

Раздел второй

МАТЕРИАЛЫ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

УДК 621.039.59

МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ЛАВОПОДОБНЫХ ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАСС

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

Научно-технический комплекс «Ядерный топливный цикл»

ННЦ ХФТИ, Харьков, Украина

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

Представлены результаты металлографических исследований структуры и микротвердости наиболее представительных образцов имитаторов ЛТСМ.

Чернобыльская авария и ее последствия стали причиной множества проблем, которые ждут своего решения. Одной из таких проблем является изучение характеристик образовавшихся лавоподобных топливосодержащих масс (ЛТСМ), прогноз их поведения и выработка рекомендаций по утилизации. Целый ряд ответов на вопросы может дать изучение имитаторов ЛТСМ, изготовленных из тех же материалов, что входят в состав ЛТСМ, но не обладающих наведенной радиоактивностью.

Кроме того, изучая процессы взаимодействия материалов, при изготовлении имитаторов в сочетании с имеющимися знаниями можно судить о параметрах и процессах, происходящих при образовании ЛТСМ в реакторе во время аварии.

В ННЦ ХФТИ проводятся работы по изучению поведения расплавленного топлива, его взаимодействию с различными конструкционными материалами и разрабатываются различные методы получения имитаторов ЛТСМ.

Целью исследований является получение сведений об основных характеристиках структуры лавоподобных топливосодержащих масс, образованных при имитации Чернобыльских лав.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При проведении исследований в качестве исходных компонентов шихты для синтеза имитаторов ЛТСМ применяли материалы, аналогичные тем, которые использовали при строительстве 4-го блока Чернобыльской АЭС и в активной зоне реактора РБМК:

- порошок диоксида урана;
- порошок циркония;
- порошок диоксида циркония;
- песок строительный;
- бетон;
- серпентинит;
- нержавеющая сталь.

Подбор компонентов и их процентное содержание было близким к составу в реальных ЛТСМ, которые обнаружены в различных

помещениях блока и исследованы с применением различных методик [1].

Эксперименты по исследованию параметров образования имитаторов ЛТСМ в вакууме проводили при одинаковом температурном режиме разогрева исходной шихты до температуры плавления, но с различными скоростями охлаждения 0,5; 4,5 и 50 °С/мин в интервале температур 800...1900 °С.

Эксперименты в атмосфере воздуха проводили при одинаковом температурном режиме разогрева, выдержки - при температуре плавления и охлаждения образцов. Скорость подъема и снижения температуры в этих экспериментах была примерно одинаковой и составляла ~200 °С/мин в интервале температур 800...1700 °С.

МЕТОДИКА МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Металлографические исследования были проведены на образцах, полученных в результате синтеза имитаторов ЛТСМ с различным составом и соотношением компонентов, приведенных в табл. 1.

Объектом исследования являлась шлифованная поверхность образца имитатора ЛТСМ.

Изучение структуры проводилось на металлографическом микроскопе МИМ-8. Измерение микротвердости различных фаз проводили на приборе ПМТ-3 с нагрузкой на индентор 100, 200 г.

Качественными признаками распознавания объектов были цвет, форма, размеры образовавшихся фаз, способность отражения света в светлом поле и в поляризованном свете [2].

Способность отражения света была использована для определения природы образовавшихся фаз.

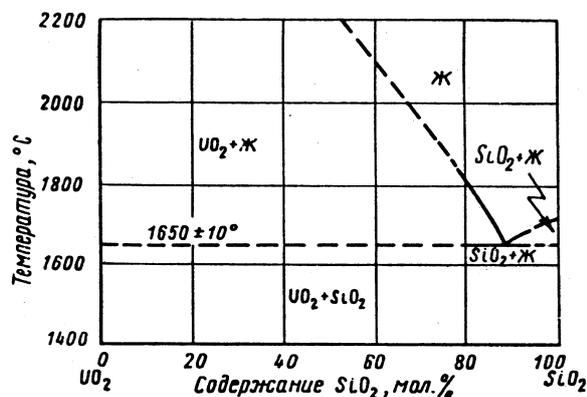
В [3] кратко описана система $UO_2-ZrO_2-SiO_2$. На рис. 1 показана диаграмма, характеризующая существующие в системе твердые растворы в температурной области 300...1350 °С, и схематическая диаграмма фазовых соотношений системы $UO_2-ZrO_2-SiO_2$. В кислородной атмосфере при 1350 °С в цирконе ($ZrSiO_4$) растворяется не более (4±2) мол. % соединения $USiO_4$.

Состав исходной шихты, использовавшейся при синтезе имитаторов ЛТСМ различного состава

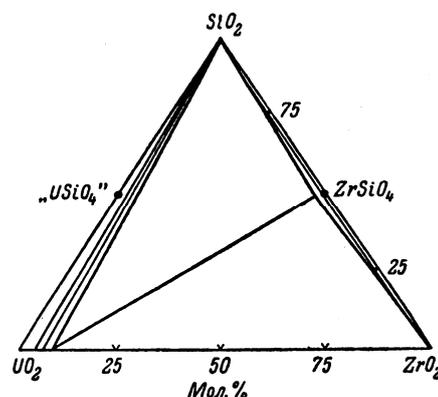
| Номер состава | Содержание компонентов, мас. % | | | | | | | |
|---------------|--------------------------------|------|------------------|------|-------------|-------|-------|-------------|
| | UO ₂ | Zr | ZrO ₂ | MgO | Серпентинит | Песок | Бетон | Нерж. сталь |
| 1 | 4,0 | - | 16,0 | - | 16,0 | 32,0 | 32,0 | - |
| 2 | 5,1 | - | 3,06 | - | 10,2 | 40,82 | 40,82 | - |
| 3 | 9,66 | - | 5,31 | - | 17,39 | 33,82 | 33,82 | - |
| 4 | 14,3 | - | 14,3 | - | 14,2 | 28,6 | 28,6 | - |
| 5 | 17,62 | - | 4,85 | - | 15,86 | 30,84 | 30,83 | - |
| 6 | 9,66 | 5,31 | - | 8,7 | - | 42,51 | 33,82 | - |
| 7 | 16,8 | 9,26 | - | 7,52 | - | 37,0 | 29,4 | - |
| 8 | 17,62 | 4,85 | - | 7,9 | - | 38,8 | 30,83 | - |
| 9 | 9,22 | 5,07 | - | 8,3 | - | 40,64 | 32,26 | 4,6 |
| 10 | 5,1 | 3,06 | - | 5,12 | - | 45,9 | 40,82 | - |
| 11 | 4,98 | 2,99 | - | 4,97 | - | 44,78 | 39,8 | 2,48 |
| 12 | 9,66 | 5,31 | - | - | 17,39 | 33,82 | 33,82 | - |
| 13 | 16,8 | 9,26 | - | - | 15,14 | 29,4 | 29,4 | - |
| 14 | 17,62 | 4,85 | - | - | 15,86 | 30,84 | 30,83 | - |
| 15 | 9,22 | 5,07 | - | - | 16,59 | 32,26 | 32,26 | 4,6 |
| 16 | 5,1 | 3,06 | - | - | 10,2 | 40,82 | 40,82 | - |
| 17 | 4,98 | 2,99 | - | - | 9,95 | 39,8 | 39,8 | 2,48 |
| 18 | - | 5,31 | - | - | 17,39 | 38,65 | 38,65 | - |

Указывается, что это соединение в чистом виде не получено и в трехфазных областях существуют SiO₂+UO₂ (твердый раствор) + ZrSiO₄ (твердый раствор) и ZrO₂ (твердый раствор) + UO₂ (твердый раствор) + ZrSiO₄ (твёрдый раствор). В виде метастабильного твердого раствора в цирконе может растворяться до 20 мол. % USiO₄.

Взаимодействие циркония с диоксидом урана в виде порошка или спеченной таблетки при температуре выше 300 °С приводит к активному процессу поглощения кислорода цирконием вплоть до образования стехиометрического диоксида циркония.



а



б

Рис. 1. Диаграмма состояния системы UO₂-SiO₂ (а) и схематическая диаграмма фазовых соотношений системы UO₂-ZrO₂-SiO₂ (б)

Это позволяет использовать для изготовления имитаторов наряду с твэловыми трубами в качестве конструкционных материалов диоксид циркония, а при исследовании брать за основу систему ZrO₂+UO₂.

В то же время в вакууме возможно частичное восстановление диоксида циркония [4], чем можно объяснить интенсивный выброс материала из зоны взаимодействия.

В качестве эталонов были исследованы соединения, образовавшиеся в результате

взаимодействия песка, бетона и серпентинита с топливными и конструкционными материалами. Это явилось исходной точкой для идентификации структуры и анализа получаемых образцов имитаторов ЛТСМ.

Структура полученных образцов представляет собой гомогенную гетерофазную керамическую композицию с включением в нее большего или меньшего количества глобул фрагментарной структуры, близкой визуально по составу к матрице и по значению к микротвердости.

В основе матрицы образца - силикатная керамика: смесь стеклокерамических фаз с частицами интерметаллида Zr-U. В образце присутствуют крупные частицы, представляющие собой конгломераты из мелких глобулярных частиц двуоксида урана и крупные частицы оксида циркония, непроизваимодействовавшие при расплавлении шихты.

Практически в матрице всех образцов присутствует равномерно распределенная фаза на основе оксидов светлого цвета с металлическим блеском и имеющая близкую к сферической форму частиц, размер которых изменяется от долей микрометра до нескольких миллиметров.

СТРУКТУРА ИМИТАТОРОВ ЛТСМ, ПОЛУЧЕННАЯ В ВАКУУМЕ

Во всех проведенных в вакууме экспериментах по синтезу имитаторов ЛТСМ образовывалась керамика с глянцевой наружной поверхностью, матовая на сколах образцов, с порами диаметром до 15 мкм и сферическими частицами с металлическим блеском.

Макроанализ показал, что керамика, полученная из шихты без содержания диоксида урана (см. состав №18, табл. 1), имеет светло-серый цвет. Образцы гетерофазны, с преобладанием двух фаз - множество включений сферической формы и металлическим блеском (рис. 2) и силикатной матрицы.

Величина включений колеблется от мелких (<1 мкм) до более крупных, размер которых достигает 30 мкм.

Цвет керамики, содержащей в исходной шихте от 4 до 5 мас. % UO_2 (см. составы № 1, 2, 10, 11, 16, 17, табл. 1), изменялся от светло-серого до серого.

Керамика, имевшая в исходной шихте ~9 мас. % порошка диоксида урана (см. составы № 3, 6, 12, 15, табл. 1) имела цветовой состав от светло-коричневого до коричневого.

При содержании диоксида урана в исходной шихте ~10 мас. % образовавшаяся керамика имеет цвет от светло-коричневого до янтарного.

Дальнейшее увеличение содержания порошка диоксида урана в исходной шихте до ~14...17 мас. % (составы № 4, 5, 7, 8, табл. 1) приводит к образованию керамики шоколадно-коричневого цвета.

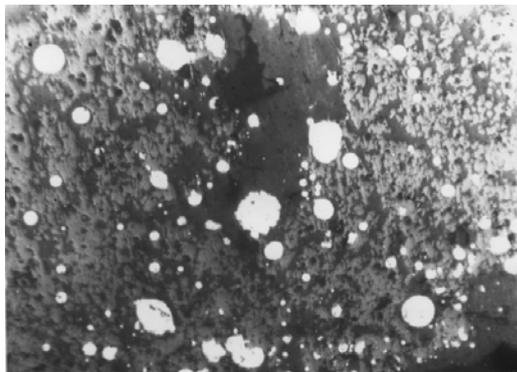


Рис. 2. Микроструктура имитатора из шихты без содержания урана

С помощью металлографического анализа образцов с содержанием урана в исходной шихте от 4 мас. % и выше UO_2 (рис. 2а) различаются следующие фазы:

- серая пористая с микротвердостью 7700...7800 МПа, предполагает состав, близкий к стехиометрическому диоксиду урана в соединении $(U,Zr)O_x$;

- серая гомогенная с микротвердостью ~8400 МПа силикатного происхождения;

- коричневая керамика с мелкими белыми включениями, твердая, но очень хрупкая (наблюдаются трещины от отпечатка). Микротвердость фазы до 19600 МПа;

- коричневая керамика без включений с микротвердостью ~8400 МПа, содержащая дисперсные частицы оксидов урана, возможно, с изоморфной примесью циркония в силикатной матрице.

Было отмечено, что внешний вид и структурное состояние получаемых образцов существенно зависели от температуры их получения.

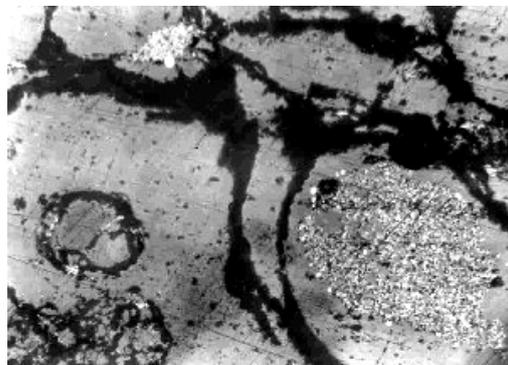


Рис. 2а. Микроструктура имитатора из шихты с содержанием 5% урана

При температуре ~1400 °С образовалась пористая керамика серого цвета (рис. 3). По-видимому, произошел расплав легкоплавких фракций в исходной шихте, и полученная масса стала связующим между остальными компонентами.



Рис. 3. Микроструктура керамики, полученной при 1400 °С

Исследуемая матрица мелкозернистая, пористая, светло-серого цвета. Предполагается, что состав ее обусловлен оксидами урана с изоморфной примесью циркония в силикатной основе. Встречающиеся участки желтого цвета округлой неправильной формы, вероятно, участки

нерасплавленного серпентинита – аналогичные участки встречаются в исходной структуре серпентинита (рис. 4). Фаза желтого цвета аморфна, не имеет четких очертаний.

Структура расплавленного серпентинита показана на рис. 4а.

Очертания фазы расплывчаты, что косвенно свидетельствует о ее некристаллическом состоянии. Проявляется темно-серая фаза, которая в светлом поле практически не проявлялась (похоже на налипание частиц силикатного происхождения). Значение микротвердости находится в пределах 6850...9310 МПа.

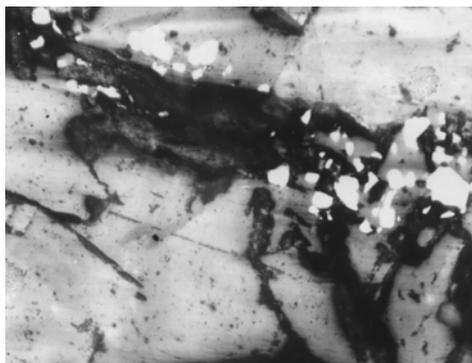


Рис. 4. Микроструктура исходного серпентинита

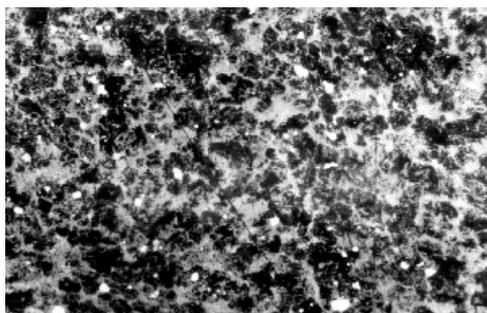


Рис. 4а. Микроструктура расплавленного серпентинита

Нагрев шихты до температуры $\sim 1500^\circ\text{C}$ приводит к образованию однородной силикатной матрицы (рис.5).

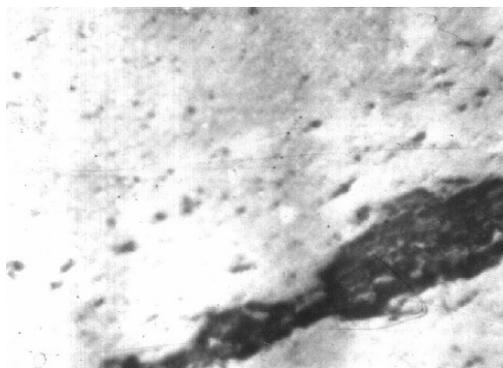


Рис. 5. Микроструктура керамики, полученной при 1500°C

Цвет, размер и форма частиц полученной керамики позволяет с определенной степенью

вероятности определить в ней наличие дисперсных частиц оксидов урана с возможным содержанием изоморфного циркония.

Микроструктура керамики коричневого цвета, образовавшаяся при температуре $1600...1650^\circ\text{C}$, приведена рис. 6. Ее цвет обусловлен многочисленными включениями дисперсных частиц оксидов урана как UO_2 , так и U_3O_8 , и изоморфного циркония в силикатной матрице. Микротвердость составляет $7840...8420$ МПа.



Рис. 6. Микроструктура керамики, полученной при 1650°C

При температуре $\sim 1900^\circ\text{C}$ образуется ряд непрерывных твердых растворов общего содержания $\text{UO}_2\text{-ZrO}_2$, состав которых варьируется в зависимости от соотношения компонентов в исходной шихте (составы № 6, 8, 10). Различное соотношение исходных компонентов приводит к образованию ряда твердых растворов общей формулой $\text{Zr}_x\text{U}_y\text{O}_z$ (рис. 7, 8).

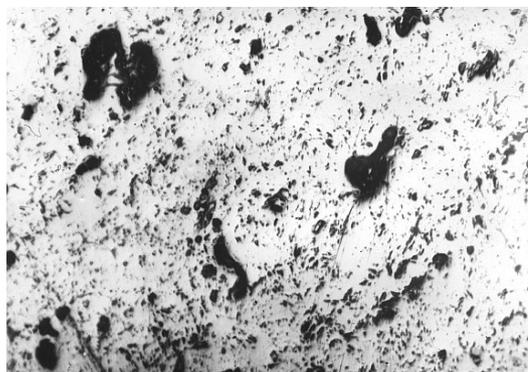


Рис. 7. Микроструктура керамики, полученной при 1900°C



Рис. 8. Микроструктура керамики, полученной при 1900°C

Полученные значения микротвердости позволяют предположить, что состав образующегося твердого раствора зависит от соотношения компонентов в исходной шихте. Значения микротвердости фаз зависят от количества вступивших во взаимодействие оксидов урана, циркония и др., т.е. от состава образовавшегося твердого раствора. В зависимости от состава полученной керамики изменяются значения микротвердости этих фаз, что видно из табл. 2.

Таблица 2

Значения микротвердости фазы твердого раствора общего содержания UO_2-ZrO_2 в некоторых образцах

| Номер состава | Микротвердость фазы состава $(Zr,U)O_x$, МПа | Микротвердость фазы состава $(U,Zr)O_x$, МПа |
|---------------|---|---|
| 6 | 11350...11900 | 5950...6320 |
| 8 | 12050...14600 | 5670...6000 |
| 10 | 6000...6213 | 6000...6200 |

Как правило, во всех экспериментах после плавления и охлаждения в материале наблюдаются сферические частицы с металлическим блеском. Было определено, что такие частицы представляют собой смесь интерметаллических и оксидных фаз. На рис. 9 приведена микроструктура одной из таких частиц.

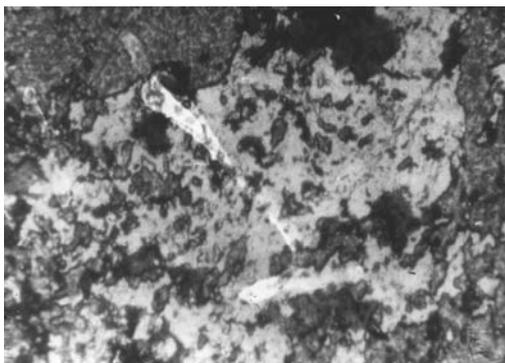


Рис. 9. Микроструктура сфероидита

Можно предположить, что эти сферические частицы появляются в результате процессов, подобных вскипанию, т.е. когда происходит образование пара в фазах, имеющих температуру плавления меньшую, чем основной расплавленный материал; наблюдается сфера парообразного материала, которая застывает в момент охлаждения расплава.

Имитатор из шихты с существенным количеством кремнийсодержащих материалов и пониженным содержанием урана и циркония имеет ярко выраженную гранулированную структуру (рис.10, состав № 11).

Средняя величина гранул составляет 50...60 мкм. Гранулы преимущественно состоят из силикатной фазы темно-серого цвета (значение микротвердости ~10200 МПа) с незначительным количеством фазы светлого цвета (микротвердость 8130...9310 МПа), характерного для силикатной керамики с включением дисперсных частиц оксидов урана и с возможным содержанием изоморфного циркония.

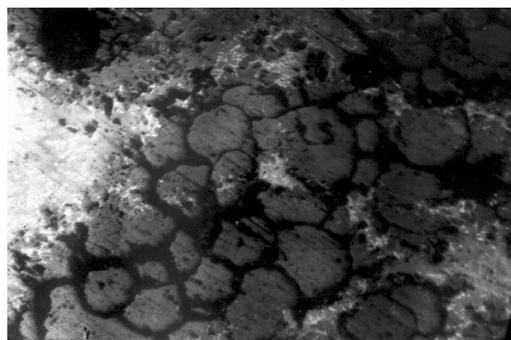


Рис. 10. Микроструктура керамики с пониженной концентрацией урана и циркония

СТРУКТУРА ИМИТАТОРОВ ЛТСМ, ПОЛУЧЕННАЯ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

Эксперименты в атмосфере воздуха проводили с использованием шихты, содержащей в своем составе серпентинит (см. табл. № 1, составы № 13, 14, 16, 17) в области температур 1450...1750 °С в течение 5...10 мин.

Для образцов, полученных в атмосфере воздуха, характерно наличие всех фаз, которые наблюдались на образцах, расплавленных в вакууме. Отличительной чертой этих образцов является появление большого количества мелких включений, колонии которых образуют фигуры звездчатой формы. Образование колоний обычно вызвано присутствием таких элементов, как алюминий, магний, железо, кальций и др.

Проведенные исследования показали, что при температуре отжига шихты 1500...1650 °С образуется глянцевая пористая стеклообразная керамика с большим количеством включений различного цвета (серого, коричневого, чёрного, серо-голубого) (рис. 11-13).

Поры произвольной формы диаметром до 10 мм образованы хаотично. Сфероиды, имеющие характерный металлический блеск, диаметром до 2 мм равномерно включены в тело имитатора.

При повышении температуры отжига до 1750 °С происходит значительное испарение ингредиентов шихты и в тигле остаётся небольшое количество керамики тёмного цвета (рис. 14).

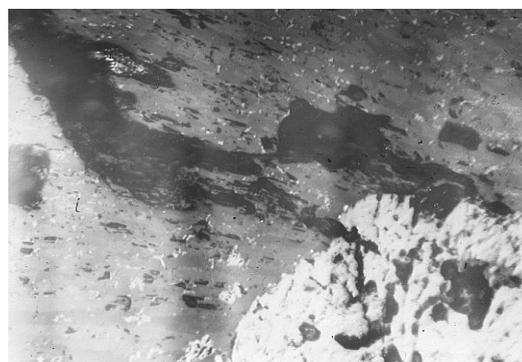


Рис. 11. Микроструктура керамики, полученной при 1460 °С

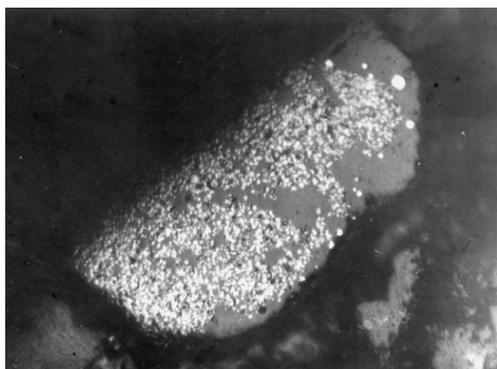


Рис. 12. Микроструктура керамики, полученной при 1520 °С



Рис. 13. Микроструктура керамики, полученной при 1650 °С

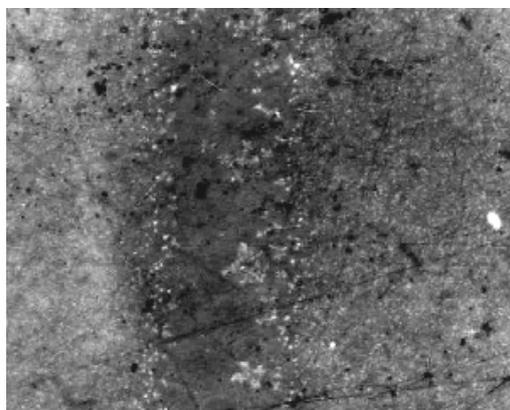


Рис. 14. Микроструктура керамики, образовавшейся при 1750 °С

Сравнение процессов формирования керамики в вакууме и в атмосфере воздуха свидетельствует о том, что в случае использования исходной шихты с серпентинитом температурные интервалы начала её образования практически совпадают и находятся в диапазоне температур 1450...1500 °С, максимальная же температура при которой ещё сохраняется керамика в атмосфере воздуха (до испарения ингредиентов) лежит в интервале 1600...1650 °С.

ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ОТЖИГА

Анализ образцов, полученных при температуре ~1500 °С в вакууме (см. табл. 1, образцы состава № 4) в течение времени от 15 мин до 20 ч показал, что при длительном (20 ч) нагреве наблюдается

процесс дифференциации, который не доходит до расслаивания. Зафиксирован процесс образования микроучастков различного состава (рис. 15).

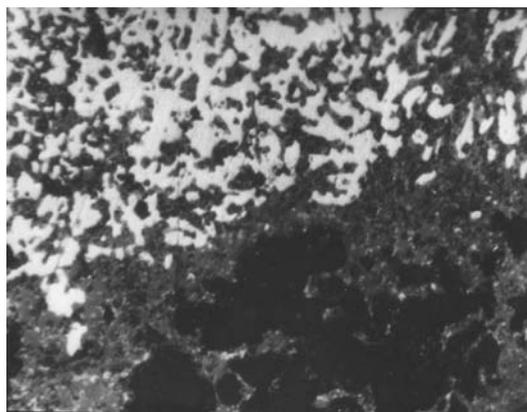


Рис. 15. Микроструктура образца, выдержанного в течение 20 ч при 1500 °С

Для незначительного времени отжига (15 мин) характерны гетерофазные образования различной природы. Увеличение продолжительности отжига при высокой температуре способствует равномерному распределению образовавшихся соединений, так как процессы, обусловленные переключением направленных связей (течение, химическое взаимодействие, диффузия, кристаллизация), протекают с малыми скоростями. Длительная (до 20 ч) выдержка приводит к агрегации идентичных структурных элементов в расплаве.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ

Для исследования влияния скорости охлаждения на состояние и структуру образцов были получены имитаторы из шихты одинакового состава (см. табл. 1, состав № 4), которую затем отжигали в вакууме при $T \sim 1500$ °С в течение 20 мин и охлаждали со средней скоростью 50; 4,5 и 0,5 °С.

В результате металлографического анализа образовавшихся образцов установлено, что во всех случаях керамика коричневого цвета.

При охлаждении со скоростью 50 °С/мин она имеет блестящую стеклообразную поверхность, тогда как имитаторы, охлажденные со скоростью 0,5 и 4,5 °С/мин имеют матовую поверхность шоколадного цвета.

На сколах образцов обнаружены поры размером до 10 мкм и сфероиды с металлическим блеском размером до 3 мкм.

Металлографический анализ свидетельствует о том, что:

- имитаторы ЛТСМ, полученные при высоких скоростях охлаждения (рис. 16) представляют собой монолитную серую матрицу с большим количеством включений светло-серого цвета, скопление которых образует фигуры звездчатой формы. Микротвердость матрицы изменяется в пределах 6530...10190 МПа. Существенный разброс по значениям микротвердости имеет и область с включениями звездчатой формы 4940...7600 МПа. В объеме образца присутствуют как включения

сфероидов, имеющих металлический блеск, так и - каплевидной формы светлого цвета.



Рис. 16. Микроструктура керамики, полученной при высокой скорости охлаждения

Для имитаторов ЛТСМ, полученных при низкой скорости охлаждения, характерным является растрескавшаяся или глобулярного строения силикатная матрица (рис. 17).

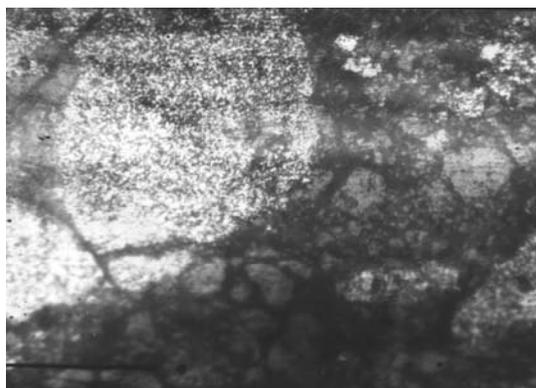


Рис. 17. Микроструктура образца, полученного при низкой скорости охлаждения

Керамика представляет собой пористую гетерофазную матрицу, состоящую из фаз серого и светло-бурого цвета и участков из множества мелких осколков, визуальнo идентичных по составу серой фазе. В объеме матрицы находится большое количество мелких (<1 мкм) частиц сфероидной формы с металлическим блеском.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что при низкой скорости охлаждения получены имитаторы, химический состав которых более однороден, а присутствующие фазы имеют более высокую степень дисперсности и распределены в объеме равномернее.

ВЫВОДЫ

Цвет керамики определяется процентным содержанием порошка диоксида урана в исходной шихте. Пороговое значение процентного содержания диоксида урана в исходной шихте, определяющее переход цвета образующейся керамики от светло-серого до светло-коричневого, лежит в интервале концентраций 5,1...9,66 мас. %.

Металлографический анализ образцов керамики показал, что состав полученных материалов в значительной мере зависит от температуры отжига и соотношения исходных компонентов в шихте.

Выявлена неоднородность имитаторов ЛТСМ по элементному составу в различных участках слитка.

В полученных образцах наблюдается отсутствие какой-либо дискретности в структуре исследуемого вещества.

Отожжённые в области температур 1400...1500 °С образцы содержат:

- силикатные фазы с включениями, скопление которых образуют фигуры звездчатой формы;
- $(Zr,U)O_x$ с микротвёрдостью выше 9800 МПа;
- соединения, близкие к стехиометрическому диоксиду урана с микротвёрдостью ~4900...5900 МПа;
- оксиды урана с изоморфной примесью циркония с микротвёрдостью 6900...9800 МПа;
- соединения, близкие по содержанию к диоксиду циркония, с микротвёрдостью ~13230...13400 МПа.

Последние четыре фазы практически не наблюдаются в чистом виде. Чаще всего они образуют соединения промежуточного состава. Соотношение компонентов в них зависит от количества используемого и вступившего в соединение циркония и диоксида урана, а также от условий синтеза.

Синтезированные при температурах 1600...1650 °С образцы однороднее по составу, керамика содержит большое количество дисперсных частиц, вероятно, оксидов урана. Образующиеся каплевидные (округлые) включения предполагаемого состава $(Zr,U)O_x$ становятся обширнее.

При более высоких температурах образуется керамика на основе твердых растворов $(Zr,U)O_x$ в силикатной матрице.

От состава исходной шихты зависит объем образовавшихся фаз: относительно высокое содержание урана и циркония определяет значительный объем фазы общего содержания $Zr_xU_yO_z$. Понижение концентрации урана и циркония в шихте приводит к образованию силикатной матрицы с небольшими образованиями общего состава $Zr_xU_yO_z$.

Металлографические исследования показали, что в результате взаимодействия топливных материалов со строительными материалами образуется силикатная керамика с содержанием урана в виде твердых растворов или в изоморфном виде.

Структурное состояние ЛТСМ и содержание фаз определяются составом, соотношением исходных компонентов, температурой, временем отжига, скоростью охлаждения и средой.

При высоких (50 °С/мин) скоростях охлаждения образуется керамика с глянцевой поверхностью, при низких (0,5 и 4,5 °С/мин) – с матовой, что достаточно хорошо согласуется с предположениями о разных скоростях остывания ЛТСМ в различных помещениях при аварии на ЧАЭС [1, 5, 6].

Металлографический анализ показал, что высокая скорость охлаждения ($50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$) приводит к образованию гомогенной матрицы, в то время как скорость охлаждения $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ приводит к образованию матрицы из осколочных фрагментов.

Отмечено, что при скорости охлаждения $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ образец включает в себя практически все наблюдаемые при образовании лав фазы, а при скорости охлаждения $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ - образование твердых растворов переменного состава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э.М. Пазухин. Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования // *Радиохимия*. 1994, т. 36, в. 2, с. 97-142.

2. Е.В. Панченко, Ю.А. Скаков, Б.И. Кример, П.П. Арсентьев, К.В. Попов, М.Я. Цвиллинг.

Лаборатория металлографии. М.: «Металлургия», 1965, 517 с.

3. Н.А. Торопов, В.П. Барзаковский, В.В. Лапин и др. *Диаграммы состояния силикатных систем*: Справочник. Л.: «Наука», 1969, т.1, с. 114-125.

4. *Физико-химические свойства окислов* / Под ред. Г.В. Самсонова: Справочник. М.: «Металлургия», 1969, 455с.

5. В. Гончар, А.В. Жидков. *Динамика высокотемпературного взаимодействия аварийного ядерного топлива с конструкционными материалами РБМК*. НТЦ «Укрытие» НАН Украины, Чернобыль.

6. 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.

Статья поступила в редакцию 28.08.2008 г.

МІКРОСТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ ЛАВОПОДІБНИХ ПАЛИВОВМІСТКИХ МАС

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

Представлено результати металографічних досліджень структури та мікротвердості найбільш представницьких зразків імітаторів ЛПВМ.

MICROSTRUCTURAL ANALYSES OF LAVA-LIKE FUEL CONTAINING MASSES

V.S. Krasnorutsky, V.K. Yakovlev, A.P. Danilov, V.M. Yevseyev, R.V. Matushenko, E.A. Slabospitskaya, Ya.A. Kushtym

The results of metallographic investigation of structure and microhardness of the most representative samples imitating of LFCM are presented in this work.