

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕНИЯ В ВОДЯНОМ ПАРЕ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЭЛЬНЫХ ТРУБ ИЗ СПЛАВА Zr1Nb

И.А. Петельгузов, Н.И. Ищенко, Е.А. Слабоспицкая, М.В. Мухин
Научно-технический комплекс «Ядерный топливный цикл»

*Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт»
г. Харьков, Украина;*

E-mail: petelg@kipt.kharkov.ua; факс: +38(057)335-27-54, телефон (057)335-67-67

Представлены результаты исследований влияния высокотемпературного окисления в атмосфере водяного пара при температурах в диапазоне 660...1200 °С и при выдержке в течение времени от 1 до 240 с на структурные и механические свойства труб-оболочек для твэлов из кальциетермического сплава Zr+1%Nb (Zr1Nb), изготовленного в Украине. Проведено сравнение свойств сплава Zr1Nb со свойствами штатного для твэлов реактора ВВЭР-1000 сплава Э110. Оценена область устойчивости свойств оболочек и начала деградации свойств материала.

В работах [1, 2] исследованы кинетика окисления, изменения структуры и механических свойств труб из сплава Zr1Nb на основе кальциетермического циркония после выдержки в паре при температурах 660...1200 °С в течение 120 с. Получены данные о закономерностях процесса окисления и изменениях структуры и механических свойств. Было отмечено снижение пластичности и появление признаков хрупкости сплава.

Представляло интерес определить, с каких параметров выдержки (время окисления, температура) начинается существенное изменение структурных свойств, снижение пластичности сплава и какова роль окисления и фазово-структурных изменений в таких процессах. С этой целью в продолжение и развитие указанных исследований расширен диапазон времени выдержек при окислении (от 1 с до 240 с), а также изучены свойства материалов после отжига в вакууме. Наблюдаемые структурные изменения в сплавах сопоставляются с изменением механических свойств материала оболочек под действием коррозионных процессов и структурных изменений, протекающих в сплавах при их нагреве до высоких температур.

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проведены после выдержки кольцевых образцов в парах воды при температурах, как в работах [1, 2] (660...1200 °С), в течение времени 1, 3, 15, 60, 120 и 240 с. Использовался метод нагрева образцов в печи сопротивления в потоке водяного пара (0,5 см³/(см²·мин) со скоростью нагрева образцов 20...25 °С/с и охлаждением со скоростью 20 °С/с. Выбранные параметры термических обработок обусловлены тем, что подобные условия могут возникать в активной зоне водо-водяных реакторов при некоторых вариантах проектных аварий в случае разгерметизации контура и утечки из корпуса

реактора ВВЭР-1000 теплоносителя, что может приводить к разрушениям твэлов. Кроме того, подобные исследования представляют научный интерес при изучении связи процессов поверхностного окисления, наклороживания, изменений фазовых состояний в циркониевых сплавах с изменением их прочностных и пластических свойств.

Как известно, при выдержке образцов в водяном паре в указанном интервале температур наблюдается одновременное протекание процесса окисления, термического отжига сплава и диффузионного проникновения кислорода из оксидной плёнки в структуру сплава [2, 3]. Эти явления могут приводить к изменению комплекса свойств сплава.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Определение толщины оксидных плёнок. Рост оксидных плёнок определялся путём взвешивания на микровесах и измерениями толщины оксидных плёнок методами металлографии. При очень коротких временах окисления толщины плёнок оценивались расчётным путём.

Данные приведены в таблице, из которой следует, что при температурах 660...770 °С за время выдержки 1...3 с образуются плёнки толщиной в сотые микрометра, а при 1020 и 1200 °С нарастают плёнки толщиной до нескольких микрометров (имеется в виду то, что при нагреве образцов до температуры выдержки и их остывании также протекает процесс окисления и роста оксидных плёнок).

При увеличении времени выдержки и с повышением температуры происходит усиление роста плёнок, так что после окисления при 1020...1200 °С в течение 120 с толщина нарастающих плёнок уже достигает 38...45 мкм.

На образцах сплава Э110 при температурах окисления 900...1020 °С наблюдались отслоения плёнок, что затрудняло точное определение толщин. Приве-

сы и толщины плёнок при окислении сплава Zr1Nb при температуре 1020 °С меньше, чем у сплава Э110 при окислении в тех же условиях, что соответствует данным работы [2], а при температурах окисления

660, 770 и 1200 °С привесы при коррозии и толщины оксидных плёнок близки для обоих сплавов. Эти особенности наблюдаются также и при коротких временах выдержек.

Измерение толщины оксидных плёнок, мкм на сплавах Zr1Nb и Э110 после выдержки в потоке водяного пара при разных температурах

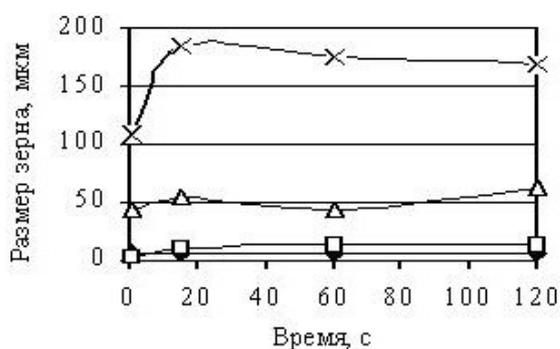
Сплав	Время выдержки, с	Толщина пленки, мкм				
		Температура окисления, °С				
		660	770	900	1020	1200
Zr1Nb	1	0,01	0,043	0,086	4...5	1,1
	15	0,16	0,65	1,3	5...7	14
	60	0,31	1,3	2,6	8...9	30
	120	0,65	1,6	4,4	12	40
Э110	1	0,01	0,036	0,06	3...4	1,1
	15	0,12	0,55	0,9	3...5	13
	60	0,20	1,2	2,2 ^x	7...8 ^x	28
	120	0,50	1,8	3,3 ^x	8...9 ^x	43

^x – наблюдалось отслоение плёнок

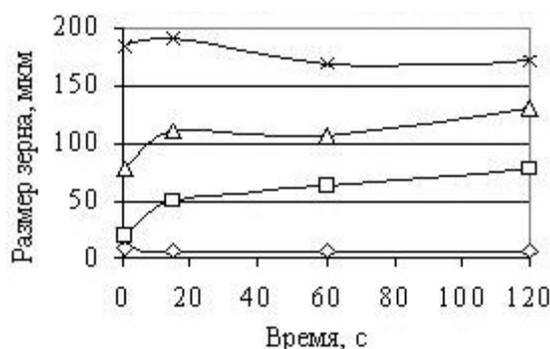
Структурные изменения

Размер зерна. Структурные превращения в сплаве начинаются уже при коротких временах выдержек. Они отражаются на изменении размеров зёрен

и значениях величины микротвердости сплава в глубине в зависимости от времени и температур выдержек. На рис. 1 приведены графики зависимостей размеров зёрен от режимов отжига при окислении в водяном паре при атмосферном давлении.



а



б

Рис. 1. Изменение среднего размера зерна у образцов труб из сплавов Zr1Nb (а) и Э110 (б) в зависимости от времени и температуры окисления в интервале температур 770...1200 °С; а: ◆ – 770 °С, □ – 900 °С, Δ – 1020 °С, × – 1200 °С; б: ◊ – 770 °С, □ – 900 °С, Δ – 1020 °С, × – 1200 °С

Как видим, структурные преобразования у сплава Э110 медленно происходят при температурах до 770 °С, а у сплава Zr1Nb даже до 900 °С и при временах выдержки до 120 с. Средний размер зёрен не превышает 13 мкм. При 1020 °С у сплава Zr1Nb, а у сплава Э110 при 900 °С отмечается интенсивный рост зёрен. Причём усиление роста зёрен при температурах 1020...1200 °С происходит уже после отжига в течение минимального времени выдержки (1 с), а после 15 с выдержки уже сформировывается зерно, так что при окислении в течение 15 и 120 с размеры зёрен мало отличаются.

Также необходимо отметить более быстрый рост зёрен у сплава Э110, и зёрна достигает больших размеров, чем у сплава Zr1Nb в области температур 900...1020 °С.

Микротвердость. Структурные преобразования в сплаве в результате окисления и высокотемпературного отжига отражаются в изменении значений его микротвердости. Данные об измерении микротвёрдости у сплавов Zr1Nb и Э110 после окисления показаны на рис. 2.

Из приведенных результатов следует, что при температуре 660 °С и выдержке в течение 120 с микротвердость обоих материалов мало отличается от микротвердости в исходном состоянии, а после 770 °С наблюдается некоторый рост значения микротвёрдости сплавов. Нагрев до температуры 900 °С и выдержка при этих температурах в течение 1...3 с ещё не приводят к повышению микротвердости после охлаждения до комнатной температуры, но после отжигов при температуре 900 °С в течение 15 с

были отмечены укрупнение зерен и изменения в структуре (образование зёрен β -превращенной фазы), увеличение значений микротвёрдости. При дальнейшем повышении температуры окисления наблюдается увеличение значений микротвёрдости сплавов после отжигов и охлаждения. Отмечен некоторый спад значения микротвёрдости после выдержки в течение 60 с при 1200 °С.

Зависимость механических свойств труб из сплавов Zr1Nb и Э110 от температуры окисления

Механические свойства оболочек твэлов являются конечной характеристикой в оценке работоспособности тепловыделяющих элементов в случаях аварийных перегревов. В наших имитационных экспериментах этому вопросу уделено большое внимание. С использованием методики испытаний кольце-

вых образцов твэльных труб из сплава Zr1Nb на разрывной машине МР-0,5 были определены пределы прочности, пределы текучести и относительное удлинение сплава после отжига в водяном паре в течение времени, аналогичного по длительности предыдущим условиям экспериментов при проведении структурных исследований. Данные показаны на рис. 3-9.

При рассмотрении графиков прежде всего отмечено сходство в поведении обоих сплавов Zr1Nb и Э110. Видно, что при комнатной температуре прочность обоих сплавов мало изменяется после выдержки в течение 1...3 с при всех температурах окисления, имея слабую тенденцию к возрастанию с увеличением температуры. При температуре механических испытаний 350 °С прочностные характеристики возрастают при нагреве сплава до температуры 1100 °С, а при нагреве сплава до 1200 °С предел прочности незначительно снижается (см. рис. 3).

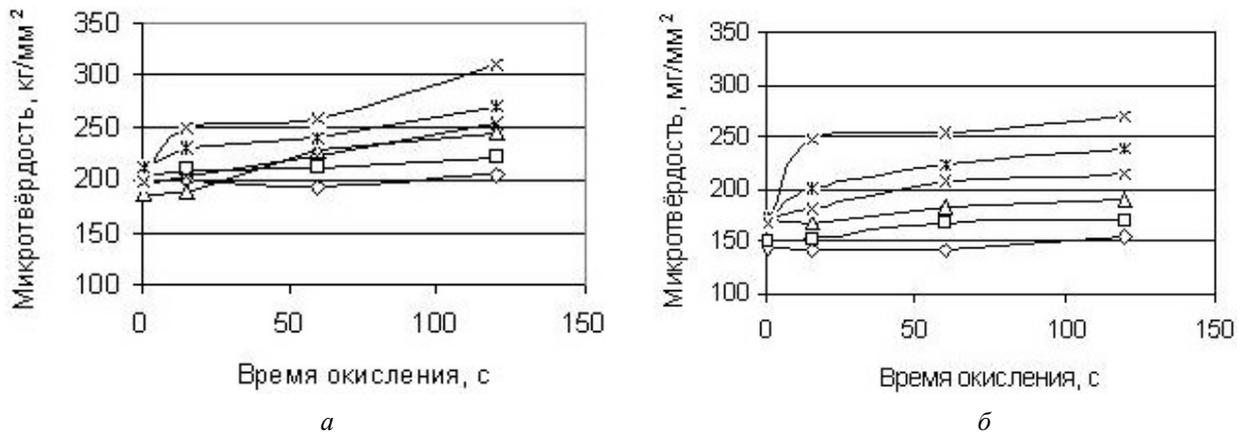


Рис. 2. Зависимость микротвёрдости труб из сплавов Zr1Nb (а) и Э110 (б) в средней части сечения от температуры и длительности окисления в парах воды; а: \diamond – 660 °С, \square – 770 °С, Δ – 900 °С, \times – 1020 °С, \blacktriangle – 1100 °С, \blacksquare – 1200 °С; б: \diamond – 660 °С, \square – 770 °С, Δ – 900 °С, \times – 1020 °С, \blacktriangle – 1100 °С, \blacksquare – 1200 °С

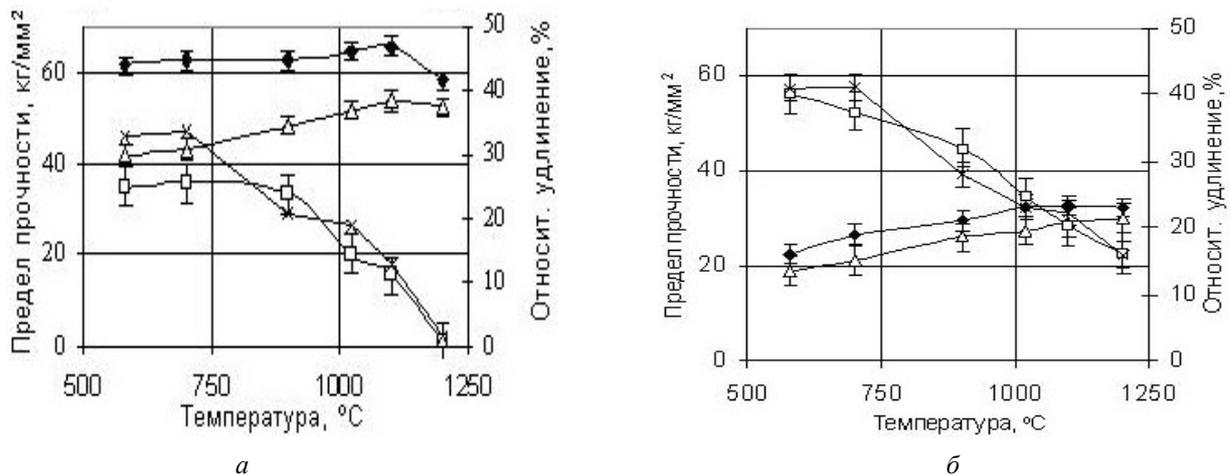


Рис. 3. Зависимость механических свойств труб из сплавов Zr1Nb и Э110 от температуры после выдержки в парах воды в течение 1 с. Механические испытания проведены при комнатной температуре (20 °С) (а) и при 350 °С (б); а, б: \diamond – Zr1Nb, предел прочности; Δ – Э110, предел прочности; \square – Zr1Nb, относительное удлинение; \times – Э110 относительное удлинение

Пластичность материала труб сохраняется на уровне исходной только при температурах окисле-

ния 660 и 700 °С; далее наблюдается монотонное её снижение как при комнатной температуре механи-

ческих испытаний, так и при 350 °С. Видно, что после окисления при 1100 °С относительное удлинение составляло приблизительно 10 %, а после выдержки при 1200 °С приблизилось к нулю. При температуре механических испытаний 350 °С относительное

удлинение у сплавов снизилось до 15 % после окисления при 1200 °С. Точность измерений предела прочности и относительного удлинения при механических испытаниях не ниже ±5 % от измеряемых величин.

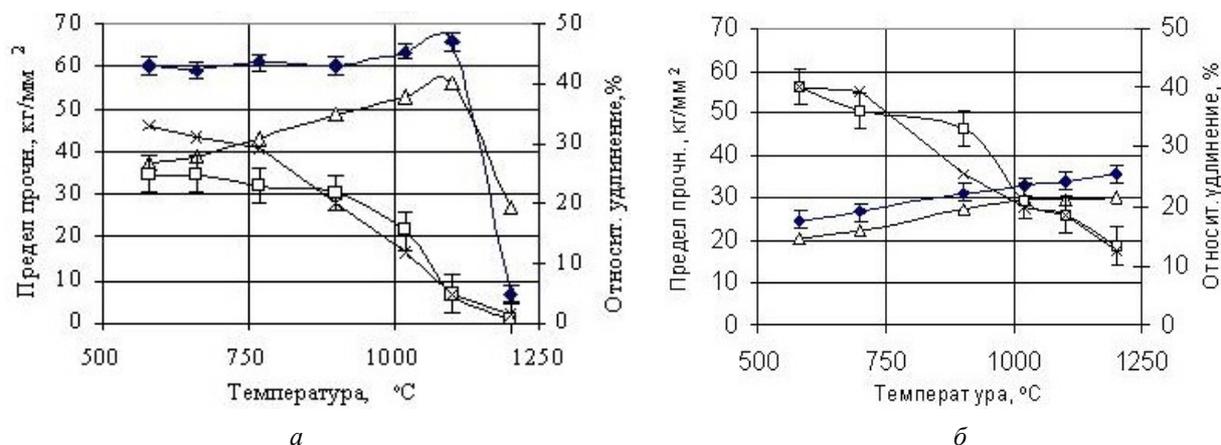


Рис. 4. Зависимость механических свойств труб из сплавов Zr1Nb и Э110 при 20 °С (а) и 350 °С (б) от температуры после выдержки в парах воды в течение 15 с; а, б: ♦ – Zr1Nb, предел прочности; Δ – Э110, предел прочности; □ – Zr1Nb, относительное удлинение; × – Э110 относительное удлинение

Анализ данных испытаний материала труб в парах воды в течение 3 с показывает сходство в изменениях прочностных и пластических свойств в зависимости от температур окисления с результатами испытаний после выдержки в течение 1 с: также увеличивается прочность образцов труб при окислении до 1100 °С и снижается в интервале температур от 1100 до 1200 °С.

Пластичность сплавов постепенно уменьшается после окисления при температурах, начиная с 700 до 1100 °С (до 5...10 % – испытания при 20 °С и до 10...15 % – при механических испытаниях при 350 °С).

После окисления в течение 15 с (см. рис. 4) при температурах в интервале от 660 до 1100 °С прочностные характеристики, измеренные при комнатной температуре, слабо возрастают с температурой испытаний, а свыше 1100 °С отмечено резкое их снижение. Относительное удлинение же постепенно уменьшалось: до 0,7 % у сплава Zr1Nb и до 4,7 % у сплава Э110 после испытаний при 1100 °С, и до 0 у Zr1Nb и 1,3 % у сплава Э110 при 1200 °С.

Как видим, на графиках ход зависимостей относительного удлинения от температуры у обоих исследуемых сплавов, с учётом погрешностей измерений, очень сходен.

При температуре механических испытаний 350 °С прочность обоих сплавов возрастала во всём диапазоне испытаний (660...1200 °С), а относительное удлинение снижалось, но не уменьшилось менее 12 % при 1200 °С для обоих сплавов. Отмечены некоторые колебания значений в ходе зависимостей прочностных и пластических свойств от температуры окисления, однако в настоящий момент мы отно-

сим их за счёт недостаточной статистики испытанных образцов (2...3 шт.).

Анализ хода зависимости механических свойств (температура механических испытаний 20 °С) сплавов от температур окисления в течение 60 с показывает сходство хода зависимостей с аналогичными при более коротких временах выдержки, за исключением того, что резкий спад прочностных характеристик начинается после выдержек при 1020 °С. После испытаний при 1100 °С относительное удлинение у сплава Э110 уменьшилось до 6 и до 1,7 % у сплава Zr1Nb. После испытаний при 1200 °С пластичность была нулевой у обоих сплавов.

После механических испытаний при 350 °С предел прочности сплавов Zr1Nb и Э110 увеличивается с повышением температуры испытаний, относительное удлинение уменьшается, но не снижается ниже 8...11 % (при 1200 °С).

Ход всех зависимостей механических свойств от температуры при выдержке в паре в течение 120 с очень похож на ход кривых после окисления в течение 15 с. Также начинает резко уменьшаться прочность после выдержки при температуре 1020 °С, и предел прочности приближается к нулевым значениям после испытаний при 1100...1200 °С.

Зависимости механических свойств при температуре испытаний 350 °С от температуры окисления в течение 120 с тоже сходны с поведением зависимостей после окисления в течение 60 с. Относительное удлинение при 350 °С составило 12 % для Zr1Nb и 16 % для Э110.

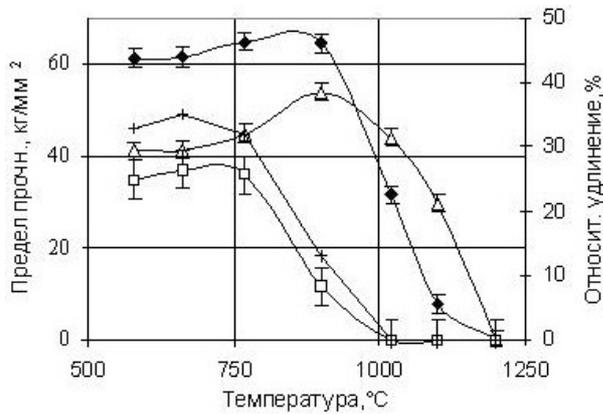
Представляет интерес изучить механические характеристики сплавов Zr1Nb и Э110 после окисления в течение заведомо длительного времени вы-

держки при температурах проектных аварий – до 240 с (см. рис. 5).

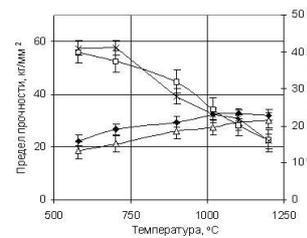
Исследования хода графиков показали, что общие закономерности пластических и прочностных свойств сходны с закономерностями, наблюдаемыми после выдержки в окислительной среде в течение более коротких времён окисления, за исключением того, что снижение прочности и пластичности

до нулевых значений начинает происходить при более низких температурах (900...950 °С).

При температуре механических испытаний 350 °С прочность всё время возрастает с температурой окисления, а пластичность постепенно уменьшается, но относительное удлинение не снижается ниже 12...16 % для обоих сплавов после испытаний при температуре 1200 °С в течение 240 с.



а



б

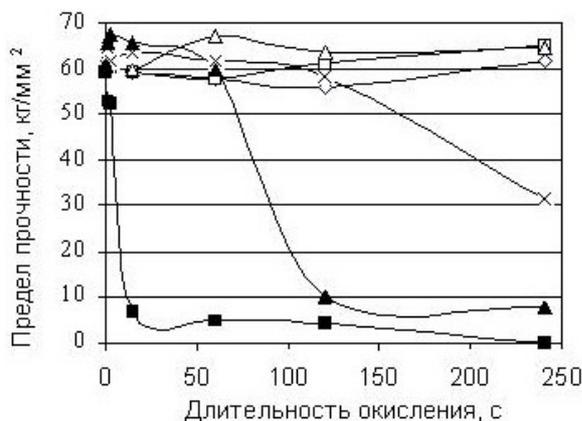
Рис. 5. Зависимость механических свойств при 20 °С (а) и 350 °С (б) труб из сплавов Zr1Nb и Э110 после выдержки в парах воды от температуры (660...1200 °С) в течение 240 с; а, б: ◆ – Zr1Nb, предел прочности; Δ – Э110, предел прочности; □ – Zr1Nb, относительное удлинение; | – Э110 относительное удлинение

Зависимость механических свойств труб из сплавов Zr1Nb и Э110 от времени окисления

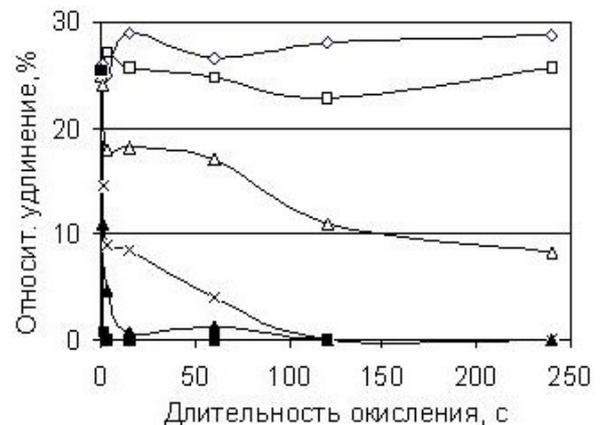
Мы показали ход зависимости механических свойств труб из сплавов Zr1Nb и Э110 от температуры выдержки в окислительной среде паров воды. Представляет интерес исследовать зависимости данных характеристик сплавов от времени окисления. Эти зависимости покажут, с какого времени и температуры окисления свойства оболочек станут ухуд-

шаться до такой степени, что прочностные и пластические характеристики становятся чрезвычайно низкими.

Данные испытаний и определения механических свойств в зависимости от времени нахождения в паровой среде при температурах проектных аварийных ситуаций показывают, что при температурах 660, 770 и 900 °С прочность материалов находится на уровне исходных данных, а пластичность не снижается ниже 10 % (см. рис. 6, 7).



а



б

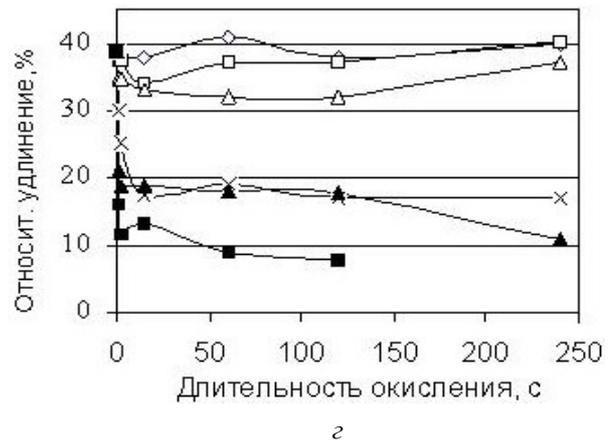
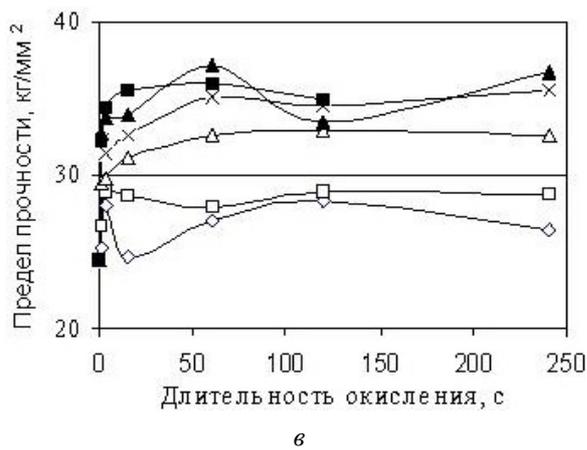


Рис. 6. Зависимость механических свойств труб из сплавов Zr1Nb от времени окисления в парах воды при высоких температурах. Механические испытания проведены при 20 °С (а,б) и 350 °С (в,г); а, б, в, г: \diamond – 660 °С; \square – 770 °С; Δ – 900 °С; \times – 1020 °С; \blacktriangle – 1100 °С; \blacksquare – 1200 °С

Температуры в диапазоне 950...1050 °С, по видимому, являются температурами ограниченной стойкости по времени нагрева для твэлов с оболочками из исследуемых сплавов.

При нагреве до температуры 1100 °С относительное удлинение исследуемых сплавов снижается до нескольких процентов.

Нагрев до 1200 °С приводит к охрупчиванию сплавов после их выдержки от 1 до 240 с.

Механические испытания при температуре 350 °С показали, что относительное удлинение труб не уменьшается более чем на 10...12 % во всём диапазоне исследований по температуре и времени выдержки, что говорит о запасе пластичности у сплавов для такого случая нагрева.

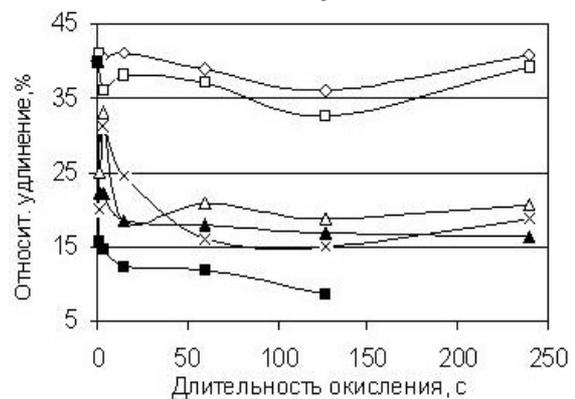
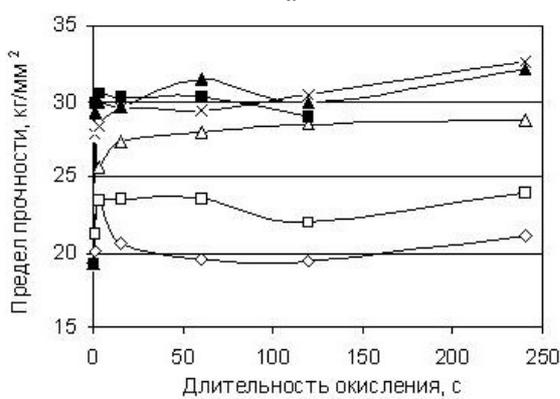
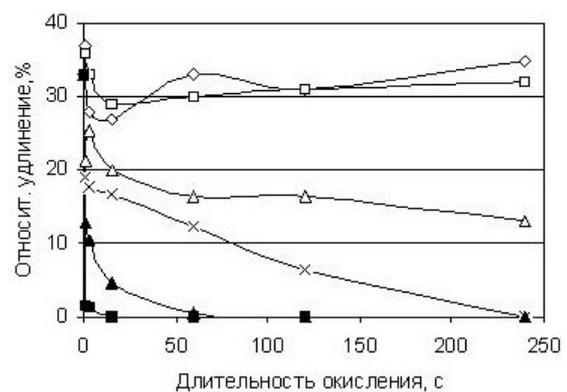
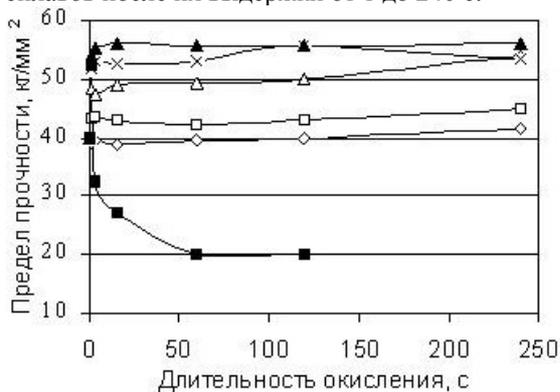


Рис. 7. Зависимость механических свойств труб из сплава Э110 от времени окисления в парах воды при температурах в интервале 660...1200 °С. Механические испытания проведены при 20 °С (а, б) и 350 °С (в, г); а, б, в, г: \diamond – 660 °С; \square – 770 °С; Δ – 900 °С; \times – 1020 °С; \blacktriangle – 1100 °С; \blacksquare – 1200 °С

Зависимость механических свойств труб из сплавов Zr1Nb и Э110 от температуры отжига в вакууме

С целью исключения влияния окислительной среды на механические свойства труб были проведены отжиги в вакууме при аналогичных температурах в течение 15, 120 и 240 с. На рис. 8 приведены значения прочностных и пластических характеристики сплавов Zr1Nb и Э110 после отжигов в вакууме только в течение 240 с. Механические свойства (предел прочности и относительное удлинение) этих сплавов после отжигов в вакууме в течение 15 и 120 с показали, в основном, сходство их значений со значениями после отжигов в течение 240 с.

Оказалось, что механические свойства остаются или на исходном уровне или незначительно изменяются при комнатной температуре (20 °С). Пластичность также мало изменяется после отжига в течение

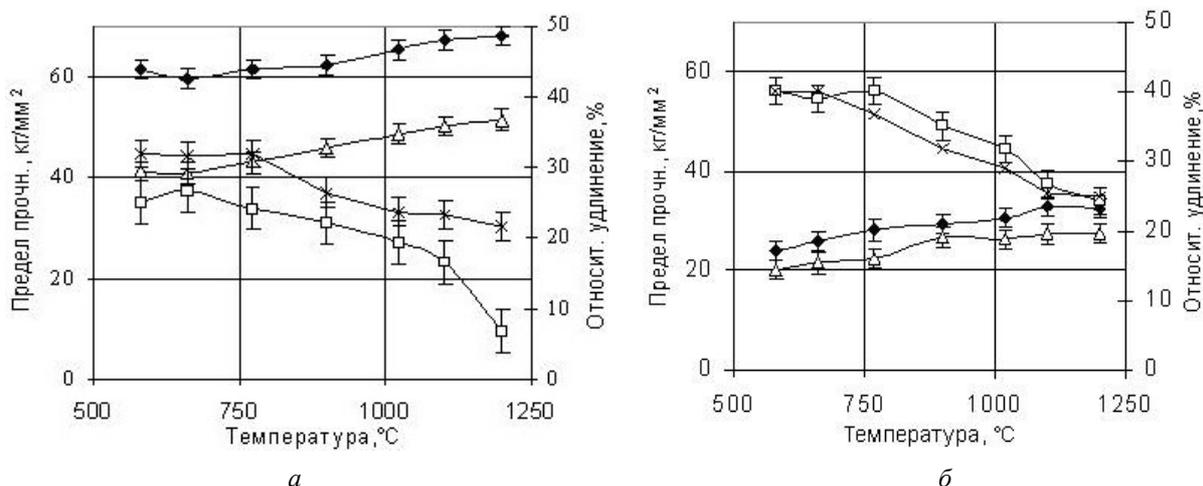


Рис. 8. Зависимость механических свойств труб из сплавов Zr1Nb и Э110 при 20 °С (а) и 350 °С (б) от температуры отжига в вакууме в течение 240 с в интервале 660...1200 °С; а, б: \blacklozenge – Zr1Nb, предел прочности; Δ – Э110, предел прочности; \square – Zr1Nb, относительное удлинение; \times – Э110 относительное удлинение

Причину некоторого снижения пластичности после выдержки в вакууме можно отнести за счёт укрупнения зёрен и образования после охлаждения в сплавах α' -фазы.

А вот процесс окисления и образования оксидных плёнок, насыщение сплава под плёнкой кислородом, образование малопластичной обогащённой кислородом α -фазы, преобразованной из высокотемпературной β -фазы – эти явления, по-видимому, играют основную роль в снижении пластичности и появлении хрупкости после выдержки образцов труб в паре при высоких температурах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что при нагреве образцов сплавов Zr1Nb и Э110 до температур 660 и 770 °С в течение 1...120 с изменение размеров зёрен практически не происходит. При температурах окисления 1020 и 1200 °С (для Zr1Nb) и при температурах 900, 1020 и

ни времени до 240 с при температурах до 770...900 °С, а затем медленно снижается с повышением температуры отжига. Самая низкая величина относительного удлинения наблюдалась у сплава Zr1Nb после отжига при температуре 1200 °С, когда относительное удлинение при комнатной температуре механических испытаний составило 7 %. При этом у сплава Э110 относительное удлинение при тех же условиях было выше и составило величину более 20 %. Признаков охрупчивания у обоих сплавов не наблюдалось.

Сравнение результатов механических испытаний сплавов Zr1Nb и Э110 после окисления в паре и после отжига в вакууме показало, что снижение пластичности сплавов происходит сходным образом, но после отжига в вакууме снижение пластичности невелико и не наблюдалось склонности к охрупчиванию.

1200 °С (для сплава Э110) происходит быстрый рост зёрен, который после 15 с выдержки замедляется и при дальнейшем времени испытаний до 120 с практически не изменяется.

2. Микротвёрдость материалов в центральной части сечения трубных образцов остаётся на уровне значений в исходном состоянии после окисления при температурах 660 и 770 °С. В то же время нагрев до температур 900...1200 °С и выдержка при этих температурах в течение 1...3 с и более приводят к заметному повышению микротвёрдости сплавов, что связывается в основном с наискислороживанием образцов сплавов.

3. Механические испытания труб из сплавов Zr1Nb и Э110 после нагрева в печи сопротивления со скоростью 15...20 °С/с и охлаждения со скоростью 20 °С/с показали следующее:

– значения предела прочности при температуре механических испытаний 20 °С у сплавов Zr1Nb и

Э110 после окисления в течение 1, 3, 15, 60 и 120 с мало изменяются при температурах отжига 660 и 770 °С, возрастают при температурах 900 и 1020 °С и резко уменьшаются после окисления при 1100 и 1200 °С;

– при температуре механических испытаний 350 °С прочностные характеристики постепенно возрастают с температурой окисления, при этом закономерность увеличения предела прочности приблизительно пропорциональна температуре и аналогична для образцов труб из сплавов Zr1Nb и Э110;

– значения величин относительного удлинения (механические испытания при 20 °С) в зависимости от времени окисления в паре образцов труб начинают снижаться по сравнению с исходными величинами после окисления в течение 1...3 с при температуре 770 °С и приближаются до 5 % у образцов сплава Zr1Nb и до 10 % у сплава Э110 при 1100 °С. При 1200 °С даже при таком коротком времени выдержки (1...3 с) значения относительного удлинения приближаются к нулю – наблюдается хрупкое разрушение образцов;

– механические испытания при 350 °С показали сохранение пластичности для обоих типов образцов твэльных труб при всех температурах (660...1200 °С) и временах выдержки (1...120 с). Относительное удлинение при самой высокой температуре окисления и длительности выдержки (120 с) составляет 6...12 %. Отмечено, что в целом при изученных параметрах исследований пластичность образцов труб из сплава Э110 несколько выше, чем у образцов труб из сплава Zr1Nb.

4. Прочностные свойства (20 °С) образцов труб из сплавов Zr1Nb и Э110 после окисления в паре в течение 240 с при температурах до 900...1020 °С сохраняются на уровне исходных значений, а затем резко снижаются. Пластичность начинает ухудшаться после выдержки при температуре 770 °С и постепенно снижается до состояния охрупчивания после окисления при температурах выше 1020 °С. Прочность образцов труб при испытаниях при 350 °С по сравнению с исходными значениями возрастает после окисления во всем диапазоне температур окис-

ления. Относительное удлинение снижается, но уменьшение составляет менее чем 10 %.

5. Отжиги образцов труб сплава Zr1Nb и Э110 в вакууме при температурах 660...1200 °С в течение 15 и 120 с показали сохранение и некоторое повышение предела прочности во всем диапазоне исследуемых температур как при комнатной температуре механических испытаний, так и при температуре испытаний 350 °С. Относительное удлинение образцов труб при всех режимах отжига уменьшалось с температурой, но не снизилось менее 15...20 %.

Охрупчивания не наблюдалось, что подчеркивает основную роль наводороживания в поверхностных слоях образцов в изменении механических свойств и возникновении состояния хрупкости материала труб для твэлов при перегреве до температур 1100...1200 °С в процессе окисления в среде водяного пара.

6. Таким образом, нагрев труб из сплава Zr1Nb и Э110 до 900...1000 °С в атмосфере водяного пара в течение времени до 120 с и охлаждения до комнатной температуры с большой вероятностью не приводят к снижению свойств до состояния охрупчивания после охлаждения, которое может наблюдаться после нагрева до температур 1100 °С и выше.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.С. Красноруцкий, И.А. Петельгузов, В.М. Грицина и др. Исследование характеристик оболочек макетов твэлов из сплава Zr1Nb после высокотемпературных испытаний в водяном паре // *Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спеціальний випуск №4 Матеріали конференції: «Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів»*. Львів, 2004.
2. И.А. Петельгузов, Н.И. Ищенко, Е.А. Слабоспицкая, М.В. Мухин. Влияние высокотемпературного отжига в водяном паре на структуру оболочек твэлов из сплава циркония с 1% Nb // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2005, №5, с. 115–120.

ВПЛИВ ТРИВАЛОСТІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕННЯ У ВОДЯНОМУ ПАРИ НА СТРУКТУРУ Й МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕЛЬНИХ ТРУБ ЗІ СПЛАВУ Zr1Nb

І.А. Петельгузов, Н.І. Іщенко, О.О. Слабоспицькая, М.В. Мухін

Представлені результати досліджень впливу високотемпературного окислювання в атмосфері водяного пару при температурах у діапазоні 660...1200 °С і при витримці протягом часу від 1 до 240 с на структурні й механічні властивості труб-оболочок для твелів із кальцієрмічного сплаву Zr+1%Nb (Zr1Nb), виготовленого в Україні. Оцінено область стійкості властивостей оболонок і початку деградації матеріалу.

INFLUENCE OF DURATION HIGH TEMPERATURE OXIDATIONS IN VAPOUR ON STRUCTURE AND MECHANICAL CHARACTERISTICS FUEL PIPES FROM ALLOY Zr1Nb

I.A. Petelguzov, N.I. Ischenko, E.A. Slabospitskaja, M.V. Mukhin

Results of the studies of the influence high temperature oxidations in atmosphere water vapour at the temperature within the range of 660...1200 °С and at endurance for time from 1 before 240 s on structured and mechanical characteristics of the pipes-shell for fuels from calcium-thermal Zr+1%Nb (Zr1Nb) alloy made in Ukraine are presented. It is evaluated the level of stability characteristics material of fuel tubes and temperature begin degradation of the material.