

ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ И ПОЛЗУЧЕСТИ СВЧ - ТЕРМООБРАБОТАННЫХ СПЛАВОВ Zr-Nb

А.И. Стукалов

(НТК «ЯТЦ» ННЦ ХФТИ, г. Харьков, Украина)

Изучены кратковременные механические свойства облученных при температуре 350°C в реакторе БОР - 60 кольцевых образцов $\varnothing 13,8 \times 0,65 \times 3,0$ мм сплава Zr-2,5%Nb в состоянии отжига и СВЧ - термообработки, а также ползучесть труб из этого сплава в поперечном направлении при температуре 350°C и ударная вязкость (по Шарпи). Флюенс нейтронов во всех случаях был $\sim 1 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-2}$ ($E \leq 0,1 \text{ МэВ}$). Показано практически полное отсутствие радиационного упрочнения СВЧ-термообработанного сплава по сравнению с исходным состоянием, уменьшение деформации за счет радиационной ползучести в 8 раз и увеличение ударной вязкости в 2...3 раза. Наблюдаемые эффекты снижения радиационной ползучести, радиационного упрочнения и повышения ударной вязкости могут быть объяснены усилением рекомбинации радиационных точечных дефектов на особенностях субструктуры, созданных СВЧ - термообработкой сплава.

ВВЕДЕНИЕ

Широко известно упрочнение циркония и его сплавов под действием облучения. Наиболее полно эффект радиационного упрочнения изучен на цирконии и его сплавах с оловом (циркалой - 2, циркалой - 4) и с ниобием (Zr-1%Nb, Zr-2,5%Nb). Показано, что упрочнение достигает насыщения при флюенсах $\sim 10^{20} \text{ см}^{-2}$, степень упрочнения определяется составом сплава и его предварительной термомеханической обработкой [1]. Так, губчатый цирконий упрочняется на 90%, циркалой - 2 на 50% и циркалой - 4 - на 25%. По данным [2] увеличение характеристик прочности канальных труб из сплава Zr-2,5%Nb в результате облучения достигает насыщения после интегрального флюенса нейтронов $1 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-2}$ и составляет 40...60%. Изменение пластичности имеет обратный знак, но характер зависимости от флюенса практически такой же. Максимальное изменение относительного удлинения достигает 90%. Упрочнение канадских канальных труб достигает насыщения также при флюенсе $1 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-2}$ и составляет $\sim 33\%$ [3]. Закалка из β - фазы, как отмечается в [1], усугубляет процесс упрочнения и охрупчивания. Так, образцы сплава Zr-2,5%Nb, закаленные из β - фазы и подвергнутые последующему старению при 500°C 24 ч почти полностью охрупчиваются; сужение при комнатной температуре было очень мало.

Согласно данным, приведенным в [5, 7],

упрочнение сплава Zr-1%Nb под облучением составляет 55%, а сплава Zr-1%Nb-0,5%Fe-1,25%Sn (сплав 635) - 70%, охрупчивание сплава Zr-1%Nb на уровне 220%, а на сплаве 635 лежит в пределах 220...400 % в зависимости от условий изготовления и термообработки.

В ННЦ ХФТИ разработан метод скоростной высокочастотной β - термообработки изделий из сплавов Zr-1%Nb и Zr-2,5%Nb и в НИИАР проведен обширный комплекс механических испытаний штатных и СВЧ - термообработанных изделий из этих сплавов [4,5]. Представляет большой интерес провести анализ результатов испытаний с точки зрения современных представлений о роли структурных особенностей сплавов в исходном и СВЧ - термообработанном состояниях в процессе взаимодействия радиационных точечных дефектов с особенностями структуры.

1. МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1.1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ОБРАЗЦЫ

Для проведения экспериментов были использованы образцы следующих типов (табл.1):

- трубчатые образцы для изучения ползучести с поперечным сечением $\varnothing 9,15 \times 0,7$ мм; $\varnothing 15 \times 1,25$ мм и $\varnothing 13,8 \times 0,65$ мм, нагруженные внутренним давлением аргона и загерметич-

зированные с помощью аргонодуговой сварки в камере под давлением;

- отрезки труб $\varnothing 15 \times 1,25$ мм и $\varnothing 9,15 \times 0,7$ мм для изучения радиационного роста;

- кольцевые образцы $\varnothing 15 \times 1,25 \times 3,0$ мм и $\varnothing 13,8 \times 0,65 \times 3,0$ мм для изучения кратковременных механических свойств в поперечном направлении;

- цилиндрические (малые гагаринские) разрывные образцы с длиной рабочей части 15 мм и $\varnothing 3,0$ мм для определения кратковременных механических свойств;

- стержни $\varnothing 6$ мм длиной 80 мм, вырезанные из труб $\varnothing 88 \times 4$ мм в продольном и поперечном (разогнутые разрезные кольца) направлениях для изучения радиационного роста;

- ударные образцы размером $4 \times 8 \times 55$ мм с надрезом двух типов: Шарпи (с V-образным надрезом глубиной 2 мм) и Изода (с «U» - образным надрезом глубиной 3 мм), - вырезанные из канальных труб в продольном направлении.

В качестве материала для изготовления образцов использовали:

- канальные трубы $\varnothing 88 \times 4$ мм из сплава Zr-2,5%Nb, отожженные по штатному режиму 550°C , 5 ч и режиму СВЧ - обработки с различным отпуском (см. табл.1);

- каркасные трубы $\varnothing 15 \times 1,25$ мм из сплава Zr-2,5%Nb, термообработанные по штатному, СВЧ - режимам с последующим отпуском;

- твэльные трубы $\varnothing 9,15 \times 0,7$ мм из сплава Zr-1%Nb, термообработанные по режимам отжига (580°C , 3 ч) и СВЧ - обработки с последующим отпуском;

- прутки $\varnothing 6$ мм из сплава Zr-1%Nb в состоянии поставки (отжиг 580°C , 3 ч) и СВЧ - обработки с последующим отпуском.

1.2. УСЛОВИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Для проведения облучения образцы размещали на различных уровнях (этажах) в разборном облучательном устройстве, конструкция которого позволяет периодически (во время остановов реактора) извлекать образцы для исследований в защитной камере, а затем вновь возвращать их в реактор

для дальнейшего облучения. Необходимый температурный режим образцов $350 \pm 20^\circ\text{C}$ поддерживали обеспечением оптимального соотношения между температурой теплоносителя (натрия) на входе в активную зону реактора БОР - 60 и уровнем его подогрева, определяемым расходом теплоносителя через сборку с образцами и величиной радиационного энерговыделения образцов, зависящей от мощности реактора и расположения образцов по высоте активной зоны.

Часть образцов из сплавов и в отожженном состоянии и термообработанных по режиму СВЧ с последующим отпуском 500°C , 24 ч была испытана на протяжении продолжительного времени в периферийных ячейках реактора БОР - 60 с проведением промежуточных измерений. Для оптимизации режимов СВЧ - обработки труб циркониевых сплавов были отобраны новые партии образцов с различными режимами отпуска после СВЧ - обработки (см. табл.1), радиационные испытания которых проведены в течение одного этапа облучения.

Конкретные значения параметров облучения образцов указаны для удобства в разделах результатов исследований. Следует отметить, что отличающиеся значения флюенса быстрых (здесь и далее $E \geq 0,1$ МэВ) нейтронов в изохронных экспериментах получены для образцов, расположенных на различных этажах облучательного устройства, исходя из косинусоидального распределения плотности нейтронного потока относительно уровня центра активной зоны реактора БОР - 60.

Проведены также низкотемпературные ($< 80^\circ\text{C}$) испытания СВЧ - обработанных сплавов циркония в реакторе СМ - 2. Центральный канал реактора СМ - 2, изготовленный из СВЧ - обработанного с последующим отпуском 500°C , 24 ч сплава Zr-2,5%Nb, проработал в течение ~ 5 лет. Флюенс быстрых нейтронов в центральной части канала за этот период достиг $\sim 10^{23}$ см⁻². Температура облучения составляла $\sim 80^\circ\text{C}$.

В облучательном устройстве с перфорированными стенками для протока дистиллированной воды [3] на двух уровнях были раз-

мещены отрезки трубок для изучения их радиационного роста. Устройство устанавливалось в ячейку ДЭК - 3 реактора СМ - 2 и выдерживалось в реакторе в течение 46,63

эфф. суток. Температура облучения образцов составляла 50...60°C, а флюенс быстрых нейтронов - $6,9 \cdot 10^{20}$ и $7,2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$.

Таблица 1.

Исходные характеристики образцов для проведения радиационных экспериментов

Материал заготовки	Режим термообработки	Тип образцов	Основные размеры, мм	Давление аргона, атм	Индексы роста		
					G _L	G _T	G _R
1	2	3	4	5	6	7	8
Zr - 2,5%Nb	Отжиг 550°C, 5 ч	Трубки под давлением	Ø13,8×0,65	60			
		Отрезки труб	Ø15×1,25×80	-			
		Стержни	Ø6×80	-	0,90	0,43	0**
		Ударные (Шарпи)	Ø6×4	-	-	-	-
		Ударные (Изода)	Ø5×4	-			
		Кольца	Ø15×1,25×3,0; Ø13,8×0,65×3,0	- -			
	СВЧ	Ударные Шарпи	Ø6×4	-			
	СВЧ + 560°C, 75 ч	Ударные Шарпи	Ø6×4	-			
	СВЧ + 560°C, 100 ч	Ударные Шарпи	Ø6×4	-			
	СВЧ + 540°C, 100 ч	Трубки под давлением	Ø13,8×0,65	90			
		Отрезки труб	Ø15×1,25	-			
		Ударные (Изода)	Ø5×4				
		Кольца	Ø15×1,25×3,0; Ø13,8×0,65×3,0	- -			
	СВЧ + 580°C, 24 ч	Трубки под давлением	Ø13,8×0,65	60			
		Отрезки труб	Ø15×1,25	-			
		Ударные (Изода)	Ø5×4	-			
		Кольца	Ø15×1,25×3,0; Ø13,8×0,65×3,0	- -	-	-	-
	СВЧ (900°C) +500°C, 24 ч	Стержни	Ø6×80	-	0,05	0,09	0**
	СВЧ	Стержни	Ø6×80	-	0,32	0,03	0**

	(950°C) +500°C, 24 ч						
Zr - 1%Nb	Отжиг 580°C, 3 ч	Трубки под давлением	Ø9,15×0,7	$\frac{87}{100}$	0,69	-0,20	-0,49
		Цилинд- рические разрыв- ные	Ø3×15	-5	-6	-7	-8
		Отрезки труб	Ø9,15×0,7×80	-	0,69	-0,20	-0,49
	СВЧ + 500°C, 24 ч	Трубки под давлением	Ø9,1×0,7	$\frac{85}{115}$	-0,05	-0,09	0,14
		Отрезки труб	Ø9,1×0,7	-	-0,05	-0,09	0,14
	СВЧ + 550°C, 10 ч	Цилинд- рические разрыв- ные	Ø3×15	-	-	-	-
	СВЧ + 550°C, 100 ч	Отрезки труб	Ø9,1×0,7×80	-	-	-	-

1.3. МЕТОДИКИ ПОСЛЕРЕАКТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для определения ползучести трубчатых образцов, нагруженных внутренним газовым давлением, в защитной камере после каждого этапа облучения проводили измерения с помощью микрометра их диаметров в двух взаимно-перпендикулярных направлениях, результаты которых сопоставляли с данными измерений до облучения.

Деформацию радиационного роста труб в продольном направлении определяли измерениями изменений длины отрезков труб и стержней по отношению к эталонным образцам с помощью устройства, содержащего индикатор часового типа с ценой деления шкалы 0,002 мм [4].

Испытания кольцевых образцов на разрыв при растяжении проводили на дистанционной разрывной метрологически аттестованной машине 1391 - У/1. Использовали опоры в захватах машины диаметром 8 мм. При этом расчетная длина рабочей части для колец Ø15×1,25 мм составляла 10,9 мм, а для колец Ø13,8×0,65 мм - 10 мм. Скорость движения активного захвата поддерживали на уровне 1 мм/мин.

Цилиндрические (малые гагаринские) образцы испытывали на разрыв в машине ММ - 150Д со скоростью движения активного захвата также 1 мм/мин.

Ударную вязкость образцов определяли с помощью испытаний их на дистанционном копре КМД - 30 молотом массой 30 кг. Испытания проводили при комнатной и повышенных температурах.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Из рис.1 следует, что упрочнение $\Delta\sigma_{0,2}$ образцов сплава Zr-2,5%Nb, вырезанных из канальной трубы штатного производства, составило ~ 33%, что сравнимо с этой величиной для штатных труб, приведенной в [2,3]. Пластичность уменьшилась на 40%, что меньше этой величины, приведенной в [2] (~90 %), и это возможно, обусловлено отсутствием в наших экспериментах наводораживания в отличие от экспериментов, описанных в [2], где охрупчивание является результатом совместного действия облучения и наводораживания.

Прочностные характеристики облученного СВЧ - обработанного сплава практически не отличаются от этих характеристик для облученного сплава с исходной обработкой,

а так как СВЧ - обработка приводит к увеличению прочности в исходном состоянии, то радиационного упрочнения СВЧ - обработанного сплава практически не наблюдается.

Пластичность уменьшилась на ~ 70% и составляет 7,5%, что вдвое меньше этой величины для штатной продукции.

В СВЧ - обработанном сплаве Zr-1%Nb облучение приводит к значительному упрочнению ($\Delta\sigma_{0,2}$ - 250%) и весьма малому охрупчиванию (30 %, рис.2, 3).

В таблице 2 приведены значения деформации и скоростей радиационной ползуче-

сти штатных и СВЧ - обработанных образцов каркасных труб из сплава Zr-2,5%Nb. Видно, что радиационная деформация СВЧ - обработанных труб в 80...10 раз меньше этой величины для труб штатного исполнения, а скорость ползучести (в предположении линейного возрастания деформации) практически на порядок ниже, чем у труб штатного производства и составляет $(1,3...4,8) \cdot 10^{-4}$ %/ч (для труб штатного производства эта величина составила $2,8 \cdot 10^{-3}$ %/ч).

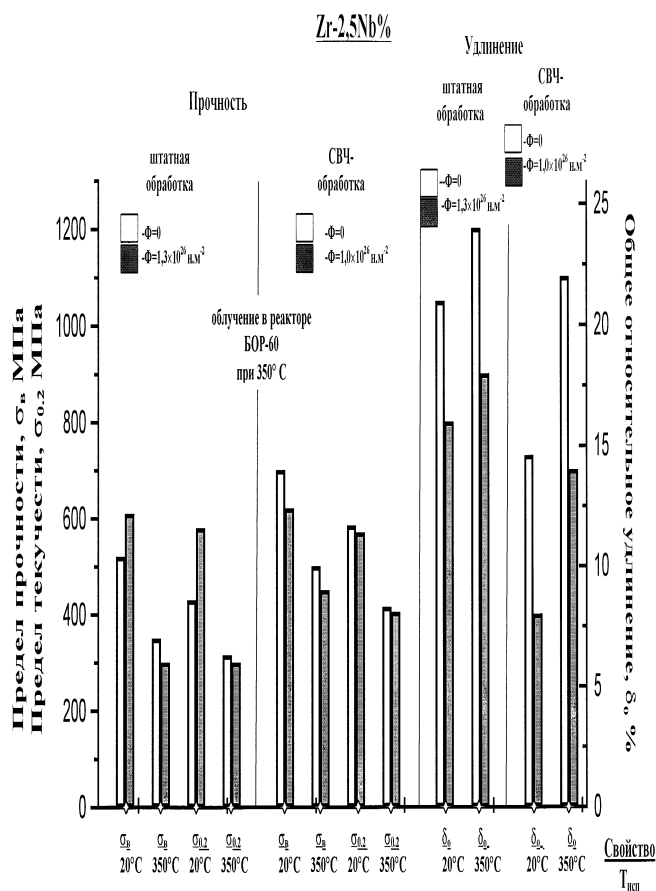


Рис.1. Прочностные и пластические характеристики кольцевых образцов каркасной трубы $\varnothing 15 \times 1,25 \times 3$ мм из сплава Zr-2,5%Nb в исходном и СВЧ - обработанном состояниях до и после облучения в реакторе БОР - 60 при 350 °С

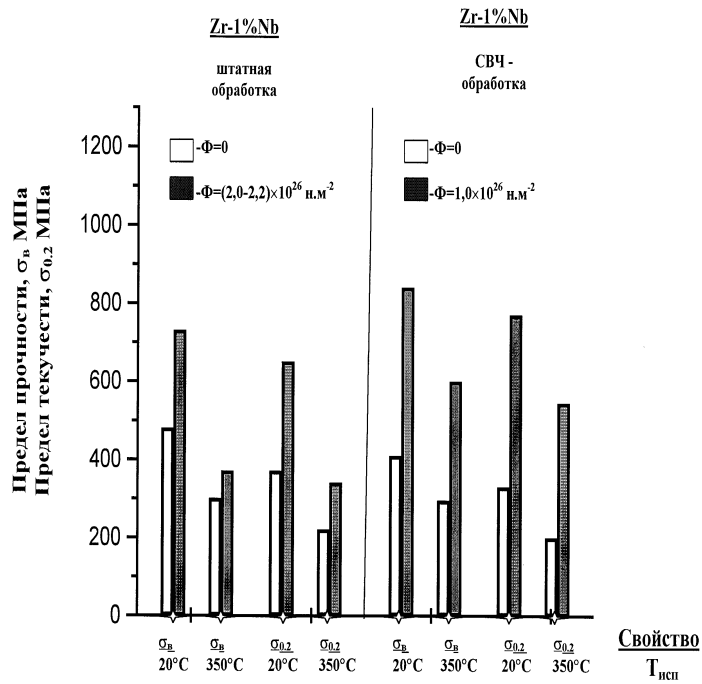


Рис.2. Прочностные характеристики стержневых образцов из сплава Zr-2,5%Nb в исходном и СВЧ – обработанном состояниях до и после облучения в БОР - 60 при 350 °С

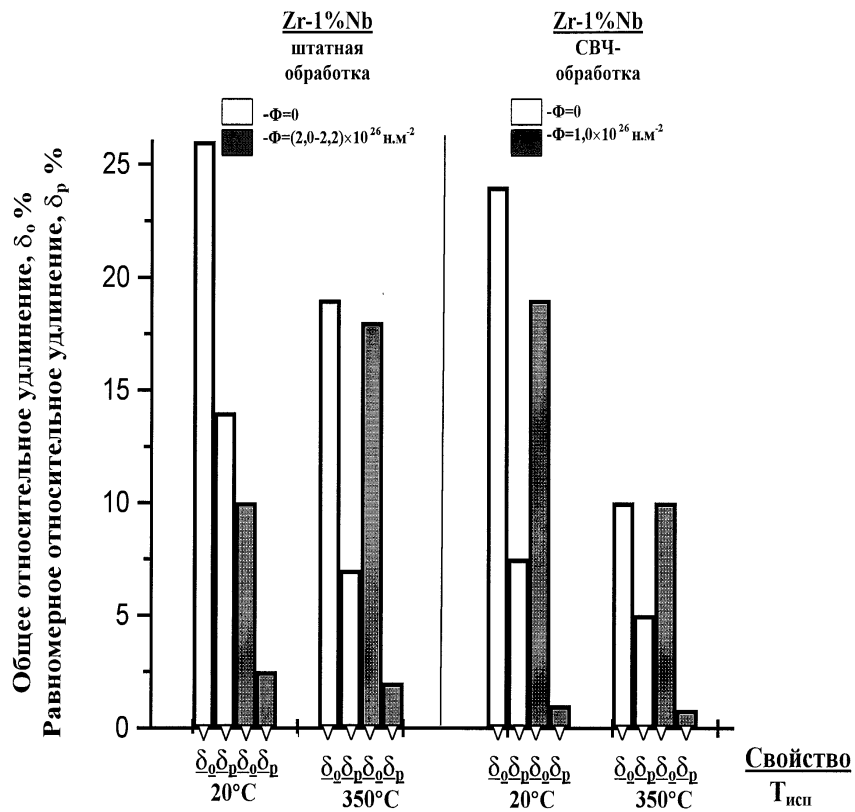


Рис.3. Кратковременные механические свойства до и после облучения в реакторе БОР - 60 при температуре 350 °С цилиндрических образцов из исходного и СВЧ - обработанного сплава Zr-1%Nb

Таблица 2.
Деформация ползучести труб из сплава Zr-2,5%Nb в исходном и СВЧ - термообработанном состоянии после облучения при 350 °С в течение 3736 ч

Термообработка	$\Phi \times 10^{-26}$, н/м ²	σ_{θ} , МПа	ϵ , %
отжиг	1,2	130	7,9
550 °С, 5 ч	1,2	130	10,5
СВЧ + 540 °С, 100 ч	0,68	190	1,2
	1,2	190	1,8
СВЧ + 580 °С, 24 ч	0,68	130	0,5
	1,2	130	1,5

Для твэльных труб из сплава Zr-1%Nb штатного производства деформация, вызванная радиационной ползучестью, существенно не отличается от этой величины, наблюдаемой в СВЧ - обработанных образцах (рис.4).

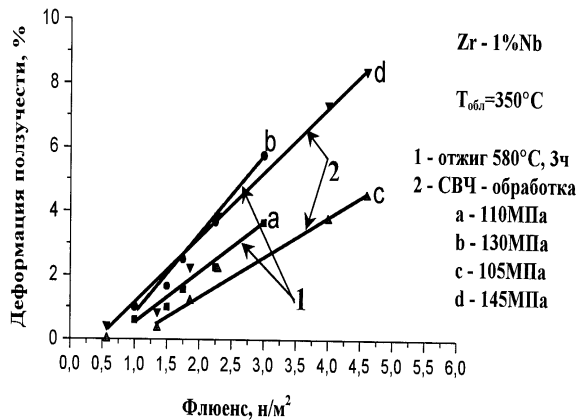


Рис.4. Зависимость деформации ползучести труб из сплава Zr-1%Nb в поперечном направлении в исходном и СВЧ - термообработанном состоянии от флюенса быстрых нейтронов

На рис.5 приведены значения температурной зависимости ударной вязкости (по Изоду) облученных до флюенсов $(0,8...1,1) \cdot 10^{26}$ м⁻² при $T_{\text{обл}} = 350^{\circ}\text{C}$ образцов сплава Zr-2,5%Nb термообработанных по режимам отжига 550 °С, 5 ч (), СВЧ + 540 °С, 100 ч () и СВЧ + 580 °С, 24 ч (Δ). Испытания облученных материалов показали, что с учетом раз-

броса данных при низких температурах 20 и 100 °С ударная вязкость отожженных образцов типа Изода не отличается от соответствующих значений для отожженных образцов типа Шарпи, приведенных в работе [4].

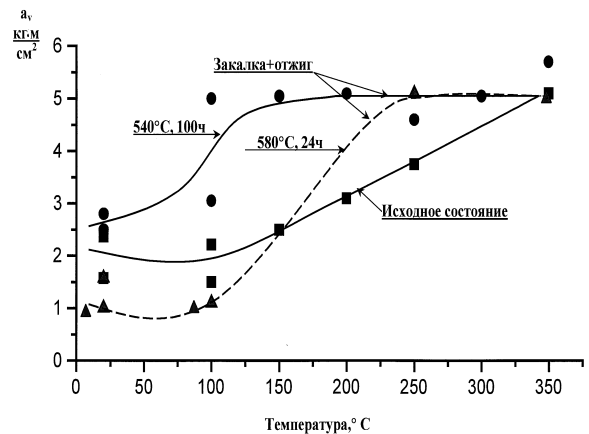


Рис.5. Ударная вязкость исходного и СВЧ - термообработанного сплава Zr-2,5%Nb после облучения

Из рис.5 видно, что ударная вязкость облученных СВЧ - обработанных образцов существенно зависит от режимов отпуска и может быть больше или меньше этой величины для сплава в исходном состоянии. Обращает на себя внимание смещение температуры, при которой происходит восстановление исходной ударной вязкости, на 200 °С в сторону низких температур для сплава, отожженного после СВЧ - обработки в течение 100 ч при 540 °С и на 100 °С для металла отожженного в течение 24 ч при 580 °С.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Итак, СВЧ - обработанный сплав Zr-2,5%Nb практически не упрочняется под облучением; при этом пластичность его уменьшается на 70%. Скорость радиационной ползучести сплава практически на порядок ниже, чем у сплава в исходном состоянии и составляет $(3,2...4,8) \cdot 10^{-4}$ %/ч.

Воздействие облучения на сплав Zr-1%Nb в СВЧ - обработанном состоянии приводит к диаметрально противоположному результату

- сплав упрочняется в 2,5 раза по сравнению с этой величиной для необлученного состояния; пластичность при этом уменьшается всего на 30%, скорость ползучести практически такая же, как у сплава в исходном состоянии.

Приведенные результаты не позволяют в полной мере составить мнение о механизмах упрочнения и охрупчивания сплавов под действием облучения, тем более при отсутствии данных о микроструктурном состоянии исследуемых материалов после облучения. Поэтому здесь мы ограничимся качественными представлениями с учетом данных микроструктурных исследований сплавов до облучения.

Отсутствие упрочнения и одновременное возрастание хрупкости СВЧ - обработанного сплава Zr-2,5%Nb можно было бы объяснить по аналогии с подобным явлением в некоторых марках сталей (например, стали типа 15X2МФА) [6]. Приведенные в этой монографии данные свидетельствуют о том, что радиационное охрупчивание может быть обусловлено не только стопорными и барьерными механизмами радиационного упрочнения, но и другими эффектами. Так, например, атомы некоторых примесных элементов могут уменьшать величину поверхностной энергии границ раздела, ослаблять межзеренную когезию и тем самым не изме-

нять или снижать величину предела текучести, облегчать зарождение или распространение трещин, повышать критическую температуру хрупкого разрушения.

Отсутствие же упрочнения можно было бы объяснить рекомбинацией радиационных точечных дефектов на особенностях микроструктуры созданных СВЧ - термообработкой, а именно: высокой плотностью когерентно связанных с матрицей выделений второй фазы, большим количеством двойников превращения, а также усилением рекомбинации при распаде твердых растворов (табл.3).

Этим же явлением усиления рекомбинации точечных дефектов можно было бы объяснить значительное (на порядок) уменьшение скорости радиационной ползучести СВЧ - обработанного сплава Zr-2,5%Nb. Следует отметить, что в аналогичных условиях облучения СВЧ - обработанный сплав Zr-1%Nb "ползет" практически с такой же скоростью, как и сплав с исходной обработкой. Микроструктура этого сплава в исходном состоянии существенно отличается от микроструктуры сплава Zr-2,5%Nb, во-первых, отсутствием двойников превращения, во-вторых, меньшим на 2 порядка количеством вторичных фаз (рис.6), и, в-третьих, большим размером зерен – 150...200 мкм, что, возможно, и обуславливает высокий -

Таблица 3.
Основные механизмы рекомбинации точечных дефектов

Механизм	Сущность
1. Рекомбинация на когерентных выделениях (Бакай А.С., Туркин А.А. [8])	При достаточно большой объемной доли когерентных выделений и более высокой скорости рекомбинации в них точечных дефектов, чем в матрице, можно предполагать заметный вклад этого механизма в уменьшение концентрации точечных дефектов.
2. Центры рекомбинации переменной полярности (в частности, на двойниках) (Бакай А.С., Зеленский В.Ф., Нелюдов И.М. [9,10])	Стоками для точечных дефектов являются границы двойников. Смещенные атомы охотно мигрируют к двойникуюющей дислокации как в более разреженное место и создают сжимающие напряжения в ядре дислокации. Релаксация этих напряжений обеспечивается притоком вакансий, после чего вновь меняется знак напряжений и т. д.
3. Принудительная рекомбинация (Паршин А.М. [11])	Экспериментально установлено неизвестное ранее явление усиления рекомбинации разноименных радиационных дефектов в упруго искаженных областях твердорастворных сплавов, возникающих при развитом непрерывном, однородном распаде с сильно выраженным инкубационным периодом и значительной объемной дилатацией на границе раздела формирующаяся вторичная фаза – матрица выраженным.

уровень пластичности после облучения (~20%, см. рис 5) по сравнению с этой величиной для исходного мелкозернистого материала (~ 10 мкм) равного 10%.

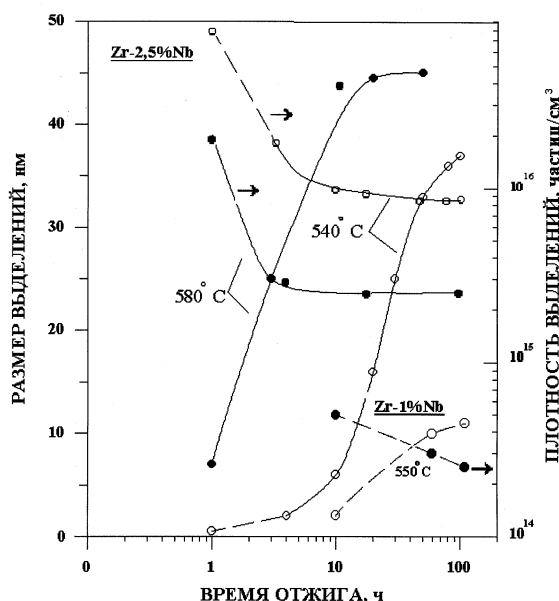


Рис.6. Изменение размера и плотности выделений в СВЧ - обработанном сплаве

По-видимому, восстановление исходного значения ударной вязкости сплава циркония с отжигом можно объяснить по аналогии с подобным явлением, наблюдаемым на сталях - т.е. отжигом радиационных дефектов, причем в СВЧ - обработанных сплавах этот процесс идет намного быстрее, вероятно, потому, что в этом материале исходная плотность дефектов ниже, чем в сплаве, приготовленном по штатной технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дуглас Д.. Металловедение циркония. М.: Атомиздат, 1975.
2. Родченков Б.С., Ривкин Е.Ю., Васнин А.М., Платонов П.А., Синельников Л.П. Прочность труб технологических каналов // ВАНТ. Сер.: Материаловедение и новые материалы. 1990. Вып. 2(36). С.14-21.
3. Hosbons R.R., Daries P.H., Griffiths M., Sagat S., Coleman C.E. Effect of long term irradiation on the fracture properties of Zr - 2,5% Nb pressure tubes // 12 In-

ternational Symposium on Zr in the Nuclear Industry, Toronto, 1998.

4. Зеленский В.Ф., Стукалов А.И., Неклюдов И.М. и др. Скоростная высокочастотная термообработка и радиационный рост циркониевых сплавов // Труды Международной конференции по радиационному материаловедению. Алушта, 22-25 мая 1990 г. Т.4. Харьков: ХФТИ, 1990. С.55-64.
5. Зеленский В.Ф., Стукалов А.И., Неклюдов И.М. и др. Воздействие облучения на деформацию и механические свойства СВЧ-обработанных циркониевых сплавов // ВАНТ. Сер.: ФРП и РМ. 1996. Вып.1(64). С.39-50.
6. Паршин А.М., Неклюдов И.М., Камыманченко Н.В. и др. Физика радиационных явлений и радиационное материаловедение. Москва, С. Петербург, Белгород, 1998.
7. Кобылянский Г.П., Новоселов А.Е.. Радиационная стойкость циркония и сплавов на его основе. Справочное издание по реакторному материаловедению. Димитровград, 1996.
8. Бакай А.С., Туркин А.А. О влиянии выделений вторых фаз на порообразование в сплавах под облучением // Препринт ХФТИ 92-44. Харьков: ХФТИ, 1992. 22с.
9. Бакай А.С., Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М. Центры рекомбинации точечных дефектов переменной полярности // ЖТФ. 1987. Т.57. №12. С.2371-2374.
10. Гиндин И.А., Неклюдов И.М., Чиркина Л.И., Оковит В.С. Взаимодействие радиационных дефектов с дефектами исходной структуры металлов и радиационно-механическое упрочнение // Труды конференции по реакторному материаловедению. Алушта, 29 мая-1июня 1978. Т.3. М.: ЦНИИИАтоминформ, 1978. С.111-127.
11. Паршин А.М., Неклюдов И.М., Горынин И.В. Структура и радиационная повреждаемость конструкционных материалов. Ч.3. М.: Металлургия, 1996.