

СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЯ ГАФНИЙ – НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ, ПОЛУЧЕННОГО ОПЛАВЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОЙ В СРЕДЕ АРГОНА

*В.С. Красноруцкий, Н.Н. Белаи, И.А. Петельгузов, Е.А. Слабоспицкая,
Л.Ю. Мильяченко, В.И. Савченко, Ж.С. Ажажа*
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
г. Харьков, Украина*

Описаны конструкция и способ получения неразъемного соединения гафниевого стержня со стальной переходной деталью, разработанного для комбинированных поглощающих элементов реактора ВВЭР-1000. Исследованы структура и граница раздела материалов в месте соединения в исходном состоянии и после испытаний образцов данного соединения на устойчивость к термоциклированию в интервале температур 20...360°C и к кратковременному нагреву в среде водяного пара до температуры 1200°C. Выполнены оценки термических напряжений в элементах конструкции соединения и проведены механические испытания соединения при температурах 20 и 350°C. Показано, что разработанное соединение сохраняет высокие механические свойства и первоначальные геометрические размеры после проведенных испытаний.

ВВЕДЕНИЕ

Дальнейшее развитие атомной энергетики базируется на создании тепловых водо-водяных реакторов нового поколения с повышенной надежностью и безопасностью эксплуатации, с более высокими технико-экономическими характеристиками всех элементов активной зоны, в том числе и элементов регулирования и защиты ядерных реакторов [1-3]. Используемые в настоящее время поглощающие материалы в реакторах PWR и ВВЭР имеют ограниченный ресурс. В связи с этим возросла актуальность работ, имеющих отношение к поглощающим материалам и поглощающим элементам (пэлам). Специалисты ведущих фирм-производителей ядерного топлива в качестве перспективной замены используемых поглощающих материалов рассматривают следующие материалы: металлический гафний, диборид гафния HfB_2 ; титанат диспрозия Dy_2O_3 , TiO_2 и гафнат диспрозия Dy_2O_3 , HfO_2 [1,3].

С 1992 г. в России и в Украине ведутся работы по модернизации поглощающих элементов СУЗ реактора ВВЭР-1000. На первом этапе рассматривается комбинированное использование материалов: Hf и W_4C ; $Dy_2O_3TiO_2$ и W_4C в пэлах специальной конструкции [4-7]. Использование новых материалов позволит увеличить срок службы пэлов в 3 раза, а их физическую эффективность до 2,5 % при значении диаметра 8,2 мм и до 15 % при значении диаметра 9,6 мм [4].

Для Украины, имеющей достаточные сырьевые ресурсы по гафнию, а также предприятия по производству карбида бора, гафния и изделий из него, более предпочтительным по сравнению с другими вариантами является использование пэлов с комбинированным поглотителем Hf- W_4C . В разработанных конструкциях пэлов верхняя часть состоит из нержавеющей оболочки, заполненной карбидом бора. Нижняя часть длиной 300...1500 мм представляет собой гафниевый стержень или трубу. Верхняя и

нижняя части соединены между собой через переходную деталь, выполненную из нержавеющей стали [5-7].

Одной из важных задач при создании комбинированных пэлов является разработка конструкции переходной детали и способа соединения гафниевого стержня с нержавеющей оболочкой.

Целью настоящей работы являлось исследование соединения гафний-нержавеющая сталь, полученного путем оплавления материала переходной детали электрической дугой в контролируемой среде аргона.

1. ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКИ

Исследования и испытания соединения Hf – нержавеющая сталь проводили на образцах, конструкция которых показана на рис. 1.

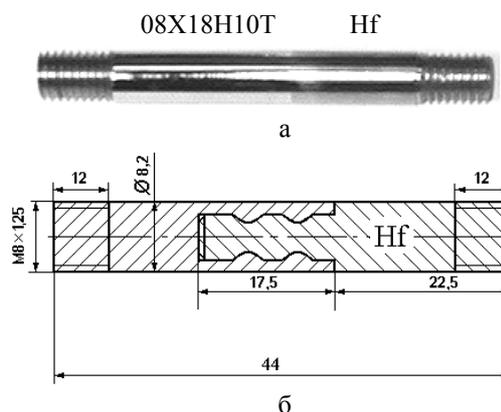


Рис. 1. Образец соединения гафний–нержавеющая сталь для стержневых комбинированных пэлов: а – внешний вид образца; б – конструкция образца

Для изготовления образцов использовали в качестве поглощающего материала кальциетермический гафний марки ГФЭ-1, а в качестве материала

переходной детали (переходника) – нержавеющей сталь марки 08X18H10T.

Образцы соединения получали путем оплавления материала переходника в районе кольцевых выступов, выполненных на его наружной поверхности, в результате чего происходило заполнение оплавленным металлом кольцевых канавок, изготовленных напротив выступов на участке гафниевого стержня, входящего внутрь переходника [7].

Оплавление материала переходника производили электрической дугой в контролируемой среде аргона на установке СА-281 (конструкции НИКИМТа) при значениях погонной энергии 80...85 Дж/мм. Режимы изготовления выбирали, преследуя цель получить соединение, имеющее достаточный запас прочности на разрыв, устойчивое к термоциклированию, сохраняющее геометрические размеры и целостность при перегревах в случае аварийных ситуаций, обладающее удовлетворительной радиационной и коррозионной стойкостью.

В комплекс исследований образцов соединения гафний–нержавеющая сталь входили металлографические исследования и механические испытания в исходном состоянии, после испытаний термоциклированием и испытаний, имитирующих перегрев в среде водяного пара при аварийных ситуациях. Структурные исследования проводили на полированных и травленных шлифах, используя оптические микроскопы МИМ-8 и МИМ-10. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 100 г.

Механические испытания образцов выполняли на установках типа Р-10 ГОСТ 7855-74 и 1246Р-2/2300 ГОСТ 7855-84 при комнатной температуре на воздухе и при 350°C в вакууме 2×10^{-3} Па.

Термоциклические испытания проводили в диапазоне температур 20...360°C. Количество теплосмен равнялось 150. Средняя скорость нагрева образцов при термоциклировании составляла 0,15°C/с, охлаждения – 7,5°C/с. Исследуемые образцы в процессе термоциклических испытаний находились в герметичных стальных капсулах. Часть капсул была заполнена бидистиллированной водой с таким расчетом, чтобы при температуре 360°C обеспечивалось давление на наружную поверхность образцов, такое как в реакторе 16 МПа, а часть капсул заполняли аргоном технической чистоты до давления 0,1 МПа.

Испытания образцов, имитирующих перегрев в случае аварийных ситуаций, проводили при температуре 1200°C по следующей схеме. На начальной стадии эксперимента образец помещали в зону кварцевой трубы, нагретой до температуры 350°C, которая продувалась перегретым паром. По истечении 10^3 с образец перемещали в зону с перегретым паром, находящуюся при температуре 1200°C. Средняя скорость нагрева образца до этой температуры составляла 13°C/с. После выдержки при температуре 1200°C в течение 120 с образец перемещали обратно в зону с температурой 350°C, где происходило его охлаждение. После испытаний исследовалась структура материалов соединения, сплошность границы раздела, механическая прочность соединения.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ

Структурные исследования материалов соединения гафний–нержавеющая сталь проводили в зоне оплавления переходной детали, на границе контакта гафния с зоной оплавления переходника и для сравнения в зонах, не подверженных влиянию термического цикла при изготовлении образцов (рис. 2 и 3).

В результате исследований установлено, что на границе контакта нержавеющей стали и гафния в области оплавления при выбранных режимах существует зона диффузионного взаимодействия. Ее ширина и количество слоев зависели от распределения величины температуры по длине зоны оплавления. Ширина зоны изменялась от 30 до 150 мкм, количество слоев – от одного до трех. Каждый слой имел ширину 20...50 мкм. Вид слоев и изменение микротвердости по сечению образца в зоне соединения показаны на рис. 2. Представленные данные свидетельствуют о том, что в зонах, где была максимальная температура в процессе изготовления соединения, в большинстве случаев со стороны нержавеющей стали, формировалась прослойка эвтектического вида серого цвета микротвердостью $(6,2 \pm 0,2)$ ГПа. За ней следовала вторая прослойка более темного цвета, микротвердость которой равнялась $(10,5 \pm 0,5)$ ГПа. В контакте с этой прослойкой со стороны гафниевого стержня наблюдалась прослойка шириной до 50 мкм микротвердостью $(3,5 \pm 0,5)$ ГПа (см. рис. 2).

На гафниевом стержне в районе соприкосновения с оплавленным материалом переходника наблюдалась зона шириной 100...150 мкм, в которой зерна были более крупными, по сравнению с зернами в основной части гафниевого стержня (см. рис. 3,б). Их величина составляла 50...100 мкм. В области гафниевого стержня, удаленной от зоны термического влияния, зерна имели величину 20...60 мкм. Микротвердость гафния на исследуемых участках равнялась $(2,4 \pm 0,2)$ ГПа.

Материал переходника в зоне оплавления имел структуру с равноосными зернами величиной 50...75 мкм (см. рис. 3,в). На участке, удаленном от зоны термического влияния, размер зерен равнялся 3...5 мкм (см. рис. 3,г). В зоне термического влияния величина зерен уменьшалась в направлении от зоны оплавления к основному металлу. Значения микротвердости в средней части оплавленной области, в зоне термического влияния и в области, удаленной от зоны оплавления, находились в интервале значений $(1,8 \dots 2,1 \pm 0,2)$ ГПа.

Исследования образцов, изготовленных для сравнительных испытаний на более мягких режимах (при значениях погонной энергии < 70 Дж/мм), свидетельствовали об отсутствии сплошных диффузионных слоев на границе раздела гафния с нержавеющей сталью в отличие от описанных выше образцов. Наблюдались лишь отдельные локальные участки плотного контакта.

2.2. ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ И КРАТКОВРЕМЕННОГО ПЕРЕГРЕВА В ПАРЕ НА СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЯ

Испытание образцов соединения гафний–нержавеющая сталь на устойчивость к термоциклированию в среде аргона и в воде не привели к заметным изменениям их геометрических размеров и фор-

мы. Внешний вид образцов после испытаний приведен на рис. 4,а,б. В результате термоциклирования в контейнерах, заполненных аргоном, на гафниевом стержне образовалась блестящая оксидная пленка светло серого цвета с зеленоватым оттенком, а на поверхности переходника – более темная пленка с фиолетовым оттенком (см. рис. 4,а).

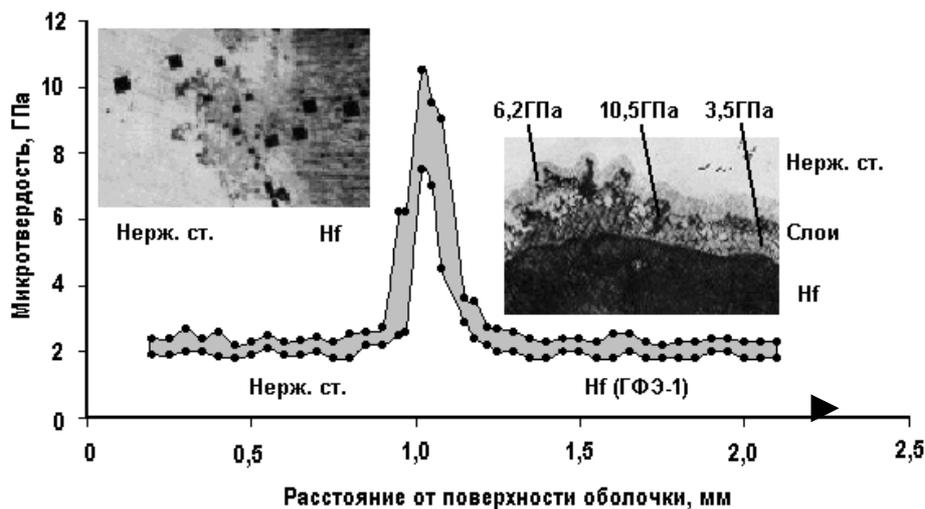


Рис. 2. Значения микротвердости по сечению соединения гафний – нержавеющая сталь. Структура границы раздела

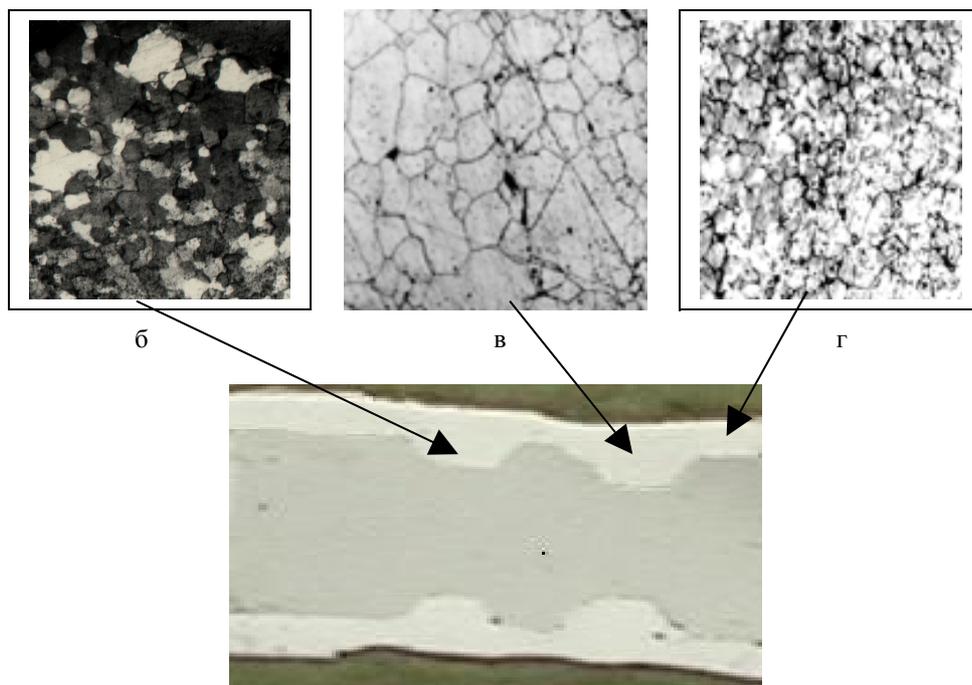


Рис. 3. Соединение гафний – нержавеющая сталь, полученное оплавлением материала переходника в установке аргонодуговой сварки СА-281: а – сечение соединения (ув. 4); б – структура гафниевого стержня (ув. 100); в – структура нержавеющей стали в зоне оплавления (ув. 100); г – структура нержавеющей стали на участке, удаленном от зоны термического влияния (ув. 450)

Испытания образцов в контейнерах с водой привели к их окислению с образованием более толстых оксидных пленок: на гафнии блестящей пленки серого цвета, а на поверхности переходника – блестящей

пленки черного цвета (см. рис. 4,б). Металлографические исследования материалов соединения и границы раздела гафния и нержавеющей стали после термоциклических испытаний свидетельство-

вали о том, что заметного изменения структуры и микротвердости нержавеющей стали и гафния не произошло. Также не наблюдалось на границе раздела образования трещин и отслоений (рис. 5). После испытаний образцов в перегретом паре при 1200°C на поверхности нержавеющей стали образовалась матовая светло-серая оксидная пленка толщиной 20...

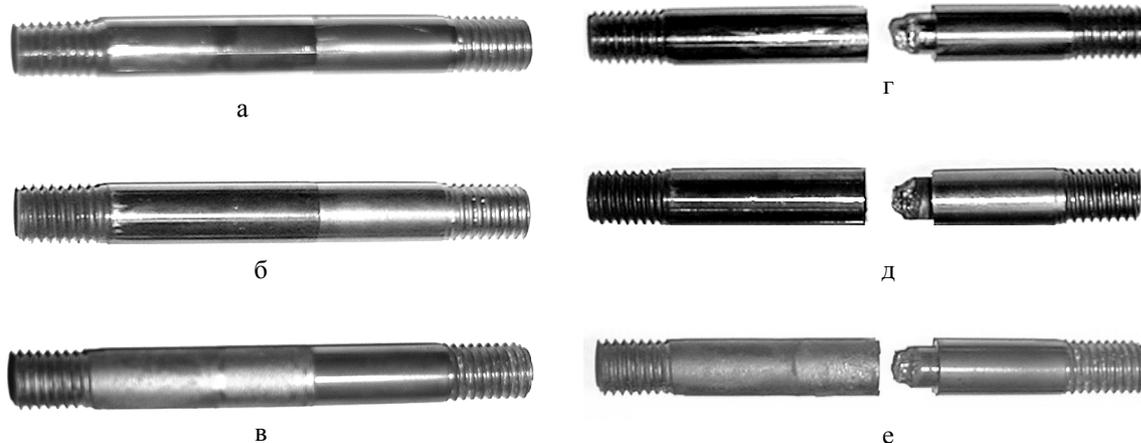


Рис. 4. Внешний вид образцов соединения гафний – нержавеющая сталь после испытаний: а – термоциклированием в стальном контейнере, заполненном аргоном; б – термоциклированием в стальном контейнере, заполненном бидистиллированной водой; в – нагревом в паре при 1200°C в течение 120 с; г, д, е – после кратковременных механических испытаний образцов, соответственно, вида: а, б и в

Нагрев образцов при 1200°C в течение 120 с привел к росту зерен в материале переходника. В области, удаленной от зоны термического влияния, они увеличились от 3...5 мкм до 160...300 мкм, а в области оплавления – от 50...75 мкм до 250...400 мкм.

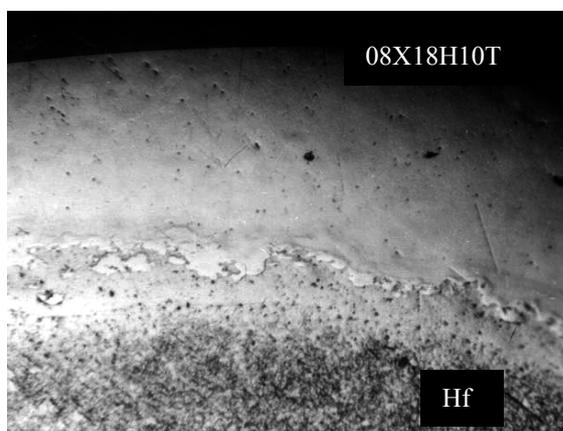


Рис. 5. Граница раздела гафния и нержавеющей стали в соединении после термоциклических испытаний (150 циклов, $\Delta T = (20...360)^\circ\text{C}$)

Микротвердость материала переходника в этих областях имела близкие значения и равнялась $(2,0 \pm 0,2)$ ГПа. На гафниевом стержне также происходило заметное увеличение размера зерен. В зоне, прилегающей к нержавеющей оболочке, зерна выросли от 50...100 мкм до 120...250 мкм, а в средней части – соответственно от 20...60 мкм до 100...150 мкм. Микротвердость материала гафниевого стержня различалась незначительно в указанных областях и составляла $(2,8 \pm 0,2)$ ГПа.

35 мкм. Она легко отслаивалась от поверхности образцов. На гафниевом стержне оксидная пленка имела черный блестящий цвет и была прочно сцеплена с поверхностью (см. рис. 4,в). В месте соединения гафниевого стержня и переходника наблюдалось незначительное увеличение диаметра, составляющее не более 10 мкм.

Исследования границы раздела соединения гафний-нержавеющая сталь свидетельствовали об отсутствии заметного роста зоны диффузионного взаимодействия, однако в отдельных местах наблюдались трещины.

Сравнительные механические испытания образцов соединения в исходном состоянии после термоциклирования в капсулах, заполненных соответственно аргоном и водой, а также после нагрева в водяном паре при 1200°C показали, что разработанное соединение сохраняет достаточно высокую прочность.

Усилия разрушения образцов в исходном состоянии и после термоциклирования в среде аргона и воды имели близкие значения и составляли при комнатной температуре 10,5...11,2 кН, а при температуре 350°C – 5,5...6,5 кН. Данные значения превышали на 15...20 % аналогичные значения, полученные на исходных образцах, изготовленных на более мягких режимах, при которых не происходило образования зоны диффузионного взаимодействия, и в 2 раза превышали прочность нержавеющей оболочки пэла $\varnothing 8,2 \times 0,6$ мм, заполненной карбидом бора. Образцы соединения, которые подвергались испытаниям в перегретом водяном паре при 1200°C, имели более низкие значения прочности по сравнению с исходными образцами. Усилия, приводящие к разрушению этих образцов, при комнатной температуре равнялись 9,0...9,7 кН, а при температуре 350°C – 5,3...5,5 кН. Характер разрушения исходных образцов и образцов после термоциклирования и испытаний в водяном паре при 1200°C был одинаковым. В результате механических испытаний образцов раз-

рушение происходило на участке гафниевого стержня в районе первой кольцевой канавки (см. рис. 4, г, д, е). Причем после разрушения на гафниевом стержне и внутренней поверхности переходника сохранялись следы диффузионной прослойки, свидетельствующие о том, что в процессе испытаний вначале разрушалось соединение по хрупкой прослойке, а затем уже по гафниевому стержню в месте наименьшего сечения.

2.3. ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПРИ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИИ

Оценку напряжений в элементах конструкции разработанного соединения проводили, используя приближенную модель, которая представляла собой двухслойный цилиндр, состоящий из внутреннего сплошного гафниевого стержня (сплава ГФЭ-1) и внешней оболочки (сталь 08Х18Н10Т). При расчетах предполагалось следующее: оболочка и сердеч-

ник неразрывно связаны между собой, нагрев и охлаждение соединения обеспечивает безградиентное поле температур по всему сечению в каждый момент времени; напряженно-деформированное состояние соединения обусловлено разностью термического расширения сердечника и оболочки; соединение получено при условиях, когда сердечник, разогретый до температуры 800°C, охватывается стальной оболочкой, нагретой до температуры, близкой к температуре плавления, и это соединение охлаждается до 20°C; каждый термический цикл представляет собой нагрев до 360°C с последующим охлаждением до 20°C.

Данные, принятые при расчете, приведены в таблице.

Согласно расчетам, первоначальное охлаждение образцов в процессе изготовления приводит к возникновению в оболочке остаточных напряжений, эквивалентное значение которых достигает предела текучести материала оболочки при комнатной температуре.

Геометрические размеры и физико-механические свойства материалов соединения, принятые при расчете

Физико-механические свойства	Сердечник: сплав ГФЭ-1	Оболочка: нерж. сталь 08Х18Н10Т	Источник информации
Наружный диаметр: сердечника D_1 , мм; оболочки D_2 , мм	6,0	8,2	
Температура плавления T , °C	2225	1440	[8,9]
Коэффициент линейного термического расширения β , 10^{-6} , $1/^\circ\text{C}$	5,9	17,0	[8,9]
Модуль Юнга E , 10^5 МПа	1,4	2,1	[8,10]
Коэффициент Пуассона μ	0,29	0,28	[8,10]
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа: при 20°C; при 360°C	425 280	246 186	[11,12]
Предел прочности при растяжении σ_B , МПа: при 20°C; при 360°C	580 360	520 370	[11-13]
Относительное удлинение δ , %	22	45	[11-13]
Относительное сужение ψ , %	25	60	[12,13]

Это ограничивает величину контактного давления в зоне сопряжения и, следовательно, значения радиальных и окружных напряжений в сердечнике. Максимальные осевые напряжения в оболочке и сердечнике определялись из условий отсутствия усилия на торцах и равенства эквивалентных напряжений в оболочке пределу текучести материала.

Результаты расчета компонент напряжений на внутренней (наиболее напряженной) поверхности оболочки и осевых напряжений в сердечнике в течение цикла приведены на рис. 6. Анализ результатов расчета показал, что максимальные растягивающие напряжения (окружные и осевые) оболочка испытывает при комнатной температуре. В процессе нагрева они снижаются, переходят в сжимающие при ~130°C и выходят на постоянный уровень при ~225°C в связи с переходом оболочки в пластическое состояние. При охлаждении образцов напряжения в оболочке снижаются, меняют знак при ~265°C и растут по величине, пока эквивалентные напряжения не достигнут предела текучести нержавеющей стали, что

происходит при ~180°C. Значения напряжений при максимальной и минимальной температурах цикла несколько отличаются по величине, что обусловлено зависимостью предела текучести материала от температуры (в интервале температур 225...360°C принято минимальное значение предела текучести, равное 186 МПа). В гафниевом стержне напряжения находятся в упругой области в течение всего цикла (осевые – не превышают ~113 МПа, окружные и радиальные – 65 МПа).

Оценку циклической долговечности выполняли по критерию малоциклового усталости, который учитывал совместное влияние упругой и пластической составляющих деформации на долговечность. Для данного случая использовали уравнение Мэнсона, описывающее связь между амплитудой полной деформации и числом циклов до разрушения с учетом влияния среднего напряжения для асимметричного цикла [14]:

$$\Delta \epsilon = [\ln(1 - \psi)^{-1}]^{0.6} N^{-0.6} + 3,5 \sigma_B N^{-0.12} / E, \quad (1)$$

где $\Delta \epsilon$ – размах полной деформации цикла; N – число циклов до разрушения; ψ , σ_B , E – характеристики материала оболочки (см. таблицу).

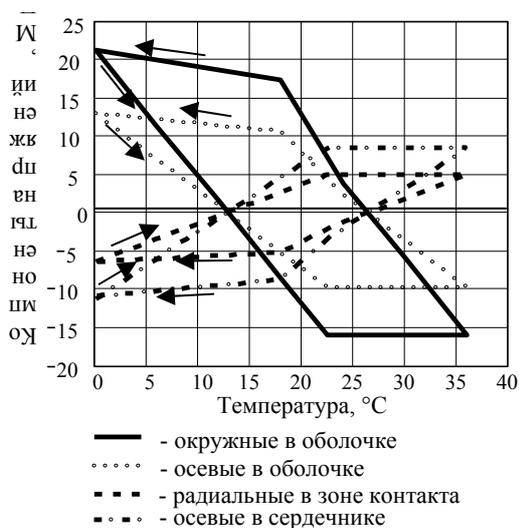


Рис. 6. Компоненты напряжений в материале переходника и гафниевого стержне в зависимости от температуры в процессе термоциклирования

Для нахождения допустимого числа рабочих циклов решение уравнения (1) следует разделить на коэффициент запаса по циклической долговечности (n_c), который принимается равным 10 [15].

Полученные данные свидетельствуют, что циклическая долговечность материала переходника соединения составит $\sim 4,3 \times 10^2$ циклов, а циклическая долговечность гафниевого стержня находится за пределами малоциклового усталости и составит более 10^5 циклов.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Физико-механические свойства соединений и используемых материалов в соединениях, описанных выше, обусловлены в первую очередь особенностями конструкции и способом изготовления. Выбранные в разработанном соединении соотношения толщины стенки переходной детали, диаметра гафниевого стержня и глубины кольцевых канавок на стержне обеспечили условия, когда разрушение в процессе механических испытаний происходило по гафнию, т.е. по элементу конструкции, большая часть материала которого не претерпела изменений в процессе его изготовления и сохранила исходные физико-механические свойства. Кроме того, согласно расчетам напряженно-деформированного состояния узлов соединения, в процессе работы при наличии тепловых циклическая прочность гафниевого стержня в соединении будет находиться за пределами малоциклового усталости и, следовательно, может выдержать без разрушения достаточно большое ($\sim 10^5$) число циклов.

Материал переходной детали, которую в процессе изготовления соединения нагревали до темпера-

туры плавления, выполнена конструктивно с запасом, что обеспечило прочность соединения при растяжении в 2 раза выше по сравнению с нагрузками, при которых происходило разрушения оболочки пэла, заполненной карбидом бора. Полученные результаты измерения микротвердости на нержавеющей стали в зоне оплавления, а также результаты исследования структуры позволяют сделать заключение о достаточной надежности материала переходника в соединении.

Близкие значения усилия разрушений образцов соединения, которые подвергались испытаниям в перегретом водяном паре, и образцов, полученных на более мягких режимах, когда сцепление на границе раздела отсутствовало, вероятно, свидетельствуют о нарушении сцепления на границе раздела гафния и нержавеющей стали в результате испытаний. Однако прочность соединения образцов уменьшилась всего лишь на 15...20%. Это свидетельствует о том, что даже в случае образования трещин и отслоений на границе раздела гафния и нержавеющей стали в данном соединении в процессе длительной работы в реакторе оно обеспечит целостность поглощающего элемента.

Таким образом, в результате анализа полученных результатов можно заключить, что разработанное соединение гафниевого стержня и переходной детали, выполненной из нержавеющей стали, для поглощающих элементов комбинированного варианта обладает достаточно высокой надежностью и может быть рекомендовано для дальнейших исследований, включая реакторные испытания.

ВЫВОДЫ

1. Проведены материаловедческие исследования свойств соединения гафний–нержавеющая сталь, разработанного для комбинированных вариантов поглощающих элементов реактора ВВЭР-1000.

2. Показана возможность изготовления надежных соединений гафний – нержавеющая сталь путем оплавления материала переходной детали, выполненной из нержавеющей стали, электрической дугой в контролируемой среде аргона.

3. Испытания термоциклированием в интервале температур 20...360°C (150 циклов) не привели к заметным изменениям геометрических размеров образцов, структуры и микротвердости материалов соединения, характера и усилий разрушения при механических испытаниях.

4. Выполнена оценка циклической долговечности элементов конструкции разработанного соединения. Показано, что циклическая долговечность нержавеющей переходной детали данного соединения составит $\sim 4,3 \times 10^2$ циклов, а циклическая долговечность гафниевого стержня находится за пределами малоциклового усталости и может составлять более 10^5 циклов.

5. Показано, что нагрев соединений в среде водяного пара при температуре 1200°C в течение 120 с не приводит к нарушению их целостности, а проч-

ностные характеристики сохраняются на высоком уровне.

6. Разработанный вариант соединения обладает достаточно высокой надежностью и может быть рекомендован для дальнейших исследований и реакторных испытаний.

Работа выполнена в рамках Программы проведения фундаментальных исследований по атомной науке и технике ННЦ ХФТИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Д. Рисованный, Е.Е. Варлашова, С.Р. Фридман. *Поглощающие материалы и органы регулирования реакторов ВВЭР-1000 и РWR. Состояние, проблемы и пути их решения* /Обзор. Димитровград, ГНЦ РФ НИИАР, 1998, 54 с.

2. Ю.Ф. Конотоп, Н.П. Одейчук, В.С. Красноруцкий. *Современное состояние проблемы поглощающих нейтроны материалов и изделий на их основе для реакторов типа ВВЭР-1000*. /Аналитический обзор. Харьков, ННЦ ХФТИ, 1998, 68 с.

3. В.И. Ряховских, С.В. Шмелёв, В.М. Чернышов и др. Современное состояние разработки и производства органов регулирования ядерных реакторов ВВЭР-1000 // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*, 1997, в. 1(65), 2(66). с. 110–118.

4. 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 техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*, 1994, в. 2(62), 3(63), с. 95–113.

5. В.Б. Пономаренко, А.О. Пославский и др. Комбинированные поглощающие элементы реакторов типа ВВЭР-1000, БПБР, ВВЭР-500 (600) с повышенным сроком службы // *III Межотраслевая конференция по реакторному материаловедению. Димитровград,*

27-30 октября 1992 г. Димитровград: НИИАР, 1994, т. 2.

6. Патент № 24734 UA от 30.10.98 (бюл. № 5), G 21С7/10. *Регулирующий стержень ядерного реактора* /В.Б. Пономаренко, А.О. Пославский, В.М. Чернышов и др.

7. В.С. Красноруцкий, В.Р. Татарин, П.А. Чернов. Патент Украины. Поглощающий стержневой элемент ядерного реактора, № 738 от 15.03.2001.

8. А.А. Афанасьев, Ю.Ф. Конотоп, Н.П. Одейчук. Гафний – перспективный поглотитель для пэлов СУЗ реакторов ВВЭР-1000 Украины // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*, 2000, в. 4 (78), с. 80–85.

9. П.Б. Михайлов-Михеев. *Справочник по металлическим материалам турбино - и моторостроения*. М.-Л.: Изд. машиностроительной литературы, 1961, 839 с.

10. Л.В. Тихонов, В.А. Кононенко и др. *Структура и свойства металлов и сплавов* /Справочник. Киев: «Наукова думка», 1986, 567 с.

11. Г.И. Волокита, Э.А. Резниченко, В.П. Чернуха, В.И. Савченко. Свойства гафниевых прутков, полученных методомковки. // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*, 2002, в. 1, с. 127–132.

12. *Марочник сталей и сплавов* /Под ред. В.Г. Сорокина. М.: «Машиностроение», 1989, 639 с.

13. В.Д. Рисованный, В.П. Клочко, В.Б. Пономаренко. *Гафний в ядерной технике*. Димитровград: НИИАР, 1993, 140 с..

14. *Сопротивление материалов деформированию и разрушению* /Справочное пособие. Ч. 2. /Под ред. В.Т. Трощенко, Киев: «Наукова думка», 1994, 704 с.

15. С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. *Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность*. М.: «Машиностроение», 1975, 488 с.

ВЛАСТИВОСТІ З'ЄДНАННЯ ГАФНІЙ – НЕРЖАВІЮЧА СТАЛЬ, ОДЕРЖАНОГО ОПЛАВЛЕННЯМ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ДУГОЮ У СЕРЕДОВИЩІ АРГОНУ

В.С. Красноруцкий, М.М. Блеш, І.А. Петельгузов, О.О. Слабоспицька, Л.Ю. Мільяченко, В.І. Савченко, Ж.С. Ажажа

Описані конструкція та спосіб виготовлення нероз'ємного з'єднання гафнієвого стержня зі сталюю перехідною деталлю, розробленого для комбінованих поглинаючих елементів реактора ВВЭР-1000. Вивчені структура та границя розділу матеріалів у місці з'єднання у вихідному стані та після випробувань зразків даного з'єднання на стійкість до циклічних змін температури в інтервалі 20...360°C та до короточасного нагрівання у середовищі водяної пари до температури 1200°C; виконані оцінки термічних напружень в елементах конструкції з'єднання і проведені механічні випробування з'єднання при температурах 20 та 350°C. Показано, що розроблене з'єднання зберігає високі механічні властивості та первинні геометричні розміри після проведених випробувань.

THE PROPERTIES OF HAFNIUM – STAINLESS STEEL JOINT THAT WAS OBTAINED BY ELECTRIC ARC IN ARGON

V.S. Krasnorudsky, N.N. Belash, I.A. Petelguzov, E.A. Slabospitska, L.Y. Miljathenko, V.I. Savshenko, Zh.S. Azhazha

The construction and the method of producing all-in-one hafnium rod and stainless steel adapter, that was developed for combined absorbent element of WWER-1000, are described. The structure and the boundary surface of materials at the joint were investigated in the initial state and after testing of samples from the joint for tolerance to thermocycling in the temperature range of

20...360°C and short-term heating in water steam up to 1200°C; thermal stresses of the joint construction were evaluated and mechanical tests of joint at 20 and 350°C were performed. It was shown that the developed joint retains high mechanical properties and initial geometry after testing.