нейтр./см ²	Температура на поверхности, К	
			внутренней	наружной
0—0,45	$1,5 \cdot 10^{13}$	$1,6 \cdot 10^{21}$	579	582
0,45—1,22	$2,3 \cdot 10^{13}$	$2,4 \cdot 10^{21}$	585	589
1,22—1,99	$3,0 \cdot 10^{13}$	$3,0 \cdot 10^{21}$	592	597
1,99—2,74	$3,4 \cdot 10^{13}$	$3,4 \cdot 10^{21}$	595	602
2,74—3,51	$3,7 \cdot 10^{13}$	$3,8 \cdot 10^{21}$	596	605
3,51—4,26	$3,7 \cdot 10^{13}$	$3,8 \cdot 10^{21}$	596	605
4,26—5,06	$3,2 \cdot 10^{13}$	$3,2 \cdot 10^{21}$	596	603
5,06—5,86	$1,8 \cdot 10^{12}$	$1,8 \cdot 10^{21}$	596	601
5,86—6,56	$2,2 \cdot 10^{11}$	$2,3 \cdot 10^{20}$	596	599
6,56—7,11	$2,3 \cdot 10^{10}$	$2,8 \cdot 10^{20}$	596	598

Таблица 2

Механические свойства материала труб

Координата участка трубы, м	Флюенс, нейтр./см ²	Температура при эксплуатации, К	Температура испытаний, К					
			293			573		
			σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
—	Исходное состояние		490	400	20	343	304	19
0,2—0,5	$(1,6-2) \cdot 10^{21}$	579—583	637	540	14	470	432	11
3,2—3,5	$3,8 \cdot 10^{21}$	596—605	608	530	12	460	442	11
6,5—6,8	$(3,2-8,2) \cdot 10^{19}$	596—599	560	440	15	440	382	16

стве критерия критического раскрытия трещины δ_c . Для определения этого показателя из трубы были вырезаны кольцевые и продольные образцы. В них надрезы были ориентированы таким образом, чтобы при испытаниях воспроизводились условия развития трещины вдоль оси трубы и в тангенциальном направлении. Радиус в вершине надреза у всех образцов составлял менее 0,1 мм. В процессе испытаний образцы устанавливали на опоры, и датчиками снимали диаграмму действующее усилие — раскрытие трещины. За критическое раскрытие принималось значение раскрытия трещины в момент достижения максимальной нагрузки. Испытания проводили также в диапазоне 293—573 К. Полученные для продольных образцов зависимости представлены на рис. 1, где для сравнения приведены также данные для сплава Zr — 2,5 Nb, подвергавшегося тройной обработке [2]. Кольцевые образцы испытывали только при температуре 293 К (рис. 2). Из рис. 1 и 2 следует, что облучение заметно уменьшает критическое раскрытие трещины при 293 К. При 573 К облучение до $(1,5-2) \cdot 10^{21}$ нейтр./см² снижает критическое раскрытие трещины существенно меньше, чем при 293 К, однако при возрастании флюенса до $3,8 \cdot 10^{21}$ нейтр./см² это различие почти исчезает. Согласно рис. 2 при 293 К для продольных образцов дальнейшее снижение критического раскрытия трещины не происходит при флюенсе более $(3,2-8,2) \cdot 10^{19}$ нейтр./см², а для кольцевых — более $(1,5-2) \cdot 10^{21}$ нейтр./см². Из этого же рисунка следует, что сопротивление движению трещины в осевом направлении трубы больше, чем в тангенциальном. Такие же данные получены и при испытании исходных образцов [3]. Оказалось, что соотношение между критическим раскрытием трещины для продольных и кольцевых образцов материала в исходном состоянии сохраняется и на горизонтальном участке зависимости этой характеристики от флюенса. После достижения флюенса $1,6 \cdot 10^{19}$ нейтр./см² критическое раскрытие трещины металла шва не отличается от измеренного для того же металла в исходном состоянии

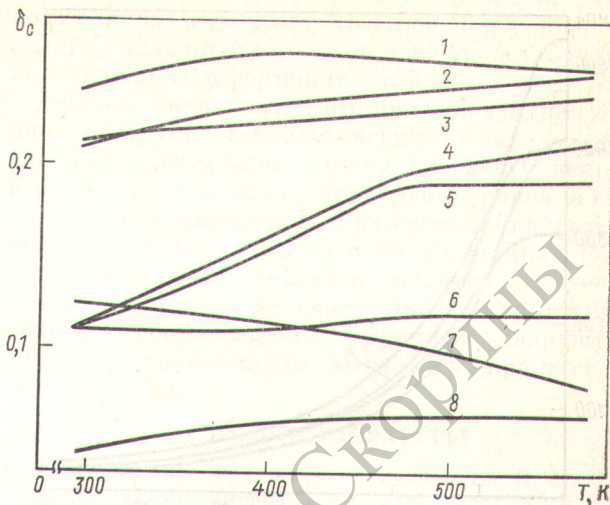


Рис. 1. Зависимость критического раскрытия трещины от температуры:

1, 2 — основной металл без облучения; 3 — металл шва при облучении флюенсом $(1-1,5) \cdot 10^{19}$ нейтр./см²; 4, 5, 6 — основной металл при облучении флюенсом $(3,2-8,2) \cdot 10^{19}$, $(1,6-2) \cdot 10^{21}$ и $3,8 \cdot 10^{21}$ нейтр./см² соответственно; 7, 8 — данные для исходного и облученного состояний [2]

(кривые 2 и 3 на рис. 1). Сравнение полученных данных с результатами исследований Б. Пиклса [2] показывает, что как в исходном состоянии (особенно), так и после облучения отожженного сплава Zr — 2,5%Nb критическое раскрытие трещины выше, чем у сплава, подвергавшегося тройной обработке.

Результаты исследований позволяют оценить сопротивление разрушению труб технологических каналов, т. е. определить соотношения между действующими напряжениями и размером возможных дефектов. Рассмотрим дефекты локальные (поры, включения, короткие трещины) и протяженные (длинные риски, царапины, трещины). Развитие дефектов первого типа может привести

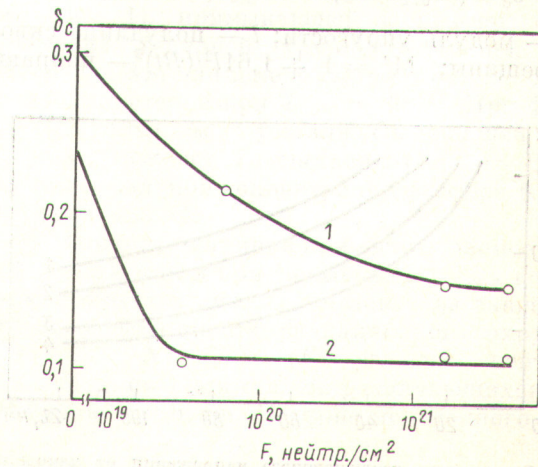


Рис. 2. Зависимость критического раскрытия трещины от флюенса нейтронов на кольцевых (1) и продольных (2) образцах

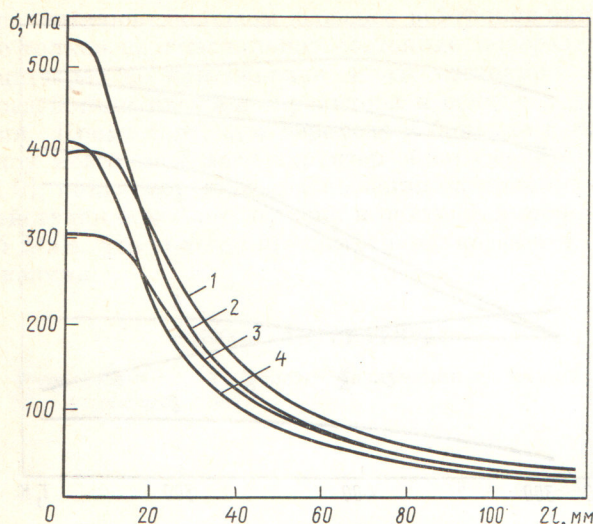


Рис. 3. Зависимость напряжений разрушения от длины продольной сквозной трещины (флюенс $3,8 \cdot 10^{21}$):

1, 2 — без облучения и после облучения образца при 293 К; 3, 4 — то же при 573 К

к образованию в трубе сквозных трещин длиной не более двух толщин стенки трубы, и цель расчета сводится к определению их критической длины, после достижения которой может произойти полное разрушение трубы. В этом случае сопротивление разрушению характеризуется критическим раскрытием трещины, ориентированной в осевом направлении. Развитие дефектов второго типа может происходить по всей длине трещины в радиальном направлении. В этом случае цель расчета сводится к определению критической глубины поверхностного дефекта, по достижении которой может произойти полное разрушение трубы.

Для расчета труб из циркониевых сплавов со сквозными дефектами может быть использована формула [4]:

$$\delta_c = (8\sigma_{0,2} l / E\pi) M^2 \ln \sec(\pi\sigma / 2\sigma_{0,2}),$$

где E — модуль упругости; l — полудлина сквозной трещины; $M^2 = 1 + 1,61l^2 / (Rt)$ — поправка

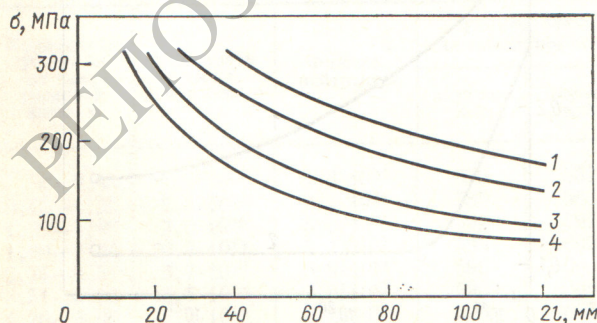


Рис. 4. Зависимость разрушающего напряжения от длины продольных поверхностных трещин при 573 К (флюенс $3,8 \cdot 10^{21}$):

1, 2 — без облучения и после облучения при глубине трещины 2 мм; 3, 4 — то же при глубине трещины 3 мм

на кривизну трубы; R , t — средний радиус и толщина стенки трубы; σ — кольцевое напряжение в трубе. Расчет проводили для труб в исходном и облученном (флюенс $3,8 \cdot 10^{21}$ нейтр./см²) состояниях при 293 и 573 К. Значения δ_c принимали по результатам испытаний кольцевых образцов в соответствии с рис. 2, $\sigma_{0,2}$ — по данным табл. 2. Как следует из рис. 3, при малой длине трещины облучение увеличивает значения разрушающего напряжения (вследствие повышения предела текучести под облучением), при большой длине трещин несколько его снижает. При рабочем уровне напряжений в трубе технологического канала 100 МПа наименьшая критическая длина трещины определяется по кривой 4 на рис. 3, соответствующей облученному материалу при 573 К. Эта длина составляет 43 мм, что существенно превышает максимально возможную длину сквозного дефекта (развивающегося из локального дефекта), равную двум толщинам стенки (для данных труб 8 мм). Это означает, что развитие локальных дефектов может привести лишь к образованию течи, но не к полному разрушению технологического канала.

Для расчета труб с поверхностными дефектами была применена предложенная [5] формула

$$\delta_c = (\sigma^2 \pi b / E \sigma_{0,2}) (C_t C_c / Q)^2,$$

где δ_c — раскрытие трещины при радиальном распространении трещины; b — глубина трещины;

$$Q^2 = \Phi^2 - 0,212 (\sigma / \sigma_{0,2})^2; C_t = \frac{1 + 0,122(1 - b/2l)^2}{\{1 - (b/t)^2\}^{1/2}}; C_c =$$

$$= (A_m - 1) b/t + 1; A_m = 0,481 \lambda + 0,614 +$$

$$+ 0,386 e^{-1,25\lambda}; \lambda = \{12(1 - \nu^2)\}^{1/4} (l / \sqrt{Rt}); \Phi =$$

$$= \int_0^{\pi/2} (1 - \frac{l^2 - b^2}{l^2} \sin^2 \theta)^{1/2} d\theta.$$

При расчете труб с поверхностными дефектами следует пользоваться значениями критического раскрытия трещины, определяемыми при испытаниях образцов с трещиной, ориентированной по толщине стенки трубы. Такие опыты с облученными образцами не проводили. Однако было установлено, что соотношение между критическим раскрытием трещины для продольных и кольцевых образцов сохраняется неизменным как до, так и после облучения. Поэтому было сделано предположение, что такая же неизменность соотношения сохраняется и для образцов с ориентировками трещины в осевом и радиальном направлениях. Это соотношение для образцов в исходном состоянии составляет 3,3 [4], в связи с чем при расчетах труб с поверхностными дефектами использовали значения из рис. 2, уменьшенные в 3,3 раза. Результаты расчета, приведенные на рис. 4, свидетельствуют, что разрушение трубы технологического канала при рабочем напряжении 100 МПа может произойти лишь в случае, если глубина длинного поверхностного дефекта будет превышать

3 мм при длине 80 мм. Возникновение таких дефектов в трубах в процессе эксплуатации технологического канала маловероятно, поскольку отсутствуют причины, которые могли бы вызвать их появление и развитие.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

Под влиянием облучения (флюенс нейтронов более $1,5 \cdot 10^{21}$ нейтр./см²) временное сопротивление и предел текучести циркониевых труб технологических каналов увеличиваются на 25—40%, относительное удлинение уменьшается на 30—40%, при этом относительное удлинение остается достаточно высоким (более 11%). Не выявлено влияния облучения (флюенсом до $3,8 \cdot 10^{21}$ нейтр./см²) на ударную вязкость сплава Zr — 2,5% Nb. Облучение флюенсом $3,8 \cdot 10^{21}$ нейтр./см² более чем в 2 раза уменьшает критическое раскрытие трещины для сплава Zr — 2,5% Nb во всем исследованном интервале температуры от 293 до 573 К по сравнению с измеренными в исходном состоянии. При флюенсе до $(1,5 - 2) \cdot 10^{21}$ нейтр./см² такое уменьшение наблюдается только при 293 К, при 573 К критическое раскрытие трещины уменьшается всего на 30%. Сопротивление разрушению отожжен-

ного сплава Zr — 2,5% Nb выше, чем у подобного сплава, подвергнутого тройной обработке (закалка, холодная деформация, отжиг).

Расчеты показывают, что при рабочем напряжении в трубе технологического канала около 100 МПа критическая длина сквозного надреза, расположенного вдоль оси трубы, равна 43 мм, критические размеры поверхностного надреза составляют 3 мм (глубина) и 80 мм (длина). Существование таких дефектов практически невозможно, что позволяет считать обеспеченным необходимое сопротивление хрупкому разрушению труб технологического канала в процессе их эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ривкин Е. Ю., Родченков Б. С., Филатов В. М. Прочность сплавов циркония. М., Атомиздат, 1974.
2. Pickles В. «Canad. Metallurg. Quart.», 1972, v. 11, N 1, p. 139.
3. Ривкин Е. Ю., Васнин А. М., Можаров В. Е. «Физ.-хим. механика материалов», 1976, № 6, с. 12.
4. Васнин А. М., Гольцев В. Ю., Марков В. М., Ривкин Е. Ю. «Проблемы прочности», 1974, № 12, с. 111.
5. Erdogan F., Ratwani M. «Nucl. Eng. and Design», 1974, v. 27, p. 14.

Поступила в Редакцию 17.07.78

УДК 621.039.531

О роли примесей в радиационном охрупчивании низколегированной стали

НИКОЛАЕВ В. А., РЫБИН В. В., БАДАНИН В. И.

Как известно, примесные элементы (P, Sb, Sn) усиливают радиационное охрупчивание конструкционной стали и бинарных сплавов железа [1—6]. При температуре облучения 300—350 °С их влияние связывается с зернограничной сегрегацией в результате радиационно-стимулированной диффузии. Представляло интерес изучить радиационное охрупчивание стали, загрязненной примесями, при возможно более низкой температуре облучения, когда процессы миграции вакансий существенно заторможены. В настоящей статье приведены результаты исследования, выполненного на улучшаемой феррито-перлитной стали типа 15X2МФА и 15X2НМФА с дозированными добавками фосфора, сурьмы и олова. Детали приготовления материалов, методика их облучения и испытания описаны ранее [5, 6].

Результаты экспериментов. На рис. 1 показаны механические свойства стали 15X2НМФА в исходном состоянии и после облучения.

Переходная температура хрупкости T_K необлученной стали при изменении содержания фосфора в пределах 0,005—0,036% меняется слабо, увеличиваясь всего на 30 °С (см. рис. 1). Концентра-

ционная зависимость T_K гораздо отчетливее проявляется после облучения в результате усиления радиационного охрупчивания с повышением содержания фосфора. Подобный эффект хорошо известен для температуры облучения $T_{обл} \approx 300$ °С (см. рис. 1), примыкающей к нижней границе интервала тепловой хрупкости сталей. Более интересно, что влияние фосфора столь же отчетливо проявляется и при $T_{обл} = 80$ °С. При флюенсе $3,5 \cdot 10^{19}$ нейтр./см²* у стали, содержащей 0,005% фосфора, прирост T_K составляет $\Delta T_K = 60$ °С, а при максимальной концентрации фосфора (0,036%) он равен 130 °С.

Значительное влияние примесных элементов как при низкой, так и при повышенной $T_{обл}$ наглядно иллюстрирует и рис. 2, где показана зависимость от $T_{обл}$ коэффициента радиационного охрупчивания $A = \Delta T_K / F^{1/3}$ (F — флюенс нейтронов, 10^{18} нейтр./см²) для сталей, различающихся по содержанию P, Sb, Sn. На фоне монотонного сниже-

* Здесь и далее флюенс нейтронов с энергией более 0,5 МэВ.