

УДК 620.187:621.039:531

## ПРОБЛЕМЫ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Мурашко В.Д.

Научный руководитель – к.т.н., доцент Герасимова А.Г.

Развитие ядерной энергетики происходит в жесткой конкурентной борьбе, как с традиционными технологиями производства электроэнергии, так и с альтернативными источниками. Ключевыми вопросами такой конкуренции являются безопасность и экономичность. Именно поведение конструкционных материалов эксплуатируемых и проектируемых ядерных реакторов определяет в значительной степени безопасную и экономичную работу атомных станций.

Роль конструкционных материалов состоит не только в обеспечении стабильности на весь период эксплуатации геометрии активной зоны и, в первую очередь, тепловыделяющих сборок (ТВС) и тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), но и в удержании внутри ТВЭЛА продуктов деления топлива, сохранении работоспособности органов системы управления и защиты (СУЗ) и обеспечении минимальных последствий возможных аварийных ситуаций, т.е. по существу в решении ключевых вопросов безопасности реакторной установки.

Достижение высоких выгораний топлива ограничивается радиационной стойкостью материалов оболочек и чехлов тепловыделяющих сборок ТВС, а срок эксплуатации реакторов на тепловых нейтронах ограничивается ресурсом материалов корпусов и внутрикорпусных устройств [1].

### **Радиационная повреждаемость конструкционных материалов.**

Конструкционные материалы под действием облучения испытывают структурные превращения, оказывающие отрицательное влияние в первую очередь на механические свойства и коррозионную стойкость. Из всех видов облучения (нейтроны,  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы,  $\gamma$ -излучение) наиболее сильное влияние оказывает нейтронное облучение.

Нейтронное облучение материалов приводит к следующим изменениям характеристик материалов: упрочнению; низко- и высокотемпературному радиационному охрупчиванию; радиационной ползучести; радиационному росту и радиационному распуханию; появлению наведенной активности [2]. Поэтому одно из основных требований, предъявляемых к облучаемым материалам, – их высокая радиационная стойкость. *Радиационная стойкость* – способность материала сохранять в определенных допустимых пределах размеры, структуру и свойства при длительном воздействии радиационных излучений.

Модель радиационных повреждений, возникающих при соударении высокоэнергетических нейтронов с атомами кристаллической решетки показана на рисунке 1 [3].

Соударения вызывают смещения атомов или каскад смещений в решетке в зависимости от количества энергии, передаваемой нейтроном атому металла. Подвергшийся удару нейтроном первый атом, подобно бильiardному шару, ударяя по другим атомам, вызывает в решетке дополнительные смещения. В результате развития каскада образуются объемы с высокой концентрацией вакансий, по периферии окруженные зонами с повышенной плотностью межузельных атомов. Один нейтрон способен создать в алюминии более 6000 вакансий, в бериллии, с большей энергией межатомной связи, – более 450 вакансий.

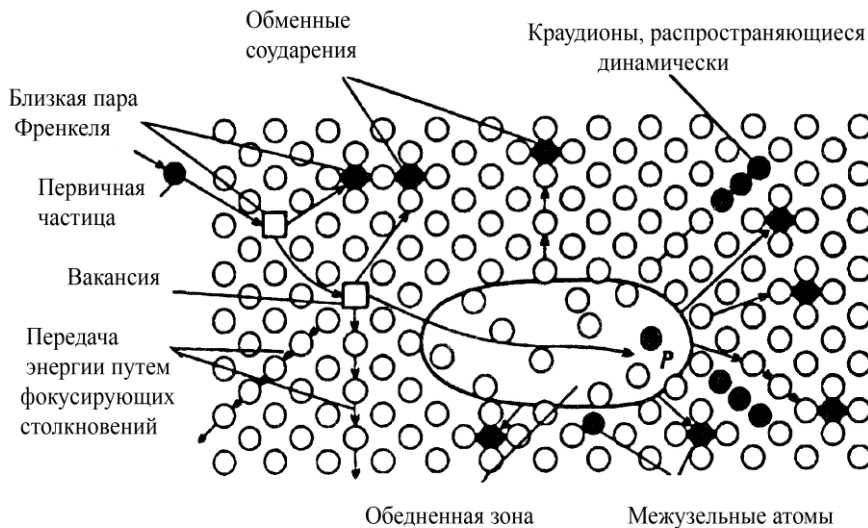


Рисунок 1 – Модель радиационных повреждений, возникающих при соударении нейтронов с атомами кристаллической решетки (модель Зеегера)

Помимо смещений большие нейтронные потоки за счет своей энергии возбуждают атомы, усиливают их колебания (это явление называют «радиационной тряской»), что сопровождается локальным повышением температуры. Рост температуры способствует радиационному отжигу, сопровождающемуся аннигиляцией вакансий и межузельных атомов. Высокие температуры и нейтронное облучение могут вызвать в материале ядерные реакции с образованием гелия, что в свою очередь приводит к появлению газовых пузырей по границам зерен.

Структурные изменения приводят к изменению механических свойств. В результате при температуре ниже температуры рекристаллизации – низкотемпературного облучения – металл упрочняется, но теряет вязкость и пластичность.

Действие низкотемпературного облучения на свойства напоминает наклеп – холодную пластическую деформацию. Однако, несмотря на такую аналогию, механизмы воздействия радиационного повреждения и наклепа на структуру материала принципиально различны, поскольку радиационное повреждение связано преимущественно с образованием точечных дефектов, тогда как деформационное упрочнение связано в основном с появлением линейных дефектов.

В условиях облучения выше температуры рекристаллизации (высокотемпературное облучение) роль точечных радиационных дефектов снижается. Вакансии и межузельные атомы частично аннигилируют друг с другом, частично взаимодействуют с примесями, дислокациями, границами раздела. Оставшиеся межузельные атомы и вакансии объединяются в кластеры, которые в свою очередь могут превращаться соответственно в дислокационные петли межузельного или вакансионного типа (рис. 2, [3]).

Высокотемпературное облучение активизирует диффузионные процессы и способствует распаду пересыщенных твердых растворов – старению. Этим объясняется высокотемпературная хрупкость аустенитных хромоникелевых сталей. Активизацией диффузионных процессов также объясняется снижение длительной прочности при облучении. Падение жаропрочности растет с увеличением температуры и интенсивности нейтронного потока.

При высокотемпературном облучении большими нейтронными потоками в аустенитных сталях и сплавах на основе  $Ni$ ,  $Ti$ ,  $Mo$ ,  $Zr$ ,  $Be$  зарождаются и растут вакансионные поры, а более подвижные межузельные атомы уходят на дальние стоки (краевые дислокации, границы зерен и др.), что приводит к заметному увеличению объема металла – радиационному набуханию.

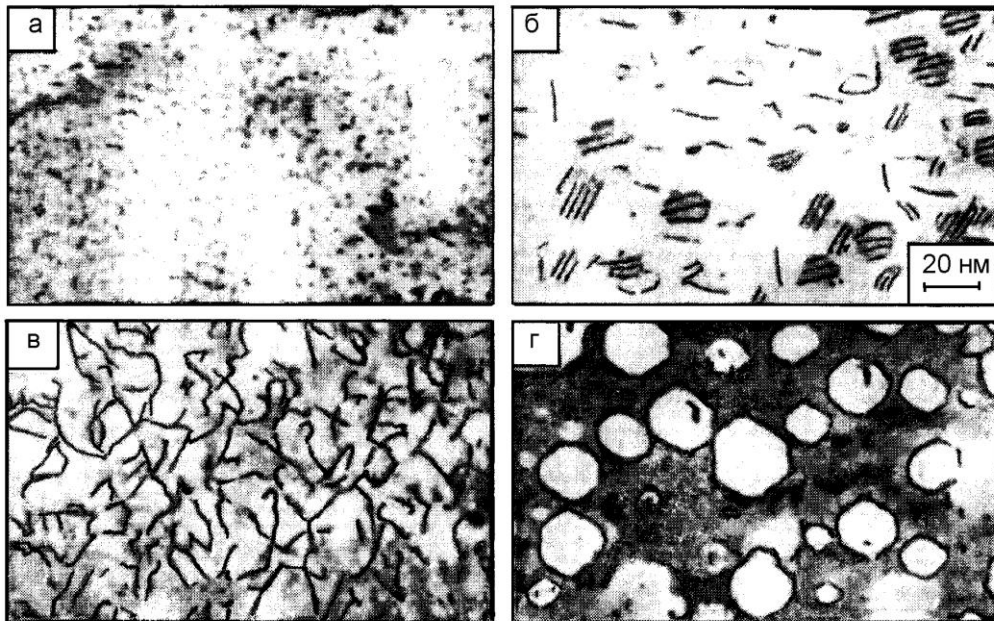


Рисунок 2 – Эволюция дефектной структуры аустенитной стали при облучении ионами хрома ( $E = 1$  МэВ):

- а – кластеры из точечных дефектов при облучении до 0,1 смещ/атом;
- б – дислокационные петли при 2 смещ/атом;
- в – дислокационная сетка при 15 смещ/атом;
- г – вакансионные поры при 100 смещ/атом

Объем аустенитных сталей, облученных при рабочей температуре  $450^{\circ}\text{C}$ , линейно растет с увеличением нейтронного потока. Объем может увеличиться на 20 % и более. Распухание усиливается в результате скопления в микропорах газов, образовавшихся при облучении. Легирование хромоникелевых сталей титаном, молибденом, ниобием снижает их распухание. Высокохромистые ферритные и перлитные стали с меньшей растворимостью водорода характеризуются меньшей склонностью к распуханию.

При облучении резко снижается коррозионная стойкость металлов и сплавов. Вода и водяной пар являются теплоносителями в водном и пароводяном трактах АЭС. Вследствие радиолиза меняется состав электролита – происходит разрушение молекул воды с образованием ионов и атомов кислорода, водорода и щелочной гидроксильной группы  $\text{OH}^-$ . Конструкционные реакторные материалы, подвергающиеся облучению, работают в контакте с водой и паром. Образующийся кислород окисляет металл, а водород его наводороживает и тем самым дополнительно охрупчивает. Радиолиз воды и увеличение концентрации гидроксильной группы способствуют растворению поверхностных оксидных пленок, в обычных условиях защищающих металл от коррозии.

Аустенитные хромоникелевые стали во влажном паре подвержены межкристаллической коррозии и коррозионному растрескиванию.

Радиационная стойкость количественно характеризуется максимальным значением поглощенной дозы (Грей), при которой материал становится непригодным для конкретных условий применения. Радиационная стойкость конструкционной стали имеет значение около  $5 \cdot 10^7$  Гр.

Предварительная радиационно-термическая обработка – облучение и отжиг – позволяет увеличить радиационную стойкость материалов в 10–15 раз.

При исследовании металлов на радиационную стойкость наиболее чувствительным является метод измерения электросопротивления, т.к. их электрическое сопротивление возрастает за счет образования радиационных дефектов [4].

**Материалы ядерных реакторов.** Целесообразность использования материалов в ядерных энергетических установках (ЯЭУ) определенного типа зависит от конструктивных особенностей ЯЭУ, используемого теплоносителя, энергетического спектра нейтронов и т.д. Как говорилось ранее, нейтронное облучение материалов приводит к следующим изменениям характеристик материалов: упрочнению; низко- и высокотемпературному радиационному охрупчиванию; радиационной ползучести; радиационному росту и радиационному распуханию; появлению наведенной активности. Именно эти характеристики, наряду с коррозионной стойкостью, являются приоритетными при оценке и сравнении различных конструкционных материалов. При разработке новых материалов главной задачей является достижение минимального или допустимого изменения этих характеристик с целью обеспечения требуемой надежности и долговечности элементов конструкции.

Требование малой активируемости или быстрого спада наведенной активности в настоящее время является обязательным при разработке проектов термоядерных реакторов (ТЯР) ввиду существенно большего, чем в активной зоне реактора деления, объема облучаемых конструкций.

Стали ферритно-перлитного и мартенситно-ферритного классов являются основными материалами для изготовления корпусов водо-водяных реакторов.

Нержавеющие стали и сплавы на основе никеля и хрома используются в качестве оболочек поглощающих элементов, пружинных элементов твэлов и ТВС и в отдельных случаях для дистанционирующих решеток ТВС. Для быстрых реакторов, работающих при более высоких температурах и энергонапряженности, используются жаропрочные холоднодеформированные аустенитные стали, хромистые мартенситно-ферритные стали, никелевые сплавы. Для первой стенки термоядерного реактора с гелиевым охлаждением основным материалом являются малоактивируемые хромистые стали, при охлаждении литием – сплавы ванадия, легированные титаном и хромом. Указанные материалы используются как в отечественных, так и зарубежных реакторах. Отличия состоят в легирующих элементах и технологии получения, которые, в конечном счете, и определяют их служебные характеристики.

#### Литература

1. Воеводин, В.Н. Конструкционные материалы ядерной энергетики – вызов 21 века // Вопросы атомной науки и техники// №2. – 2007. С. 10–22.
2. Воеводин, В.Н. Эволюция структурно-фазового состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов/ В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов. – Киев: «Наукова думка», 2006. – 378с.
3. Солнцев, Ю.П. Материаловедение: Учебник для вузов / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, Ф. Войкут. – М.: МИСИС, 1999. – 600с.
4. Амаев, А.Д. Радиационная повреждаемость и работоспособность конструкционных материалов/ А.Д. Амаев, А.М. Крюков, И.М. Неклюдов и др.; Под ред. А.М. Паршина и П.А. Платонова. – СПб.: Политехника, 1997. – 348с.