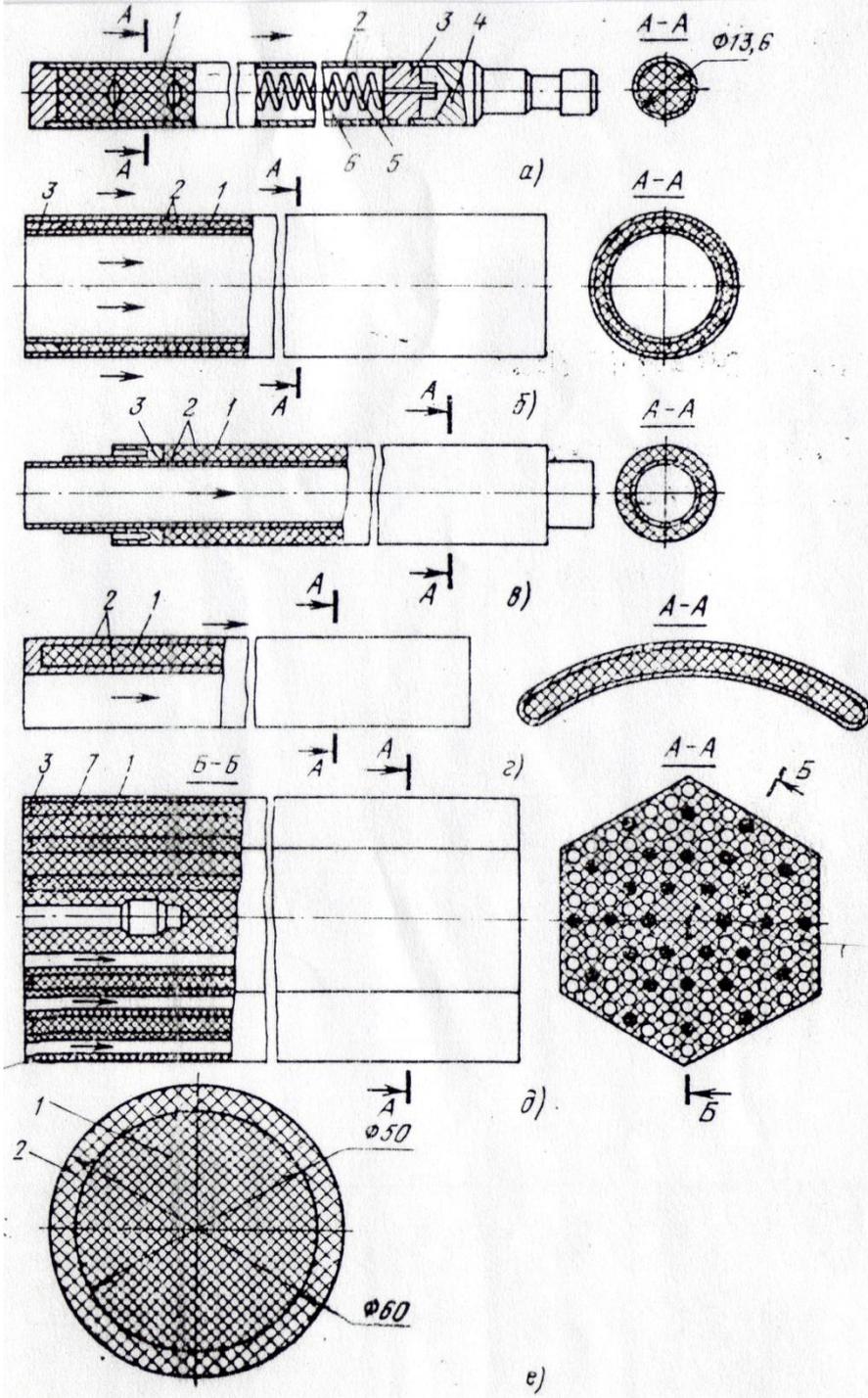


Лекция 9. Топливные и конструкционные материалы ядерной энергетики.

Типы ТВЭЛОВ

- а – стержневой с таблетками из спеченной UO_2 ;
- б – кольцевой совместно – прессованный;
- в – трубчатый с пропиткой матричным материалом;
- г – пластинчатый;
- д – призматический;
- е – шаровой;

- 1 – топливный сердечник (топливная композиция);
- 2 – оболочка;
- 3 – заглушка;
- 4 – наконечник;
- 5 – фиксатор;
- 6 – компенсационный объем;
- 7 – графитовый блок (призма).



Металлический уран

Уран - серебристо-белый глянцеватый металл на свежем сломе. Всего известно 14 изотопов $U^{227-240}$, для ядерной энергетики интересны 233, 235, 238. В чистом виде он немного мягче стали, ковкий, гибкий. Уран имеет три аллотропные формы: альфа (призматическая, стабильна до 667.7 °С), бета (четырёхугольная, стабильна от 667.7 до 774.8 °С), гамма (с объёмно центрированной кубической структурой, существующей от 774.8 °С до точки плавления), в которых уран наиболее податлив и удобен для обработки.

Основные физические свойства урана:

температура плавления 1132.2 °С ;

температура кипения 3818 °С;

плотность 18.95 г/см³ (в альфа-фазе);

теплоемкость от 120 Дж/(кг·К) (25 °С) до 200 Дж/(кг·К) (800 °С);

теплопроводность от 22 Вт/(м·К) (25 °С) до 45 (27 ?) Вт/(м·К) (800 °С).

Для использования в α -фазе (до 400°С) добавляют железо, кремний, алюминий, хром. Для использования в γ -фазе добавляют молибден, ниобий, цирконий. В натрии без кислорода коррозионно стоек, с алюминием совместим до 300°С, со сталью до 700°С, с циркониевыми сплавами до 700°С.



Кел Томасеши



Металлический плутоний



$\text{Pu}^{232\ 244}$ в природе почти не встречается, при облучении U^{238} в реакторе получают Pu^{239} . Хорошо очищенный плутоний является химически активным металлом (активнее урана) с никелевым блеском. На воздухе металл тускнеет.

Плутоний - это сложный металл, имеющий шесть аллотропных состояний (α , β , γ , δ , δ' , ϵ). Объем плутония увеличивается в процессе затвердевания расплавленного металла при температуре 640°C . При комнатной температуре нелегированный плутоний (α -фаза) имеет высокую плотность, он хрупкий и резко увеличивается в объеме с ростом температуры. При нагревании от комнатной температуры до температуры $120\pm 2^\circ\text{C}$, соответствующей точке α -перехода, его объем повышается на 11%. Однако, если плутоний легирован такими элементами, как алюминий или галлий, то полученный металл в δ -фазе пластичен и имеет близкий к нормальному коэффициент расширения.

Основные физические свойства плутония:

- температура плавления 639.4°C ;
- температура кипения 3230°C ;
- плотность от $19.84\ \text{г/см}^3$ (в альфа-фазе) до $15.92\ \text{г/см}^3$ (в других фазах);
- теплоемкость от $134\ \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ (25°C) до $2800\ \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ (600°C);
- модуль Юнга $96\ \text{ГПа}$;
- теплопроводность от $5.2\ \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ (25°C) до $8.7\ \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ (600°C).

Металлический торий

Торий радиоактивен $\text{Th}^{223-235}$, стабильных изотопов не имеет, наиболее долгоживущие изотопы ^{230}Th (период полураспада $7,5 \cdot 10^4$ лет) и ^{232}Th (период полураспада $1,4 \cdot 10^{10}$ лет). В природе наиболее распространен изотоп ^{232}Th , его содержание в земной коре $8 \cdot 10^{-4}\%$. Впервые торий выделен И. Берцелиусом (швед) в 1828 из минерала торит (содержит сульфат тория). Интерес к соединениям тория возник после того, как в 1885 венский химик Ауэр фон Вельсбах обнаружил, что если ввести в пламя газовой горелки оксид тория, то он очень быстро нагревается до состояния белого каления и испускает яркий белый свет. Ауэровские колпачки почти в 20 раз увеличили яркость газового освещения и втрое снизили его стоимость. Производство таких колпачков в отдельные годы достигало 300 миллионов. Торий является серебристо-белым пластичным металлом: α -фаза до 1400°C , далее β -фаза. Торий используется в качестве легирующей добавки, упрочняющей магниевые сплавы, введение тория в состав вольфрамовых нитей для электроламп накаливания увеличивает срок их службы.



Основные физические свойства тория:

- температура плавления 1842°C ;
- температура кипения 4820°C ;
- плотность от 11.724 г/см^3 (теоретическая);
- теплоемкость от $115 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ (25°C) до $537 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ (1400°C);
- модуль Юнга 79 ГПа ;
- теплопроводность от 36 (?54?) $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$ (25°C) до 45 (?3.4?) $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$ (1400°C);
- сверхпроводимость ниже 1.38 К .

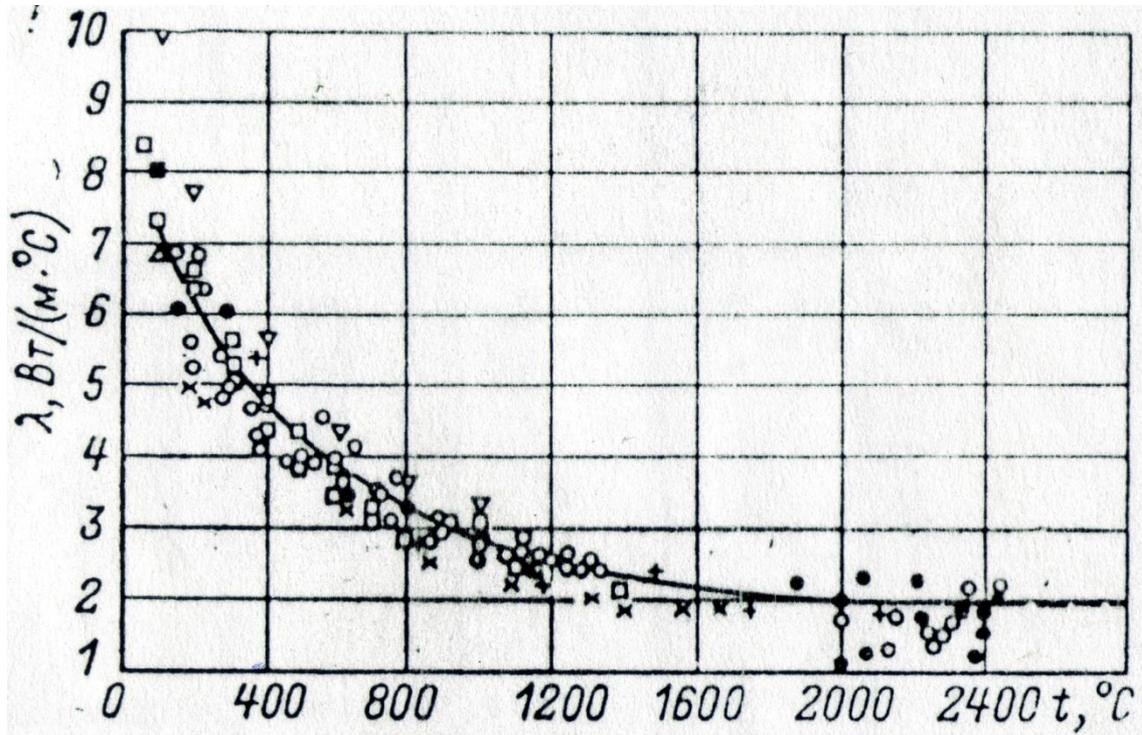
Двуокись урана



Всего 7 окислов, наиболее распространены UO_2 , U_4O_9 , U_3O_8 , UO_3 . Используется первая, массовое содержание урана 88 %, на цвет темно серая (почти черная). В ядерной энергетике может быть использована в виде прессованных или спеченных изделий.

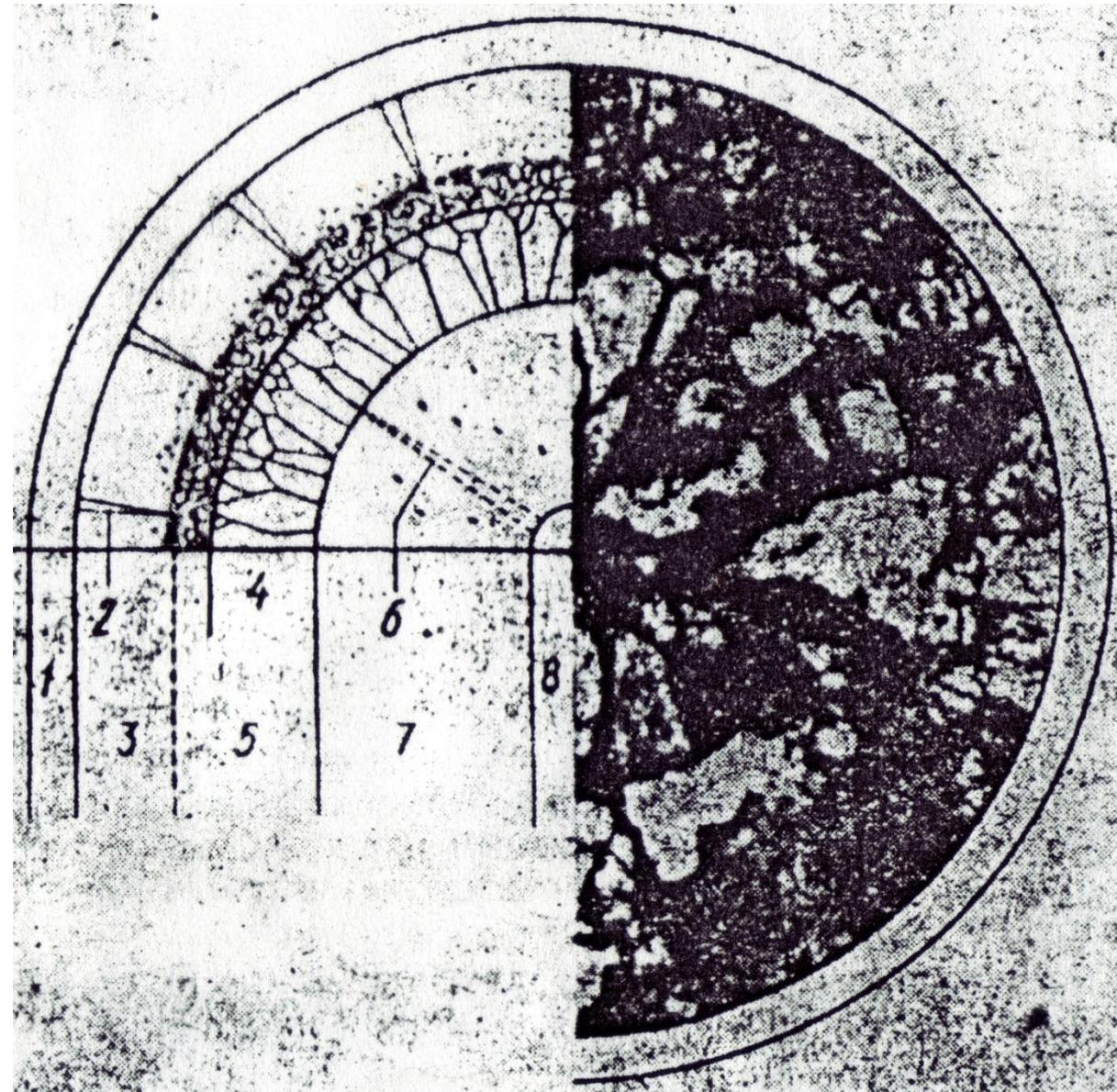
- Теоретическая плотность – 10.97 г/см^3 .
- Плотность в компактных изделиях – 10.0 г/см^3 .
- Плотность в уплотненных изделиях – $8.8 \div 9.5 \text{ г/см}^3$.
- Температура плавления зависит от стехиометрического состава, в идеале 2827°C .
- Тепловое расширение высокое $11 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.
- Теплоемкость от $245 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ до $350 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Данные по теплопроводности UO_2
плотностью 10.4 г/см^3 .



Структура UO_2 в твэле, проработавшем до глубины выгорания 680 МВт·сут/т U.

- 1 – оболочка;
- 2 – радиальные трещины;
- 3 – зона с первоначальной структурой таблетки (UO_2);
- 4 – зона с радиальными столбчатыми кристаллами;
- 5 – зона пластичной UO_2 ;
- 6 – усадочные трещины;
- 7 – зона с литой структурой UO_2 ;
- 8 – центральный канал.



Двуокись плутония



Известны PuO , Pu_2O_3 , PuO_2 . Применяется последняя (цвет желто – коричневый) в смеси с UO_2 при массовом содержании плутония до 30%. Свойства оксида плутония зависят от метода и условий получения. Диоксид плутония гигроскопичен.

Теоретическая плотность – 11.46 г/см^3 .

Плотность в изделиях до – 11.2 г/см^3 .

Температура плавления 2400°C .

Температура кипения 2800°C .

Термическое расширение $7.5 \div 12.3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Теплофизические свойства в целом хуже, чем UO_2 .

Двуокись тория



Сходна с UO_2 порошок белого цвета, высших окислов нет.

Теоретическая плотность – 9.82 г/см^3 .

Плотность в изделиях – $9.5 \div 9.7 \text{ г/см}^3$.

Температура плавления 3390°C .

Температура кипения 4400°C .

Термическое расширение $8.9 \div 10.6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Теплоемкость ниже чем UO_2 , теплопроводность выше. $\text{ThO}_2 + \text{UO}_2$ образуют твердые растворы, применяются именно в этом виде. Коррозионные свойства и совместимость лучше, чем у UO_2 .

Конструкционные материалы

материал	Плотность, г/см ³	Плавление, °С	Расширение, ×10 ⁻⁶ К ⁻¹	Теплопроводность, Вт/(м·К)	теплоемкость, кДж/(кг·К)	Сечение поглощения тепловых нейтронов, барн
алюминий	2.7	660.32	23.1	235	0.9	0.215
магний	1.74	650	8.2	160	1.05	0.059
бериллий	1.85	1287	11.3	190	1.76	0.009
цирконий	6.51	1855	5.7	23	0.29	0.18
X18H10T	7.95	1400	16.0	14.6	0.5	2.88
графит	2.267	3527*	3÷8	130÷170	0.72	0.0045

* ВОЗГОНКА

Алюминий



Применяется для реакторов с рабочими температурами $250\div 300^{\circ}\text{C}$, основной материал исследовательских реакторов.

Применяются в основном сплавы с добавками никеля, железа, меди, кремния, магния, хрома. Такие сплавы более коррозионно стойкие. Предел прочности при 200°C – 90 МПа, текучести – 30 МПа.

Магний



Применяется легированный цирконием, алюминием, торием, цинком, марганцем. Основное применение в сплаве magnox (0.5 ÷ 0.7 % Zr, 0.8 % Al) в английских и французских графитовых реакторах на углекислом газе при 330 ÷ 400°C.

Бериллий



Основное достоинство – низкое сечение захвата тепловых нейтронов, недостатки – крайне низкая пластичность и высокая токсичность.

Цирконий

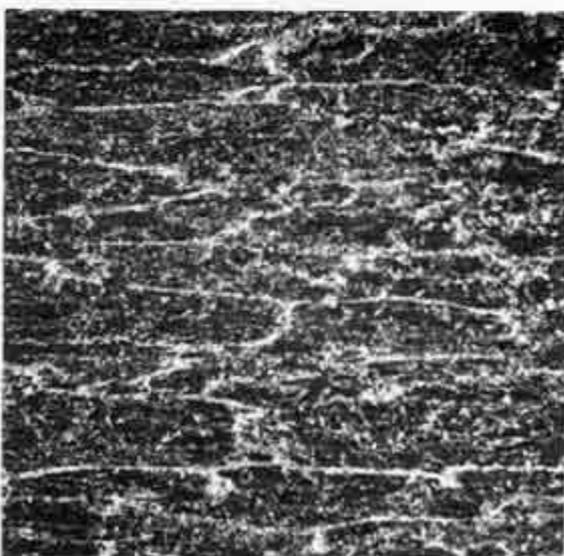
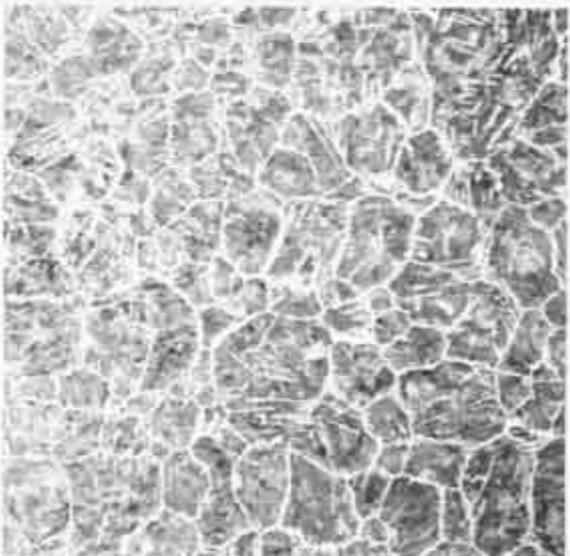
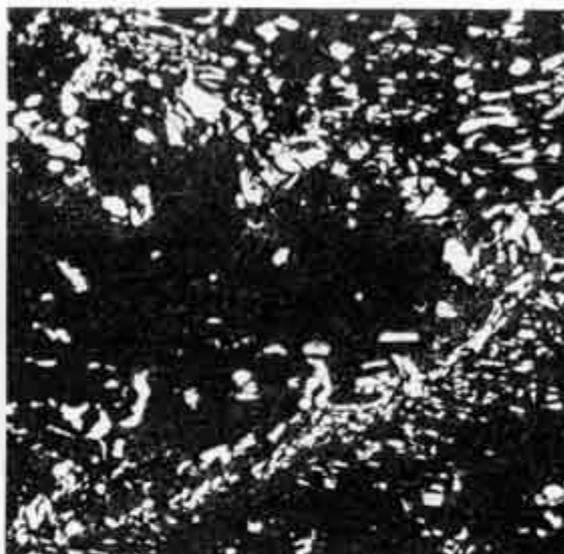
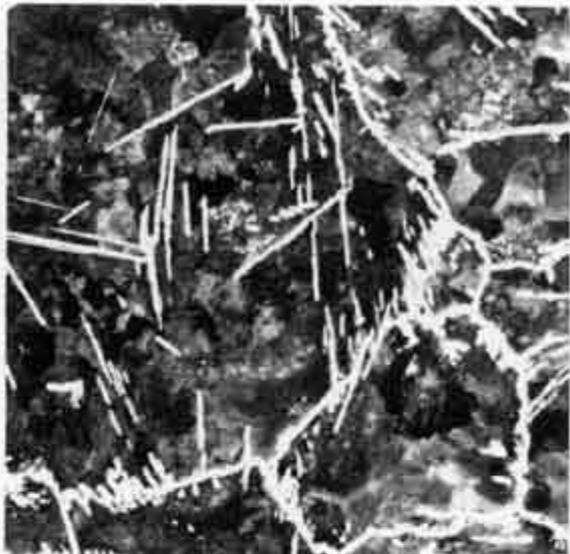


Наиболее широко распространенный материал в ядерных реакторах. Достоинства: низкое сечение поглощения тепловых нейтронов, высокая температура плавления. Сплавы циркония коррозионно стойки в воде и паре при $350\div 360^{\circ}\text{C}$. Для улучшения механических свойств легируется ниобием.

Zr + 1 % Nb при 300°C предел текучести 120 МПа.

Zr + 2.5 % Nb при 300°C предел текучести 200 МПа.

Нержавеющая сталь



Весьма стойки в воде и металлах, предел текучести при 500°C – 170 МПа. Недостатки: низкая теплопроводность и высокое сечение захвата тепловых нейтронов. Для повышения жаропрочности легируются молибденом. В целом, применяют в крайних случаях. Например планируется применение в сверхкритическом реакторе стали 19 % Cr + 3 % Mo + 5 % Nb + Ni при рабочей температуре 620°C в воде.

Графит

Основной материал высокотемпературных реакторов. Допустимая температура сильно зависит от кристалла и контактирующих материалов (по кислороду). Прочность при повышении температуры растет. Свойства зависят от технологии изготовления. Для примера при 20°C: на растяжение 7÷21 МПа, на сжатие 21÷35 МПа, на изгиб 7÷30 МПа. Технологичен, теплопроводен. Часто используют карбид кремния или пирографит (параллельные слои атомов).

