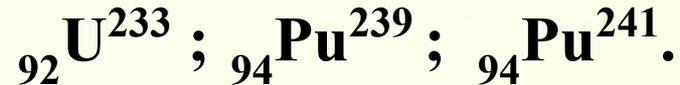


Тема 5. Делящиеся материалы

Существуют в природе: ${}_{90}\text{Th}^{232}$; ${}_{92}\text{U}^{234}$; ${}_{92}\text{U}^{235}$; ${}_{92}\text{U}^{238}$.

Производятся искусственно и используются в ядерной энергетике:



5.1. Физические свойства урана

Металл. Природная смесь изотопов: ${}_{92}\text{U}^{234}$ (период полураспада – $2,44 \times 10^5$ лет) – 0,005 %; ${}_{92}\text{U}^{235}$ ($6,85 \times 10^8$ лет) – 0,713%; ${}_{92}\text{U}^{238}$ ($4,5 \times 10^9$ лет) – 99,3%.

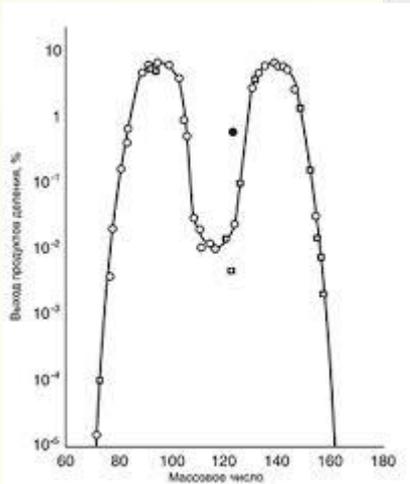
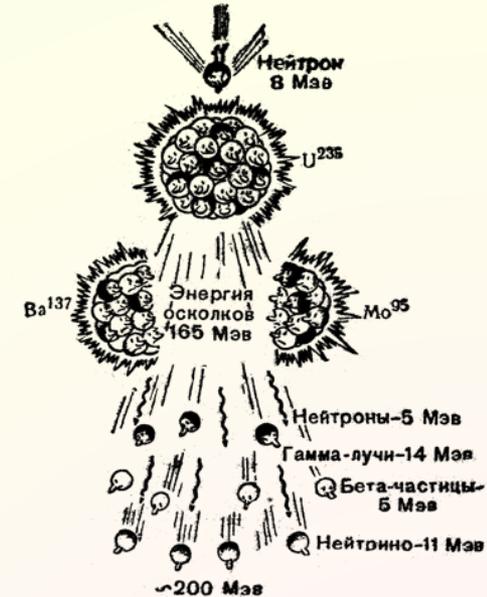
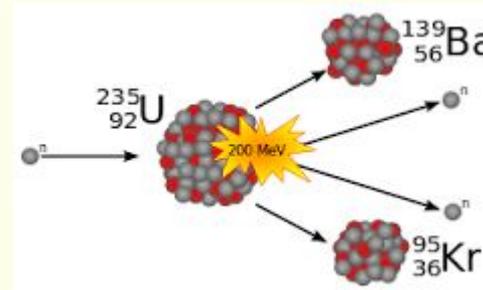
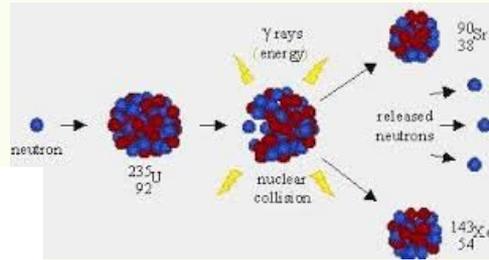
Все изотопы – альфа-активные ($E=4-5$ МэВ).

Плотность – $19,1 \text{ г/см}^3$. Температура плавления – 1402^0 К . Образует фториды типа UF_6 , которые сублимируют в газ при температуре 59^0С (очень важное свойство для изотопного обогащения с помощью центрифугирования или диффузионного разделения). Образует тугоплавкие оксиды (типа UO_2), нитриды (UN), карбиды (UC) и т.д., которые позволяют существенно повысить температуру твэла и тепловой КПД ядерного реактора.

Тема 5. Делящиеся материалы

Реакции взаимодействия нейтронов с ураном и другими актиноидами

1) ${}_{90}\text{Th}^{232}(\text{торий}) + {}_0\text{n}^1(\text{тепл.}) = {}_{90}\text{Th}^{233} \rightarrow {}_{91}\text{Pa}^{233}(\text{протактиний}) \rightarrow {}_{92}\text{U}^{233}$ (уран; этот изотоп способен делиться на тепловых нейтронах, т.е. превращается в топливо).



2) ${}_{92}\text{U}^{235}$ - способен делиться на тепловых нейтронах (много вариантов).

3) ${}_{92}\text{U}^{238}$ - способен делиться на быстрых нейтронах (много вариантов).

4) ${}_{92}\text{U}^{238} + {}_0\text{n}^1(\text{тепл.}) = {}_{92}\text{U}^{239} \rightarrow {}_{93}\text{Np}^{239}(\text{нептуний}) \rightarrow {}_{94}\text{Pu}^{239}(\text{плутоний})$.

${}_{94}\text{Pu}^{239} + {}_0\text{n}^1(\text{тепл.}) \rightarrow {}_{94}\text{Pu}^{240}$ (способен делиться на быстрых нейтронах).

${}_{94}\text{Pu}^{240} + {}_0\text{n}^1(\text{тепл.}) \rightarrow {}_{94}\text{Pu}^{241}$ (способен делиться на тепловых нейтронах).

Тема 5. Делящиеся материалы

Физические свойства урана

Атомный номер	92
Относительная атомная масса	238,03
Плотность, г/см ³	19,05
Температура плавления, К	1402—1403
Удельная теплоемкость при 298К кДж/(моль-град)	27.6
Температура кипения, К	4086
Удельное электрическое сопротивление при 298 К, мкОм · см	30
Кристаллическая структура	α-Фаза, ромбическая до 940,7± 1,3 К β-Фаза, тетрагональная до 1047,8±1,6 К γ-Фаза, ОЦК при температуре выше 1049 К
Параметр кристаллической решётки, нм	α-Фаза: a=0,2852 b=0,5865 c=0,4955 β-Фаза: a= 1,0759 c = 0,5656 γ-Фаза: a=0,3524
Коэффициент линейного расширения в интервале температуры 293-773 К вдоль различных кристаллографических осей, 10 ⁻⁶ град ⁻¹	a = 39,2 b=—6,3 c = 27,6

Тема 5. Делящиеся материалы

5.2. Радиационный рост урана

Под действием облучения происходит изменение формы и размеров изделий из урана. Удлинение вдоль оси $[010]$ и сокращение вдоль $[100]$ (вдоль $[001]$ размеры не изменяются).

Причина – образование радиационных дефектов типа каскадов смещения. Существует несколько теорий. Термомеханическая (анизотропия пластических свойств). Теория Коттрелла (анизотропия коэффициентов расширения). Диффузионная теория (анизотропия диффузии вакансий) и др.

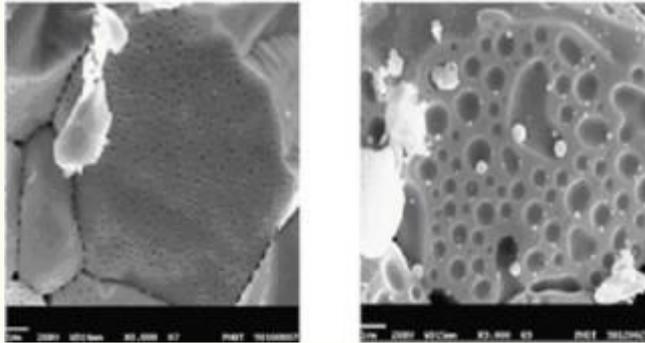
Для твэлов – нежелательное явление.

5.3. Радиационное распухание (свеллинг)

Механизм распухания – накопление газообразных продуктов деления (в основном гелия) с последующим объединением их в непрерывно растущие (пока есть нестабильные ядра, подверженные альфа-распаду) микропоры.

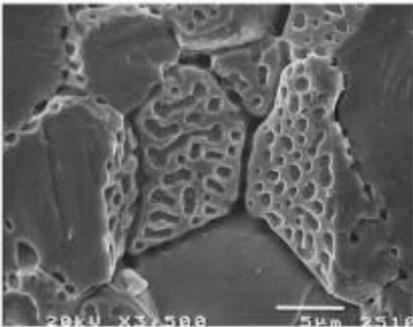
Механизм роста микропор – коалесценция, т.е. их объединение благодаря миграции. Существование крупных микропор термодинамически более оправдано.

Тема 5. Делящиеся материалы

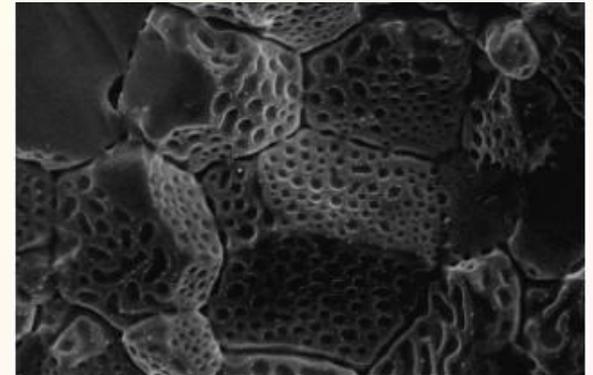
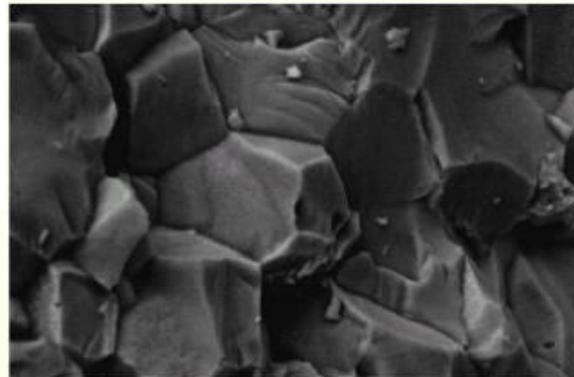


Примеры ранней (слева) и поздней (справа) стадий развития зернограничной пористости. На рисунке слева свеллинг равен 0,15%, справа - 5%.

На рисунке справа видны каналы вдоль поверхности зерен, сформированные пузырями в результате коалесценции, и приводящие к образованию открытой пористости.



Образование туннелей на поверхности зёрен после высокотемпературного отжига



Образец UO_2 до и после высокотемпературного (1410 C, 5 часов) отжига. Видны отдельные зёрна

Тема 5. Делящиеся материалы

- **Радиационный наклёп** = пластическая деформация зёрен в результате образования в них большого количества радиационных дефектов.
- Радиационная ползучесть урана (т.н. сверхползучесть) – важное свойство при его облучении. В результате этого процесса уран медленно деформируется. При облучении нейтронами ползучесть возрастает в сотни раз.
- Увеличение ползучести U (урана) в результате облучения нейтронами наблюдается при нагрузке $\sim 0,02$ МПа (!). При этом характерная скорость ее составляет примерно 1×10^{-5} % /час. Считается, что ползучесть является следствием радиационного роста (из-за образования дефектов и движения атомов в каскадах смещения и вблизи них).
- Ускоренная ползучесть при облучении может вызвать деформацию твэла в активной зоне и привести к аварии аппарата.

Тема 5. Делящиеся материалы

5.5. Сплавы урана

Уран в чистом виде не обладает хорошими механическими характеристиками. Поэтому используется в основном в низкотемпературных реакторах-бридерах с малым выгоранием. Повышение устойчивости металлического ядерного горючего к воздействию факторов активной зоны может быть достигнуто применением сплавов урана.

Требования к сплавам урана:

- легирующие элементы должны иметь минимальное сечение поглощения нейтронов;
- сплавы должны сохранять размеры, форму, обладать высокой прочностью и пластичностью;
- должны быть совместимы с оболочкой твэла; недопустимо их диффузное взаимодействие;
- обладать высокой коррозионной и эрозионной стойкостью в потоке теплоносителя.

Основное преимущество сплавов U по сравнению с керамическим топливом (оксиды, нитриды урана и т.д.) состоит в том, что они обладают значительно более высоким коэффициентом теплопроводности.

Тема 5. Делящиеся материалы

Уран имеет 3 модификации:

- α -фаза (низкотемпературная, до 940°K , ромбическая решетка);
- β -фаза ($940\text{--}1048^\circ\text{K}$, тетрагональная);
- γ -фаза (более 1048°K , ОЦК).

Основные различия в фазовых состояниях состоят в параметрах решётки.

Наиболее распространенные сплавы урана

Их можно разделить на 2 группы:

- со структурой α -фазы;
- со структурой γ -фазы.

Основное требование – фаза должна существовать в широком интервале температур). Первая группа используется в низкотемпературных реакторах на тепловых нейтронах (в них мало легирующих добавок, малое обогащение по U^{235}).

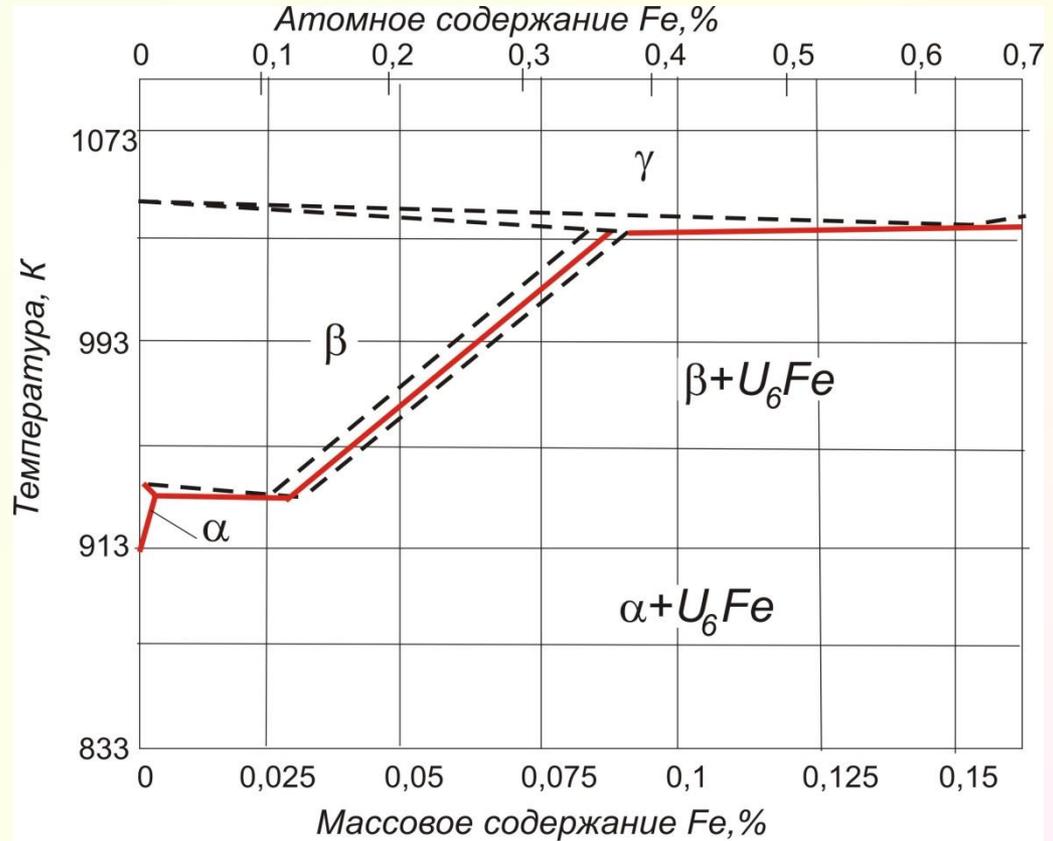
Вторая группа – для реакторов с более высоким обогащением по U^{235} . В ней содержание добавок больше. Соответственно, требуется более высокое обогащение.

Тема 5. Делящиеся материалы

Сплавы урана с железом

Если α -модификация, то содержание железа составляет 0,01–0,1% (структура твэла становится мелкозернистой).

Если β -, то 0,5%. Для γ -модификации – 1,8%. Т.е. содержание железа зависит от температуры, при которой будет работать твэл.



Урановый угол диаграммы системы U–Fe

Тема 5. Делящиеся материалы

Сплавы с алюминием

Al в α -фазе нерастворим.

В β -фазе – 0,18 %, в γ -фазе 0,6 %. Твэл может иметь включения интерметаллидов типа UAl_2 .

Сплавы с кремнием

В α -фазе кремний не растворяется.

В β - и γ -фазах соответственно до 2,58 и 3,75 %. Повышение содержания кремния немного снижает температуру $\beta - \gamma$ перехода.

Фаза U_3Si содержит 3,75 % кремния. Имеет большой практический интерес. Имеет большой предел текучести (400-700 МПа).

Сплавы с хромом

Содержание хрома составляет 1,5 – 4,5% (атомных). Повышается прочность.

Тема 5. Делящиеся материалы

Сплавы с молибденом

- Содержание Мо – 1-3%. Предел прочности – 1300 МПа, предел текучести – 900 МПа. Радиационная стойкость сплавов возрастает по мере увеличения содержания Мо. Хорошо сопротивляется свеллингу. Высокая коррозионная стойкость.

Сплавы с цирконием

- Zr хорошо растворяется в U. Малое сечение поглощения тепловых нейтронов (0,185 бн). Хорошо фиксирует высокотемпературную (γ) фазу.

Фоссиум

- Пирометаллургическая обработка отработанного топлива хорошо очищает от легколетучих продуктов деления. Но часть продуктов не удаляется (Mo – 3,4 %; Ru – 2,6 %; Tc, Rh, Pd – 0,3 – 0,9 %). Фоссиум (Fs) – обобщенное название этих продуктов. Его добавляют в топливо (U). Fs фиксирует γ -фазу урана. Перспективным считается горючее типа U – Pu – Fs.

Тема 5. Делящиеся материалы

5.6. Совместимость урана с оболочкой. Коррозия урана

Алюминий (оболочка): взаимодействует с ураном; образует интерметаллиды; при больших флюенсах оболочка способна разрушиться; для предотвращения используются промежуточные слои.

Цирконий: в целом хорошо совместим с нелегированным ураном, особенно если цирконий легирован ниобием на уровне 1-10%.

Сталь типа 12X18Н10Т: хорошо совместима; образует слой урансодержащих интерметаллидов толщиной 0,04 мм в год при температуре 773 К. При температуре 973 К толщина этого слоя составляет 0,3-0,5 мм. в год.

Тема 5. Делящиеся материалы (лекция+семинар, 4/14)