

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА В ВОДЯНОМ ПАРЕ НА СВОЙСТВА ОБОЛОЧЕК ПЭЛ

Н.Н. Белаш, И.А. Петельгузов, Л.С. Ожигов, В.И. Савченко, А.В. Куштым
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

Представлены результаты исследований влияния кратковременного нагрева в водяном паре до температур в интервале 600...1200 °С на механические свойства и устойчивость формы оболочек макетов пэлов из стали X16H15M3B и сплава Zr-1%Nb (Э110). Установлены факторы, оказывающие доминирующее влияние на механические свойства оболочек, изготовленных из указанных материалов. Исследовано влияние наличия порошка В₄С на механические свойства оболочек в исходном состоянии и после нагрева до разных температур. Обсуждены вероятные механизмы, описывающие особенности деформации и разрушения при механических испытаниях и отвечающие за изменение механических свойств исследуемых материалов.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из направлений повышения надежности при длительной работе поглощающих элементов ПС СУЗ водо-водяных реакторов является применение оболочек, обладающих повышенной радиационной и коррозионной стойкостями, совместимых с поглощающими материалами и материалами направляющих каналов тепловыделяющих сборок при высоких температурах.

В первых поколениях водо-водяных реакторов в качестве материала оболочек пэлов использовались нержавеющие стали аустенитного класса 06X18H10T (ВВЭР) и SS304 (PWR) [1]. В настоящее время осуществляется переход на оболочки из более радиационно-стойких материалов: в пэлах для ПС СУЗ реактора ВВЭР-1000 оболочки изготавливаются из сплава Ni-42 вес.% Cr-1 вес.% Mo (XHM-1), а в реакторах PWR используется сталь SS316 [1-3]. Предлагаются конструкции пэлов с оболочками из сплавов на основе циркония, гафния и на основе сплавов циркония с гафнием [4-6].

Оболочки из нержавеющих сталей, никель-хромовых и циркониевых сплавов хорошо освоены промышленностью и в достаточной степени подтвердили свою работоспособность в энергетических реакторах при эксплуатации на стационарных режимах.

В меньшей степени изучены характеристики оболочек пэлов из указанных материалов после аварийных ситуаций, что очень важно для прогнозирования остаточного ресурса ПС СУЗ при последующем демонтаже и транспортировке.

Основными факторами, влияющими на свойства материала оболочки и устойчивость пэлов при аварии с потерей теплоносителя, являются: окисление внешней поверхности оболочки при высокой температуре в пароводяной среде, образование диффузионных слоев на внутренней поверхности оболочки в результате взаимодействия с материалом поглотителя нейтронов, наличие внутреннего давления гелия, изменение структурно-фазового состояния в процессе высокотемпературного нагрева и последующего охлаждения и т.д.

Представляет интерес сравнение изменений в условиях аварии геометрических размеров и механиче-

ских свойств оболочек пэлов, изготовленных из нержавеющих сталей с оболочками, выполненными из сплавов на основе циркония, поскольку каждой из них свойственны свои преимущества и недостатки.

Например, для оболочек из нержавеющих сталей характерными являются сравнительно высокие значения механических свойств при высоких температурах, но, с другой стороны, они имеют низкую совместимость с поглощающими материалами и элементами конструкции тепловыделяющих сборок, изготовленными из циркониевых сплавов. При использовании в качестве материала оболочки пэлов сплавов на основе циркония отсутствует значительное взаимодействие между оболочкой и большинством применяемых поглощающих материалов вплоть до температуры 1500 °С. Однако сплавам циркония присуще резкое снижение предела текучести при температурах ≥ 850 °С и значительное изменение структурно-фазового состояния после нагрева до температур выше полиморфного перехода и последующего охлаждения.

Целью настоящей работы являлось исследование формоизменения макетов пэлов и механических свойств оболочек, изготовленных из стали X16H15M3B и сплава Э110 (Zr-1вес.%Nb), после кратковременных нагревов в среде водяного пара до температур в интервале 600...1200 °С.

1. ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКИ

Исследования и механические испытания проводили на макетах пэлов двух вариантов, спроектированных с учетом требований ГОСТ 10006-80 (ИСО 6892-84). Их конструкция приведена на рис. 1. Макеты первого варианта (см. рис. 1,а) включают: оболочку 1, загерметизированную концевыми деталями 2, на которых выполнена резьба для крепления в захватах разрывной машины. Внутренний объем оболочки заполнен порошком карбида бора 3. Он отделен от концевой детали газопроницаемой вставкой 4. Между вставкой и концевой деталью находится свободное пространство 5, имитирующее газосборник. Макеты второго варианта (см. рис. 1,б) представляют собой оболочку (без карбида бора) с приваренными к ней концевыми деталями с резьбой.

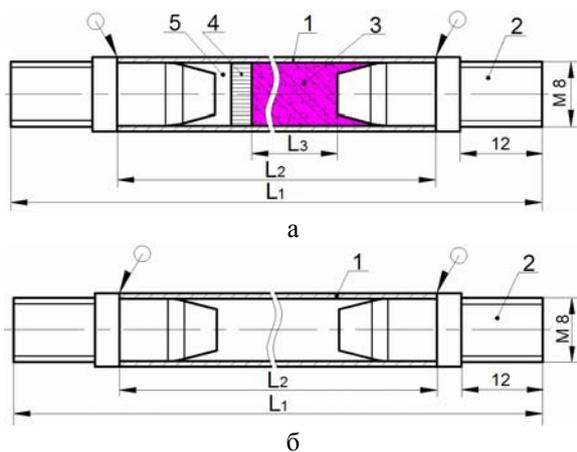
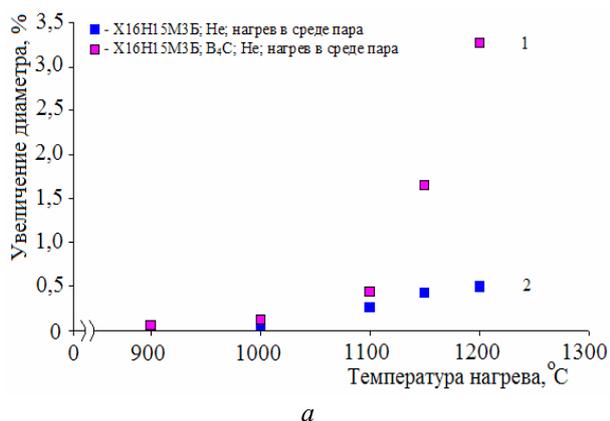


Рис. 1. Макеты пэлов для исследований и механических испытаний: а - первый вариант; б - второй вариант; 1 - оболочка, 2 - концевые детали; 3 - карбид бора; 4 - газопроницаемая вставка; 5 - газосборник

Все макеты пэлов перед герметизацией заполнены гелием до давления $\sim 0,15$ МПа.

В качестве оболочек макетов пэлов использовали стандартные трубы из стали X16H15M3B (аналог стали SS316) диаметром $8,2 \times 0,6$ мм и циркониевого сплава Э110 диаметром $9,1 \times 0,65$ мм. Макеты пэлов имели следующие размеры: а) при использовании стальной оболочки: $L_1=90$ мм, $L_2=60$ мм, $L_3=35$ мм; б) при использовании оболочки из Э110: $L_1=100$ мм, $L_2=70$ мм, $L_3=45$ мм (см. рис. 1). В макетах, где использовалась оболочка из стали X16H15M3B, газопроницаемую вставку выполняли из никелевой сетки, а в макетах с оболочкой из сплава Э110 – из циркония.

На макетах первого варианта изучали свойства оболочек на участке активной зоны пэла, заполненной V_4C , а на макетах второго варианта на участке, где находится газосборник.



Исследования включали измерение геометрических размеров макетов пэлов, выполненных с использованием различных оболочек, и исследование механических свойств оболочек в исходном состоянии и после нагрева в среде водяного пара, имитирующего вероятные аварийные ситуации.

Механические испытания образцов выполняли на установке типа 1246P-2/2300 ГОСТ 7855-84 при комнатной температуре и скорости растяжения 1 мм/мин.

Нагрев макетов пэлов проводили по методике, отработанной ранее [5]. На начальной стадии испытаний макет помещали в зону кварцевой трубы, нагретой до температуры 350 °C, продуваемой водяным паром. По истечении 10^3 с образец перемещали в зону с перегретым паром, в которой поддерживалась заданная температура. Ее значения лежали в интервале $600 \dots 1200$ °C. Средняя скорость нагрева равнялась ~ 13 °C/с, выдержка при заданной температуре составляла ~ 120 с. После нагрева макеты перемещали обратно в зону с температурой 350 °C, где происходило их охлаждение.

Кроме того, с целью разделения влияния на механические свойства процесса окисления и изменений структурно-фазового состояния (в результате термообработки в процессе указанных испытаний) макеты пэлов с оболочкой из Э110 нагревали в потоке аргона при аналогичных режимах.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Изменение геометрических размеров

Нагрев в среде водяного пара приводил к увеличению диаметра оболочек макетов пэлов всех вариантов в результате воздействия совокупности различных факторов (рис. 2).

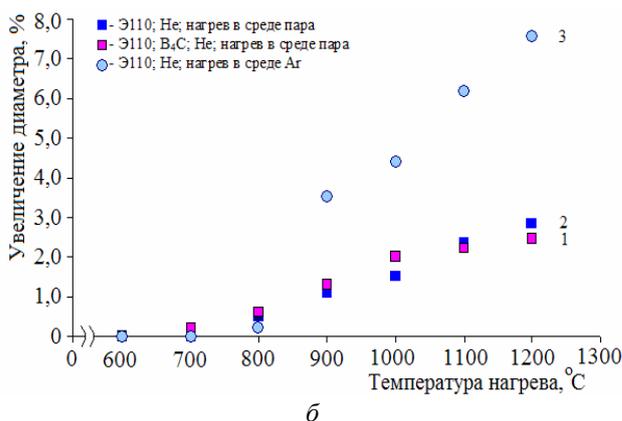


Рис. 2. Увеличение диаметра в средней части макетов пэлов в зависимости от температуры нагрева: а - оболочка выполнена из стали X16H15M3B; б - оболочка выполнена из сплава Э110; 1 - оболочка заполнена V_4C , нагрев в среде водяного пара; 2 - оболочка без V_4C , нагрев в среде водяного пара; 3 - оболочка без V_4C , нагрев в аргоне

Изменение геометрических размеров, в первую очередь, обусловлено образованием на поверхности оболочек оксидной пленки. После нагрева в среде водяного пара до температуры 1000 °C на оболочках макетов пэлов, изготовленных из стали X16H15M3B,

формируется матовая оксидная пленка светлорыжевого цвета, прочно сцепленная с поверхностью. Ее толщина не превышает 10 мкм. Повышение температуры нагрева до 1100 °C приводит к образованию на поверхности оболочек следов светло-

серой рыхлой оксидной пленки, которая легко отслаивается. Нагрев в интервале температур 1100...1200 °С приводит к увеличению толщины оксидной пленки до 20...40 мкм. В результате обработки поверхности оболочек шлифовальной бумагой белая оксидная пленка легко удаляется. При этом на всех макетах пэлов, не содержащих V_4C , диаметр оболочки приближался к значениям в исходном состоянии. Следовательно, в этом случае основным фактором, влияющим на размер оболочки, является образование оксидной пленки на ее поверхности. На макетах пэлов, заполненных порошком V_4C , после нагрева при температурах, превышающих 1100 °С, фиксировали увеличение значений диаметра даже после снятия оксидной пленки. С ростом температуры нагрева диаметр увеличивался. После нагрева до 1200 °С его прирост составил 270 мкм, т. е. около 3,3 % от его исходного значения (см. рис. 2,а). При этом наблюдались места локального проплавления оболочки. Согласно результатам металлографических исследований [5], увеличение диаметра оболочек из стали Х16Н15М3Б, заполненных V_4C , обусловлено интенсивным ростом диффузионных слоев на границе раздела этих материалов.

После нагрева макетов пэлов с оболочкой из сплава Э110 в среде водяного пара в интервале температур 600...1200 °С не обнаружено существенной разницы в изменении диаметра оболочек в зависимости от наличия внутри порошка V_4C (см. рис. 2,б, графики 1 и 2). Нагрев до температур ≤ 800 °С приводит к образованию на поверхности оболочек макетов пэлов оксидной пленки черного цвета, прочно сцепленной с поверхностью. Толщина пленки составляет 10...20 мкм. Начиная с температуры 900 °С, в результате взаимодействия с водяным паром образуется белая серебристая оксидная пленка, которая легко отслаивается от поверхности. Под этой пленкой находится оксидная пленка черного цвета. Измерения диаметра оболочки до и после удаления оксидной пленки белого цвета, а также измерения толщины отслоившихся кусков пленки показали, что ее толщина составляет ≤ 30 мкм. Тем не менее, увеличение диаметра оболочки после нагрева до температур от 900 до 1200 °С равно 70...250 мкм (1,0...2,8 %), что дает основание предполагать о наличии деформации оболочки под действием давления гелия (см. рис. 2 б).

Результаты измерений диаметра оболочки из сплава Э110 после нагрева макетов пэлов в среде аргона, когда отсутствует взаимодействие с кислородом, подтвердили значительную радиальную деформацию оболочки после нагрева до температур ≥ 900 °С (см. рис. 2,б, график 3). При этом разность значений диаметра после нагрева в аргоне и в исходном состоянии превышает значения после нагрева в среде водяного пара в 2,5...3,0 раза и составляет 320 мкм при 900 °С и 690 мкм при 1200 °С (соответственно 3,5 и 7,5 %).

Полученные данные свидетельствуют о том, что в результате диффузионного взаимодействия кислорода с оболочками из сплава Э110 при нагреве в среде водяного пара происходит их упрочнение, приводящее к уменьшению окружной деформации.

2.2. Результаты механических испытаний

Результаты кратковременных механических испытаний при комнатной температуре макетов пэлов с оболочками из стали Х16Н15М3Б и сплава Э110 после их нагрева до разных температур в среде водяного пара приведены на рис. 3.

Согласно полученным данным, значения временного сопротивления (σ_B) и предела текучести ($\sigma_{0,2}$) оболочек макетов из стали Х16Н15М3Б, независимо от того заполнены ли они порошком V_4C или нет, имеют близкие значения. После нагрева до температуры 1150 °С σ_B и $\sigma_{0,2}$ равняются соответственно 540...560 и 250...270 МПа и в незначительной степени отличаются от аналогичных характеристик оболочки в исходном состоянии (см. рис. 3,а). Повышение температуры нагрева макетов пэлов, не содержащих V_4C , с 1150 до 1200 °С снижает значения σ_B на ~13 %, а $\sigma_{0,2}$ на ~30 % по сравнению с исходными значениями, что может быть связано со структурными изменениями материала оболочки при термообработке. Механические испытания оболочек, заполненных V_4C , после нагрева до температуры 1200 °С не проводили из-за наличия участков полного проплавления стенок. Наиболее чувствительной характеристикой к взаимодействию порошка V_4C с материалом оболочки при нагреве является относительное удлинение δ . Для оболочек макетов пэлов, не заполненных V_4C , значения δ практически не зависят от температуры нагрева и составляют 46...49 %. Испытания оболочек макетов, содержащих V_4C , свидетельствуют о заметном снижении δ после нагрева до температур выше 900 °С. В частности, нагрев до температур в интервале 900...1150 °С приводит к снижению значений δ с 46 до 21 % (см. рис. 3,б).

Характерной особенностью, выявленной в процессе испытаний макетов пэлов с оболочкой из сплава Э110, является отличие значений σ_B и δ для оболочек, заполненных и не заполненных порошком V_4C (см. рис. 3,в,г). Они соответственно составляют после испытаний в исходном состоянии 384 МПа и 31 % для оболочек, не заполненных V_4C , 457 МПа и 17 % для оболочек, содержащих V_4C . Указанное различие в значениях σ_B и δ сохраняется и после нагрева в среде водяного пара до температур от 600 до 800 °С. Значения $\sigma_{0,2}$ для оболочек указанных вариантов макетов пэлов практически не отличаются, т. е. не зависят от наличия V_4C (см. рис. 3,в). Нагрев до температур ≥ 900 °С приводит к резкому увеличению σ_B и $\sigma_{0,2}$ и снижению δ . При этом наблюдается выравнивание значений σ_B и δ для оболочек обоих вариантов макетов пэлов.

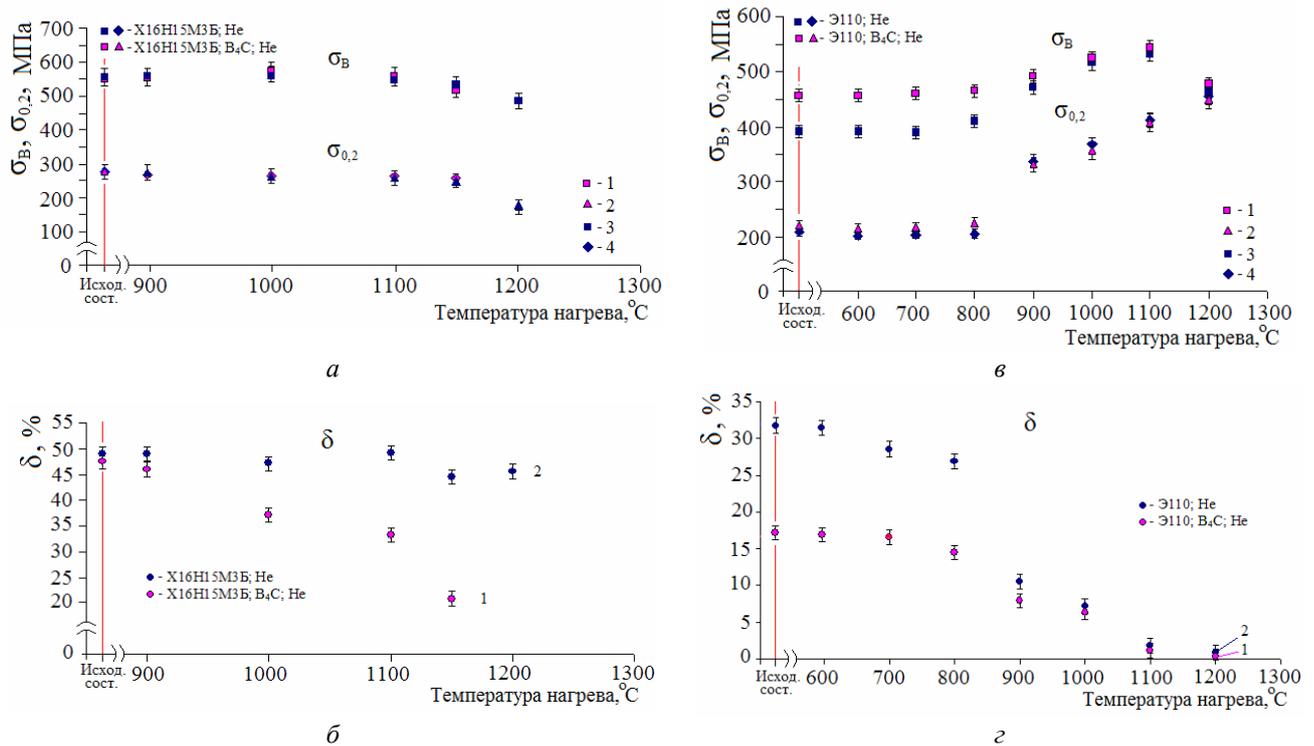


Рис. 3. Зависимость механических свойств оболочек макетов пэлов, измеренных при температуре 20 °С, от температуры нагрева в среде водяного пара: а, в - σ_B и $\sigma_{0,2}$ оболочек из стали X16H15M3B (а) и сплава Э110 (в); 1, 2 - оболочки заполнены V_4C , 3, 4 - оболочки без V_4C ; б, г - δ оболочек из X16H15M3B (б) и Э110 (г): 1 - оболочки с V_4C , 2 - оболочки без V_4C

Повышение температуры нагрева от 800 до 1200 °С приводит к увеличению σ_B до максимального значения - 545 МПа, а $\sigma_{0,2}$ до - 455 МПа.

Значения δ при этом уменьшаются до 1...2 % (см. рис. 3,г). Из сравнения результатов механических испытаний с оболочкой из Э110 после нагрева в аргоне (рис. 4) и в среде водяного пара (см. рис. 3,в,г) следует, что в обоих случаях после нагрева до температур в интервале 600...800 °С значения σ_B , $\sigma_{0,2}$ и δ изменяются незначительно по отношению к аналогичным характеристикам образцов в исходном состоянии.

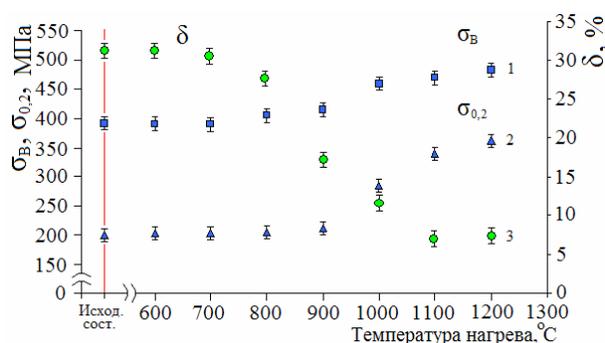


Рис. 4. Зависимость механических свойств оболочки из сплава Э110 от температуры нагрева в среде аргона: 1 - временное сопротивление (σ_B); 2 - предел текучести ($\sigma_{0,2}$); 3 - относительное удлинение (δ)

Повышение температуры нагрева до 900 °С и выше приводит к заметному изменению механических свойств.

Однако после нагрева макетов пэлов в среде аргона изменения механических свойств выражены в меньшей степени, что, вероятно, обусловлено отсут-

ствием взаимодействия оболочки с кислородом. В этих экспериментах зафиксировано повышение σ_B и $\sigma_{0,2}$ до 483 и 363 МПа, что ниже значений, полученных после нагрева в среде водяного пара соответственно на ~10 и ~25 %. Значения δ после нагрева в среде аргона в интервале температур 1100...1200 °С составляют 6,5...8,2 % (см. рис. 4).

Исследования характера деформации оболочек и разрушения макетов пэлов в результате механических испытаний показали, что они все разрушаются по оболочке (рис. 5).

При использовании в макетах оболочки из стали X16H15M3B наблюдается вязкий характер разрушения. Наличие внутри оболочек порошка V_4C не изменяет характера деформации и разрушения.

В макетах пэлов с оболочкой из сплава Э110 наблюдаются отличия характера их деформации в зависимости от наличия V_4C внутри и температуры нагрева в водяном паре. В исходном состоянии и после нагрева до температур ≤ 800 °С оболочки, не заполненные V_4C , деформируются равномерно с образованием шейки в месте разрыва (см. рис. 5,а). Деформация оболочек, заполненных V_4C , происходит одновременно в нескольких локальных местах, например, в районе газосборника, возле вставки, фиксирующей столб порошка V_4C , в районе концевой детали (см. рис. 5,б), т. е., вероятно, в тех местах, где плотность порошка несколько ниже, чем на остальных участках. После нагрева в среде водяного пара и в аргоне до температур выше 1000 °С происходит хрупкое разрушение оболочек, и характер разрушения не зависит от наличия внутри оболочек V_4C (см. рис. 5,в,г).



Рис. 5. Характер деформации и разрушения макетов пэлов с оболочками из сплава Э110 после нагрева в среде водяного пара при температурах: а - 800 °С (без V_4C); б - 800 °С (с V_4C); в - 1200 °С (без V_4C); г - 1200 °С (с V_4C)

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В процессе аварийных ситуаций с потерей теплоносителя оболочки пэлов могут разогреваться до высоких температур. При этом они подвергаются таким воздействиям, как интенсивное окисление, возникновение напряжений в результате повышения давления гелия, накопление деформации, взаимодействие с поглощающим материалом, изменение структурно-фазового состояния, отжиг радиационных дефектов и т.д. Степень влияния указанных процессов зависит от материала оболочки.

Нагрев в среде водяного пара макетов пэлов приводит к формированию на их поверхности оксидных пленок, свойства и цвет которых меняются в зависимости от температуры нагрева. Причем до температур нагрева ≤ 800 °С на оболочках из сплава Э110 и до температур нагрева ≤ 1000 °С на оболочках из стали Х16Н15М3Б формируются тонкие оксидные пленки, прочно сцепленные с поверхностью оболочки. Повышение температуры нагрева приводит к образованию пленок толщиной 30...40 мкм, которые легко отслаиваются от поверхности, что обусловлено образованием оксидов стехиометрического и застехиометрического составов с кристаллическими решетками, отличающимися от решеток материалов оболочек и имеющих низкую когезивную прочность с их поверхностью [7].

Характер деформирования макетов зависит от материала оболочки. При использовании стали Х16Н15М3Б диаметральной деформация оболочек, не заполненных V_4C , после нагрева в среде водяного пара незначительная ($< 0,5\%$) и обусловлена образованием оксидной пленки. Нагрев макетов, заполненных V_4C , до температур > 1100 °С приводит к заметному увеличению (до 3,3 % с нагревом до 1200 °С) диаметра оболочек из стали Х16Н15М3Б за счет образования интерметаллических слоев в результате диффузионного взаимодействия с порошком V_4C . Согласно данным работ [5,8], на границе раздела указанных материалов при повышенных температурах происходит образование слоев из боридов железа и хрома типа Me_2B и Me_4B_3 ($Me=Fe, Cr$). Толщина боридного слоя при температурах, близких к 1200 °С, может превышать 500 мкм [5]. Под боридным слоем формируется зона интенсивного науглероживания с образованием карбидов типа Me_3C_6 [8].

В случае использования сплава Э110 диаметральной деформация оболочек макетов как заполненных, так и не заполненных V_4C после нагрева в среде водяного пара одинаковая во всем диапазоне исследованных температур. С нагревом до температур от 850 до 1200 °С увеличение диаметра обусловлено не только образованием оксидного слоя, но и деформацией оболочки под действием давления гелия. Причиной является резкое уменьшение сопротивления пластическому деформированию сплава $Zr-1\text{вес.}\%Nb$ в интервале температур 827...850 °С [9], когда в сплаве присутствует большое количество пластичной β -фазы, окружающей более жесткую α -фазу. При этом пластическая деформация реализуется главным образом путем межзеренного проскальзывания [10]. Минимальные значения предела текучести при температурах 850...1000 °С могут составлять для сплава Э110 2,5...5,0 МПа [11]. Оценка тангенциальных напряжений в стенке оболочки, возникающих в процессе нагрева, выполненная по формуле [12]

$$\sigma_{\tau} = \frac{P \cdot D \cdot T}{2 \cdot t \cdot 293},$$

где P - давление гелия внутри макета пэла при комнатной температуре, МПа; D - средний диаметр оболочки, мм; t - толщина стенки, мм; T - температура нагрева, К, показала, что их значения в этой области температур равняются 4...5 МПа. Следовательно, полученные значения напряжений, обусловленные давлением гелия, достаточны для деформации оболочки при нагреве до температур ≥ 850 °С.

Более высокие значения диаметральной деформации оболочки (3,5...7,5 %) после нагрева в среде аргона при температурах 850...1200 °С по сравнению со значениями деформации (1,0...2,8 %) после нагрева в среде водяного пара можно объяснить сильной зависимостью механических свойств сплавов циркония при высоких температурах от степени окисления [10].

В связи с незначительными изменениями структуры и благодаря высокому сопротивлению окислению оболочек из стали Х16Н15М3 при нагреве в среде водяного пара до температур в указанном интервале их кратковременные механические свойства изменяются незначительно по сравнению с анало-

гичными характеристиками в исходном состоянии. Основной причиной, изменяющей механические свойства оболочки после нагрева до высоких температур, является образование хрупких интерметаллических слоев в результате диффузионного взаимодействия с V_4C . Результаты механических испытаний показали, что наиболее чувствительной характеристикой к наличию на границе раздела слоев диффузионного взаимодействия является относительное удлинение. Его значения с увеличением температуры нагрева от 900 до 1200 °C уменьшаются в 2,2 раза. Временное сопротивление и предел текучести при этом практически не изменяются.

Оболочка из сплава Э110 при нагреве в среде водяного пара до температур >900 °C подвергается более интенсивному взаимодействию с кислородом по сравнению с нержавеющей сталью, а структура претерпевает существенные изменения в результате полиморфных превращений при нагреве и последующем охлаждении. На поверхности оболочки формируются слой оксида ZrO_2 и подоксидный слой, представляющий собой твердый раствор кислорода в α -фазе циркония. В основной части оболочки происходит образование неравновесной структуры, состоящей из пластин (игл) α' -фазы Zr , которая представляет собой пересыщенный раствор Nb в искаженной решетке циркония в границах бывших β -зерен Zr [5].

Из-за насыщения поверхности оболочек кислородом и изменения структурно-фазового состояния ее материала наблюдается повышение значений σ_B и $\sigma_{0,2}$ соответственно в ~1,4 и в ~2,3 раза по сравнению со значениями в исходном состоянии. Проведение нагрева макетов пэлов с оболочкой из сплава Э110 в среде аргона позволило разделить вклады в упрочнение от изменения структурно-фазового состояния и за счет образований поверхностного слоя, насыщенного кислородом, и оксидного слоя. Вклад поверхностного слоя в увеличение значений σ_B и $\sigma_{0,2}$ составляет соответственно ~10 и ~25 %.

Как и в случае с оболочкой из стали X16H15M3Б, наиболее чувствительной характеристикой к изменению структурно-фазового состояния и наличию поверхностного слоя, обусловленного взаимодействием с кислородом, является относительное удлинение. Его значения уменьшаются от 31 % в исходном состоянии до 1...2 % после испытания в водяном паре с нагревом до температур 1100...1200 °C и до 6,5...8,2 % после испытаний в среде аргона с нагревом до этих температур.

Установленное в процессе механических испытаний макетов пэлов с оболочкой из сплава Э110 увеличение значений σ_B на 18 % и снижение δ в 1,8 раза в заполненных карбидом бора макетах по сравнению с незаполненными в исходном состоянии и после нагрева до температур ≤ 800 °C, вероятно, обусловлено следующим. Согласно механическим испытаниям макетов с оболочкой из стали X16H15M3Б и макетов с оболочкой из сплава Э110 после нагрева до температур ≥ 900 °C, значения $\sigma_{0,2}$ составляли соответственно >260 и >330 МПа. Возможно, эти значения превышали напряжения, необ-

ходимые для перемещения порошка V_4C внутри оболочки. Значения $\sigma_{0,2}$ оболочки из сплава Э110 в исходном состоянии и после нагрева до температур ≤ 800 °C не превышали 205 МПа и были меньше этих напряжений. Тогда в процессе механических испытаний, по-видимому, происходило проскальзывание оболочки по столбу порошка V_4C , что приводило к увеличению значений σ_B за счет вклада сил трения. Причина уменьшения значений δ , вероятно, связана с одновременной деформацией оболочки в нескольких локальных местах.

Таким образом, в результате анализа полученных данных можно заключить, что оболочки пэлов, изготовленные из стали X16H15M3Б или сплава Э110, сохраняют достаточный уровень прочности и пластичности после кратковременного нагрева в среде водяного пара до температур ≤ 1100 °C. При более высоких температурах нагрева возрастает вероятность разрушения оболочки из X16H15M3Б по причине интенсивного взаимодействия порошка V_4C с материалом оболочки, а оболочки из Э110 за счет уменьшения пластичности ($\delta \leq 2\%$) [7,11].

ВЫВОДЫ

1. Проведены механические испытания оболочек макетов пэлов, изготовленных из стали X16H15M3Б и сплава Э110, после кратковременного нагрева в среде водяного пара до температур в интервале 600...1200 °C.
2. Установлены факторы, оказывающие доминирующее влияние на механические свойства оболочек и зависимость их изменений от материала, из которого они изготовлены.
3. Исследовано влияние наличия порошка карбида бора на формоизменение и механические свойства оболочек макетов пэлов.
4. Показано, что диффузионное взаимодействие оболочки из стали X16H15M3Б с порошком V_4C при нагревах >1100 °C является причиной увеличения диаметра и снижения пластичности.
5. Определены вклады в изменение механических свойств оболочки из сплава Э110 после нагрева в среде водяного пара из-за изменений структурно-фазового состояния и за счет образования поверхностного слоя, представляющего собой оксидную пленку и приповерхностный слой, насыщенный кислородом.
6. Рассмотрены вероятные механизмы разрушения макетов пэлов в процессе механических испытаний, отвечающие за изменения механических свойств исследуемых материалов и их зависимость от температуры нагрева в водяном паре.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Д. Рисованный, Е.Е. Варлашова, С.Р. Фридман, В.Б. Пономаренко, А.В. Щеглов. Сравнительные характеристики поглощающих кластерных сборок ВВЭР-1000 и PWR // *Атомная энергия*. 1998, т. 84, в. 6, с. 508-513.
2. В.Б. Пономаренко, А.О. Пославский, В.М. Чернышов и др. Органы регулирования и СВП ядерных реакторов ВВЭР-1000 и пути их совершенствования // *Вопросы атомной науки и тех-*

- ники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». 1994, в. 2(62), 3(63), с. 95-113.
3. П.П. Гринчук, В.Н. Голованов, М.И. Солонин, В.П. Кондратьев, В.Н. Речицкий. Радиационная и коррозионная стойкость сплава ХНМ-1 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Материаловедение и новые материалы»*. 2005, в. 1 (64), с. 273-280.
 4. В.Д. Рисованный, Е.Е. Варлашова, С.Р. Фридман. *Поглощающие материалы и органы регулирования реакторов ВВЭР-1000 и PWR. Состояние, проблемы и пути их решения: Обзор*. Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1998, 54 с.
 5. В.С. Красноруцкий, Н.Н. Белаш, А.М. Абдуллаев, А.И. Жуков, И.А. Петельгузов, Н.А. Михайлов, Е.А. Слабоспицкая. Разработка и некоторые характеристики работоспособности пэлов с поглотителем В₄С-Hf // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2007, № 2, с. 88-96.
 6. Патент № RU 2287193 от 17.12.2003, G21C 7/04, G21C 7/10, G21C 7/103. *Регулирующий стержень ядерного реактора* / В.И. Ряховских.
 7. Д.Н. Игнатьев. Исследование деформации, структурного состояния и остаточного ресурса механических свойств оболочек имитаторов твэлов ВВЭР после испытаний на стенде Параметр-М // *Сборник докладов 7 Российской конференции по реакторному материаловедению*. Димитровград: НИИАР, 2004, т. 2, ч. 3, с. 272-290.
 8. В.Д. Рисованный, А.В. Захаров, С.Р. Фридман. Взаимодействие карбида бора со сталью 06Х18Н10Т в диапазоне температур 600-1200°С // *Сборник тезисов докладов 4 Международной конференции по реакторным материалам*. Димитровград: НИИАР, 1995, с. 204.
 9. Е.Н. Пирогов, Л.Л. Артюхина, М.И. Алымов, Ю.А. Перлович, М.Г. Исаенкова. Механизм сверхпластичности циркониевого сплава Н-1 // *Атомная энергия*. 1987, т. 63, в. 2, с. 142-144.
 10. Н.М. Бескоровайный, Б.А. Калинин, П.А. Платов, И.И. Чернов. *Конструкционные материалы ядерных реакторов*. М: «Энергоатомиздат», 1995, с. 564-566.
 11. Г.П. Кобылянский, А.Е. Новоселов. Радиационная стойкость циркония и сплавов на его основе: *Справочные материалы по реакторному материаловедению*. Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1996, с. 21-22.
 12. Г.П. Кобылянский, В.К. Шамардин, С.Г. Еремин, И.М. Кадармедов, А.В. Медведев. Длительная прочность оболочек из сплава Э110 в области температур 673...843 К // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2001, № 2, с. 91-95.

Статья поступила в редакцию 03.06.2010 г.

ВПЛИВ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРІВАННЯ У ВОДЯНІЙ ПАРІ НА ВЛАСТИВОСТІ ОБОЛОНОК ПЕЛ

М.М. Бєлаш, І.А. Петельгузов, Л.С. Ожигов, В.І. Савченко, А.В. Куштим

Подано результати досліджень впливу короткочасного нагрівання у водяній парі до температур в інтервалі 600...1200 °С на механічні властивості і стійкість форми оболонок макетів пелів зі сталі Х16Н15М3Б та сплаву Zr-1% Nb (E110). Встановлено фактори, які спричиняють домінуючий вплив на механічні властивості оболонок, виготовлених із вказаних матеріалів. Вивчено вплив наявності порошку В₄С на механічні властивості оболонок у вихідному стані та після нагрівання до різних температур. Обговорені вірогідні механізми, що описують особливості деформації і руйнування при механічних випробуваннях, які є відповідальними за зміну механічних властивостей досліджуваних матеріалів.

INFLUENCE OF HIGH-TEMPERATURE STEAM HEATING ON THE PROPERTIES OF ABSORBER ROD CLADDING

M.M. Belash, I.A. Petelguzov, L.S. Ozhygov, V.I. Savchenko, A.V. Kushtym

There are provided the results of investigations into the influence of short-term steam heating within the temperature the range of 600...1200 °C on the mechanical properties and cladding shape stability of the dummy absorber rods made from X16H15M3B steel and Zr-1% Nb alloy (E110). There have been determined the factors which have a dominant impact on the mechanical properties of claddings produced from said materials. There have been investigated the influence of the presence of В₄С powder on the mechanical properties of the claddings in the initial state and after heating to different temperatures. The potential mechanisms describing the characteristics of cladding deformation and damage during the mechanical tests and that are responsible for changing of the mechanical properties of investigated materials have been discussed.