

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ ЦИРКОНИЙ-КИСЛОРОД

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

Подані дані про вплив кисню на теплофізичні властивості цирконію і цирконієвих сплавів: температуру плавлення, температуру алотропічних перетворень, теплоємність, теплопровідність, густина і коефіцієнт лінійного розширення.

Представлены сведения о влиянии кислорода на теплофизические свойства циркония и циркониевых сплавов: температуру плавления, температуру аллотропических превращений, теплоёмкость, теплопроводность, плотность и коэффициент линейного расширения.

The information about influence of oxygen on thermal-physical properties of zirconium and zirconium alloys is represented: melting temperature, allotropic transformations temperature, specific heat, thermal conductivity, density and coefficient of linear expansion.

К основным теплофизическим характеристикам, необходимым при оценке возможности использования материала в качестве материала элементов конструкции активной зоны ядерных энергетических установок, относятся: температура плавления, температура аллотропического превращения, плотность, теплопроводность, теплоёмкость и коэффициент линейного расширения.

Плавление и кристаллизация

Плавление и кристаллизация являются важнейшими процессами, воздействие которых испытывает преобладающая часть материалов при их изготовлении, очистке и первичном формировании. В отношении циркониевых сплавов интерес к плавлению и кристаллизации особый - они рассматриваются как процессы, происходящие в циркониевых элементах конструкции активной зоны реакторов при аварийной ситуации (в условиях перегрева топлива при потере теплоносителя).

Наиболее часто встречаются значения температуры плавления циркония $T_m=1852^\circ\text{C}$ [1] и 1855°C [2-4]. Кислород относится к тем немногим элементам, которые повышают температуру плавления циркония. При введении каждого атомного процента кислорода в неупорядоченном твердом растворе температура плавления циркония повышается в среднем на $(15\pm 5)^\circ\text{C}$ (табл.1) [2-4]. Кроме кислорода температуру плавления циркония повышают азот и гафний [5].

Технический интерес представляют точные значения формы линий солидуса и ликвидуса в области высоких концентраций циркония [4] и величины коэффициентов распределения кислорода [5].

Коефициент распределения кислорода в цирконии (k_O^{Zr}) характеризует отношение концентрации кислорода в различных фазах, находящихся в равновесии. В случае кристаллизации [5],

$$k_{O,L\rightarrow s}^{Zr} = \frac{c_{sO}^{Zr}}{c_{LO}^{Zr}},$$

где c_{sO}^{Zr} - равновесная концентрация кислорода в твердой фазе; c_{LO}^{Zr} - равновесная концентрация кислорода в жидкой фазе. Для разбавленных сплавов кислорода в цирконии $k_{O,L\rightarrow s}^{Zr} > 1$, поэтому кислород накапливается в области, которая кристаллизуется в первую очередь. В силу этого при зонном рафинировании циркония отбор материала от конца переплавляемого стержня может быть использован для того, чтобы поэтапно получить чистый металл в отдельной его области.

По данным разных авторов, энтальпия плавления равна 13...23 кДж/моль [6,7]. Из-за различия энергии связи атомов кислорода с атомами циркония в кристаллическом и жидком состояниях при легировании кислородом значение энтальпии плавления увеличивается. По оценкам, проведенным в работе [7], в присутствии кислорода в количестве $O/Zr=0,2$ значение энтальпии плавления Zr-O увеличивается почти вдвое.

Таблица 1

**Значения температуры плавления
для сплавов Zr-O [3]**

O/Zr	0	0,1	0,13	0,20	0,24
$T_m, ^\circ\text{C}$	1875	1970	2020	2130	2130

Аллотропические превращения

Фазовое превращение циркония $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ влияет на выбор температурно-скоростного режима технологии изготовления циркониевых изделий и используется на практике для создания структурно-фазо-

ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ. 2002. №1.

Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (12), с.106-111.

циркония $T_{\alpha \rightarrow \beta} = 863^\circ\text{C}$ [9]. Для циркония значение энтальпии $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения $H_{\alpha \rightarrow \beta} = (4,02 \pm 0,35)$ кДж/моль. Для промышленного сплава циркалой-4 изменение энтальпии при фазовом превращении $\alpha \rightarrow \beta$ составляет $(4,12 \pm 0,35)$ кДж/моль (рис.1). Таким образом, свойственное этому сплаву легирование и присутствие примесей не приводит к значительному изменению энтальпии превращения $\alpha \rightarrow \beta$ [10].

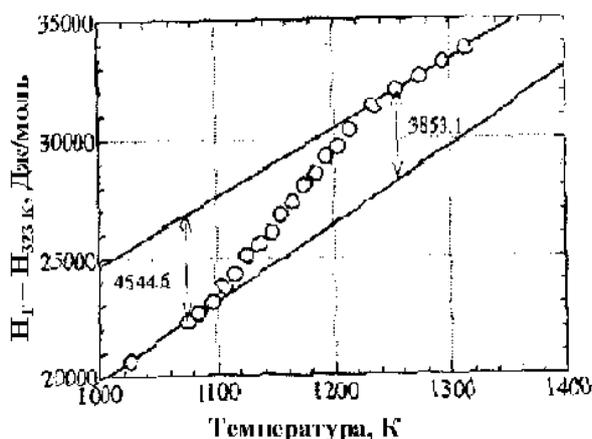


Рис.1. Температурная зависимость энтальпии в области превращения $\alpha \rightarrow \beta$ [10]

Присутствие кислорода и увеличение его содержания в цирконии приводит к следующим изменениям в поведении $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ превращений [11]:

- повышению температуры аллотропического превращения (рис.2);
- появлению и расширению двухфазной области (рис.2);
- может изменить внутреннее строение зерен материала, охлажденного из β -области.

Коэффициент распределения кислорода при превращении $\beta \rightarrow \alpha$, $k_{O, \beta \rightarrow \alpha}^{\text{Zr}} \neq 1$

$(k_{O, \beta \rightarrow \alpha}^{\text{Zr}} = \frac{C_{\text{O}}^{\alpha \text{Zr}}}{C_{\text{O}}^{\beta \text{Zr}}})$. Поэтому в процессе превращения $\beta \rightarrow \alpha$ кислородом обогащается область,

которая первой переходит в α -состояние, и при изготовлении изделий из циркониевых сплавов с повышенным содержанием кислорода во избежание неоднородности распределения кислорода, обусловленного его перераспределением

между фазами, необходимо сократить время пребывания в двухфазной области.

В области разбавленных твердых растворов температура $\beta \rightarrow \alpha + \beta$ -превращения нелегированного циркония и сплавов циркалой-2 и -4 повышается в среднем на $4 \dots 5^\circ\text{C}$ на каждые $0,01\% \text{O}_2$ (см. рис.2) [12].

Ширина области двухфазного состояния при концентрации кислорода в цирконии $0,1\%$ около 50°C .

В работе [13] получены следующие эмпирические закономерности изменения концентрации кислорода для сплава циркалой-2 вдоль фазовых границ $\beta/(\alpha + \beta)$ и $\alpha/(\alpha + \beta)$:

$$C_{\beta/(\alpha + \beta)} = e^{5,02 - 8220/T} \text{ для } T > 1280 \text{ К или концентрация кислорода в } \beta\text{-фазе } > 0,2 \text{ мас. \%}$$

$$C_{\alpha/(\alpha + \beta)} = e^{-2,28(T - 1083)^{0,535}},$$

где T в К, а $C_{\beta/(\alpha + \beta)}$ и $C_{\alpha/(\alpha + \beta)}$ в мас. %.

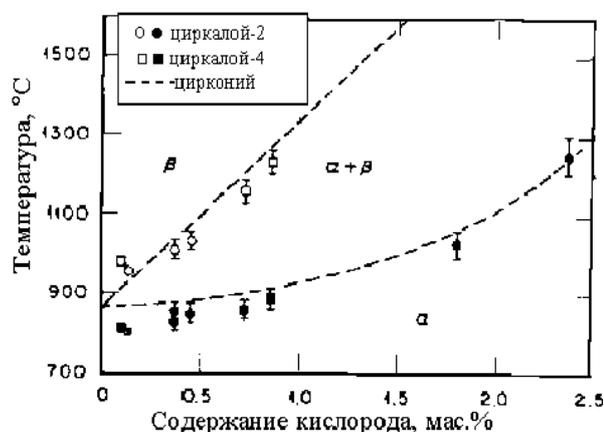


Рис.2. Влияние кислорода на температуру $\alpha/(\alpha + \beta)$ и $\beta/(\alpha + \beta)$ превращений в цирконии и сплавах циркалой [12]

Хейс и Кауфман исследовали структуру циркония, быстро охлажденного из β -области, и установили [14], что чистый цирконий с содержанием кислорода от $0,031$ до $0,035\%$ состоит из зерен без признаков игольчатой структуры. Для появления в быстро охлажденном цирконии игольчатого строения достаточно $0,07 \dots 0,1\%$ кислорода.

В промышленных циркониевых сплавах при скорости охлаждения из β -фазы ниже $400^\circ\text{C}/\text{с}$ ширина пластин α -фазы увеличивается с увеличением содержания кислорода, что обусловлено расширением температурного интервала двухфазной ($\alpha + \beta$)-области [15]. С увеличением скорости охлаждения влияние содержания кислорода на ширину пластин α -фазы ослабевает и на модифицированном сплаве циркалой-4 при скорости охлаждения выше некоторой критической не отмечается значительного влияния кислорода в количестве до $0,5\%$ на ширину пластин в быстрозакаленном металле [15].

¹ Здесь и далее по тексту, где не отмечено особо, содержание кислорода приведено в процентах по массе

Превращения $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \alpha$ в двойных сплавах Zr-Nb более чувствительны к содержанию примесей внедрения, в особенности кислорода, чем нелегированный цирконий и циркалои. В сплавах Zr-Nb увеличение температуры $\beta/(\beta+\alpha)$ -превращения составляет 8...10°C на 0,01%O₂ и присутствие примесей вносит большие изменения в положение линий на диаграмме состояний сплавов системы Zr-Nb [16-20]. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC) проведено исследование влияния кислорода на $\alpha \rightarrow \beta$ -превращение в сплавах Zr-1%Nb и Zr-2,5%Nb [18]. Результаты в виде зависимости объемной доли β -фазы от температуры представлены на рис.3. Сравнение результатов экспериментальной оценки с расчетными значениями для двойных сплавов показывают, что присутствие кислорода в количестве 1200 ppm уменьшает долю превращенного материала в стадии превращения, расширяет интервал превращения и значительно увеличивает температуру $\beta/(\alpha+\beta)$ -превращения исследуемых сплавов.

Из имеющихся налицо сведений можно утверждать, что в отношении превращения $\beta \rightarrow \alpha$ в цирконии функция кислорода и других примесей внедрения состоит в контроле структурных превращений, при этом оно не требует введения дополнительного количества кислорода не только в цирконий и циркониевые сплавы обычных промышленных плавок, но и в цирконий, очищенный имеющимися в нашем распоряжении методами.

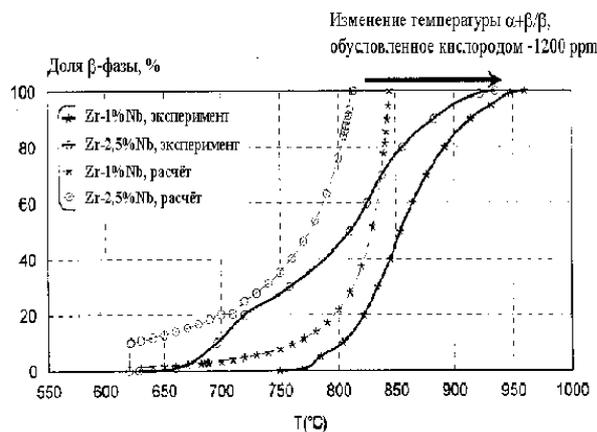


Рис. 3. Температурная зависимость объемной доли β -фазы в сплавах Zr-1%Nb и Zr-2,5%Nb. Экспериментальные данные и результаты расчета (их сравнение) [18]

Плотность

В литературе встречаются значения плотности α -циркония ($6,55 \pm 0,08$) г/см³. По данным CINDAS (CINDAS - Center for Information and Numerical Data Analysis and Synthesis at Purdue University, USA) [21] плотность циркония при комнатной температуре (ρ_0) равна 6,57 г/см³. Легирование кислородом в пределах неупорядоченного твердого раствора оказывает слабое влияние на плотность циркония [11].

Плотность диоксидов циркония [22]:

$$\rho_{\text{ZrO}_2 (\text{монокл.})} = 5,56 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{\text{ZrO}_2 (\text{тетраг.})} = 6,1 \text{ г/см}^3.$$

Коэффициент линейного расширения

Тепловое расширение кристалла обладает симметрией этого кристалла. Коэффициент линейного расширения нетекстурированного циркония при комнатной температуре равен $5,85 \times 10^{-6}$ 1/град. Разработанные CINDAS [21] уравнения для описания температурной зависимости коэффициента линейного расширения поликристаллического циркония следующие:

$$\Delta L/L_0 = -1,11 \times 10^{-3} + 2,325 \times 10^{-6}T + 5,595 \times 10^{-9}T^2 - 1,768 \times 10^{-12}T^3 \quad (1)$$

для α -Zr ($293 \leq T \leq 1139$ K),

$$\Delta L/L_0 = -7,59 \times 10^{-3} + 1,474 \times 10^{-6}T - 5,140 \times 10^{-9}T^2 + 1,559 \times 10^{-12}T^3 \quad (2)$$

для β -Zr ($1139 \leq T \leq 1800$ K).

Тепловое расширение является одной из характеристик сил связи и существует связь коэффициентов теплового расширения со многими термодинамическими и механическими характеристиками металла [23-26]. В частности, первое правило Грюнайзена утверждает, что при данной приведенной температуре T/T_m произведение $\alpha \times T_m$ приблизительно не зависит от природы вещества [25,26]. Исходя из данных по влиянию кислорода на температуру плавления, энергию кристаллической решетки, энтальпию плавления, теплоемкость, модуль Юнга [23-26], следует ожидать очень незначительного уменьшения коэффициента линейного расширения с увеличением содержания кислорода в неупорядоченных твердых растворах циркония, что может быть нарушено побочными эффектами.

На рис.4. представлена температурная зависимость изменения размеров вдоль и поперек пластин из сплава Zr-1% Nb (содержание кислорода 420 и 690 ppm), а также вдоль прутков $\varnothing 5$ мм из сплава Zr-2,5%Nb (содержание кислорода 150, 200, 1650 и 1680 ppm) [27]. Наблюдаемые изменения размеров пластин и прутков с повышением температуры обусловлены их термическим расширением. Значения коэффициентов линейного расширения для этих материалов приведены в табл.2. Видно, что влиянием кислорода на коэффициент линейного расширения сплавов Zr-Nb промышленных плавок можно пренебречь.

Коэффициент линейного расширения вдоль основных направлений труб сильно зависит от технологии их изготовления и требует непосредственного определения в каждом конкретном случае.

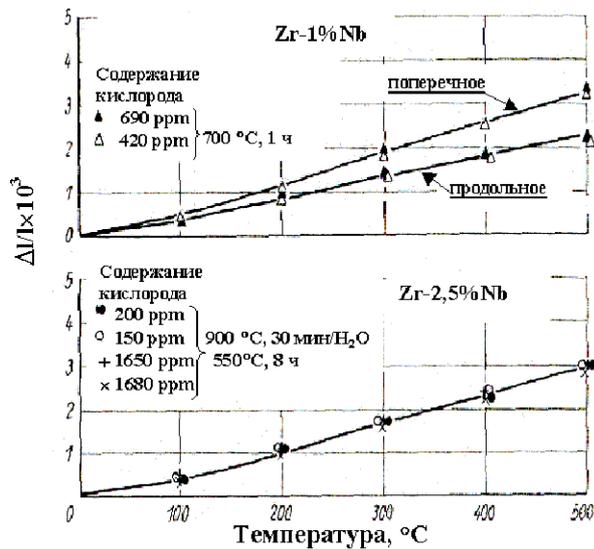


Рис.4. Температурная зависимость коэффициента линейного расширения пластин из сплава Zr-1%Nb в продольном и поперечном направлениях и прутка из сплава Zr-2,5%Nb при разном содержании кислорода [27]

Таблица 2
Коэффициент линейного расширения сплавов Zr-1%Nb и Zr-2,5%Nb [27]

Коэффициент линейного расширения сплава, $\times 10^{-6}$ 1/град					
Сплав Zr-1%Nb					
Содержание кислорода, ppm	Температура, °C				
	100	200	300	400	500
Вдоль пластины					
690	5,0	5,5	5,5	5,2	5,0
420	5,4	5,6	5,5	5,3	5,0
80	5,3	5,7	5,7	5,5	5,3
Поперек пластины					
690	6,2	6,9	7,1	7,2	7,3
420	5,8	7,1	7,3	7,3	7,4
80	5,6	6,7	6,9	7,1	7,2
Сплав Zr-2,5%Nb, пруток					
200	4,6	6,3	6,5	6,6	6,6
150	5,6	6,7	6,8	6,9	6,9
1650	5,6	6,6	6,8	6,8	6,9
1680	5,8	6,7	6,8	6,9	6,9
80	5,1	6,6	7,0	7,1	7,2

Теплоёмкость

За исключением области аллотропического превращения в разбавленных твердых растворах значение теплоёмкости циркония слабо зависит от примесей и легирующих добавок (рис.5) и при незначительном легировании подчиняется закону аддитивности [10]. Теплоёмкость промышленного сплава циркалой-4 лишь на 0,2% отличается от теплоёмкости чистого циркония. Присутствие кислорода влияет на число и положение пиков в области ал-

лотропического превращения на температурной зависимости теплоёмкости (пик в области 1170 К объясняется присутствием олова и кислорода (рис.6)) [10].

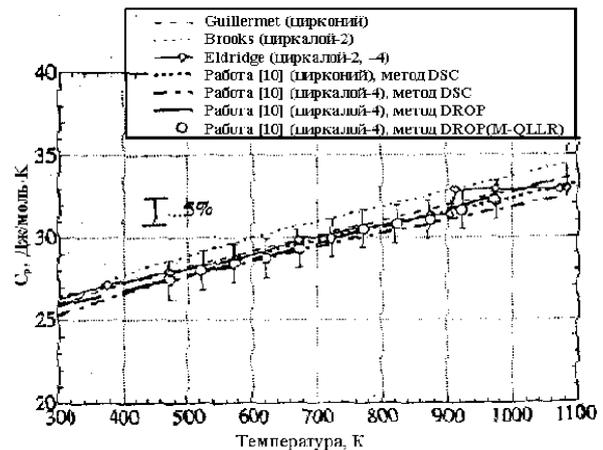


Рис.5 Температурная зависимость теплоёмкости циркония и сплавов циркалой [10]

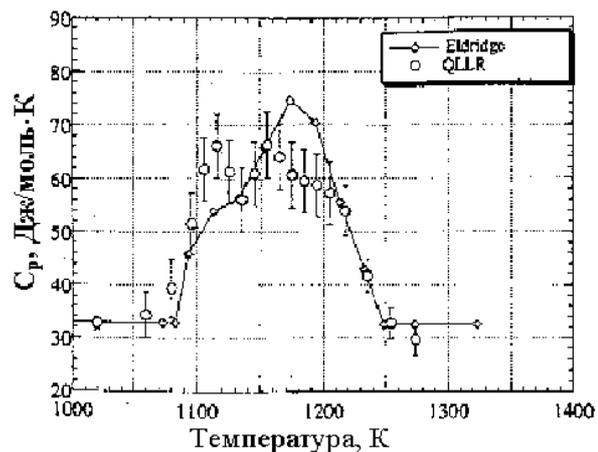


Рис.6. Температурная зависимость сплава циркалой-4 в области $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения [10]

Построенная по результатам статистической обработки данных CINDAS температурная зависимость теплоёмкости циркония [21] имеет вид:

$$C_p = 24,1618 + 8,75582 \times 10^{-3} T - 69942 \times T^{-2} \text{ (Дж/моль К)}$$

для α -циркония: $298 \text{ K} \leq T \leq 1139 \text{ K}$, (3)

$$C_p = 25,607406 + 6,80168 \times 10^{-4} T + 5,837384 \times 10^{-8} T^2 + 9,13714728 \times 10^{-10} T^3 - 50466 T^{-2} \text{ (Дж/моль К)}$$

для β -циркония: $1139 \text{ K} \leq T \leq 2128 \text{ K}$. (4)

В сплавах Zr-O с высоким содержанием кислорода ($O/Zr=0,1...0,24$) на температурной зависимости теплоёмкости есть пики, обусловленные превращением порядок \rightarrow беспорядок (рис.7). Значения теплоёмкости сплавов системы Zr-O при температурах в интервале 350...900 К приведены в табл.3 [3].

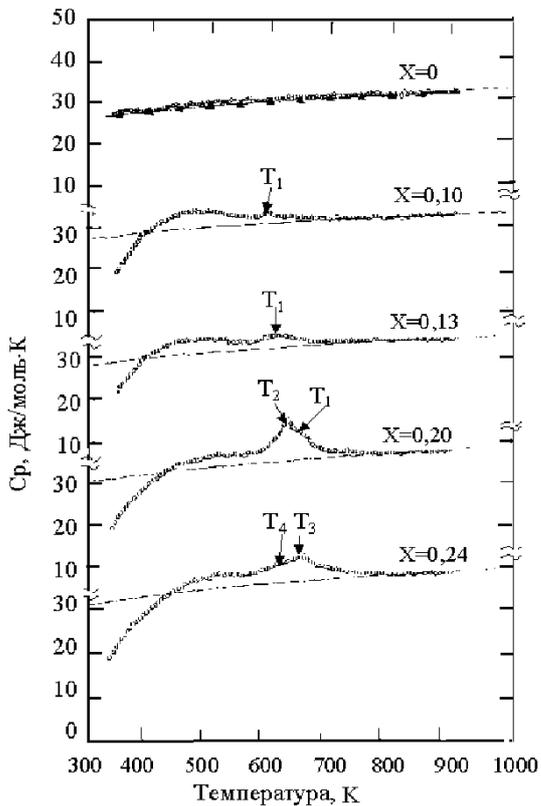


Рис.7. Теплоёмкость сплавов $Zr-O_x$ ($x = 0; 0,1, 0,13; 0,2$ и $0,24$) [3]

Таблица 3

Т, К	Удельная теплоёмкость сплавов $Zr-O$ [3]			
	Zr	$ZrO_{0,1}$	$ZrO_{0,13}$	$ZrO_{0,24}$
1	2	3	4	4
350	27,80	20,48	21,98	19,80
400	27,97	28,92	30,00	28,57
450	28,56	33,14	33,18	34,01
500	29,54	33,60	33,64	37,29
550	29,94	32,34	32,92	37,71
600	30,10	33,00	33,78	38,85
650	30,68	31,63	33,36	41,22
700	31,02	31,19	32,97	39,77
750	30,96	31,70	33,09	38,36
800	30,96	31,65	32,88	37,72
850	30,72	31,95	32,85	37,74
900	31,45	32,25	33,11	38,15

Теплопроводность

На основании систематизации и анализа данных по теплопроводности циркония в работе [21] развито уравнение, описывающее температурную зависимость теплопроводности циркония (рис.8):

$$k = 8,8527 + 7,0820 \times 10^{-3} T + 2,5329 \times 10^{-6} T^2 + 2,9918 \times 10^3 T^{-1} \text{ (Вт/м·К)}$$

при $298 \text{ K} \leq T \leq 2000 \text{ K}$. (5)

В зависимости от температуры отклонения от представленной закономерности составляют от 5 до 9,5%. При легировании циркония кислородом в пре-

делах неупорядоченного твердого раствора теплопроводность слегка уменьшается (в среднем на 10% при введении каждого атомного процента кислорода) [28].

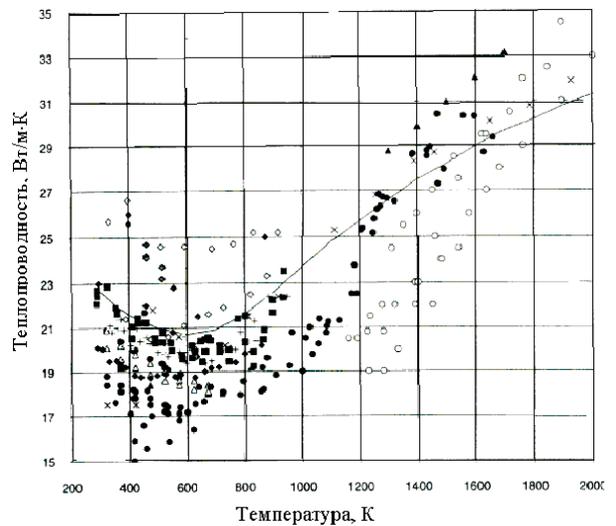


Рис.8. Температурная зависимость теплопроводности циркония [21]

Заключение

Теплофизические свойства допускают возможность использования сплавов с повышенным содержанием кислорода (отмеченное влияние кислорода на теплофизические характеристики циркония и циркониевых сплавах не исключает возможность применения в реакторостроении циркониевых сплавов с содержанием кислорода, вдвое превышающем его количество в серийной циркониевой продукции). На конкретно выбранном сплаве должна быть проведена оценка: температур начала и конца аллотропического превращения, теплопроводности и коэффициента линейного расширения по основным направлениям изделия. По остальным теплофизическим характеристикам достаточно провести оценку влияния кислорода на основании известных эмпирических закономерностей. Сильное влияние кислорода на параметры аллотропического превращения предъявляют требования к его предельнодопустимому отклонению в циркониевых сплавах и однородности распределения кислорода по слитку и изделию. Предельнодопустимое отклонение содержания кислорода в партии не должно превышать $\pm 0,02\%$. В противном случае материал будет неоднородным по структурно-фазовому состоянию. Из теплофизических характеристик при обосновании «вновь предлагаемого содержания» кислорода влияние на решение о возможности использования сплава в реакторостроении (при общем содержании примесей до 0,5%) может оказать влияние кислорода на аллотропические превращения и теплопроводность.

Литература

1. Р.Ф. Домагала, Д.Дж. Макферсон. Система цирконий-кислород // *Цирконий: Сборник переводов / Под ред. В.А. Алексеева. М.: Иностран. лит., 1955, с.40-58.*
2. И.И. Петрова, В.Э. Пелецкий. Спектральная ($\lambda=0,65$ мкм) излучательная способность и температура солидуса сплава Zr-1%Nb // *Теплофизика высоких температур. 1995, т.33, №5, с.716-720.*
3. Т. Tsuji, М. Амауа. Study on order-disorder transition of Zr-O alloys (O/Zr=0-0.31) by heat capacity measurement // *J. Nucl. Mater. 1995, v.223, №1, p.33-39.*
4. P.J. Hayward, I.M. George. Determination of the solidus temperatures of zircaloy-4/oxygen alloys // *J. Nucl. Mater. 1999, v.273, №3, с.294-301.*
5. *Кристаллизация из расплавов: Справочник / Под ред. К. Хайна, Э. Бурига. М.: «Металлургия», 1987, с.1-319.*
6. В.Н. Коробенко, А.И. Савватимский. Свойства твёрдого и жидкого циркония // *Теплофизика высоких температур. 1991, т.29, №5, с.883-886.*
7. D.R. Olander, W. Wang. Heat effects accompanying phase changes in the Zr-U-O system // *J. Nucl. Mater. 1995, v.223, №1, p.28-32.*
8. А.И. Стукалов, В.М. Грицина, Т.П. Черняева, В.Н. Воеводин, Л.С. Ожигов, Н.И. Рагулина, В.И. Савченко, Д.Г. Малыхин. *Воздействии СВЧ-термообработки на структурно-фазовое состояние и механические свойства сплава Zr-2,5%Nb: Препринт ХФТИ 99-1. Харьков: ИФТТМТ ННЦ ХФТИ, 1999, с.1-56.*
9. Г.Л. Миллер. *Цирконий / Перевод с англ./ Под ред. С.Г. Глазунова, А.А. Киселёва. М.: Иностран. лит., 1955, с.1-392.*
10. Т. Terai, Y. Takahashi, S. Masumura, T. Yoneoka. Heat capacity and phase transition of zircaloy-4 // *J. Nucl. Mater. 1997, v.247, compl., p.222-226.*
11. Т.П. Черняева, А.И. Стукалов, В.М. Грицина. *Кислород в цирконии: Обзор. Харьков: НТК ЯТЦ ХФТИ, 1999, с.1-112.*
12. R.A. Perkins. Oxygen diffusion in β -zircaloy // *J. Nucl. Mater. 1977, v.68, №2, p.148-160.*
13. Н.М. Chung, Т.Ф. Kassner. Pseudobinary zircaloy-oxygen phase diagram // *J. Nucl. Mater. 1979, v.84, №1-2, p.327-339.*
14. Е.Е. Хейс, А.Р. Кауфман. Об аллотропическом превращении циркония // *Цирконий: Сборник переводов / Под ред. В.А. Алексеева. М.: Иностран. лит., 1955, с.14-23.*
15. S.H. Hong, S.J. Kim, K.S. Lee. Effect of oxygen content on the beta-quenched microstructure of modified Zircaloy-4 // *J. Nucl. Mater. 1999, v.265, №1-2, p.108-111.*
16. С. Е. L. Hunt, P. Niessen. The effect of oxygen on the equilibrium $\alpha/\alpha+\beta$ transformation temperature of zirconium-niobium alloys // *J. Nucl. Mater. 1970, v.35, №1, p.134-136.*
17. Д. Дуглас. *Металловедение циркония / Пер. с английского / Под ред. А.С. Займовского. М.: «Атомиздат», 1975, с.1-360.*
18. С. Toffolon, С. Servant, J.C. Brachet, J.P. Mardon. Experiment and thermodynamic study of Fe-Nb-Zr-(Sn,O) system // *12th. Int. Symposium on "Zirconium in the Nuclear Industry", June 15-18, 1998. Toronto, Ontario, Canada. Program and Abstracts. ASTM, 1998, p.97-98.*
19. W. Jung-Konig, H. Richter, W. Spalthoff, E. Starke. Properties and technology of zirconium alloys with niobium and tin // *Proc. of the Third United Nations International Conference on the Peaceful Used of Atomic Energy. Geneva, 31 Aug.-9 Sept. 1964, v.9. Reactor Materials. New York: United Nations, 1965, p.139-144.*
20. V. Fidleris. The creep strength of quenched and aged Zr-2.5 wt. %Nb alloy // *J. Nucl. Mater. 1974, v.54, №2, p.199-211.*
21. J.K. Fink, L. Leibowitz. Thermal conductivity of zirconium // *J. Nucl. Mater. 1995, v.226, №1-2, p.44-50.*
22. Г.Я. Акимов, В.М. Тимченко. Влияние скорости нагружения на механические свойства поликристаллов твёрдого раствора ZrO₂-3 mol. % Y₂O₃ // *Физика твёрдого тела. 1997, т.39, №5, с.880-884.*
23. И.И. Корнилов, В.В. Глазова. *Взаимодействие тугоплавких металлов переходных групп с кислородом. М.: «Наука», 1967, с.1-256.*
24. С.И. Новикова. Исследование закономерностей изменения коэффициентов теплового расширения элементов. // *Физико-механические и тепловые свойства металлов: Сборник. /Отв. редактор Н.Н. Рыбалкин. М.: «Наука», 1976, с.118-124.*
25. К. Мейер. *Физико-химическая кристаллография. М.: «Металлургия», 1972. с.1-479.*
26. Л.Г. Никифоров. О связи теплового расширения с теплоёмкостью, точкой плавления, параметрами межатомного взаимодействия и кристаллической структуры // *Теплофизи-*

ка высоких температур. 1993, т.31, вып.1, с.139-140.

27. Н. Von Bohmeier, R. Juknat. Einfluss des sauerstoffgehaltes auf die eigenschaften von Zr-Nb legierungen // *Eigenschaften und Anwendung hochschmelzender und reaktiver Metalle. Leipzig. 1968, p.159-173.*
28. Р.М. Треко. О некоторых свойствах циркония высокой чистоты и его сплавов с низким содержанием кислорода // *Цирконий: Сборник переводов / Под ред. В.А. Алексева. М.: Иностран. лит., 1955, с.24-39.*