

# Радиационные дефекты и механизмы их зарождения

## Виды излучений

- Альфа ( $\alpha$ ) излучение
- Нейтронное излучение
- Бета ( $\beta$ ) излучение
- Гамма ( $\gamma$ ) излучение
- Рентгеновское излучение

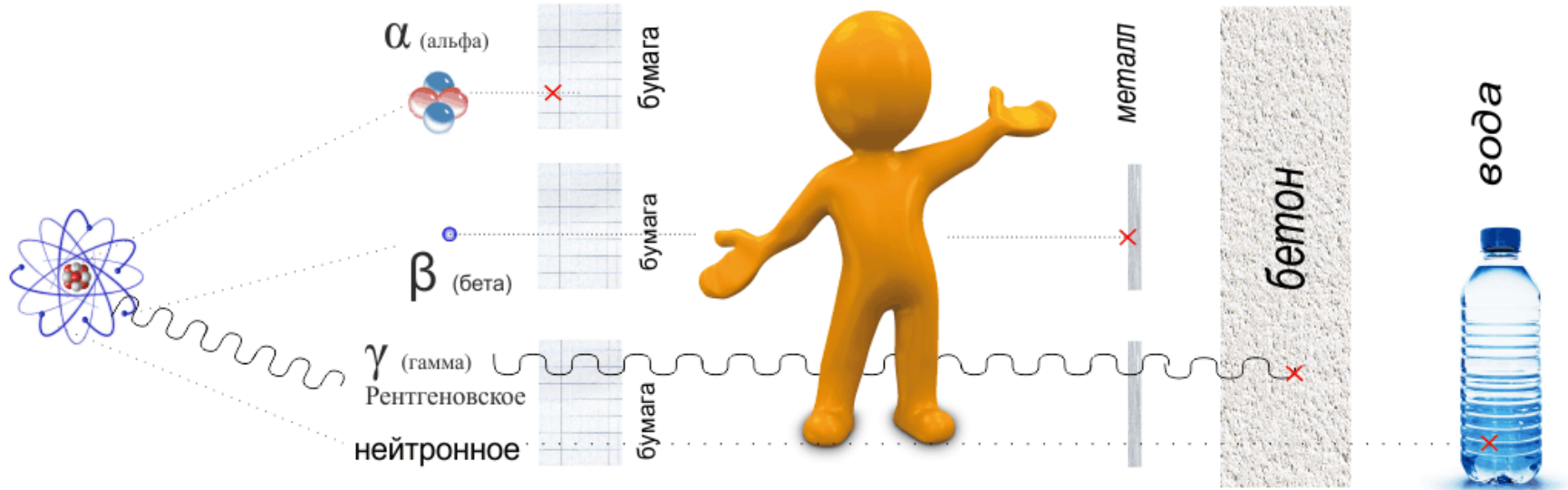
В процессе распада вещества или его синтеза происходит выброс элементов атома (протонов, нейтронов, электронов, фотонов), иначе можно сказать *происходит излучение* этих элементов. Подобное излучение называют - *ионизирующее излучение* или что чаще встречается *радиоактивное излучение*, или еще проще **радиация**. К ионизирующим излучениям относится так же рентгеновское и гамма излучение.

**Радиация** - это процесс излучения веществом заряженных элементарных частиц, в виде электронов, протонов, нейтронов, атомов гелия или фотонов и мюонов. От того, какой элемент излучается, зависит вид радиации.

**Ионизация** - это процесс образования положительно или отрицательно заряженных ионов или свободных электронов из нейтрально заряженных атомов или молекул.

**Радиоактивное (ионизирующее) излучение** можно разделить на несколько типов, в зависимости от вида элементов из которого оно состоит. Разные виды излучения вызваны различными микрочастицами и поэтому обладают разным энергетическим воздействием на вещество, разной способностью проникать сквозь него и как следствие различным биологическим действием радиации.

# Виды радиации



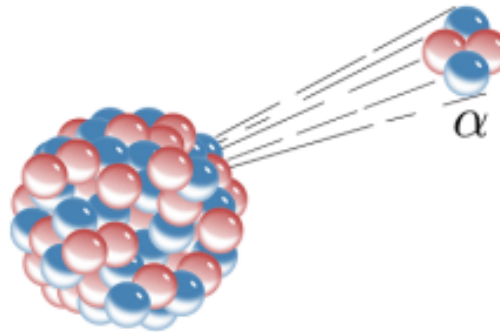
## Проникающая способность излучения

*Альфа, бета и нейтронное излучение - это излучения, состоящие из различных частиц атомов.*

*Гамма и рентгеновское излучение - это излучение энергии.*

## Альфа излучение

- излучаются: *два протона и два нейтрона*
- проникающая способность: *низкая*
- облучение от источника: *до 10 см*
- скорость излучения: *20 000 км/с*
- ионизация: *30 000 пар ионов на 1 см пробега*
- биологическое действие радиации: *высокое*



Альфа ( $\alpha$ ) излучение возникает при распаде нестабильных *изотопов* элементов.

**Альфа излучение** - это излучение тяжелых, положительно заряженных альфа частиц, которыми являются ядра атомов гелия (два нейтрона и два протона). Альфа частицы излучаются при распаде более сложных ядер, например, при распаде атомов урана, радия, тория.

Альфа частицы обладают большой массой и излучаются с относительно невысокой скоростью в среднем 20 тыс. км/с, что примерно в 15 раз меньше скорости света. Поскольку альфа частицы очень тяжелые, то при контакте с веществом, частицы сталкиваются с молекулами этого вещества, начинают с ними взаимодействовать, теряя свою энергию и поэтому проникающая способность данных частиц не велика и их способен задержать даже простой лист бумаги.

Однако альфа частицы несут в себе большую энергию и при взаимодействии с веществом вызывают его значительную ионизацию. А в клетках живого организма, помимо ионизации, альфа излучение разрушает ткани, приводя к различным повреждениям живых клеток.

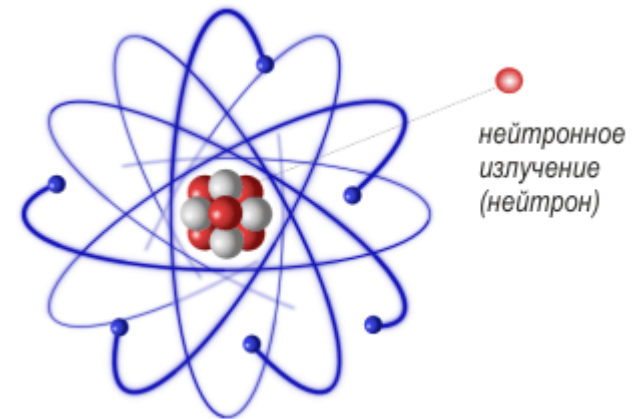
Из всех видов радиационного излучения, альфа излучение обладает наименьшей проникающей способностью, но последствия облучения живых тканей данным видом радиации наиболее тяжелые и значительные по сравнению с другими видами излучения.

Облучение радиацией в виде альфа излучения может произойти при попадании радиоактивных элементов внутрь организма, например, с воздухом, водой или пищей, а также через порезы или ранения. Попадая в организм, данные радиоактивные элементы разносятся током крови по организму, накапливаются в тканях и органах, оказывая на них мощное энергетическое воздействие. Поскольку некоторые виды радиоактивных изотопов, излучающих альфа радиацию, имеют продолжительный срок жизни, то попадая внутрь организма, они способны вызвать в клетках серьезные изменения и привести к перерождению тканей и мутациям.

**Радиоактивные изотопы фактически не выводятся с организма самостоятельно, поэтому попадая внутрь организма, они будут облучать ткани изнутри на протяжении многих лет, пока не приведут к серьезным изменениям. Организм человека не способен нейтрализовать, переработать, усвоить или утилизировать, большинство радиоактивных изотопов, попавших внутрь организма.**

# Нейтронное излучение

- излучаются: *нейтроны*
- проникающая способность: *высокая*
- облучение от источника: *километры*
- скорость излучения: *40 000 км/с*
- ионизация: *от 3000 до 5000 пар ионов на 1 см пробега*
- биологическое действие радиации: *высокое*

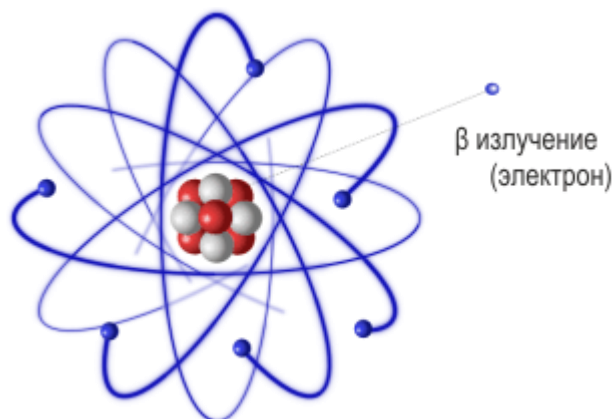


**Нейтронное излучение** - это техногенное излучение, возникающее в различных ядерных реакторах и при атомных взрывах. Также нейтронная радиация излучается звездами, в которых идут активные термоядерные реакции.

Не обладая зарядом, нейтронное излучение сталкиваясь с веществом, слабо взаимодействует с элементами атомов на атомном уровне, поэтому обладает высокой проникающей способностью. Остановить нейтронное излучение можно с помощью материалов с высоким содержанием водорода, например, емкостью с водой. Так же нейтронное излучение плохо проникает через полиэтилен.

Нейтронное излучение при прохождении через биологические ткани, причиняет клеткам серьезный ущерб, так как обладает значительной массой и более высокой скоростью чем альфа излучение.

## Бета излучение



- излучаются: *электроны или позитроны*
- проникающая способность: *средняя*
- облучение от источника: *до 20 м*
- скорость излучения: *300 000 км/с*
- ионизация: *от 40 до 150 пар ионов на 1 см пробега*
- биологическое действие радиации: *среднее*

## Бета излучение

**Бета ( $\beta$ ) излучение** возникает при превращении одного элемента в другой, при этом процессы происходят в самом ядре атома вещества с изменением свойств протонов и нейтронов.

При бета излучении, происходит превращение нейтрона в протон или протона в нейтрон, при этом превращении происходит излучение электрона или позитрона (античастица электрона), в зависимости от вида превращения.

Скорость излучаемых элементов приближается к скорости света и примерно равна 300 000 км/с. Излучаемые при этом элементы называются бета частицы.

Имея изначально высокую скорость излучения и малые размеры излучаемых элементов, бета излучение обладает более высокой проникающей способностью чем альфа излучение, но обладает в сотни раз меньшей способностью ионизировать вещество по сравнению с альфа излучением.

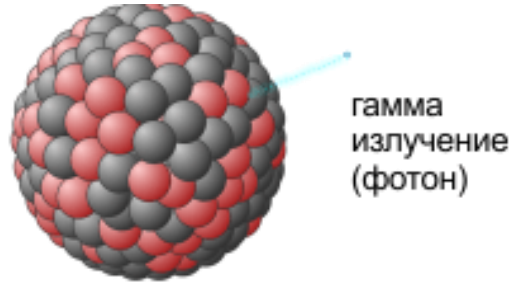
Бета радиация с легкостью проникает сквозь одежду и частично сквозь живые ткани, но при прохождении через более плотные структуры вещества, например, через металл, начинает с ним более интенсивно взаимодействовать и теряет большую часть своей энергии передавая ее элементам вещества. Металлический лист в несколько миллиметров может полностью остановить бета излучение.

Если альфа радиация представляет опасность только при непосредственном контакте с радиоактивным изотопом, то бета излучение в зависимости от его интенсивности, уже может нанести существенный вред живому организму на расстоянии несколько десятков метров от источника радиации.

Если радиоактивный изотоп, излучающий бета излучение попадает внутрь живого организма, он накапливается в тканях и органах, оказывая на них энергетическое воздействие, приводя к изменениям в структуре тканей и со временем вызывая существенные повреждения.

Некоторые радиоактивные изотопы с бета излучением имеют длительный период распада, то есть попадая в организм, они будут облучать его годами, пока не приведут к перерождению тканей и как следствие к раку.

# Гамма излучение



- излучаются: *энергия в виде фотонов*
- проникающая способность: *высокая*
- облучение от источника: *до сотен метров*
- скорость излучения: *300 000 км/с*
- ионизация: *от 3 до 5 пар ионов на 1 см пробега*
- биологическое действие радиации: *низкое*



**Гамма ( $\gamma$ ) излучение** - это энергетическое электромагнитное излучение в виде фотонов.

Гамма радиация сопровождает процесс распада атомов вещества и проявляется в виде излучаемой электромагнитной энергии в виде фотонов, высвобождающихся при изменении энергетического состояния ядра атома. Гамма лучи излучаются ядром со скоростью света.

Когда происходит радиоактивный распад атома, то из одних веществ образуются другие. Атом вновь образованных веществ находится в энергетически нестабильном (возбужденном) состоянии. Воздействуя друг на друга, нейтроны и протоны в ядре приходят к состоянию, когда силы взаимодействия уравниваются, а излишки энергии выбрасываются атомом в виде гамма излучения

Гамма излучение обладает высокой проникающей способностью и с легкостью проникает сквозь одежду, живые ткани, немного сложнее через плотные структуры вещества типа металла. Чтобы остановить гамма излучение потребуется значительная толщина стали или бетона. Но при этом гамма излучение в сто раз слабее оказывает действие на вещество чем бета излучение и десятки тысяч раз слабее чем альфа излучение.

Основная опасность гамма излучения - это его способность преодолевать значительные расстояния и оказывать воздействие на живые организмы за несколько сотен метров от источника гамма излучения.

## Рентгеновское излучение

**Рентгеновское излучение** - это энергетическое электромагнитное излучение в виде фотонов, возникающие при переходе электрона внутри атома с одной орбиты на другую.

Рентгеновское излучение сходно по действию с гамма излучением, но обладает меньшей проникающей способностью, потому что имеет большую длину волны.

Радиация включает в себя совершенно различные виды излучения, которые оказывают разное воздействие на вещество и живые ткани, от прямой бомбардировки элементарными частицами (альфа, бета и нейтронное излучение) до энергетического воздействия в виде гамма и рентгеновского излучения!

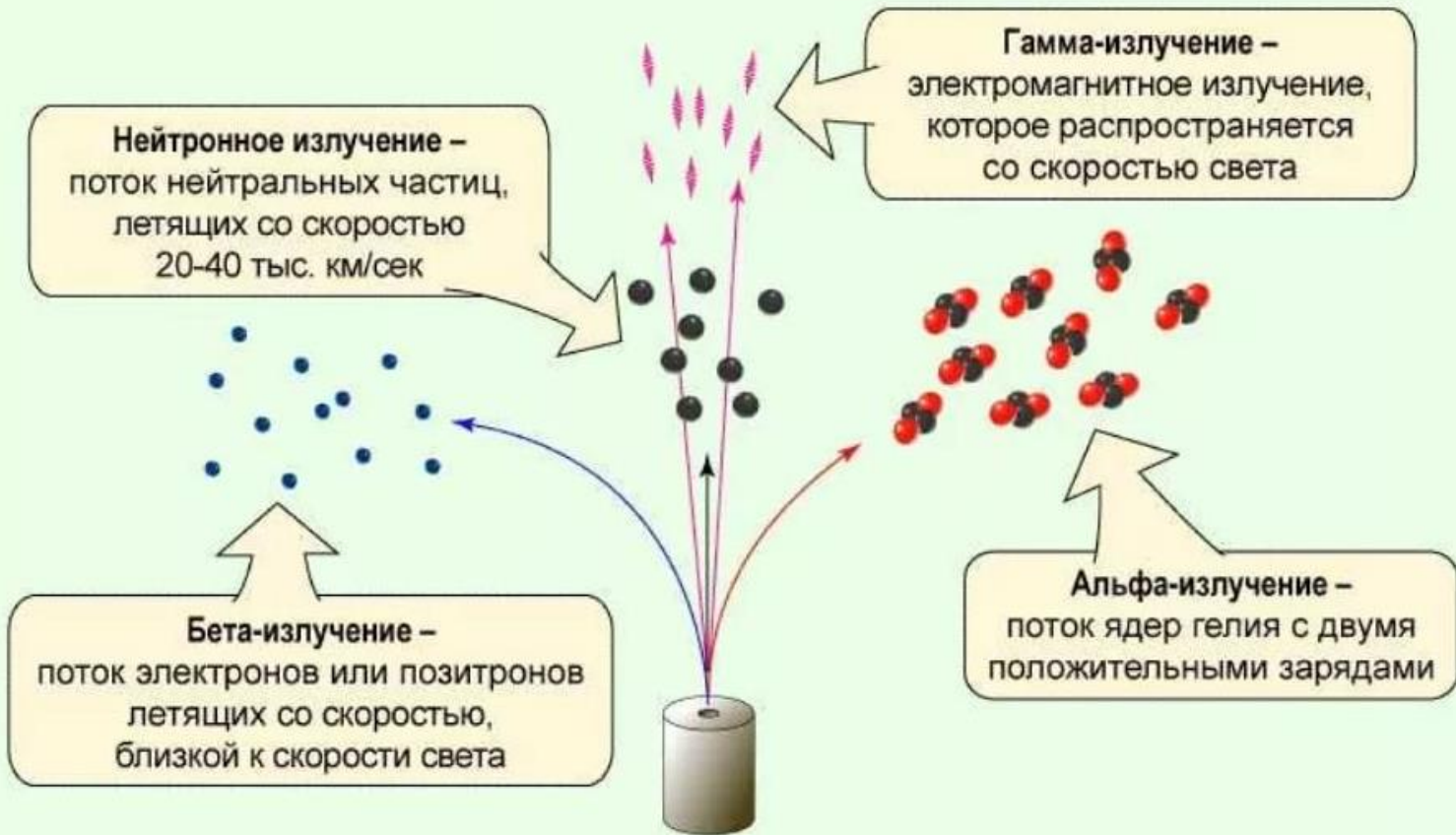
## Таблица с характеристиками различных видов радиации

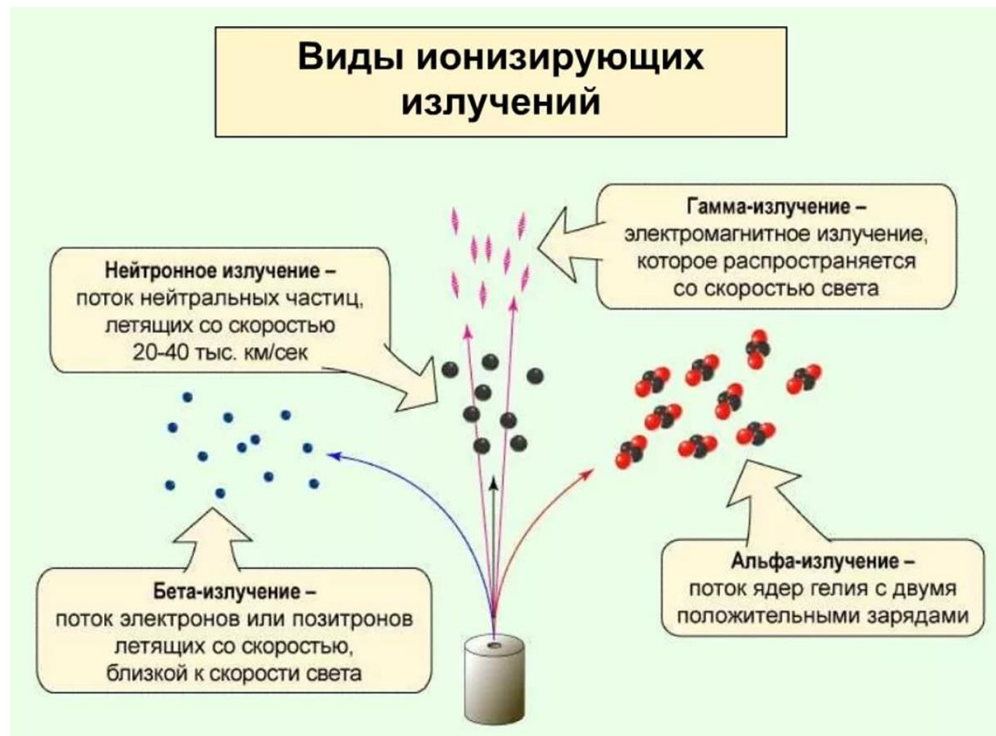
Характеристика	Альфа излучение	Нейтронное излучение	Бета излучение	Гамма излучение	Рентгеновское излучение
Излучаются	два протона и два нейтрона	нейтроны	электроны или позитроны	энергия в виде фотонов	энергия в виде фотонов
Проникающая способность	низкая	высокая	средняя	высокая	высокая
Облучение от источника	до 10 см	километры	до 20 м	сотни метров	сотни метров
Скорость излучения	20 000 км/с	40 000 км/с	300 000 км/с	300 000 км/с	300 000 км/с
Ионизация, пар на 1 см пробега	30 000	от 3000 до 5000	от 40 до 150	от 3 до 5	от 3 до 5
Биологическое действие радиации	высокое	высокое	среднее	низкое	низкое

## Коэффициент $k$

<b>Вид излучения и диапазон энергий</b>	<b>Весовой множитель</b>
<i>Фотоны</i> всех энергий (гамма излучение)	1
<i>Электроны и мюоны</i> всех энергий (бета излучение)	1
<i>Нейтроны с энергией</i> < 10 КэВ (нейтронное излучение)	5
<i>Нейтроны</i> от 10 до 100 КэВ (нейтронное излучение)	10
<i>Нейтроны</i> от 100 КэВ до 2 МэВ (нейтронное излучение)	20
<i>Нейтроны</i> от 2 МэВ до 20 МэВ (нейтронное излучение)	10
<i>Нейтроны</i> > 20 МэВ (нейтронное излучение)	5
<i>Протоны</i> с энергий > 2 МэВ (кроме протонов отдачи)	5
<i>Альфа-частицы</i> , осколки деления и другие тяжелые ядра (альфа излучение)	20

# Виды ионизирующих излучений





Развитие атомной энергетики и реакторного материаловедения обусловило разработку нового класса материалов, устойчивых к действию разного рода излучений. В промышленных масштабах применяются с 40-х г.г. XX века. Наибольшей стабильностью структуры свойств обладают металлы. Самое сильное влияние на материалы оказывает нейтронное облучение. Облучение  $\alpha$ -частицами, протонами,  $\beta$ -частицами и  $\gamma$ -лучами менее существенно. Материалы, эксплуатирующиеся в условиях облучения, должны быть радиационно-стойкими.

## Радиационная стойкость

**Радиационная стойкость** - свойство материалов противостоять воздействию интенсивных потоков радиоактивного излучения, изменяющих их структуру и свойства. В наибольшей степени это воздействие отражается на механических свойствах и коррозионной стойкости. Радиационную стойкость конструкционных материалов в основном повышают легированием и регулированием микроструктуры (ее измельчением). Повышенной радиационной стойкостью обладают некоторые марки конструкционных нержавеющих сталей аустенитного и ферритного классов, дисперсноупрочненные сплавы, изготовленные по специальной технологии, некоторые сплавы хрома, ванадия, ниобия, циркония, титана и их гидриды. Из боросодержащих регулирующих материалов наибольшую радиационную стойкость имеют бориды тугоплавких металлов, особенно диборид титана  $TiB_2$ , сплавы и соединения гафния, гадолиния, европия и самария. Чистый бор и карбид бора характеризуются склонностью к радиационному разбуханию.

Излучение делят на две группы:

- рентгеновские лучи, позитроны,  $\beta$ -частицы и  $\gamma$ -лучи;
- $\alpha$ -частицы, нейтроны, протоны и ускоренные ионы.

Взаимодействие легких частиц с веществом происходит в виде ионизации. Повреждение вещества в основном имеет химический характер, оно подобно эффекту электрического заряда и может быть очень существенным для органических материалов и незначительным для металлических. При их попадании в атом твердого вещества он не только ионизируется, но выбивается из узла кристаллической решетки, при этом образуется вакансия и междоузельный атом.

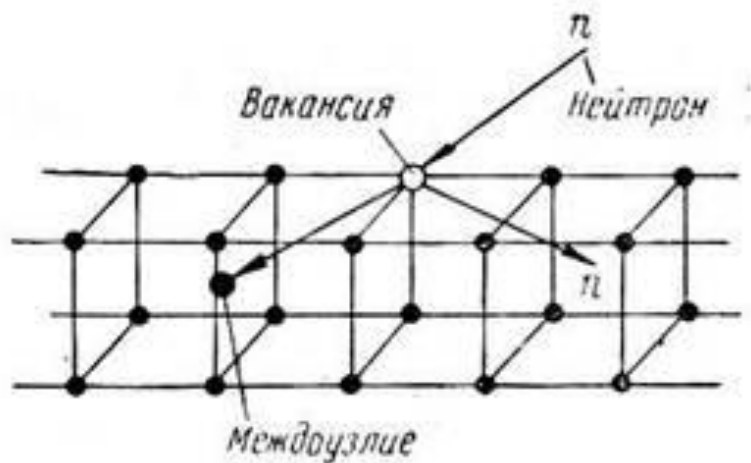


Схема образования вакансий и междоузельных атомов при нейтронном излучении



**Точечные дефекты**, возникающие при облучении кристалла быстрыми частицами, называются радиационными. Основное отличие этого вида точечных дефектов от рассмотренных выше тепловых состоит в том, что они термодинамически неравновесны, т.е. после прекращения бомбардировки быстрыми частицами состояние кристалла нестационарно. Основные процессы, приводящие к появлению радиационных дефектов, следующие:

- 1. Упругие столкновения быстрых частиц с ядрами атомов кристалла.
- 2. Возбуждение электронных оболочек атомов и их ионизация.
- 3. Ядерные превращения — переход части атомов в кристалле в радиоактивное состояние и превращение их после распада в примесные центры.

В зависимости от природы излучения, энергии быстрых частиц и свойств самого кристалла одни процессы могут преобладать над другими.

К важнейшим **радиационным эффектам** относится газовое и вакансионное разбухание ядерных, конструкционных и функциональных материалов, сопровождающееся существенным изменением размеров, короблением, растрескиванием и разрушением изделий. Газовое разбухание происходит в результате возникновения в материале при радиационно-химических превращениях элементов газообразных продуктов и объединения их в пузырьки. Вакансионное разбухание наблюдается при больших интегральных потоках нейтронов и связано с интенсивным ростом пор вследствие объединения вакансий и образованием дислокационных петель и скоплений.

Более тяжелые заряженные частицы также теряют значительную часть своей энергии в результате ионизации, но они могут также испытывать упругие столкновения с ядрами вещества ( $\alpha$ -частицы, нейтроны и ускоренные ионы теряют свою энергию исключительно за счет упругих столкновений). Кроме того, тяжелые частицы передают атомам решетки значительную энергию, вызывая каскады атомных столкновений и смещений с образованием двойных, тройных и более крупных скоплений вакансий и междоузельных атомов (кластеров), областей разупорядочения, дислокационных петель и т.п.

Быстрые частицы, проходя через металлические материалы, отдают значительную часть своей энергии в небольшой области решетки, вызывая плавление в микроскопических объемах. Отвердевание этих объемов происходит чрезвычайно быстро, что приводит к образованию сильно напряженных участков. Они оказывают такое же действие на свойства металла, как и обычная закалка, а именно: увеличиваются твердость и прочность, снижается пластичность, падает плотность.

## Эффекты радиационного воздействия

Различают мгновенные и остаточные эффекты воздействия излучения на материалы. Мгновенные - наблюдаются только в процессе облучения, остаточные – накапливаются во время облучения и сохраняются после него. Остаточные повреждения атомной и электронной структуры материала называются радиационными дефектами. Проникающая способность нейтральных частиц (нейтронов и  $\gamma$ -квантов) высока, вследствие чего они вызывают объемное повреждение материала.

Длина пробега заряженных частиц (электронов, позитронов, протонов) мала, поэтому они повреждают лишь поверхностный слой. Число вакансий, создаваемых одной частицей, зависит от ее вида и энергии, а также от свойств облучаемого вещества. Одна частица нейтрона, обладающая меньшей энергией, чем  $\alpha$ -частица и протон, создает несравнимо больше структурных повреждений. Число вакансий, образовавшихся в алюминии, больше, чем в бериллии, что определяется большей энергией межатомной связи в последнем. Степень изменения свойств и число дефектов в металле при облучении зависит от суммарного потока частиц, температуры облучения и температуры рекристаллизации металла.

Радиационные точечные дефекты, в отличие от тепловых, всегда парные (по Френкелю). Итог облучения твердого тела быстрыми частицами может состоять в том, что на пути движущейся в кристалле быстрой частицы образуется сильно разупорядоченная область, размеры и форма которой зависят от энергии, массы и природы быстрой частицы, массы атомов кристалла, его температуры и структуры. Образуется каскад смещений.

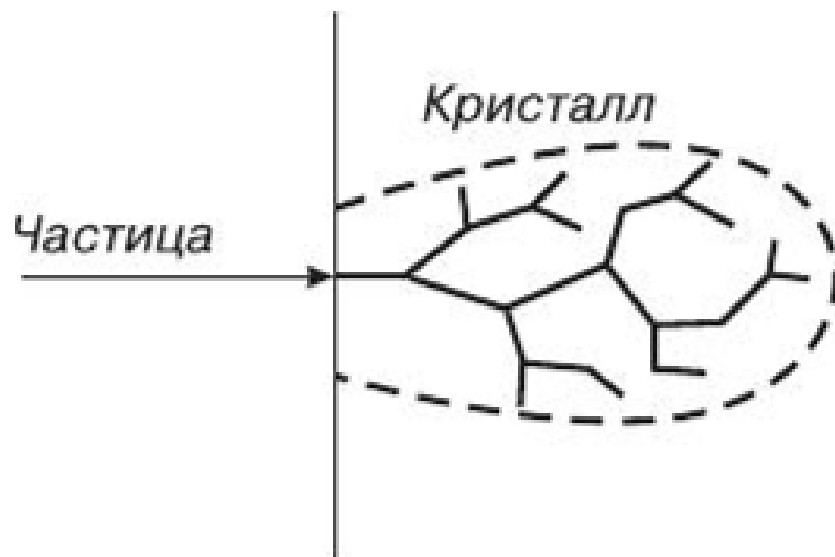


Схема образования разупорядоченной области в кристалле (выделена пунктиром) за счет каскада смещений атомов (сплошные линии)

Этот процесс происходит за очень короткое время  $10^{-13}$ -  $10^{-10}$  с. После этого наступает длительный процесс релаксации, по окончании которого тело приходит в термодинамическое равновесие.

Пороговая энергия смещения  $E_d$ : минимальная энергия, которую необходимо сообщить атому при лобовом столкновении, чтобы образовалась устойчивая пара Френкеля, т.е. чтобы атом образовал цепочку замещений, большую по длине, чем зона рекомбинации пары Френкеля.

Для металлов, как правило,  $E_d=20...30$  эВ.

Время отдельного соударения равно  $10^{-16}...10^{-14}$  с, а весь процесс смещения происходит за  $10^{-14}...10^{-13}$  с.

Время жизни каскада составляет величину  $\sim 10^{-11}$  с.

Если число смещенных атомов в каскаде невелико и столкновениями между ними можно пренебречь, то такой каскад называется линейным.

Когда число смещений в каскаде велико, и доля столкновений смещенных атомов с движущимися атомами велика, то это - нелинейный каскад.

Каскадная функция  $N_d(E_1)$  - среднее число атомов в каскаде смещения (т.е. смещенных атомов), инициированного первично выбитым атомом с энергией  $E_1$ .

После динамической стадии при облучении материалов осуществляются

- диффузионные перестройки дефектной структуры;
- отжиг дефектной структуры.

Возможны как процессы аннигиляции (уничтожения) вакансий и междоузельных атомов, так и их объединение в более устойчивые вторичные дефекты. Окончательное распределение дефектов определяется числом и распределением первоначально смещенных атомов и природой кристалла.

Некоторая критическая концентрация радиационных дефектов может приводить к нарушению устойчивости кристаллического состояния, его переходу в аморфное состояние, что иногда негативно отражается на механических и других свойствах материала. Поэтому при выборе конструкционных материалов для реакторов большой мощности необходимо учитывать изменение свойств материала под действием излучения.

## Механизмы образования радиационных дефектов

Среди всех рассмотренных процессов взаимодействия различных видов излучения с веществом наиболее важными (с точки зрения образования точечных радиационных дефектов) являются следующие:

- упругие столкновения быстрых частиц с ядрами атомов кристалла;
- возбуждение электронных оболочек атомов кристалла и их ионизация;
- ядерные превращения – переход части атомов кристалла в радиоактивное состояние и превращение их после радиоактивного распада в примесные центры.

Перечисленные процессы могут привести к изменениям различного характера, прежде всего к образованию новых дефектов в облучаемом веществе.

## РАДИАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ И СВЯЗАННЫЕ С НИМИ ЭФФЕКТЫ

В. В. КИРСАНОВ

Тверской государственный технический университет

88

СОРОСОВСКИЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЖУРНАЛ, ТОМ 7, №10, 2001

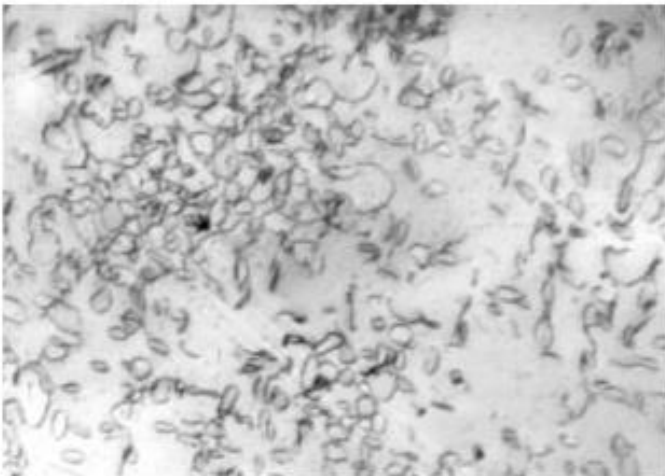


Рис. 1. Микрофотография (электронно-микроскопическое изображение на просвет) дислокационных петель в облученном молибдене [3]

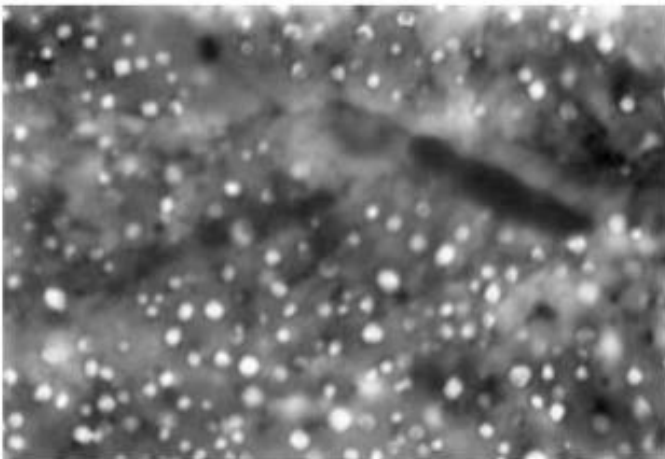


Рис. 2. Микрофотография (электронно-микроскопическое изображение на просвет) вакансионной пористости в облученном ниобии [3]

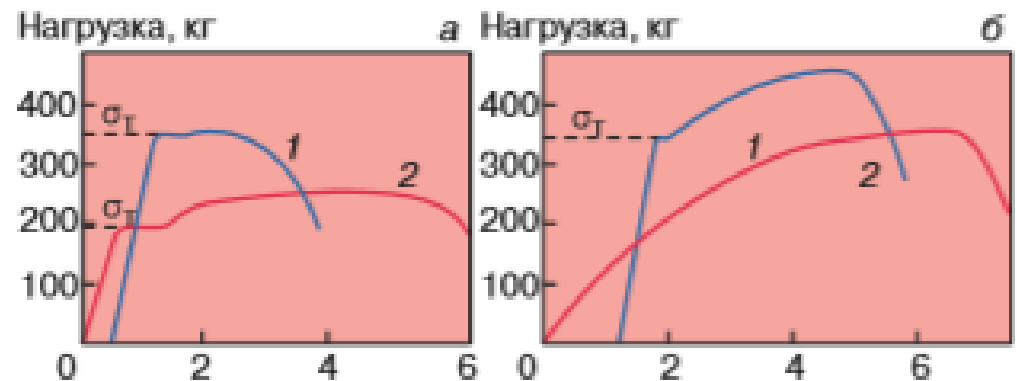


Рис. 4. Кривые напряжение–деформация для облученных (1) и необлученных (2) образцов железа (а) и никеля (б). Доза облучения  $1,1 \cdot 10^{20}$  нейтрон/см<sup>2</sup> [2].  $\sigma_T$  – предел текучести