|  |  |
| --- | --- |
| Курс: | Производство керамического ядерного топлива |
| Модуль 6: | Технология нитридного керамического топлива |

|  |  |
| --- | --- |
| Автор | Гузеев Виталий Васильевич, д.т.н., профессор |
|  |  |
| Рецензенты |  |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Длительность  (рекомендуемая) | 3 часа |
|  |  |
| Главная цель | По окончании изучения темы обучаемый будет способен дать описание технологии нитридного керамического топлива. |
|  |  |
| Промежуточные цели | * Знать свойства нитридов урана * Назвать способы получения нитридов урана * Назвать этапы подготовки смеси для прессования таблеток ядерного топлива |

6.1. **Нитриды урана. Строение и свойства**

Рассмотрим нитриды урана. В системе уран-азот известно 4 фазы: UN, α-U2N3, β-U2N3, UN2 (или UN1,9). Все они при высокой температуре диссоциируют, поэтому вид диаграммы состояния зависит от давления азота в системе (рис.6.1).

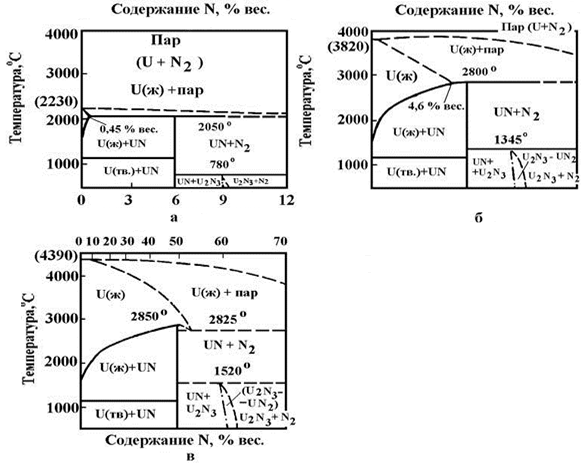


Рис. 6.1. Фазовая диаграм­ма U – N при различных давлениях азота

На рисунке 6.2 приведена диаграмма состояния в системе U-N при давлениях азота 1 атмосфера.

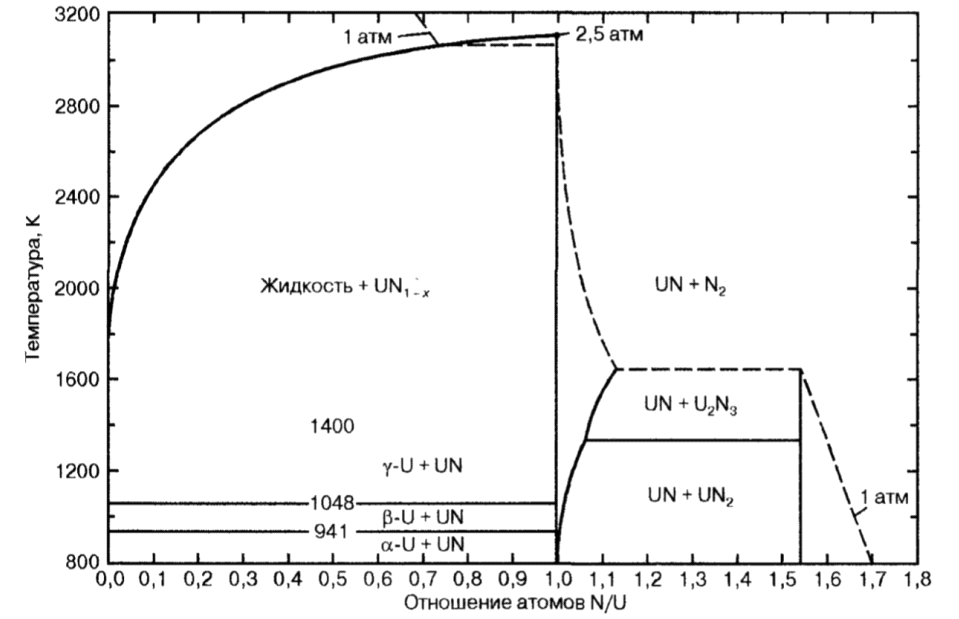


Рис. 6.2. Диаграмма состояния в системе U-N при давлении азота 1 атм

По внешнему виду нитриды урана описаны как черно-бурые, серо-стальные, темно-серые или черные порошки. Фазовые области между U и UN, UN и U2N3 гетерогенны. Уран и мононитрид урана образуют между собой эвтектику. UN при низких температурах практически не обладает областью гомогенности. При высокой температуре существует небольшая область нестехиометрических растворов с составами UN0,96 при 1500 ⁰С и UN0,92 при 1800 ⁰С. Состав области со стороны обедненной ураном имеет границы UN1,04 при 1600 ⁰С.

В таблице 6.1 представлены основные характеристики нитридов урана.

Табл. 6.1. Характеристики нитридов урана

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Соеди-нение | Тип кристаллической решётки | Параметры решетки, нм | Плотность, г/см3 | Температура плавления, ⁰С |
| UN | Кубическая гранецентрированная | 0,4889 | 14,32 | 2850 |
| α-U2N3 | Кубическая объемно-центрированная | 1,0678 | 11,24 | - |
| UN2 | Кубическая гранецентрированная | 1,0628 | 11,73 | 2650 |

**Мононитрид урана**. Мононитрид урана является фазой внедрения, кристаллизуется в гранецентрированной кубической решетке типа NaCl с 4 молекулами в элементарной ячейке. Существует в виде стехиометрического соединения с содержанием азота 5,56%. Период кристаллической решетки а0 = 4,8897 ± 0,0003.

На величину периода влияют примеси кислорода и углерода. Кислород присутствует чаще всего в виде UO2. В таблице 6.2 приведены теплофизические характеристики мононитрида урана.

Табл. 6.2. Теплофизические характеристики мононитрида урана

|  |  |
| --- | --- |
| **Характеристика** | **Нитрид урана (UN)** |
| Теплопроводность, Вт/м∙°С | 18,0 |
| Коэффициент линейного термического расширения,  10-6/°С | 10 |
| Сp, Дж/(моль·К) | 47,78 |
| ΔHобр, кДж/моль | -309,3 |

**Нитрид урана U2N3**. Полуторный нитрид урана U2N3 кристаллизуется в двух типах решеток.  Основная структура α-U2N3 – объемно-центрированная кубическая решетка типа Mn2O3 с 16 молекулами в элементарной ячейке. Вторая структура β-U2N3 – гексагональная плотноупакованная типа La2O3 может быть получена в специальных условиях. Гексагональную модификацию U2N3 получают в виде промежуточного слоя между UN и UN2 на куске урана нитрованием образца при температуре 1000 ⁰С и выше.

При низких температурах состав полуторного нитрида урана не соответствует стехиометрической формуле. Содержание в нем азота всегда больше, чем следует из формулы (8,11 % вес. N), но с повышением температуры состав приближается к стехиометрическому.

**Динитрид урана UN2.** Динитрид урана UN2 кристаллизуется в гранецентрированной кубической решетке типа CaF2 с периодом 5,31 ± 0,01. Получаемый динитрид урана всегда загрязнен нитридом UN. Стехиометрический состав UN2, если он существует, может образовываться только при высоких давлениях азота и низких температурах. Для эффективного проведения процесса необходимая температура составляет 1600 ⁰С. При этой температуре высшие нитриды U2N3 и UN2 неустойчивы. Однако, получаемый по этому методу UN, всегда загрязнен кислородом и углеродом.

6.2. **Методы получения мононитрида урана**

На данный момент можно выделить две наиболее перспективные технологические схемы получения мононитридов:

* карботермический метод в атмосфере азота из исходных оксидов (с использованием оксида энергетического плутония);
* метод гидрирования и нитрирования исходных металлов и сплавов U, Pu (продуктов электрохимической регенерации).

6.2.1. **Карботермический метод**

Карботермический процесс проводят по реакции:

2UO2 + 4C + N2 = 2UN + 4CO

Углерод в этом процессе необходим для связывания кислорода и удаления его из зоны реакции. Для эффективного проведения процесса необходимая температура составляет 1600 ⁰С. При этой температуре высшие нитриды U2N3 и UN2 неустойчивы. Однако, получаемый по этому методу UN, всегда загрязнен кислородом и углеродом.

Для полного удаления кислорода и углерода и получения чистого UN используют термическую обработку продукта при 1400-1600 ⁰С смесью водорода и азота (8% H2 + 92 % N2) или аммиаком, который при термической диссоциации образует водородно-азотную смесь: (NH3 + 75% H2 + 25% N2).

Кроме того, подбирают необходимое количество углерода для полного восстановления диоксида урана. Использование для получения UN водородно-азотной атмосферы позволяет получать чистый продукт из диоксида урана. В таблице 6.3 показано содержание примесей в UN при его получении из диоксида урана.

Табл. 6.3. Содержание примесей в UN при его получении из диоксида урана

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Состав  атмосферы | Оптимальное молярное отношение C/UO2при | | Содержание примесей в UN, % | |
| 1400 °С | 1600 °С | Кислород | Углерод |
| NH3 | 2,9 | 2,2 | 0,027 - 0,055 | 0,025 - 0,047 |
| 75 % H2 + 25% N2 | 2,7 | 2,2 | 0,038 - 0,051 | 0,014 - 0,032 |
| 8% H2 + 92 % N2 | 2,3 | 2,1 | 0,025 - 0,094 | 0,007 - 0,067 |

6.2.2. **Нитрование металлического урана азотом или аммиаком**

Исходный металлический уран может быть взят в виде куска, стружки или порошка, предварительно очищенные от оксидных пленок кислотной обработкой. При проведении процесса необходимо устранить попадание кислорода в реакционную зону, т.к. поглощенный ураном кислород практически не удаляется из продукта.

Этот синтез основан на следующих реакциях:

2Me(сплав) + 3Н2 = 2МеН3

МеН3 + 1/2(1+х)N2 = MeN(1+x) + 1,5H2

Реакция между ураном и азотом начинается при 200 – 300 ⁰С и интенсивно протекает при 700 – 900 ⁰С. Конечным продуктом реакции является не UN, а гомогенная фаза состава UN1+Х, где х = 0,55 – 0,75.

Динитрид урана стехиометрического состава может быть получен только при очень высоких давлениях азота. В то же время при нагревании полученной фазы в вакууме выше 800 – 1000 ⁰С она легко теряет азот и переходит в чистый UN, устойчивый до температур 1700 – 1800 ⁰С. Этот процесс может быть описан следующей реакцией:

UN1,55-1,75 = UN + N2

Как правило, этот процесс осуществляют в периодическом режиме.

Отечественными исследователями разработан непрерывный процесс получения мононитрида урана в установке, представленной на рисунке 6.3.

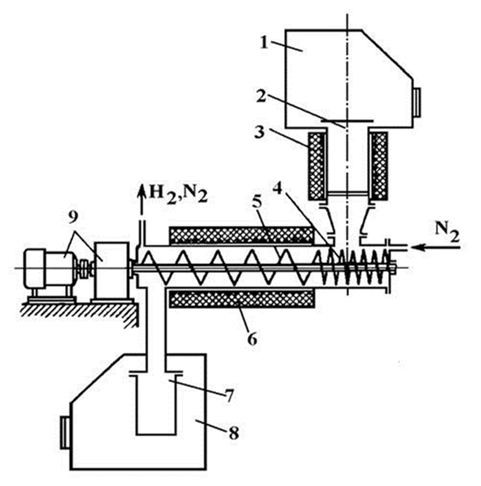


Рис. 6.3. Схема установки для получения UN непрерывным способом:

1 – загрузочная камера; 2, 3 – аппараты для гидрирования урана; 4 – шнек;   
5 – аппарат для нитрования урана; 6 – электропечь; 7 – приемная емкость;   
8 – разгрузочная камера; 9 – мотор

Металлический уран в виде слитков подают в аппарат для гидрирования. Порошок гидрида питателем 4 подается в аппарат для нитрования, куда подается и азот. Избыточное давление азота не превышает 20 – 30 мм. рт. ст., а его расход примерно в два раза выше необходимого для образования полуторного нитрида урана. При повышении температуры нитрирования с 400 ⁰С до 800 ⁰С содержание азота в конечном продукте увеличивается с 6,96 до 8,4%. При температуре 400 ⁰С процесс не проходит до конца, поэтому его проводят при 800 ⁰С.

Повышение температуры приводит к увеличению размера частиц порошка получаемого нитрида (при 400-550 ⁰С средний размер частиц порошка составляет 3-8 мкм). При последующей термической обработке полученного продукта в вакууме при 900 ⁰С получают мононитрид урана с содержанием азота 5,4-5,5%, крупностью 5-12 мкм. Содержание кислорода <0,1%, преимущественно в виде UO2. Тонкодисперсные порошки UN пирофорны.

6.3. **Переработка UF6 в неравновесном плазмохимическом процессе**

Неравновесные процессы – необратимые процессы, которые могут самопроизвольно протекать только в направлении изменения системы в сторону равновесия, в направлении повышения энтропии системы.

В неравновесной системе возникают силы, являющиеся разностью соответствующих величин в разных участках данной системы. Силы эти порождают выравнивающие процессы – перемещения веществ или полей, химические реакции, перестройки структуры и т.п., которые в конце концов истощают сами силы их породившие. Все градиенты постепенно исчезают и система достигает окончательного равновесия. В таблице 6.4 представлены термодинамические параметры плазмохимических реакций, рассчитанные для равновесных условий при температуре плазменного разряда, равной 4500 K.

Табл. 6.4. Термодинамические параметры плазмохимических реакций

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Реакция | Энтальпия реакции, ΔH, кДж/моль | Энергия Гиббса, ΔG, кДж/моль |
| 2UF6(г) + 3NH3(г) = 2UN + NF3(г) + 9HF(г) | 1281,137 | -1396,316 |
| 2UF6(г) + 6H2(г) + N2(г) = 2UN + 12HF(г) | 389,164 | -1370,261 |
| UF6(г) + 1,5H2(г) + NH3(г) = UN + 6HF(г) | 240,187 | -1116,394 |
| UF6(г) + 4,5H2(г) + N2(г) = UN + 5HF(г) + NH4F | 47,962 | 605,472 |
| UF6(г) + 1,5N2(г) = UN + 2NF3(г) | 1704,897 | 1850,338 |
| UF6(г) + 1,5H2(г) + 2N2(г) = UN + 2NF3(г) + NH3(г) | 1659,292 | 2281,601 |
| UF6(г) + 12H2(г) + 3,5N2(г) = UN + 6NH4F | -685,141 | 7058,485 |
| 2UF6(г) + 3NH3(г) = 2UN + NF3(г) + 9HF(г) | 0 | 1992,1 |
| 2UF6(г) + 6H2(г) + N2(г) = 2UN + 12HF(г) | 0 | 933 |
| UF6(г) + 1,5H2(г) + NH3(г) = UN + 6HF(г) | 0 | 774 |

Рассмотрим подробнее реакцию:

UF6(г) + 1,5H2(г) + NH3(г) = UN + 6HF(г) (6.1)

Реакция в действительности протекает ступенчато с образованием целого ряда промежуточных соединений. Основные стадии этого процесса могут быть представлены следующими уравнениями:

UF6 (г) + H2 (г) = UF4 (к) + 2HF(г)

NH3 (г) = 3Н\*(г) + N\*(г)

UF4 (к) + 4Н\*(г) = U (к) + 4HF(г)

U (к) + N\*(г)  = UN( к)

Возможные следующие побочные реакции:

N2 ( к) + 3F2 (г)  = 2NF3 ( г)

NH3 (г) + HF (г) = NH4F (к)

Равновессие в плазмохимическом процессе для реакции 6.1 будет смещено в сторону образования продуктов за счёт того, что:

* связь U-N наиболее прочная;
* UN имеет наибольшее значение удельного сопротивления, чем реагенты, а значит,
* что при правильном энергетическом режиме UN не будет подвергаться воздействию барьерного разряда.

6.4. **Подготовка смеси для прессования таблеток ядерного топлива. Прессование таблеток**

Для изготовления изделий из мононитрида урана можно использовать ряд методов:

1. холодное формование порошков с последующим спеканием;
2. горячее прессование в специальных прессах в защитной атмосфере;
3. дуговая плавка и литье;
4. реакционное спекание смеси урана и высшего нитрида (U2N3).

Независимо от метода получения изделий необходимо знать влияние параметров процесса на свойства получаемых изделий, таких как: плотность, состав, стехиометрию, структуру и т. д., так как свойства изделий в значительной мере влияют на поведение UN при эксплуатации.

Одностороннее горячее прессование обычно проводят в пресс-формах из графита, с использованием фольги из тантала, вольфрама или молибдена в качестве прокладки во избежание диффузии углерода внутрь образца.

Процесс горячего прессования проводят в вакууме или в среде азота. При процессе горячего прессования нитрид обычно оборачивается фольгой, а затем помещается в выложенные изнутри графитом емкости из ниобия или тантала для проведения процесса горячего прессования.

Для изготовления таблеток (для комплектации твэлов большинства энергетических реакторов) обычно применяется метод холодного прессования и спекания. Процесс спекания UN зависит от размера частиц порошка, атмосферы и температуры спекания.

В настоящее время основным методом получения нитридного топлива (мононитрид урана, уран-плутониевый нитрид, карбонитридные композиции) считается метод, основанный на приемах порошковой металлургии.

Основные операции производства сердечников твэлов из тугоплавких соединений урана:

* получение (синтез) тугоплавких соединений;
* изготовление их пресс-порошков;
* формование заготовок сердечников твэлов;
* спекание (термическая обработка) сформованных заготовок.

Получение тугоплавких соединений (карбидов, нитридов и т. д.) из оксидов связано с трудностями, обусловленными необходимостью получения продукта, не загрязненного кислородом и углеродом.

На процессы взаимодействия, протекающие в порошкообразных смесях (оксид и восстановитель), влияют многочисленные факторы:

* состав и природа реагирующих материалов;
* размеры и форма их частиц;
* степень смешения разнородных материалов (оксид, восстановитель);
* степень уплотнения реакционной смеси;
* условия проведения процесса синтеза и т. д.

Процесс изготовления плотных изделий из мононитрида урана, полученного карботермическим восстановлением UO2 в потоке азота, складывается из следующих последовательных операций:

* приготовление шихты — смесей диоксида урана с углеродом, в том числе с пластификатором;
* формование (прессование) брикетов из смеси UO2 + С;
* синтез UN путем конверсии UO2 при карботермическом восстановлении в потоке азота;
* приготовление пресс-порошка (измельчение синтезированного UN);
* формование (прессование) заготовок изделий;
* термическая обработка (спекание) сформованных заготовок.

**Приготовление шихты.** Проблема смешивания разнообразных веществ актуальна для многих технологических схем получения различных материалов. Исследованию аспектов этой проблемы посвящено большое количество работ. Однако в настоящее время не создано общей теории процесса смешивания. Эта теория позволила бы заранее на основании свойств смешиваемых материалов, требований к качеству продуктов смешивания и особенностей применяемого для этой цели оборудования рассчитывать параметры процесса смешивания и выбрать необходимый тип оборудования.

Проблема усугубляется при подготовке смесей материалов с большой разницей удельных весов. Диоксид урана имеет удельный вес 10,7 г/см3, а углерод — 2,2 г/см3.

Специальных исследований по получению смесей UО2 + С не проводилось, но практически во всех работах, посвященных получению нитридного топлива, отмечается необходимость получения смесей с равномерным распределением компонентов.

Для приготовления смесей UО2 + С используются шаровые мельницы, блендеры, планетарные мельницы и т. д.

Наиболее богатый опыт приготовления смесей оксида с углеродом с использованием шаровых мельниц накоплен в производстве твердых сплавов. Корпус шаровой мельницы обычно изготавливают из нержавеющей стали. В качестве смесителя используют планетарную мельницу или вибромельницу.

В зависимости от типа смесителя длительность смешивания различна и для шаровых мельниц достигает 24 ч, для планетарных — до 16 ч.

Качество смешивания определяется либо по качеству получаемого продукта взаимодействия компонентов смеси или по распределению (содержанию) одного из компонентов, чаще всего диоксида урана, в смеси UО2 + С.

Содержание урана определяется методом радиометрического или химического анализов. Качество смесей UО2 + С, получаемых в шаровой мельнице, также зависит от продолжительности смешивания, среднего размера частиц диоксида и углерода, их плотности, характеристик шаровой мельницы (соотношения диаметра мельницы к размеру применяемых шаров, коэффициента заполнения мельницы, соотношения массы UО2 + С к массе шаров, скорости вращения мельницы и т. д.).

Чаще всего для приготовления смесей используется UO2, полученный из диурана аммония, коэффициент стехиометрии 2,05, средний размер частиц 3,5 – 4,0 мкм, удельная поверхность 2 – 4 м2/г, а в качестве углерода-восстановителя — ламповая сажа, средний размер частиц 0,62 мкм, удельная поверхность 17 м2/г.

В таблице 6.5 показано влияние коэффициента неоднородности распределения UО2 в смеси UО2 + С на качество получаемого UN.

Табл. 6.5. Влияние коэффициента неоднородности распределения UО2 в смеси UО2 + С на качество получаемого UN

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Коэффициент неоднородности, % | Химический состав, % масс. | | | | Рентгенофазовый анализ | |
| U | С | N | О | Фаза | а, нм |
| 6,3 | 94,0 | 0,80 | 4,3 | 0,60 | U(C, N), UО2 | 0,4904 |
| 4,2 | 94,1 | 0,50 | 4,8 | 0,40 | То же | 0,4904 |
| 3,1 | 94,3 | 0,10 | 5,4 | 0,10 | UN | 0,4889 |
| 2,7 | 94,4 | 0,08 | 5,5 | 0,06 | То же | 0,4889 |

**Брикетирование.** Для обеспечения хорошего контакта диоксида урана с углеродом смесь UО2 + С подвергают брикетированию — приданию шихте определенных геометрических форм путем прессования например: цилиндрических таблеток с соотношением d/h = 1/3, дисков d = 10-15 мм и h = 1-3 мм.

Усилие прессования в зависимости от качества исходных UО2 и углерода, а также от вида и количества технологического связующего, колеблется от 50 до 200 МПа.

Для обеспечения хорошей проницаемости азота в зону взаимодействия и выхода образовавшегося СО плотность компактов составляет от 30 до 50 % от теоретической.

**Синтез.**

Процесс синтеза мононитрида урана при карботермическом восстановлении UО2 в потоке азота проводят в установках (печах) горизонтального или вертикального типа. Установки кипящего слоя не нашли применения в связи с механическим уносом реагирующего материала. В установках вертикального типа чаще всего используется индукционный нагрев. Прямое пропускание электрического тока через нагреватель применяется в печах горизонтального типа. Предпочтение отдается нагревателям, изготовленным из вольфрама. На рисунке 6.4 показаны печи, используемые для синтеза UN.

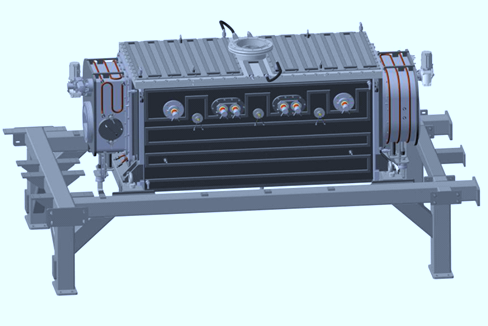


Рис. 6.4. Печь карботермического синтеза нитридов

**Спекание.** Обычно для спекания используются печи с нагревателем из вольфрама, также процесс спекания проводится в муфельной печи с футеровкой из оксида алюминия, но в тигле из вольфрама. Плотность спеченного изделия зависит от температуры, атмосферы спекания и длительности измельчения и практически не зависит от плотности исходной заготовки, если ее плотность не ниже 60-63 %.

Данные показывают, что плотность спеченного изделия зависит от длительности измельчения (дисперсности используемых порошков), качества заготовки (плотность) и условий проведения процесса (температура, атмосфера).

Плотность спеченного уранового нитрида увеличивается с повышением температуры спекания и оказывается больше в атмосфере смеси Аг и 8 % Н2, чем при спекании в атмосфере смеси N2 и 8 % Н2.

Многочисленные исследования показали хорошую совместимость нитридного топлива с нержавеющими сталями. При получении положительного результата таблетки или сразу направляют на снаряжение ТВЭЛов или упаковывают в специальную тару для временного хранения на складе готовых таблеток.

Композиция UN совместима при 973 К в течение по крайней мере 1000 ч со сталью марки 316. Согласно полученным данным нитридное топливо совместимо со сталью 304 при 700 и 800 ⁰С в течение 1000 ч, а со сталью 316 оно совместимо до 1000 ⁰С за это же время.

На совместимость нитридного топлива значительное влияние оказывают примеси кислорода и углерода.

На рисунке 6.5 представлена печь спекания нитридов толкательного типа.

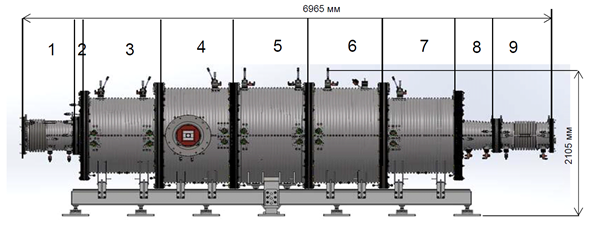


Рис. 6.5. Печь спекания нитридов толкательного типа:  
1) входной сильфон; 2) входной канал; 3) модуль предварительного нагрева; 4) модуль сдувки технологических газов; 5) модуль спекания; 6) модуль подачи технологических газов; 7) модуль охлаждения; 8) выходной канал; 9) выходной сильфон

Для получения изделий из мононитрида урана с плотностью больше, чем 90 % т. п., применяемые порошки должны быть крупностью менее 2 мкм. Это связано с плохой спекаемостью порошков нитридных материалов. Порошки крупностью менее 2 мкм получают при измельчении. Для измельчения чаще всего используют шаровые мельницы, изготовленные из карбида вольфрама (твердые сплавы ВК).

Имеются данные об использовании для измельчения нитридных материалов планетарных и вибромельниц. Порошки нитридов получают и с использованием автоматического вихревого смесителя Перед измельчением клинкер UN, полученный в результате конверсии UО2, дробят до крупности менее 200-300 мкм с использованием дробилок типа КИД или гидравлических прессов.

Порошки мононитрида урана с размером частиц 2-12 мкм — пирофорны и при наличии кислорода уже при комнатной температуре способны самовозгораться, поэтому получение мелких (<2 мкм) порошков UN проводят в атмосфере аргона, содержание кислорода и паров воды в котором не превышает 5-10 ppm.

Процесс измельчения проводят в жидкой среде (гексан, трихлорэтилен, тетралин и т. д.).

При выборе среды измельчения необходимо учитывать следующие факторы:

* испаряемость,
* способность растворять воду,
* воздействие на обслуживающий персонал,
* пожаробезопасность и т. д.

Характеристики порошков UN, используемых при спекании, представлены в таблице 6.6.

Табл. 6.6. Характеристики порошков UN, используемых при спекании

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Метод синтеза UN | Условия получения порошков | Характеристики порошков (размер, длительность) |
| Гидрирование-азотирование | Вибромельница | Размер частиц 0,01-3,0 мкм после 8 ч измельчения, <1 мкм после 20 ч измельчения, 0,01-0,5 мкм после 128 ч измельчения |
| После синтеза | 90 % < 10 мкм, 50 % < 5 мкм, 10 % < 2 мкм, 5уд = 0,5 м2/г |
| Конверсия UО2 в UN | Вибромельница | Длительность измельчения до 36 ч |
| Шаровая мельница | Длительность измельчения до 64 ч |
| Планетарная мельница | Длительность измельчения до 12 ч, 5уд = 1-1,5 м2/г |

Свойства изделий, получаемых методом порошковой металлургии, во многом зависят от состояния исходных заготовок. Качество последних в основном определяется характеристиками применяемых порошков, типом используемого технологического связующего и условиями формования.

Наиболее распространенным способом формования изделий простой геометрической формы (например, таблетка) является прямое прессование в металлических прессформах, помещенных в защитную атмосферу.

Обычно используется двухстороннее прессование, так как в этом случае достигается наибольшая равномерность плотности по высоте заготовки.

При изготовлении изделий таблеточной формы из UN в качестве технологического связующего используют парафин, воск, олеиновую кислоту, камфару, нафталин, стеарат цинка и т. д.

Наиболее эффектным фактором повышения спекаемости мононитрида урана является крупность используемых порошков.

Как следует из данных таблицы 6.7 для получения изделий UN с пористостью менее 10 %, необходимо использовать порошки со средним размером частиц менее 2 мм.

Табл. 6.7. Зависимость спекаемости UN от среднего размера частиц порошка

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Средний размер частиц порошка, мкм | Условия спекания | | Пористость, % |
| Температура, К | Длительность, ч |
| 2,1 – 2,3 | 1800 | 2,0 | 15 |
| 2200 | 1,0 | 11 |
| 1800 | 5,0 | 11 |
| 1900 | 0,5 | 4 |
| 2,0 | 2 |
| 1,5 – 1,7 | 2000 | 0,5 | 4 |
| 2,0 | 2 |
| 2120 | 0,5 | 3 |
| 2,0 | 2 |

Теплоемкость и теплопроводность мононитрида урана, а также средние коэффициенты линейного расширения UN представлены в таблицах 6.8, 6.9.

Табл. 6.8. Теплоемкость и теплопроводность мононитрида урана

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Температура, К** | **Теплоемкость, кал/моль·К** | **Теплопроводность, Вт/см·К** |
| **10** | 1,33 | 0,030 |
| **50** | 3,76 | 0,072 |
| **100** | 6,17 | 0,095 |
| **200** | 9,80 | 0,123 |
| **300** | 11,40 | 0,139 |
| **400** | 12,30 | 0,149 |
| **600** | 13,10 | 0,160 |
| **800** | 13,70 | 0,189 |
| **1000** | 14,20 | 0,206 |
| **1200** | 14,70 | 0,226 |
| **1400** | 15,20 | 0,245 |
| **1600** | 15,80 | 0,250 |

Табл. 6.9. Средние коэффициенты линейного расширения UN

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Температурный интервал, °С** | **20-100** | **20-300** | **20-500** | **20-700** | **20-900** | **20-1100** | **20-1300** | **20-1500** |
| **КЛР, 10-6/⁰С** | 7,4 | 8,0 | 8,4 | 8,8 | 9,2 | 9,4 | 9,6 | 9,8 |

Обработка спеченных таблеток проводится аналогично описанным процедурам для спеченных таблеток диоксида урана.