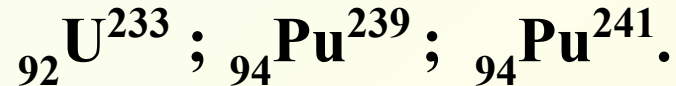


## Тема 5. Делящиеся материалы

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%.

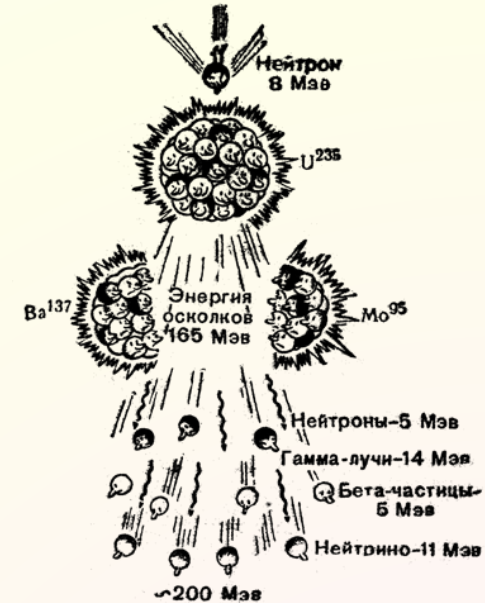
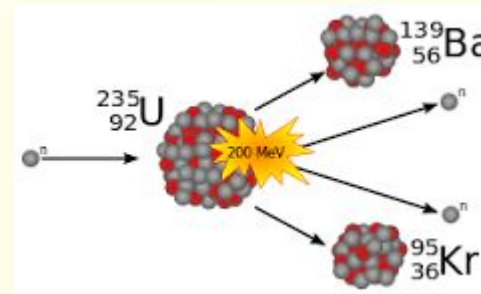
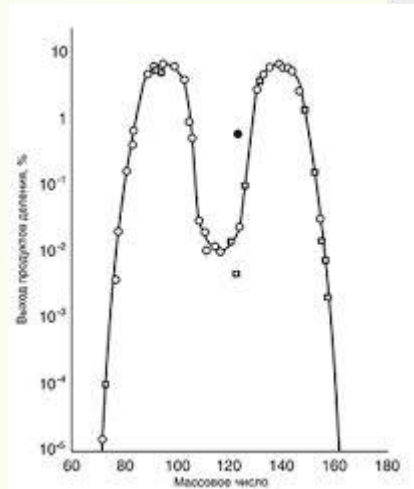
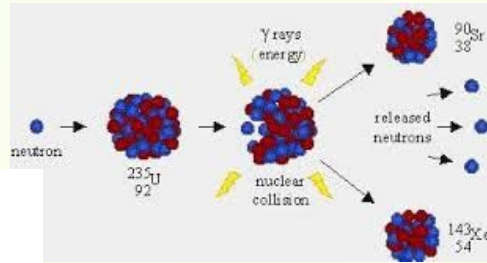
Все изотопы – альфа-активные ( $E=4-5$  МэВ).

Плотность –  $19,1 \text{ г/см}^3$ . Температура плавления –  $1402^0 \text{ К}$ . Образует фториды типа  $\text{UF}_6$ , которые сублимируют в газ при температуре  $59^0\text{С}$  (очень важное свойство для изотопного обогащения с помощью центрифугирования или диффузионного разделения). Образует тугоплавкие оксиды (типа  $\text{UO}_2$ ), нитриды ( $\text{UN}$ ), карбиды ( $\text{UC}$ ) 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 <sup>3</sup>	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 <sup>-6</sup> град <sup>-1</sup>	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.

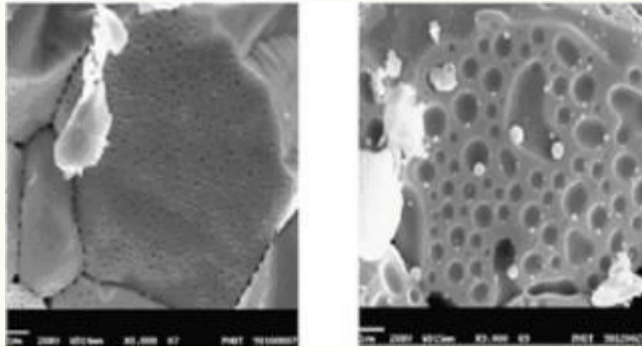
Для твэлов – нежелательное явление.

### 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.

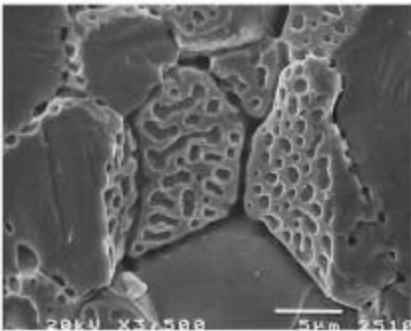
Механизм роста микропор – коалесценция, т.е. их объединение благодаря миграции. Существование крупных микропор термодинамически более оправдано.

## Тема 5. Делящиеся материалы

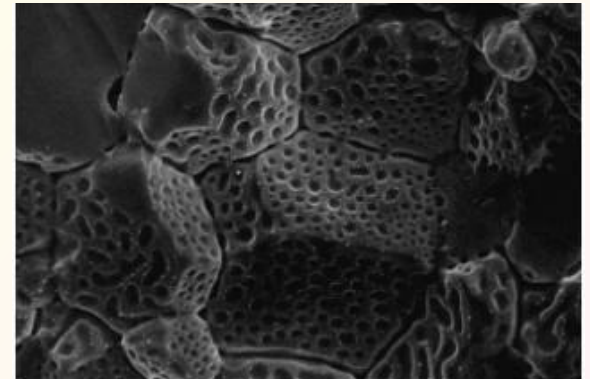
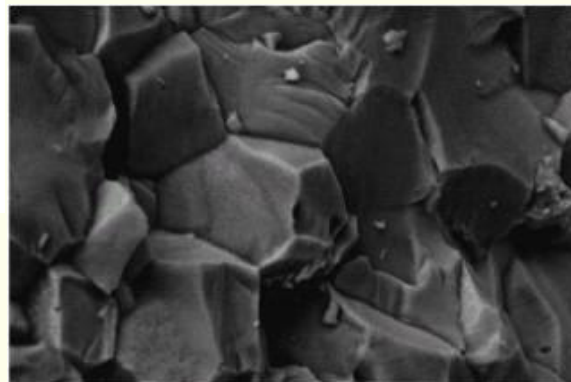


Примеры ранней (слева) и поздней (справа) стадий развития зернограничной пористости. На рисунке слева свеллинг равен 0,15%, справа - 5%.

На рисунке справа видны каналы вдоль поверхности зёрен, 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  $1 \times 10^{-5}$  % /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:

- $\alpha$ -фаза (низкотемпературная, до  $940^\circ\text{K}$ , ромбическая решетка);
- $\beta$ -фаза ( $940\text{--}1048^\circ\text{K}$ , тетрагональная);
- $\gamma$ -фаза (более  $1048^\circ\text{K}$ , ОЦК).

Основные различия в фазовых состояниях состоят в параметрах решётки.

### **Наиболее распространенные сплавы урана**

Их можно разделить на 2 группы:

- со структурой  $\alpha$ -фазы;
- со структурой  $\gamma$ -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  $\text{U}^{235}$ ).

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

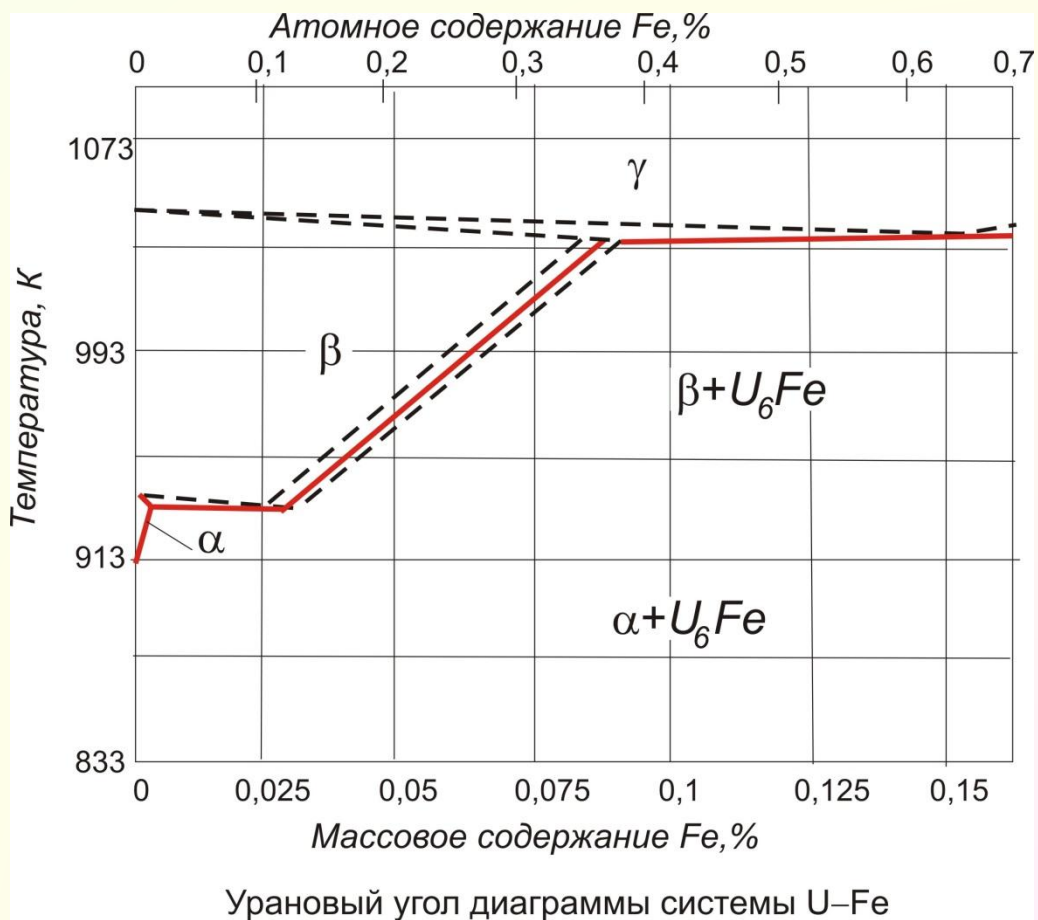


## Тема 5. Делящиеся материалы

### Сплавы урана с железом

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

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



## Тема 5. Делящиеся материалы

### Сплавы с алюминием

Al в  $\alpha$ -фазе нерастворим.

В  $\beta$ -фазе – 0,18 %, в  $\gamma$ -фазе 0,6 %. Твэл может иметь включения интерметаллидов типа  $UAl_2$ .

### Сплавы с кремнием

В  $\alpha$ -фазе кремний не растворяется.

В  $\beta$ - и  $\gamma$ -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 ( $\gamma$ ) 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  $\gamma$ -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 12Х18Н10Т: 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)**