

ВЛИЯНИЕ КИСЛОРОДА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦИРКОНИЯ

Т.П. Черняева, А.И. Стукалов, В.М. Грицина

Научно-технический комплекс «Ядерный топливный цикл», Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт, г. Харьков, Украина, e-mail: chernyaeva@kipt.kharkov.ua; fax: (0572)-35-27-54, телефон (0572)-35-60-26

Систематизовані дані про вплив кисню на механічні характеристики цирконію: границя міцності, границя плинності, відносне подовження, модуль Юнга, в'язкість і тріщиностійкість.

Систематизированы сведения о влиянии кислорода на механические характеристики циркония: предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, модуль Юнга, вязкость и трещиностойкость.

The information about influence of oxygen on the mechanical properties of zirconium is systematized: ultimate strength, yield strength, elongation, Young's modulus, viscosity and cracking resistance.

Механические свойства при кратковременных испытаниях

Чистый нелегированный цирконий относится к числу металлов с низкой прочностью и очень высокой пластичностью. Опубликованные в литературе [1-16] значения предела текучести и предела прочности у чистого циркония (при комнатной температуре) колеблются в пределах: 25...150 МПа и 103...280 МПа соответственно; относительное удлинение $\delta_0=25...50\%$. Наблюдаемый разброс данных обусловлен сильным влиянием примесей на механические свойства циркония. Большой интерес представляет действие собственно кислорода, по эффективности упрочняющего действия, уступающего только азоту (рис.1).

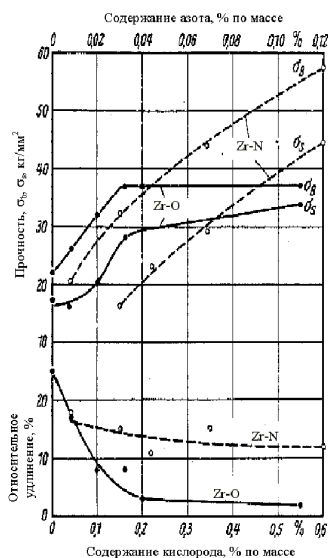


Рис.1. Влияние массового содержания кислорода (Zr-O) и азота (Zr-N) на временное сопротивление (σ_s), истинный предел прочности (σ_b) и относительное удлинение циркония [7]

Эффективность влияния кислорода на прочность и пластичность циркония зависит от исходного состояния материала, содержания кислорода и усло-

вий испытаний (температуры и скорости деформации) [11,12]. В области разбавленных твердых растворов зависимость предела текучести в сплаве Zr-O от концентрации кислорода может быть описана выражением:

$$\sigma_{\tau} = \sigma_{\tau 0} + \Delta\sigma_{\tau}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\tau 0}$ и σ_{τ} - предел текучести исходного и легированного кислородом циркония соответственно, $\Delta\sigma_{\tau}/\Delta c_o$ - концентрационное упрочнение (увеличение предела текучести при дополнении 1 ат. % кислорода, c_o [ат. %]). Согласно [12] при деформации со скоростью $6,9 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ кислородное упрочнение ($\Delta\sigma_{\tau}/\Delta c_o$) равно 46 кг/мм² на каждый ат. % при 77 К и 29 кг/мм² на каждый ат. % при 298 К (рис.2).

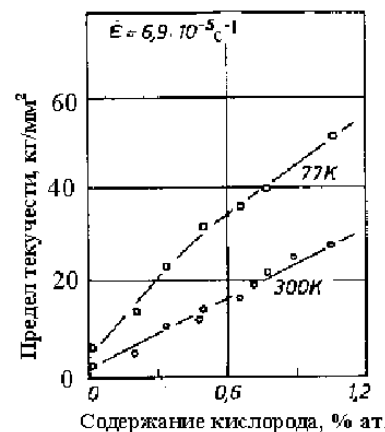


Рис.2. Зависимость предела текучести сплавов Zr-O при температурах 77 и 300 К от концентрации кислорода [12]

Температурные зависимости предела текучести для циркония с разным содержанием кислорода представлены на рис.3. Видно, что с увеличением температуры испытаний до 500 К эффективность упрочняющего действия кислорода в количестве до 1 ат. % уменьшается до нуля.

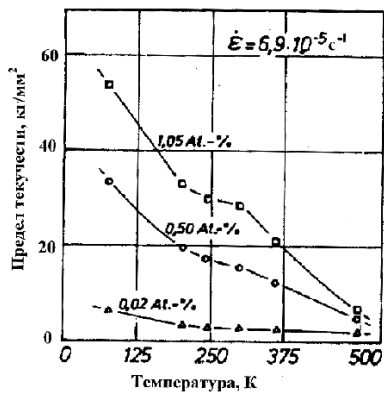


Рис.3. Температурная зависимость предела текучести сплавов Zr-O [12]

Качественно такие же результаты получены на оболочечных трубах из сплава циркалой и Zr-1%¹Nb [3].

На рис.4. представлены температурные зависимости предела прочности и относительного удлинения для: йодидного циркония, магнетермического циркония производства середины 50-х годов (содержание кислорода 600...1000 ppm) и йодидного циркония, долегированного кислородом до 0,1%; а также приведены значения предела прочности и относительного удлинения для магнетермического циркония первых выпусков [5].

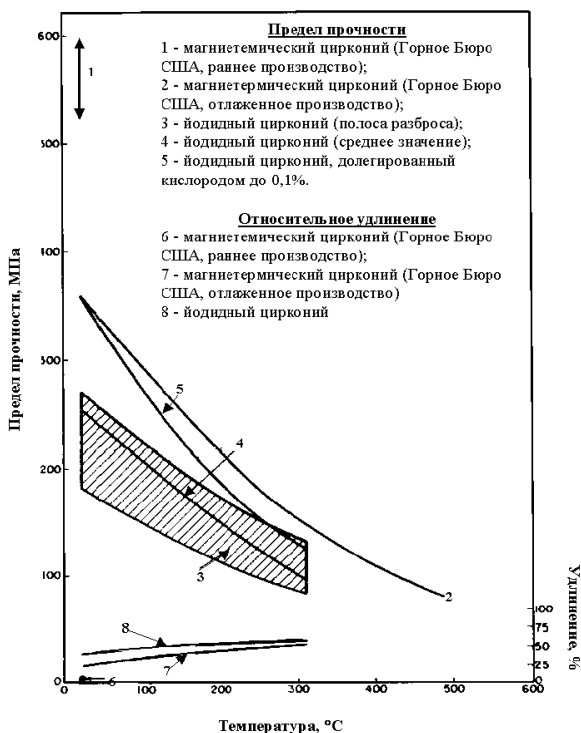


Рис.4. Механические свойства циркония различной технологии изготовления [5]

Необходимо отметить следующее:

- магнетермический цирконий первых выпусков был очень прочный и хрупкий;

- с повышением содержания кислорода на 0,1% предел прочности циркония увеличивается на 50%;

- при долегировании йодидного циркония кислородом до 0,1% его прочность практически достигает уровня прочности магнетермического циркония.

Долегирование кислородом предусмотрено стандартом ASTM B353 как метод управления структурой и свойствами циркониевых сплавов. Согласно требованиям к химическому составу промышленных труб из циркалой-2 и -4, количество кислорода устанавливается по согласованию с заказчиком и записывается в требования на поставку. На рис.5 представлены температурные зависимости предела прочности и предела текучести для сплава циркалой-2 с разным содержанием кислорода (от 0 до 3000 ppm) [6].

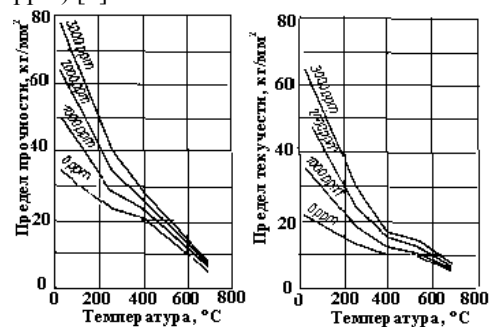


Рис.5. Температурная зависимость предела прочности и предела текучести сплава циркалой-2 с разным содержанием кислорода [6]

Сплав Zr-1%Nb, используемый в качестве материала оболочек твэлов, разрабатывался в России первоначально на основе йодидно-рафинированного циркония, затем по экономическим соображениям перешли на более дешевый электролитический цирконий. Механические свойства отожженных труб с внешним диаметром 9,15 мм и толщиной стенки 0,7 мм из сплава Zr-1%Nb с разным содержанием кислорода приведены в табл.1 [3]. Видно, что повышенные содержания кислорода в оболочечных трубах из сплава Zr-1%Nb, вызывая интенсивное упрочнение (увеличение предела текучести и предела прочности труб из сплава Zr-1%Nb в осевом направлении составляет в среднем 15,45 МПа на каждые 0,01 мас. % O₂, что составляет 27,6 кг/мм² на каждый ат. % кислорода), не приводит к значительной потере пластичности (интенсивность потери пластичности труб в осевом направлении не превышает 2% на каждые 0,01 мас. % O₂). Согласно данным работы [14], представленным в табл.2, предел текучести оболочечных труб из сплава Zr-1%Nb на основе электролитического циркония в поперечном направлении увеличивается на 16 МПа с дополнением каждых 0,01 мас. % O₂ (28,6 кг/мм² на каждый ат. %, кислорода), при этом увеличение предела прочности составляет 20 МПа на 0,01 мас. % O₂ (34,3 кг/мм² на каждый ат. % кислорода).

¹ Здесь и везде по тексту, где не отмечено особо, концентрация элементов приведена в процентах и ppm по массе.

Таблица 1

Механические свойства труб с внешним диаметром 9,15 мм и толщиной стенки 0,7 мм из сплава Zr-1%Nb с разным содержанием кислорода. После прокатки с обжатием около 50% проведен отжиг труб при 580°C в течение 3 ч [3]

O ₂ , мас. %	Температура испытаний						Направление
	20°C			350°C			
	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\delta_{0,2}$, %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\delta_{0,2}$, %	
0,05	400...430	240...270	45...50	200...230	90...100	45...50	Осевое
0,05	350...360	290...310	35...38	160...180	130...160	25...33	Поперечное
0,13	520...530	330...350	40...42	220...230	120...130	45...50	Осевое
0,16	580...590	420...430	39...41	250...260	150...160	45...48	Осевое

Таблица 2

Кратковременные механические свойства кольцевых образцов сплава Zr-1%Nb без и с добавкой кислорода до 0,13% в исходном состоянии и после облучения [14]

Материал	T _{исп} , °C	σ_B , МПа	σ_T , МПа	$\delta_{0,2}$, %	δ_p , %
Zr+1%Nb+0,08%O отжиг 580°C, 3 ч	20	370	320	32	11,5
	350	190	170	34	12,0
Zr+1%Nb+0,13%O отжиг 580°C, 3 ч	20	470	400	26	9,1
	350	210	180	38	8,2

Из опубликованных данных следует, что, находясь в разбавленном твердом растворе, кислород как в чистом цирконии, так и в сплавах на основе циркония вызывает упрочнение при комнатной температуре равное (18 ± 4) МПа на каждые 0,01 мас. % O₂, (30 ± 5) кг/мм² на каждый ат. % кислорода. Кислородное упрочнение ослабевает (значение $\Delta\sigma/\Delta c_O$ уменьшается) с увеличением содержания кислорода и повышением температуры механических испытаний.

Модуль Юнга

Упругие свойства могут служить мерой межатомных связей и определяют интенсивность взаимодействия точечных дефектов с дислокациями. Норсвуд и Росинджер [17] провели систематизацию данных, относящихся к константам упругости сплавов циркония с различным содержанием кислорода. Для циркония и его сплавов температурная зависимость модуля Юнга может быть описана уравнением:

$$E_T = E_0 - AT, \quad (2)$$

где E_T – модуль Юнга при температуре T (в °C), E_0 – модуль Юнга при 0°C, A – константа материала.

Для йодидного циркония в интервале температур от комнатной до 580°C:

$$\text{Zr- 200 ppm O} - E_T = 102,2 - 0,0612T \text{ ГПа}, \quad (3)$$

$$\text{Zr- 3000 ppm O} - E_T = 112,7 - 0,0626T \text{ ГПа}, \quad (4)$$

$$\text{Zr- 6000 ppm O} - E_T = 120,0 - 0,0595T \text{ ГПа}, \quad (5)$$

Значения модуля Юнга и модуля сдвига при комнатной температуре для сплава циркалой-4 с разным содержанием кислорода и в различных состояниях (указанных в табличке на рисунках) приведены на рис.6, 7. Видно, что при комнатной температуре модуль Юнга и модуль сдвига для материала отожженного при 800°C в течение часа, а затем диффузионно насыщенного кислородом в паре при 900°C (обозначен – исходный) увеличиваются с уве-

личением содержания кислорода. Модуль Юнга при комнатной температуре материала, прошедшего гомогенизирующие отжиги, не зависит от содержания кислорода (см. рис.6), модуль сдвига в гомогенизованном состоянии слегка увеличивается с повышением концентрации кислорода (см. рис.7).

Температурные зависимости модуля Юнга гомогенизированных сплавов циркалой-4 с различным содержанием кислорода представлены на рис.8. Видно, что на гомогенизированных образцах различие в модуле Юнга сплава с различным содержанием кислорода возрастает с повышением температуры испытаний; эффективность влияния температуры испытаний снижается с увеличением содержания кислорода. Для сплава циркалой-4 значение E_0 в уравнении (2) не изменяется с увеличением концентрации кислорода, значение константы A в (2) значительно уменьшается с повышением содержания кислорода.

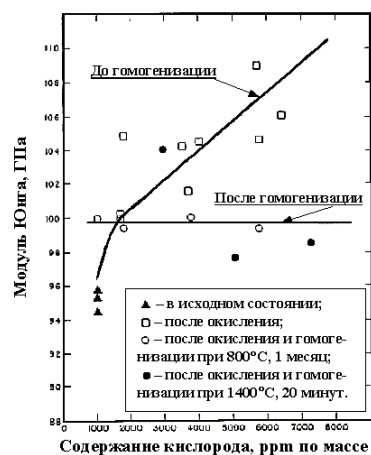


Рис.6. Влияние кислорода на модуль Юнга сплава циркалой-4 при комнатной температуре [17]

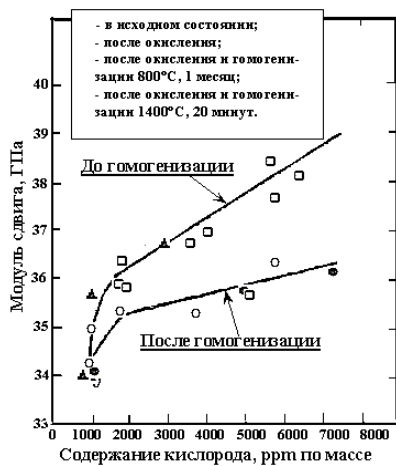


Рис.7. Влияние кислорода на модуль сдвига сплава циркалой-4 при комнатной температуре [17]

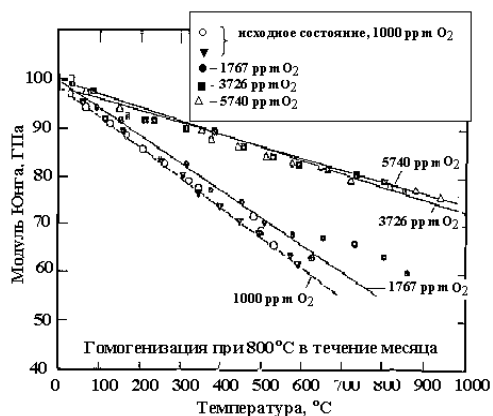


Рис.8. Температурная зависимость модуля Юнга для сплава циркалой-4 с содержанием кислорода от 1000 ppm до 5740 ppm, гомогенизированного при 800°C в течение 2,7 Мс [17]

Температурная зависимость модуля Юнга для сплавов Zr-1%Nb (690 ppm кислорода) и Zr-2,5%Nb (содержание кислорода 150, 200, 690, 1650 и 1680 ppm) представлена на рис.9 [6]. Видно, что влиянием кислорода в указанных пределах на модуль Юнга сплава Zr-2,5%Nb можно пренебречь.

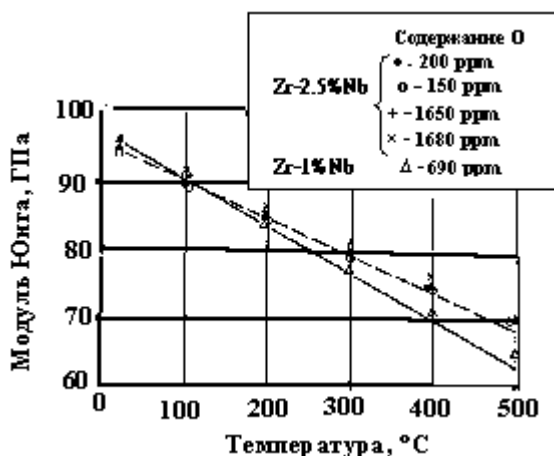


Рис.9. Температурная зависимость модуля Юнга сплавов Zr-1%Nb и Zr-2,5%Nb [6]

Таким образом, в отношении констант упругости эффект легирования кислородом зависит от со-

става сплава по другим легирующим элементам, предшествующей термообработке и температуры испытаний.

Твердость

Чистый цирконий – материал мягкий [11,12,18] – твердость отожженного йодидного циркония 100 кг/мм². С повышением содержания кислорода твердость циркония увеличивается; в среднем на 90 кг/мм² на каждый атомный процент кислорода (рис.10) [12].

Влияние кислорода на твердость циркония зависит от термообработки. На рис.11 представлена зависимость твердости сплавов Zr-O, закаленных от температур 600 и 800°C, от содержания кислорода (вплоть до 18 ат. %) [18]. Видно, что для закаленного состояния с увеличением концентрации кислорода в пределах неупорядоченного твердого раствора твердость материала повышается. При концентрации кислорода выше 8 ат. % твердость практически не зависит от содержания кислорода.



Рис.10. Изменение микротвердости циркония с увеличением содержания кислорода [12]

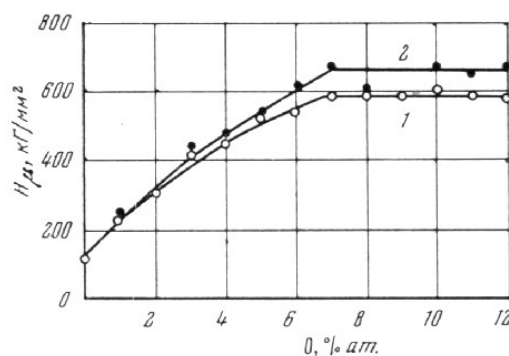


Рис.11. Зависимость микротвердости сплавов Zr-O от состава: 1 - закалка от 600°C, 2 - закалка от 800°C [18]

Вязкость

Вязкость относится к основным технологическим характеристикам материала, предназначенного для изготовления изделий посредством пластической деформации. Помимо технологического значения сведения о вязкости содержат информацию о силах связи в металле и характеризуют сопротивление растрескиванию и разрушению при работе материала на изгиб. Чистый цирконий и сплав Zr-

1%Nb – материалы с высокой вязкостью, присутствие примесей ее снижает (рис.12) [3,6].

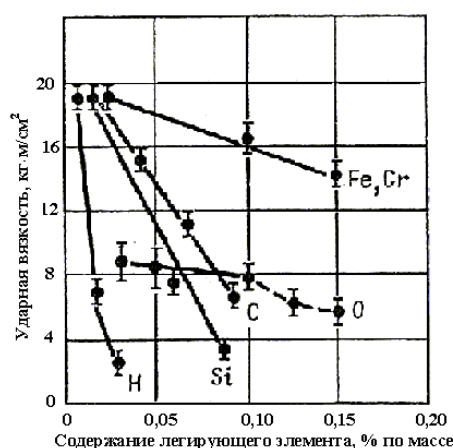


Рис.12. Влияние содержания примесей M (массового содержания) на ударную вязкость A_k сплава $Zr-1\%Nb$ [3]

С увеличением содержания кислорода от 0,05 до 0,1% снижение вязкости сплава $Zr-1\%Nb$ незначительное, при содержании кислорода свыше 0,1% эффективность действия кислорода значительно возрастает. При увеличении содержания кислорода от 0,1 до 0,15% вязкость сплава $Zr-1\%Nb$ снижается на 2 кг·м/см², что составляет 25% её исходного значения.

Температурная зависимость вязкости сплава $Zr-2,5\%Nb$ (содержание кислорода 80 и 1590 ppm) представлена на рис.13 [6]. Видно, что при всех температурах в интервале от -75 до +400°C сплав с более высоким содержанием кислорода имеет более низкую вязкость.

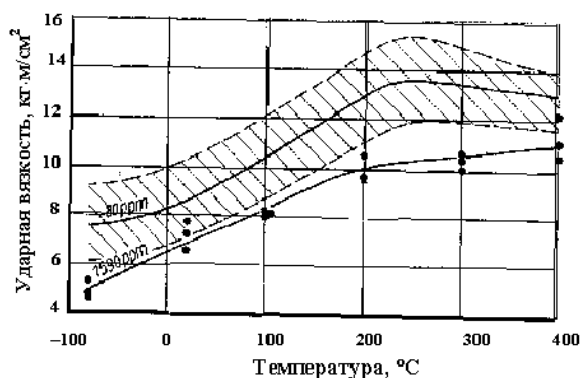


Рис.13. Температурная зависимость вязкости сплава $Zr-2,5\%Nb$ с разным содержанием кислорода [6]

Трещиностойкость

Параметры трещиностойкости материала канальных труб ядерных реакторов типа РБМК оценены при испытаниях на трехточечный изгиб образцов с надрезом и усталостной трещиной. По результатам испытаний определяли условный коэффициент интенсивности напряжений K_m , соответствующий максимальной нагрузке, и условное значение интеграла, соответствующее максимальной нагрузке, J_m . Для диаграмм, содержащих значительные участки общего течения, в расчете использовали приближение на основе J -интеграла. Полученные характеристики трещиностойкости приведены в табл.3 [19]. Сведения о критическом раскрытии трещин приведены в табл.4 [20]. Для напряженно-деформационного состояния канальных труб наиболее опасное направление распространения трещины – θ г. В этом направлении трубы из сплава Э125 обладают очень низким сопротивлением распространению трещины, и преимущество сплава И125 значительное.

Таблица 3

Характеристики трещиностойкости образцов размером 4 мм × 4 мм × 35 мм, изготовленных из труб Ø88 мм и толщиной стенки 4 мм и облученных в реакторе СМ-2 в воде при температуре (40...60)°С и плотности потока нейтронов (2,5...2,7)·10¹⁸ нейтр.·м⁻²·с⁻¹ до флюенса нейтронов (1...1,1)·10²⁵ н нейтр.·м⁻² (E>0,1 МэВ). Испытания проведены при комнатной температуре [19]

Сплав*	Термообработка	Ориентация трещины	K_m , МПа·м ^{1/2}	J_m , кДж/м ²
И125	Отжиг при 550°С, 5 ч	Zr	66,8...67,1	107
		Zθ	68,5...95	136
		θr	92,7...107	148
Э125	Отжиг при 550°С, 5 ч	Zr	67,3...70,3	243
		Zθ	67,5...77,2	114
		θr	67,5...78,1	52

*И125 - сплав $Zr-2,5\%Nb$ на основе йодидного циркония;

Э125 – сплав $Zr-2,5\%Nb$ на основе штатного материала (смесь электролитического и йодидного циркония в принятой пропорции)

Таблица 4

Значения критического раскрытия трещин для труб из сплава Zr-2,5%Nb[20]

Материал	Особенности технологии изготовления	Ориентация трещин	Критическое раскрытие трещин, δ_c , мм
Сплав Zr-2,5%Nb на основе высокочистого циркония	Холодная деформация, затем отжиг	Z θ	0,27
		Zr	0,09
		θ Z	0,08
		θ r	0,19
Сплав Zr-2,5%Nb на основе электролитического циркония	Холодная деформация, затем отжиг	Z θ	0,13
		θ Z	0,03

SD-эффект

SD-эффект заключается в различии значений предела прочности материала при растяжении и сжатии. Этот эффект может быть вызван нелинейным упругим взаимодействием дислокаций и атомов внедрения (механизм Хирша-Кохена). Сведения, представленные в работе Маннена и Родригьюза [21], свидетельствуют о сильном влиянии кислорода на SD-эффект. Цилиндрические образцы диаметром 5 мм и длиной 10 мм (для испытаний на сжатие) и длиной 75 мм (рабочая часть 25 мм) для испытаний на растяжение были изготовлены из сплавов Zr-O (содержанием кислорода от 0,051 до 0,6 ат. %). Все материалы приготовлены из йодидного циркония. Контролируемое увеличение содержания кислорода и азота достигалось посредством диффузионного насыщения расплава. Перед испытанием проведен отжиг образцов в вакууме при 750 °C в течение 24 ч. Температура испытаний 27°C, скорость деформации в обоих случаях составляла $8,33 \times 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Как видно из данных, представленных в табл.5, уровень SD-эффекта возрастает с увеличением содержания кислорода и азота в цирконии.

Эти примеси способны вызвать наблюдаемый на циркониевых сплавах уровень этого эффекта.

Заключение

Кислород оказывает сильное влияние на механические свойства циркония и его сплавов: увеличивает прочность, снижает пластичность, увеличивает значение SD-эффекта. Следует отметить неблагоприятное влияние кислорода на характеристики технологичности: снижение вязкости, увеличение твердости, снижение пластичности. Так что требования к предельно-допустимому содержанию кислорода предъявляет прежде всего трудоёмкость изготовления качественных циркониевых изделий из сплавов с повышенным содержанием кислорода. Благоприятным является упрочняющее действие кислорода (однако оно имеет низкую термическую стабильность), а также влияние кислорода на интенсивность действия SD-эффекта (с увеличением значения SD-эффекта повышается сопротивление оболочек твэлов к криповому коллапсу). Вызывает тревогу снижение трещиностойкости циркониевых сплавов с повышением содержания кислорода.

Таблица 5

Значения предела текучести ($\sigma_{0.1}$) при испытаниях на растяжение и сжатие ($T_{исп}=27^\circ\text{C}$) [21]

Сплав	Содержание кислорода, ат. %	Содержание азота, ат. %	Кислородный эквивалент примесей, ат. %	Предел текучести, $\sigma_{0.1}$		SD = $\sigma_p - \sigma_t$, кг/мм ²	$\frac{\sigma_p - \sigma_t}{\sigma_t}$	σ_t / σ_p	$\frac{\sigma_p - \sigma_t}{\sigma_p + \sigma_t}$
				При растяжении, σ_t , кг/мм ²	При сжатии, σ_p , кг/мм ²				
A	0,051	0,034	0,13	4,6	5,5	0,9	0,195	0,84	0,178
B	0,159	0,148	0,50	6,6	10,0	3,4	0,515	0,66	0,41
C	0,284	0,142	0,61	7,2	11,8	4,6	0,639	0,61	0,484
D	0,600	0,020	0,65	22,6	29,6	7,1	0,316	0,76	0,273

Литература

1. А.Д. Швоппе. Общие замечания о сплавах циркония // *Цирконий* : Сборник переводов из иностранной периодической литературы / Под ред. В.А. Алексеева. М.: Иностран. лит., 1955, с.5-13.
2. Ю.Ф. Коровин, В.Г. Чуприенко, К.А. Лидт, А.П. Мухачев, В.Д. Федоров, М.Л. Коцарь. Производство циркония и гафния на ПО ПХЗ для удовлетворения потребностей атомной энергетики Украины // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1994, вып.2(62), 3(63), с.114-124.
3. А.С. Займовский, А.В. Никулина, Н.Г. Решетников. *Циркониевые сплавы в ядерной энергетике*. М.: «Энергоатомиздат», 1994, с.1-256.
4. R.S. Ambartsumyan, A.A. Kiselev, R.V. Grebennikov, V.A. Myshkin, L.J. Tsuprun, A.F. Nikulina. Mechanical properties and corrosion resistance of zirconium and its alloys in water, steam and gases at high temperature // *Proc. of Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy. Geneva, 1-13 September, 1958, v.5, Properties of Reactor Materials*. Geneva: United Union, 1958, p.12-33.
5. *Reactor Handbook Materials: General Properties*. Unites States Atomic Energy Commission / Eds. J.F. Hogerton, R.C. Grass. Mc. Graw – Hill Book Company. Inc. New York, Toronto, London, 1955, p.468-469.
6. H. Von Bohmeier, R. Juknat. Einflussdes sauerstoffgehaltes auf die eigenshaften von Zr-Nb legierungen // *Eigenschaften und Anwendung hochschmelzender und reaktiver Metalle*. Leipzig. 1968, p.159-173.
7. К.Н. Wiedermann. Die eigenshaften von zirkonlegierungen als konstruktionswerkstoffe in kernreaktoren, Teil I // *Metall*. 1967, v.21, №2, p.113-120.
8. С.Д. Williams. Development potential of zirconium alloys for high-temperature applications // *Reactor Technology*. 1970, v.13, №2, p.147-169.
9. Г.Л. Миллер. *Цирконий*. / Перевод с англ. / Под ред. С.Г. Глазунова, А.А. Киселёва. М.: Иностран. лит., 1955, с.1-392.
10. А.В. McIntosh, Т.Т. Heal. *Materials for Nuclear Engineers*. London: «Temple Press Limited», 1960, p.1-386.
11. Р.М. Треко. О некоторых свойствах циркония высокой чистоты и его сплавов с низким содержанием кислорода // *Цирконий* : Сборник переводов / Под ред. В.А. Алексеева. М.: Иностран. лит., 1955, с.24-39.
12. G. Elssner, U. Krohn, O. Ruano Hartung der IVa- metalle interstitiell gelosten sauerstoff und stickstoff // *Z. Metallkunde - Germany, - F.R.* 1976, v.67, №5, p.311-317.
13. Л.В. Тихонов, В.А. Кононенко, Г.И. Прокопенко, В.А. Рафаловский. *Структура и свойства металлов и сплавов. Механические свойства металлов и сплавов: Справочник*. Киев: «Наукова думка», 1986, с.1-567.
14. В.А. Цыканов, Б.В. Самсонов, А.Я. Рогозянов, Н.П. Лосев, В.К. Шамардин, Г.П. Кобылянский, А.В. Никулина, М.Б. Фивейский. Влияние реакторного облучения на механические свойства циркониевых сплавов // *Физика и химия обработки материалов*. 1982, №6, с.3-7.
15. В.М. Ажажа, П.Н. Вьюгов, К.В. Ковтун, В.В. Левенец, К.А. Линдт, А.П. Мухачев, И.А. Петельгузов, Н.Н. Пилипенко. Изучение процессов очистки циркония и гафния и исследование их свойств // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1998, вып.3(69), 4(70), с.78-79.
16. Г.А. Некрасова, Б.Г. Парфенов, А.С. Пиляев, Г.П. Клыпина, Л.В. Семенова. *Цирконий в атомной промышленности. Вып.7. Термическая и термомеханическая обработка сплавов циркония: Обзорная информация*. АИНФ 549. М.: «ЦНИИАтоминформ», 1981, с.1-64.
17. D.O. Northwood, H.E. Rosinger. Influence of oxygen on the elastic properties of zircaloy-4 // *J. Nucl. Mater.* 1980, v.89, №1, p.147-154.
18. И.И. Корнилов, В.В. Глазова. *Взаимодействие тугоплавких металлов переходных групп с кислородом*. М.: «Наука», 1967, с.1-256.
19. Г.П. Кобылянский, А.Е. Новоселов. *Радиационная стойкость циркония и сплавов на его основе. Справочные материалы по реакторному материаловедению*. Димитровград, 1996, с.1-174.
20. В.М. Григорьев, А.В. Никулина, С.Н. Каплий, Н.В. Садовников; А.И. Стукалов, В.М. Грицина. Оценка трещиностойкости материала канальных труб из сплава Zr-2,5%Nb после СВЧ-обработки // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 1992, вып.1(58), 2(59), с.104-111.
21. S.L. Mannan, P. Rodriguez. Strength differential effect in zirconium alloys // *Scr. Met.* 1973, v.7, №10, p.1069-1074.

