

Раздел второй

МАТЕРИАЛЫ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

УДК 621.039.59

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОДУКТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБОЛОЧЕК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ТОПЛИВНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ В УСЛОВИЯХ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ

*В.С. Красноруцкий, А.П. Данилов, В.К. Яковлев, В.М. Евсеев, Р.А. Матющенко,
Е.А. Слабоспицкая, Я.А. Куштым*

*Научно-технический комплекс «Ядерный топливный цикл»
Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

*E-mail: slabospitskaya@kipt.kharkov.ua,
факс +38(057)335-27-54, тел. +38(057)335-67-43*

Представлены результаты металлографических исследований продуктов взаимодействия оболочки тепловыделяющего элемента из циркониевого сплава Э110 с таблеткой диоксида урана при различных температурах, а также проведены исследования продуктов взаимодействия оболочки твэлов с порошком UO_2 , взаимодействия порошка ZrO_2 с порошком и таблеткой из UO_2 .

ВВЕДЕНИЕ

Анализ повреждаемости активной зоны при различных авариях является одним из требований по обоснованию безопасности при проектировании АЭС. Поэтому весьма актуальным является получение информации о последствиях аварий при их экспериментальном моделировании.

При авариях с тяжелым повреждением активной зоны в ядерных реакторах с водяным охлаждением с потерей теплоносителя характерным является резкое повышение температуры, кипение остаточной воды, образование в активной зоне водяного пара и возможное расплавление ядерного топлива.

Проведенные в ННЦ ХФТИ эксперименты по моделированию запроектных аварий с изменением состояния материалов, входящих в состав твэлов реакторов водо-водяного типа, и анализ литературных источников [1-3] показали, что при высоких температурах ($>1200\text{ }^\circ\text{C}$) в парогазовой среде сплавы циркония переходят из металлического состояния в оксидное. Взаимодействие металлического циркония с диоксидом урана, в виде порошка или спеченной таблетки, при температуре выше $300\text{ }^\circ\text{C}$ приводит к активному процессу поглощения кислорода цирконием вплоть до образования стехиометрического диоксида циркония. Это позволяет использовать для изготовления имитаторов наряду с твэльными трубами в качестве конструкционных материалов, кроме металлического циркония, диоксид циркония, а при исследовании брать за основу систему ZrO_2+UO_2 .

Поэтому при разрушении твэлов необходимо рассматривать взаимодействие систем $Zr+UO_2$ и

ZrO_2+UO_2 . Хотя известны диаграммы состояний этих систем, эксперимент свидетельствует, что система тонко реагирует на влияние различных, даже незначительных на первый взгляд, факторов.

Целью настоящих исследований является получение более полной информации об основных характеристиках структур систем $Zr+UO_2$, ZrO_2+UO_2 , образовавшихся на начальной стадии аварии, характеризуемой взаимодействием расплавленных материалов активной зоны.

1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При проведении исследований в качестве исходных компонентов в определенных соотношениях были использованы следующие материалы:

- порошок диоксида урана;
- порошок диоксида циркония;
- таблетка диоксида урана;
- оболочка твэльной трубы из циркониевого

сплава Э110.

Имитация физико-химических процессов, проходящих на разных стадиях развития запроектной аварии, связана с целым рядом трудностей по созданию даже близких к реальным условий, таких как:

- высокие температуры (значительно выше $2600\text{ }^\circ\text{C}$) в течение длительного времени;
- наличие агрессивных сред (воздух, водяной пар), в присутствии которых протекают сложные процессы взаимодействия расплавленных материалов активной зоны реактора с образованием соединений сложных структур и т.д.

Совместное использование в экспериментах тугоплавких металлов и жаростойких материалов ограничивает возможности их применения в качестве оснастки высокотемпературных печей в связи с интенсивным взаимодействием.

По этой причине получение имитаторов с использованием компонентов активной зоны, участвовавших в их образовании, проводили в условиях низкого вакуума ($1 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.) в графитовых печах с использованием танталовых и графитовых тиглей для удержания расплавленной массы (тантал слабо взаимодействует с расплавом UO_2-ZrO_2 при температурах 2600 °С и кратковременных выдержках).

Вакуумные графитовые печи позволяют достигать температур выше 2600 °С путем прямого пропускания тока через графитовый нагреватель от трансформатора и стабильно выдерживать температуру в течение часа.

Экспериментальное оборудование для получения расплавленного конструкционного материала и изучения его взаимодействия с топливными материалами представляет собой вакуумную водоохлаждаемую камеру, оснащенную форвакуумным насосом ВН-1 и диффузионным масляным насосом, обеспечивающим при необходимости глубокий вакуум. Вакуумная камера оснащена приспособлениями, обеспечивающими возможность заполнения объема газами и контроля давления при проведении экспериментов в газовых средах.

В вакуумную камеру через электроизоляторы введены медные водоохлаждаемые токоподводы, обеспечивающие прохождение электрического тока до 5000 А. Внутри камеры между токоподводами размещается графитовое нагревательное устройство с экранами, обеспечивающее температуру до 3000 °С.

Температуру поверхности тиглей измеряли через смотровое окно оптическим пирометром "Проминь".

2. МЕТОДИКА МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Металлографические исследования были проведены на образцах, полученных в результате взаимодействия оболочки тепловыделяющего элемента из циркониевого сплава Э110 с таблеткой диоксида урана при различных температурах, а также проведены исследования продуктов взаимодействия оболочки твэлов с порошком UO_2 , взаимодействия порошка ZrO_2 с порошком и таблеткой из UO_2 .

Металлографические исследования проводили на образцах, приготовленных шлифованием на абразивных материалах с различной величиной зерна: от 150 до 9 мкм. В качестве охлаждающей жидкости в процессе приготовления шлифов использовали воду.

Структуру образцов исследовали с помощью оптического исследовательского металлографического микроскопа МИМ-10. Фотографии микроструктуры

сделаны при увеличении $\times 200$ в светлом поле и в поляризованном свете.

Измерение микротвердости различных фаз проводили на приборе ПМТ-3 с нагрузкой на индентор 100, 200 г.

Качественными признаками идентификации объектов были цвет, форма, размеры образовавшихся фаз, способность отражения света в светлом поле и в поляризованном свете [4].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Диаграмма состояния системы UO_2-ZrO_2

Для лучшего понимания процессов физико-химического взаимодействия между UO_2 -топливом и окислившейся оболочкой твэла (сплав на основе Zr) необходимо знать термодинамические свойства системы U-Zr-O. Поэтому рассмотрение диаграммы состояния системы UO_2-ZrO_2 является составной частью этой проблемы.

На рис.1 приведена диаграмма состояния системы UO_2-ZrO_2 [5]. Диоксид урана растворяет от 40 до 53 мол. % оксида циркония при температурах от 1000 до 2550 °С. Около 20 мол.% тетрагонального ZrO_2 растворяется в UO_2 с образованием твердого раствора при температурах до 1700 °С [5,6].

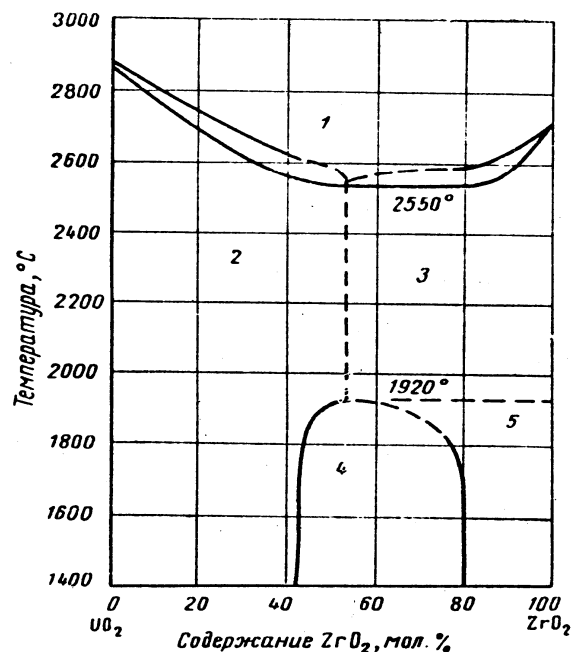


Рис. 1. Диаграмма состояния UO_2-ZrO_2 : 1 - жидкая фаза; 2 - твёрдый раствор с кубической решёткой; 3 - твёрдый раствор неизвестного состава; 4 - твёрдый раствор с кубической решёткой плюс твёрдый раствор с тетрагональной решёткой; 5 - твёрдый раствор с тетрагональной решёткой

С повышением температуры до 1920 °С растворимость ZrO_2 повышается примерно до 40 мол.%. Выше указанной температуры в богатой оксидом циркония области имеется пока что не идентифицированная фаза.

3.2. Структура топливного материала при плавлении UO_2+ZrO_2

Экспериментальные исследования взаимодействия материалов UO_2+ZrO_2 проводили с использованием спрессованной в брикет смеси порошкообразных материалов и последующим отжигом при высоких температурах.

Соотношение компонентов в топливном материале (UO_2+ZrO_2) было выбрано таким, чтобы соответствовало или было близко по значению к соотношению диоксида урана к диоксиду циркония при условии полного окисления оболочки твэлов из циркониевого сплава. С учетом указанного проведена серия экспериментов по определению температуры плавления топливного материала состава 62,5 мас.% UO_2 и 37,5 мас.% ZrO_2 в графитовых тиглях. Полнота расплавления смесей UO_2 и ZrO_2 характеризуется объемом частиц, образовавших расплав.

Исследования показали, что при температуре 2250 °С порошок топливного материала спекается, брикет уменьшается в геометрических размерах, и на поверхности не отмечено следов оплавления. Повышение температуры до 2370 °С приводит к частичному оплавлению топливного материала по всему периметру графитового тигля, однако в центральной части тигля материал полностью не расплавился. Структура не полностью расплавленного топливного материала представляет собой типичный твердый раствор переменного состава (рис. 2,б). Для отдельных участков характерно постепенное изменение цвета фаз от серого до светлого. Объем фаз, на которых происходит изменение цвета, различен – от очень мелких (10...30 мкм) до крупных (600 мкм и более). Аналогичный характер носит и степень пористости: размер основного количества пор не превышает 1...15 мкм. Более крупные поры встречаются редко. Значения микротвердости существенно различаются в зависимости от цвета фазы: на участках серого цвета – 7879...8428 МПа (содержание диоксида циркония 15...20%), светло-серого цвета 11564...13112 МПа (содержание диоксида циркония до 85...90%). Однако большая часть образца имеет промежуточное значение микротвердости в

соответствии с составом образовавшихся твердых растворов.

Эксперименты, проведенные при температуре 2425 °С, показывают, что гарантированное расплавление всего образца происходит за 10 мин. При температуре 2425 °С расплавленный топливный материал представляет собой структуру твердого раствора переменного состава. Ему свойственно чередование участков фаз серого и светлого цветов различной интенсивности. Распределение твердых растворов какого-либо состава в объеме неравномерно. Это чередование местами, преимущественно в центре, приобретает характер механической смеси твердых растворов серого и светло-серого цветов (см. рис. 2,в). Ближе к тиглю наблюдается образование твердых растворов светлого цвета, в центре образца происходит смешивание - светлая фаза внедрена в фазу серого цвета. Значения микротвердости на участках фазы серого цвета составляют 8193...8428 МПа (содержание диоксида циркония 15...20%), светлого - 11172...13112 МПа (содержание диоксида циркония 75...90%).

Повышение температуры отжига до 2500 °С приводит к полному расплавлению материала. Следует отметить, что снижение температуры плавления материала с 2550 °С (по диаграмме состояния) до 2425 °С, вероятно, связано с присутствием углерода в расплаве из графитовой оснастки.

Полностью расплавленный топливный материал имеет чрезвычайно развитую пористую структуру. Зафиксированные сечения указывают на образование гомогенных твердых растворов серого цвета.

Экспериментально подтверждено, что расплавление материалов сложного состава происходит строго в определенном температурном интервале. Чем выше поддерживается температура расплава и время выдержки, тем меньше остается в расплаве непрореагировавших частиц. Этот факт отчетливо фиксируется при металлографических исследованиях, однако его очень трудно оценить количественно.

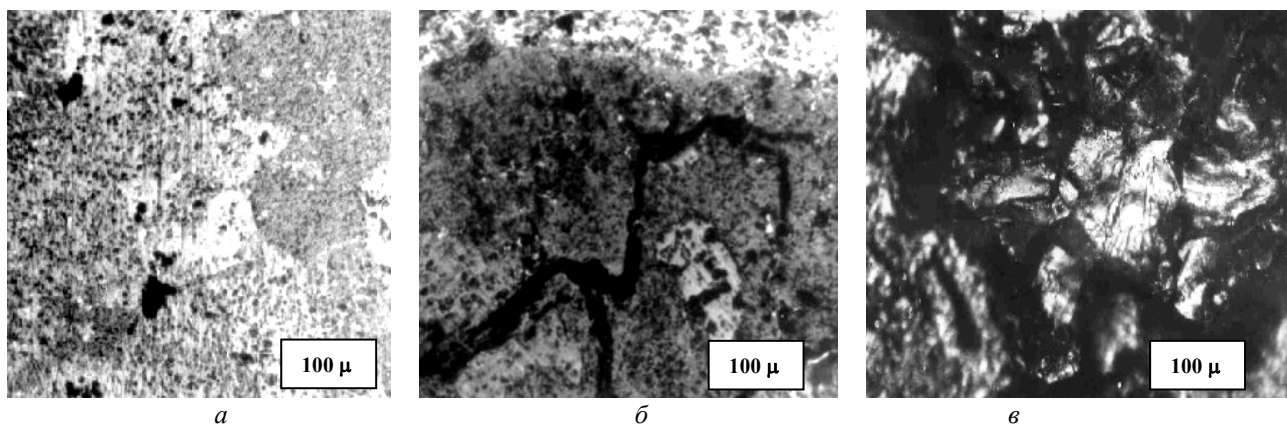


Рис. 2. Микроструктура топливного материала при различных температурах отжига:
а – не расплавлен ($T=2250^{\circ}C$); б - частично расплавлен ($T=2370^{\circ}C$);
в – полностью расплавлен ($T=2425^{\circ}C$)

3.3. Взаимодействие Zr с порошком UO_2

Эксперименты проведены в вакууме, чтобы сохранить исходное состояние двуоксида урана и металлического циркония, а также в атмосфере воздуха. Поскольку в экспериментах настоящей работы охлаждение расплавов осуществлялось с высокой скоростью, то это означает, что практически фиксировалось высокотемпературное фазовое состояние. Исследования проводили с использованием спрессованных брикетов металлического циркония или диоксида циркония, внутри которых находился порошок диоксида урана при температуре 1900, 2300 °С.

Форма брикета, изготовленного из 20 г металлического циркония и 0,95 г диоксида урана, при выдержке в течение 1 ч в вакууме при температуре 1900 °С не изменилась. Поверхность в нижней его части стала более светлой из-за оплавления и стекания вниз циркония, появился металлический блеск. Нижний торец брикета после оплавления принял радиусную форму по профилю дна графитового тигля. Верхняя часть брикета черного цвета стала более рыхлой из-за потери металлического циркония и его стекания в нижнюю часть брикета (рис. 3,а).

Наличие порошка UO_2 в присутствии металлического циркония приводит к частичному восстановлению диоксида урана, при этом цирконий частично окисляется. Происходит образование твердых растворов общего состава $Zr_xU_yO_z$ с широким интервалом варьирования содержания Zr, U, O.

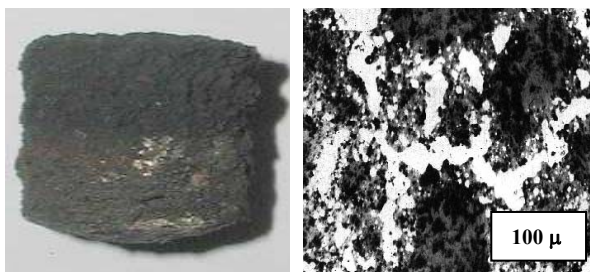


Рис.3. Образец материала из $Zr_{(mp)}+UO_{2(пор)}$, $T\sim 1900$ °С, $x200$: а - брикет после оплавления; б - микроструктура образца

Типичная микроструктура полученных образцов в сечении по центру показана на рис.3,б. Она гетерогенна, состоит из фаз светлого и серого цветов различных оттенков, а также их комбинаций. Значения микротвердости серой фазы находятся в интервале $H_{\mu}=8682\ldots 9310$ МПа, светлой - $H_{\mu}=11172\ldots 13426$ МПа. Цвет фаз и значение микротвердости позволяет идентифицировать их следующим образом: фаза светлого цвета представляет собой твердый раствор урана в цирконии с преобладанием в нем циркония (до 80...90%), фаза серого цвета свидетельствует о смещении состава в сторону увеличения содержания диоксида урана (~до 65...80%).

При температуре 2300 °С и времени выдержки 10 мин в атмосфере воздуха материал расплавился, смочил внутреннюю поверхность графитового тигля и выплеснулся на внешнюю поверхность. На поверхности тигля образовалась выпуклая пленка расплава толщиной ~0,3 мм темно-синего цвета, хрупкая, легко разрушаемая. На дне тигля остался расплав светло-серого цвета, пористый, хорошо отделяемый от графита (рис. 4,а).

Микроструктура образовавшегося расплава показана на рис. 4,б.

Она гетерогенна, состоит из фазы светлого цвета с равномерно распределенной в ней фазой серого цвета и дендритными выделениями литого материала. Не исключено образование карбидов циркония. Значения микротвердости фазы светлого цвета равномерны и находятся в интервале 7742...7840 МПа. По составу это близко к $Zr_xU_yO_z$, где $x = 0,10\ldots 0,12$, $y = 0,88\ldots 0,90$.



Рис.4. Образец материала из $Zr_{mp}+UO_{2(пор)}$, $T\sim 2300$ °С, $x200$: а - после оплавления; б - микроструктура образца

Исследования взаимодействия циркониевого сплава с таблеткой диоксида урана проводили на изготовленных макетах твэлов.

При температуре 2800 °С в атмосфере воздуха в течение 10 мин в результате отжига произошло полное окисление макетов твэлов и таблетки диоксида урана. Отжиг макета твэла ($Zr+UO_2$) при $T>2800$ °С на воздухе привел к образованию равномерной по составу пористой мелкозернистой структуры твердого раствора (рис. 5). При этом произошло окисление циркония до стехиометрического состава ZrO_2 . Об этом свидетельствуют как значения микротвердости $H_{\mu}=11172\ldots 13426$ МПа, так и цвет образовавшегося твердого раствора.

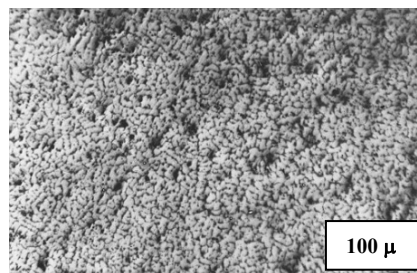


Рис.5. Микроструктура образца из $Zr_{(mp)}+UO_{2(таб)}$, $T\sim 2800$ °С, $x200$

В теле образца равномерно распределены поры, которые образовались в результате усадки материала в процессе охлаждения.

3.4. Взаимодействие порошка ZrO_2 с порошком UO_2

Изучение взаимодействия окислов на воздухе проводили с использованием спрессованных при температуре 1100...1200 °С брикетов оксида циркония, внутри которых находился порошок диоксида урана, а отжиг брикетов – в графитовых тиглях при температурах 2200...2600 °С с использованием более стойких на воздухе нагревателей из углерод-углеродных композиционных материалов (рис. 6,а).

В таких сложных условиях создается возможность образования в присутствии графита и кислорода карбидных, окисных и оксикарбидных систем, которые, вероятно, непрерывно образуются и параллельно распадаются с выделением большого количества тепла и окиси углерода и могут приводить к бурному кипению в результате газовыделения, разбрызгиванию и испарению компонентов. После проведения ряда экспериментов стало очевидным, что «критические» параметры – температура и время - требуют строгого контроля и сокращения времени отжига до 10 мин и меньше.

Сплавление в вакууме порошка диоксида циркония ZrO_2 с диоксидом урана UO_2 в соотношении как 5:1 при ступенчатом нагреве при температурах 2200...2300...2350 °С с выдержкой в течение 15 мин на каждом этапе привело в конечном счете к полному расплавлению брикета (остались только следы материала на тигле) и повреждению нагревателя. Анализ следов материала показал образование структуры мартенситного типа (см. рис. 6,б), по составу, более близкой к стехиометрическому диоксиду урана (микротвердость 6664...8428 МПа) с выделениями, по составу приближающимися к оксидам циркония нестехиометрического состава, о чем свидетельствуют и значения микротвердости ($H_{\mu}=12054...12446$ МПа).

Отжиг брикета при тех же условиях в тигле из графита АРВ при температуре (2300+50) °С с выдержкой 10 мин показывает полное расплавление материала, хорошее смачивание тигля. На внутренней и внешней нижней части тигля наплыв расплава. Внутренняя часть тигля золотистого цвета (рис. 7,а). Микроструктура расплава представлена твердым раствором состава $Zr_xU_yO_z$ (см. рис. 7,б). Микротвердость фазы серого цвета составляет 7183...8428 МПа (по составу близкому к стехиометрическому диоксиду урана) с небольшими участками, по составу приближающимися к твердому раствору, с содержанием диоксида циркония до 40...50% ($H_{\mu}=9898...10500$ МПа).

Обследование после охлаждения брикетов по составу аналогичного предыдущим, отжиг которых проводили в вакууме в графитовом тигле при температуре 2600 °С в течение 15 мин, свидетельствует о том, что материал брикета расплавился и испарился без внешних признаков конденсации на экране нагревателя и подставке.

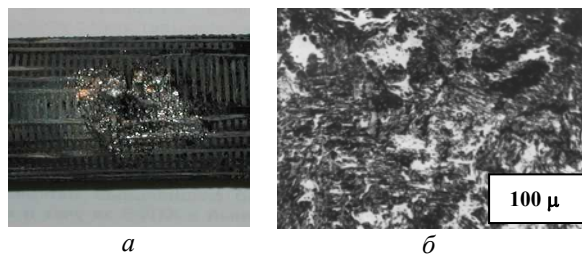


Рис. 6. Образец материала из $ZrO_{2(пор)}+UO_{2(пор)}$, $T\sim 2350^{\circ}C$, $x200$: а - после оплавления; б - микроструктура образца

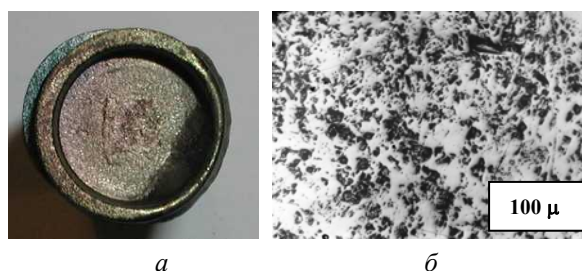


Рис. 7. Образец материала из $ZrO_{2(пор)}+UO_{2(пор)}$, $T\sim 2350^{\circ}C$, $x200$: а - после оплавления; б - микроструктура образца

На поверхности тигля осталась коричневая с золотистым оттенком пленка (следы побежалости), на подставке тигля – следы от расплава.

3.5. Взаимодействие порошка ZrO_2 с таблеткой UO_2

С целью исключения влияния углерода на температуру плавления системы ZrO_2-UO_2 были взяты фрагменты таблетки диоксида урана, закрытые порошком диоксида циркония и помещенные в танталовую лодочку для отжига в графитовых тиглях при «критических» температурах 2350 и 2600 °С в вакууме. После отжига при температуре 2350 °С в течение 5 мин наблюдалось незначительное спекание (усадка) порошка диоксида циркония.

После отжига при температуре 2600 °С в течение 5 мин материал расплавился (рис. 8,а). Спекание UO_2 -таблетки и ZrO_2 (порошок) при $T\sim 2600^{\circ}C$ позволило получить UO_2-ZrO_2 -эвтектику (см. рис. 8,б).

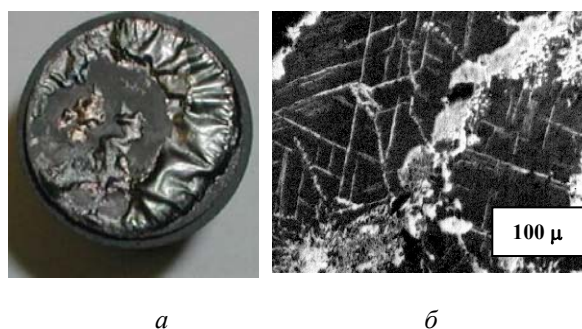


Рис. 8. Образец материала из $ZrO_{2(пор)}+UO_2(T)$, $T\sim 2600^{\circ}C$, $x200$: а - после оплавления; б - микроструктура образца

Темная фаза с белыми прожилками представляет собой $(U,Zr)O_x$ и имеет значение микротвердости в интервале 5488...7252 МПа. Темно-серая гомогенная фаза, вероятно, приближается по составу к стехиометрическому диоксиду урана и имеет $H_{\mu}=7840$ МПа. Светлая фаза, вероятно, представляет собой соединение с преобладанием циркониевой составляющей $(Zr,U)O_x$ и имеет микротвердость $H_{\mu}=5880$ МПа. Участок светлой и темной фазы имеет $H_{\mu} = 8134$ МПа и его состав предполагает механическую смесь циркониевых и урановых оксидов различной стехиометрии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В системе оксидов урана и циркония отсутствуют химические соединения, расплав кристаллизуется с образованием простой эвтектической смеси оксидов и твердых растворов $(U,Zr)O_{2+x}$, $(Zr,U)O_2$. Анализируя результаты взаимодействия расплавов конструкционных материалов с топливными, находящимися в твердой фазе, следует отметить, что взаимодействие наблюдается для всех сочетаний материалов.

В смеси расплавов наблюдается большее различие по цветовым оттенкам наблюдаемых фаз по сравнению с исходными расплавами. Несмотря на то, что условия взаимодействия и материалы экспериментов идентичны, происходит образование материалов с различной структурой. Внешний вид и структурное состояние полученных образцов существенно зависят от условий их получения: температуры, атмосферы, материала тигля. Наблюдается общая картина: чем длительнее выдержка материала в состоянии расплава, тем меньше в нем пор.

Показано, что с ростом температуры и времени выдержки увеличивается степень гомогенности полученных образцов: уменьшается количество фаз, их объем.

Металлографический анализ серии экспериментов по определению температуры плавления топливного материала показал, что:

- серия проведенных экспериментов позволила получить ряд твердых растворов общего состава ZrO_2-UO_2 , который зависит от содержания компонентов в исходной шихте;
- температура начала плавления системы (ZrO_2+UO_2) в графитовых тиглях составляет 2350 °С для всех изученных соотношений ZrO_2-UO_2 .

Серия проведенных экспериментов по определению температурных границ взаимодействия металлического циркония, диоксида

циркония с диоксидом урана в тиглях из графита различных марок в печах с графитовой оснасткой свидетельствует о существенном влиянии контакта исследуемого расплава с графитом. Эксперименты показали, что контакт расплава с графитом снижает температуру плавления систем $Zr-UO_2$ и ZrO_2-UO_2 на 250...300 °С.

Обнаружено, что в вакууме и атмосфере воздуха при плавке материалов в графитовых тиглях происходит значительный унос материалов через газовую фазу. При этом определенную роль в образовании газообразных продуктов играет графит. Это явление не позволяло осуществлять длительные выдержки расплавленных материалов при высоких температурах. Необходимо отметить результаты, которые невозможно объяснить на основе полученных данных: происходит унос практически всех окислов материалов, в том числе окислов циркония и урана, следует отметить, что основная часть убыли веса происходит примерно в первые 15 мин, вне зависимости от температуры расплава.

Значения микротвердости образовавшихся фаз лежат в пределах значений, полученных для расплавов топливных материалов, но имеют свои собственные значения для каждой фазы.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.В. Гончар, А.В. Жидков. *Динамика высокотемпературного взаимодействия аварийного ядерного топлива с конструкционными материалами РБМК НТЦ «Укрытие» НАН Украины, Чернобыль.*
2. А.Н. Киселев, К.П. Чечеров. Модель процесса разрушения реактора 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС // *Атомная энергия.* 2001, т. 91, в. 6, с. 425-434.
3. Э.М. Пазухин, Лавообразные топливо-содержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования // *Радиохимия.* 1994, т. 36, в. 2, с. 97-142.
4. Е.В. Панченко, Ю.А. Скаков, Б.И. Кример, П.П. Арсентьев, К.В. Попов, М.Я. Цвилинг. *Лаборатория металлографии.* М.: «Металлургия», 1965, 517 с.
5. Р.П. Эллиот. *Структура двойных сплавов.* М.: «Металлургия», 1970, т. 2, 472 с.
6. Г.Я. Сергеев, В.В. Титова, К.А. Борисов. *Металловедение урана и некоторых реакторных материалов.* М.: «Атомиздат», 1960, 223 с.

Статья поступила в редакцию 25.09.2008 г.

**МЕТАЛОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОДУКТІВ ВЗАЄМОДІЇ ОБЛОНОК
ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ТОПЛИВНИМИ МАТЕРІАЛАМИ В УМОВАХ
ВАЖКИХ АВАРІЙ**

*В.С. Красноруцький, А.П. Данилов, В.К. Яковлев, В.М. Євсєєв, Р.А. Матющенко,
О.О. Слабоспицька, Я.О. Куштим*

Представлено результати металографічних досліджень продуктів взаємодії оболонки тепловідляючого елемента з цирконієвого сплаву Е110 з таблеткою двоокису урану при різних температурах, також проведені дослідження продуктів взаємодії оболонки твелів з порошком UO_2 , взаємодія порошку ZrO_2 з порошком та таблеткою з UO_2 .

**METALLOGRAPHIC ANALYSIS OF INTERACTION PRODUCTS OF FUEL ROD
CLADDING WITH FUEL MATERIALS UNDER SEVERE ACCIDENTS**

*V.S. Krasnorutsky, A.P. Danilov, V.K. Yakovlev, V.M. Evseev, R.A. Matushenko,
E.A. Slabospitskaya, I.A. Kushtym*

Results of metallographic researches of interaction products of zirconium alloy E110 fuel rod cladding with uranium dioxide tablet at various temperatures, and also researches of interaction products of fuel rod cladding with UO_2 powder, interactions of ZrO_2 powder with UO_2 powder and UO_2 tablet are presented in the work.