

Тема 3. Прочность, совместимость и радиационная стойкость реакторных материалов

Реакторные материалы при эксплуатации подвергаются действию высоких механических нагрузок, интенсивному облучению, эрозионному действию потоков жидкостей и газов, влиянию значительных температурных полей.

Их свойства (и способность противостоять указанным факторам) во многом определяются процессами образования и отжига радиационных дефектов, взаимодействием с другими материалами, явлениями на границе раздела сред и т.д.

3.1. Радиационные дефекты в кристаллической решётке

Точечные дефекты

Вакансии и межузельные атомы.

Правило Эйринга: энергия активации какого-либо процесса (т.е. высота энергетического барьера, который надо преодолеть атому для того, чтобы осуществить этот процесс) равна $1/4$ энергии связи, которую надо разорвать для того, чтобы реализовать данный процесс. Другими словами, энергия активации образования вакансии примерно равна $1/4$ удельной энергии атома в решётке.

Тема 3. Прочность, совместимость и радиационная стойкость реакторных материалов

Вероятность образования вакансии при температуре T :

$W(T) = \exp(-E_v/k_b T)$. k_b - постоянная Больцмана ($8,6 \times 10^{-5}$ эВ/град).

E_v примерно равна $1/4$ средней удельной энергии кристаллической решётки ($E_{кр} = 4,2$ эВ), т.е. около 1 эВ.

Следовательно, концентрация вакансий (т.е. их количество в 1 см^3) равна nW , где n – ядерная плотность вещества.

Отсюда концентрация вакансий $C_v(300 \text{ K})$ в железе ($n = 8,5 \times 10^{22}$) составит $3,2 \times 10^5$ в см^3 (проверить!).

Межузельный атом. Искажение решётки.

Линейные дефекты (дислокации: краевые, винтовые). Ядро дислокации (диаметр составляет 2-10 межатомных расстояний).

Вектор Бюргерса ($\mathbf{b}$) — количественная характеристика, описывающая искажения кристаллической решётки вокруг дислокации. Важнейшие виды линейных дефектов — краевые и винтовые дислокации. Краевая дислокация представляет собой край «лишней» полуплоскости в решётке. Вокруг дислокаций решётка упруго искажена.

Тема 3. Прочность, совместимость и радиационная стойкость реакторных материалов

3.2. Жаропрочность и деформация материалов

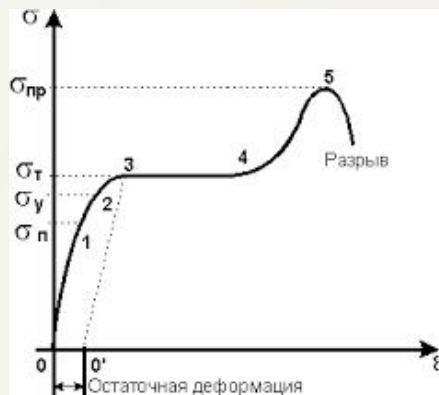
3.2.1. Деформация и разрушение

Упругая деформация. Предел текучести (упругости). Пластическая деформация. Удельная нагрузка, при которой происходит разрушение, называется **пределом прочности**.

сигма – напряжение;

E- модуль Юнга;

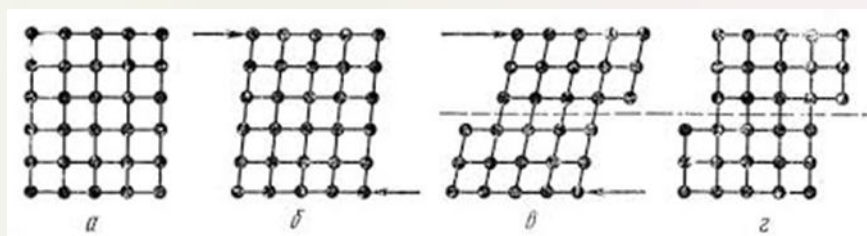
эпсилон – деформация.



$$\sigma = E\epsilon,$$

Механизмы пластической деформации: *скольжение* и *двойникование*.

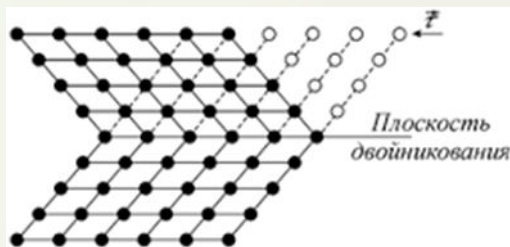
При *скольжении* перемещаются тонкие слои кристалла (подобно листам в стопке бумаги). Плоскость скольжения.



Тема 3. Прочность, совместимость и радиационная стойкость реакторных материалов

ДВОЙНИКОВАНИЕ — [twinning] образование в кристалле областей с разной ориентацией кристаллической решётки, связанное зеркальным отражением в определённой кристаллографической плоскости (плоскости **двойникования**).

При *двойниковании* происходит сдвиг определённых областей кристалла в положение, отвечающее зеркальному отражению несдвинутых областей.



Тема 3. Прочность, совместимость и радиационная стойкость реакторных материалов

Развитие трещин

Суть процесса: её зарождение, развитие (очень редко – залечивание), обычно – рост, иногда с замедлением, катастрофическое разрушение изделия.

Элементарный акт состоит в разрыве связи между соседними атомными плоскостями. Можно определить энергию образования поверхности стенок трещины.

Жаропрочность – способность материала противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах. Характеризуется пределом ползучести (т. е. напряжением, которое вызывает заданную скорость деформации при определённой температуре).

Ползучесть – пластическая деформация под действием постоянных и относительно небольших механических нагрузок (масштаб – в пределах единиц процентов).

Разрушение под действием знакопеременных нагрузок («усталость»).

Частота 1-10 Гц, число циклов порядка 10^6 – 10^7 . Источники напряжений – пульсация жидкости в насосах.

Тема 3. Прочность, совместимость и радиационная стойкость реакторных материалов

3.3. Совместимость реакторных материалов

Обычно проблемным местом является система «теплоноситель-оболочка твэла-топливо». Требование совместимости ограничивает выбор материалов.

Химическая совместимость. Пример последствий использования карбидного топлива во влажной среде:

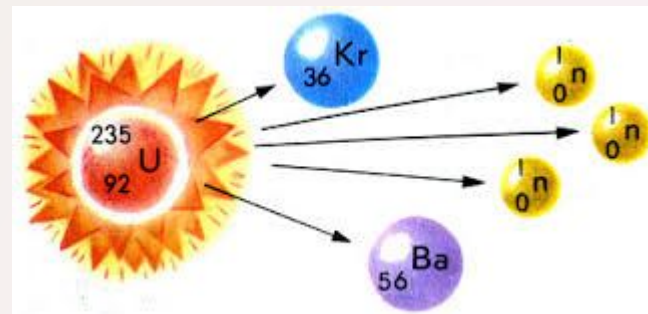


Совместимость в смысле **взаимной диффузии** (учесть её усиление в результате облучения). Образование интерметаллических соединений и эвтектик (Fe, Mn, Ni взаимодействуют с U с $T_{\text{пл}}$ около 1000K.).

Диффузия по поверхности.

3.4. Радиационная стойкость

Виды излучений в активной зоне и их спектральные свойства (нейтроны, электроны, гамма-кванты, альфа-частицы, осколки деления и т.д.



Тема 3. Прочность, совместимость и радиационная стойкость реакторных материалов

Распределение осколков деления U^{235} по массам

Характеристики радиационных полей в активной зоне энергетических реакторов (приблизительно):

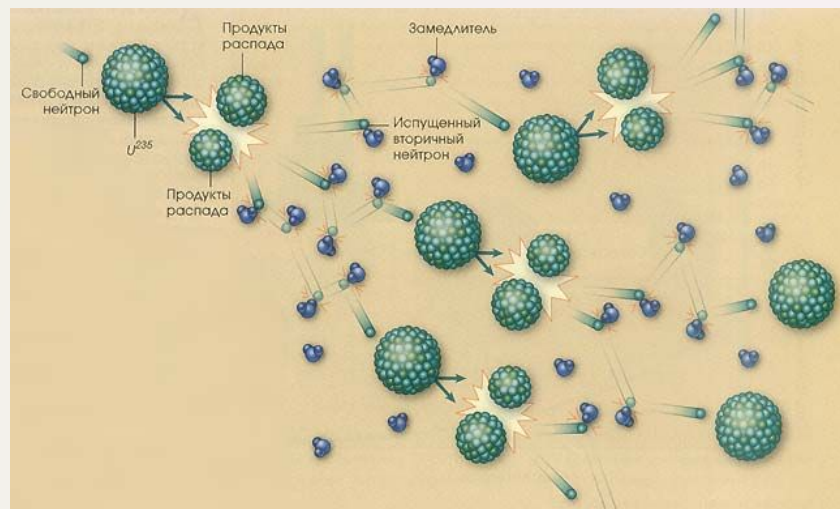
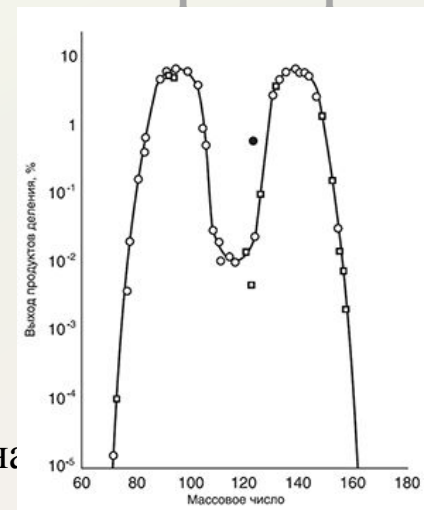
-плотность потока тепловых ($E=k_b T$, 0,025 эВ)

нейтронов - 10^{13} - 10^{14} частиц/(см² с);

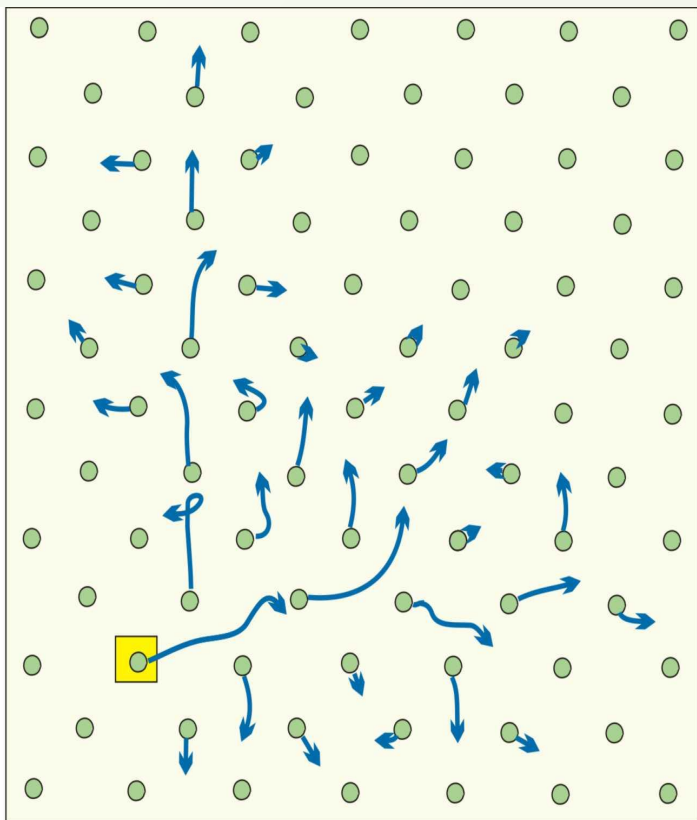
- плотность потока быстрых ($E > 10^3$ эВ) нейтронов - 10^{12} - 10^{13} ч
- средняя энергия гамма-квантов – 2 МэВ;
- средняя мощность экспозиционной дозы гамма-излучения – 10^1 - 10^3 Зв/с;
- средняя энергия осколков
- деления – 200 МэВ.

Характеристика повреждаемости материала – число смещений на атом (0.01 сна – заметно, 100 сна – катастрофическое разрушение).

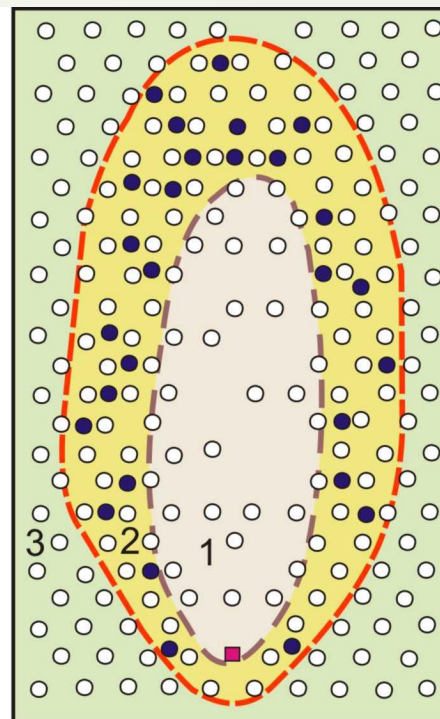
Необходимо принимать во внимание радиационный разогрев (способствует отжигу радиационных дефектов).



Тема 3. Прочность, совместимость и радиационная стойкость реакторных материалов

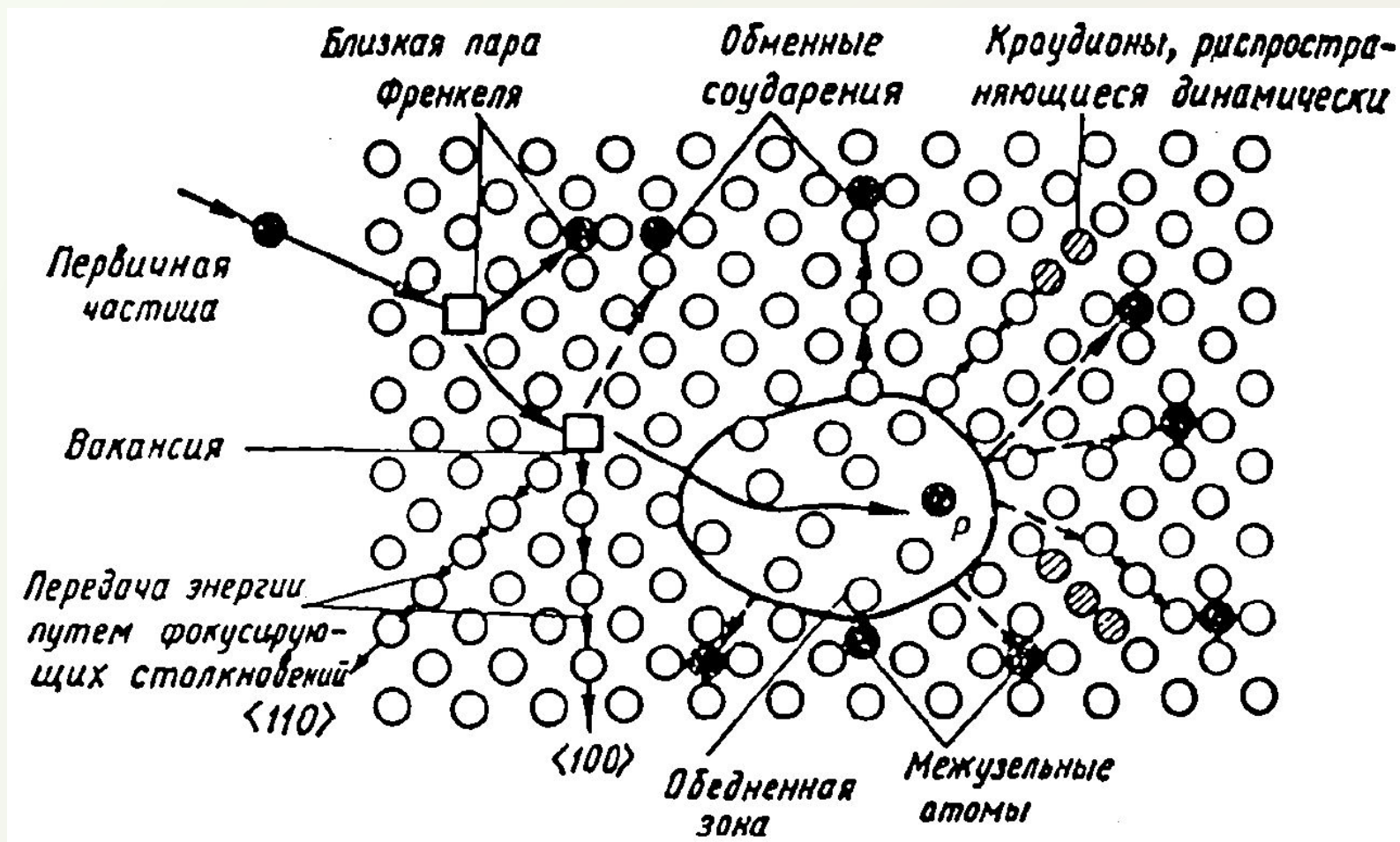


Начальная стадия развития каскада столкновений в алюминии
ПВА (□) имел начальную энергию 100 эВ и двигался в плоскости (100).
Стрелками указаны направления движения атомов



Структура поврежденной области:
квадрат – первоначальное положение ПВА;
1 – обедненная зона;
2 – зона насыщенная внедренными атомами
(черные кружки);
3 – неповрежденная кристаллическая решетка

Тема 3. Прочность, совместимость и радиационная стойкость реакторных материалов



Тема 3. Прочность, совместимость и радиационная стойкость реакторных материалов

1. Накопление осколков деления. Иодная «яма».

Процесс отравления вызывается накоплением ксенона-135, у которого сечение поглощения тепловых нейтронов 2720000 барн и период полураспада 9,2 часа.

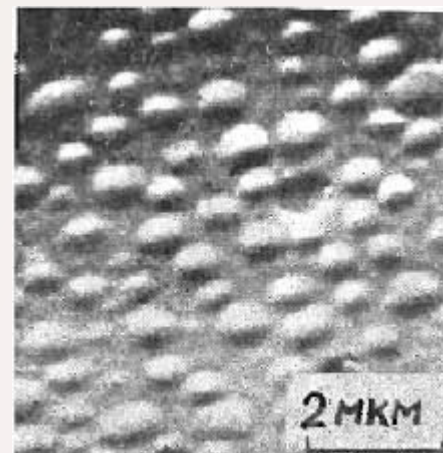
2. Накопление He3 в отражателе реактора ИРТ-Т.

3. Радиационное распухание аустенитных сталей в результате накопления вакансий.

4. Блистеринг (образование «пузырей» в приповерхностной зоне, особенно актуален для термоядерных установок).

5. Свеллинг (распухание в результате накопления гелия).

6. Флекинг – отшелушивание поверхности.



Тема 3. Прочность, совместимость и радиационная стойкость реакторных материалов

Создание качественных конструкционных материалов для активной зоны ядерного реактора – очень трудоёмкая и ответственная задача. Она лежит на стыке целого ряда дисциплин и требует проведения больших по объёму исследований и испытаний.