

Лекция 30

КОНТРОЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ДЕФЕКТОВ В ОБОРУДОВАНИИ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Конструкционные материалы ядерных энергетических установок, как правило, работают в условиях воздействия радиационных полей различной интенсивности. Облучение приводит к радиационно–стимулированному изменению структуры, элементного и фазового состава материалов, появлению дефектов радиационного происхождения и, как следствие, ухудшению их служебных характеристик.

Известно, что степень радиационного повреждения материалов определяется числом первично выбитых атомов материала бомбардирующей частицей и зависит от ее энергии. Например, при облучении до флюенса 10^{27} нейтр/м² каждый атом решетки металла испытывает более 100 смещений. Основным механизмом радиационного повреждения является взаимодействие атомов материала с нейтронами. Смещение атомов приводит к накоплению дефектов — междоузельных атомов и вакансий. Их взаимодействие между собой и с элементами структуры материала, например с границами зерен в металлах, является причиной радиационного упрочнения, охрупчивания, распухания материалов, их радиационной ползучести. Эти процессы могут привести к искажению формы и размеров конструктивных элементов реактора и, как следствие, к аварийным ситуациям.

Облучение нейтронами вызывает изменение изотопного состава материалов, причем протекание этого процесса существенно зависит от энергии нейтронов. Значительным изменениям подвержены хром, железо, никель, ниобий и другие элементы, входящие в состав конструкционных сплавов. Поскольку атомные размеры исходных и образующихся элементов различны, изменение состава влечет изменение физико-механических, теплофизических и электрических характеристик материалов. Накапливаясь, продукты ядерных превращений могут выделяться в виде фазовых включений, приводя к структурным изменениям в материале, что также изменяет его свойства.

Образование в материалах радиоактивных нуклидов при облучении нейтронами, является причиной, так называемой, наведенной активности. Ее спад может наступить лишь через многие годы после прекращения эксплуатации реактора. Радиоактивный распад образующихся нуклидов — источник остаточного энерговыделения в конструкционных

материалах. Поэтому необходимо поддерживать работу системы охлаждения реактора в течение определенного времени после его остановки.

Из всего многообразия процессов, протекающих при облучении конструкционных материалов, основными, определяющими их радиационную стойкость, являются:

- радиационное охрупчивание
- радиационное распухание;
- радиационная ползучесть.

Именно они ограничивают срок службы материалов и установки в целом.

Для проектирования оборудования ЯЭУ необходимы данные о свойствах материалов в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. На этапе проектирования проводят расчетное обоснование прочности элементов установок. Расчеты выполняются с использованием понятия предельного состояния конструкции. В зависимости от условий работы конструкции в качестве критерия наступления предельного состояния может быть выбрано:

- вязкое разрушение;
- хрупкое разрушение;
- пластическая деформация элемента;
- потеря устойчивости конструкции;
- недопустимое изменение формы и размеров конструктивных элементов;
- появление макротрещины.

Критерии предельного состояния, как правило, представляют в виде математических соотношений, которым должны удовлетворять размеры конструктивных элементов, действующие в них напряжения и температурные поля. В качестве параметров в прочностных расчетах фигурируют **пределы прочности, текучести, ползучести, длительной прочности и выносливости, модуль упругости, относительные удлинение и сужение сечения, удельная работа разрушения и вязкость разрушения, а также критическая температура хрупкости материала**. Разумеется, необходимо учитывать изменение этих свойств из-за старения материалов, коррозионно-эрозионных процессов, неоднородности полей излучения и температуры, в которых будет работать конструкция, а также возможных структурных превращений в материалах при эксплуатации. В табл. Л5.1 приведены основные эксплуатационные факторы влияния на критерии предельного состояния.

Таблица Л30.1. Эксплуатационные факторы и механизмы старения оборудования и трубопроводов АЭС

Эксплуатационное воздействие / Механизмы старения	Радиационное облучение	Термическое старение	Термодеформационное старение	Статическое нагружение	Динамическое нагружение	Циклическое нагружение	Фрикционное взаимодействие	Коррозионное воздействие	Влияния состава и параметров среды	Наводораживание	Коррозионно-эрозионное воздействие
Изменение микроструктуры	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Радиационное охрупчивание	+										
Термическое и термодеформационное охрупчивание		+	+								
Усталость						+	+				
Термоусталость						+					
Межкристаллитная коррозия									+		
Коррозионное растрескивание под напряжением				+							
Общая коррозия									+		+
Питинговая и язвенная коррозия									+		+
Изменение физико-механических свойств	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Водородное охрупчивание										+	
Износ, в т.ч. коррозионно-эрозионный							+				+
Термоудар					+						
Коррозионная растрескивание и коррозионная усталость				+	+			+			
Трибофатика							+				

При проектировании тех или иных конструктивных элементов разработчики выбирают материалы, ориентируясь в основном на опыт своей предыдущей работы. Закладываемые в расчеты данные о свойствах материала определяются при испытании большого числа образцов и представляют собой некие усредненные, справочные характеристики, порой отличающихся от свойств конкретного элемента конструкции. Необходимо также иметь в виду, что за счет неизбежных флуктуации тепловых и нейтронных полей, случайных нагрузок условия работы конструктивных элементов могут отличаться от расчетных.

В результате критическая деградация их эксплуатационных свойств может произойти ранее ожидаемого срока и явиться причиной аварийного инцидента. Возможна и обратная ситуация, когда, выработав расчетный срок службы, конструкция сохраняет работоспособность. Разумеется, конструкторы на этапе проектирования не могут в деталях предвидеть процесс деградации свойств материалов под действием ионизирующего облучения. Особенно, если речь идет о длительных сроках эксплуатации конструкции. Для предотвращения аварийных ситуаций и обоснованного продления ресурса установки необходимы данные о фактическом состоянии материалов. Их можно получить в ходе эксплуатационного контроля, и таким образом оценить момент достижения конструкцией своего предельного состояния.

Для разных этапов эксплуатации оборудования, трубопроводов и других металлоконструкций АЭС предусмотрены процедуры уточнения характеристик материалов. Их основу составляют методики определения деградации физико-механических свойств материала корпуса реактора. Для этого изготавливают серию образцов, которые в дальнейшем облучают в исследовательских реакторах, а после облучения проводят материаловедческие и прочностные испытания в защитных камерах. Используется ускоренная методика накопления флюенса нейтронов. Облучение образцов проводится в потоках нейтронов, в 100-1000 раз превышающих соответствующие потоки на стенке корпуса реактора в реальных условиях.

Образцы для испытаний, как правило, изготавливаются из архивных запасов конструкционных материалов или из материалов, имеющих такие же физико-механические свойства, как и материалы реальной конструкции. Если это возможно, то для изготовления образцов используют специально отобранные пробы металла, вырезанные из доступных и не влияющих на безопасность элементов и зон контролируемых металлоконструкций. Так, например, для уран-графитовых канальных реакторов это — определенные части монтажных площадок внутри баков биологической защиты. Для оценки изменения свойств материала трубопроводов ВВЭР-440 и определения технического состояния металла сварных соединений трубопроводов Ду 500 берут пробы после 10^5 часов эксплуатации, которые подвергают дополнительному ускоренному старению. Ускоренное старение за короткое время позволяет перевести материал в состояние, соответствующее длительным срокам эксплуатации. К ускоренным видам старения относится, в частности, термическое старение, проводимое при температурах выше эксплуатационных. Термическое старение при температуре 450°C в течение 1500 часов металла сварных швов с содержанием ферритной фазы до 8% переводит его в состояние с поврежденностью, соответствующей эксплуатации

конструкции при температуре 280°C в течение $2,5 \cdot 10^5$ часов. В свою очередь, металл вырезок из трубопровода Ду 500 ВВЭР-440, отработавший 10^5 часов и подвергнутый дополнительному старению, оценивается как металл после наработки в $3,5 \cdot 10^5$ часов.

Заключение об изменении эксплуатационных характеристик делается на основе результатов следующих материаловедческих испытаний:

- металлографических, электронно-микроскопических и рентгеноструктурных исследований структуры и химического состава образцов;
- определения механических свойств образцов при их растяжении до момента разрушения;
- определения ударной и пластической вязкости разрушения;
- исследования параметров сопротивления образцов при малоцикловой и многоцикловой усталости, циклической трещиностойкости;
- исследования стойкости к межкристаллитной коррозии и коррозионному растрескиванию под напряжением;
- других специальных исследований.

В качестве примера в табл. Л30.2 и Л30.3 приведены данные об изменении физико-механических характеристик конструкционных сплавов, исследованных указанным образом.

Другой метод оценки деградации эксплуатационных характеристик — исследование образцов-свидетелей из штатных материалов, которые были размещены непосредственно во внутриреакторном пространстве при монтаже реактора. После заданного времени облучения часть образцов извлекается, и по специальной программе исследуется изменение их физико-механических свойств и микроструктуры. Исследовав образцы с разным временем облучения, можно проследить динамику деградации их служебных характеристик.

Применение образцов-свидетелей обладает рядом преимуществ по сравнению с использованием образцов, облучаемых в исследовательских реакторах. Прежде всего, это

- получение данных о влиянии флюенса быстрых нейтронов на механические свойства конструкционных материалов в рабочих условиях, за счет чего удается повысить достоверность получаемых экспериментальных данных;
- возможность облучения большого количества образцов с разным содержанием легирующих и примесных элементов в одних и тех же условиях, что позволяет оценить влияние различных элементов и примесей на ход деградационных процессов в конструкционных материалах;

— возможность использования активационных мониторов нейтронного потока непосредственно в образцах или облучательных капсулах, что обеспечивает определение флюенса быстрых нейтронов с погрешностью, не превышающей 15 %.

Недостатком метода исследования образцов, облучаемых непосредственно в реакторах АЭС, является то, чтобы получить сведения об изменении свойств материалов требуется значительное время. Это затрудняет оперативный прогноз срока, в течение которого еще возможна безопасная эксплуатации диагностируемой конструкции.

Таблица Л30.2. Свойства металла сварного соединения трубопроводов Ду 500

Материал	Температура испытания, °С	Механические свойства			
		σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Исходное состояние					
08X18H12T	20	546	245	67,0	76,3
	350	412	168	38,5	69,3
08X18H10T	20	617	228	52,2	73,2
	350	380	163	35,3	69,2
Металл сварного шва	20	573	353	41,2	53,3
После 100 тысяч часов эксплуатации					
08X18H12T Вырезка I (труба 1)	20	556	278	60,8	74,6
	350	385	202	32,0	71,0
08X18H12T Вырезка I (труба 2)	20	554	279	56,5	67,5
	350	371	215	26,5	59,3
08X18H12T Вырезка II (труба 3)	20	541	266	59,8	73,2
	350	368	193	30,5	72,5
08X18H12T Вырезка II (труба 4)	20	552	277	56,5	70,8
	350	377	208	28,8	67,0
Металл сварного шва Вырезка II	20	590	351	51,5	62,5
	350	461	277	34,0	57,5
После 10⁵ часов эксплуатации и термического старения при 450 °С 1500 час.					
08X18H12T Вырезка I (труба 1)	20	557	271	57,0	73,5
	350	385	206	31,5	70,5
Металл сварного шва Вырезка II	20	612	333	44,0	59,5
	350	475	267	32,5	59,8

Таблица Л30.3. Результаты испытаний на малоцикловую усталость

Состояние металла	Исследуемый материал	Частота нагружения, Гц	Число циклов до зарождения трещины, N_i
Исходное	Основной металл 08X18H12T	0,5–0,7	6400
	Основной металл 08X18H10T	0,5–1	6000
	Металл шва	0,5–2	12000
После эксплуатации	Основной металл 08X18H12T	0,5–0,7	6200
	Металл шва	0,4–2	4000
После термического старения	Основной металл 08X18H12T	0,5	5600
	Металл шва	0,5–2	4000

Еще одна возможность изучения изменения свойств материалов — вырезка проб металла из конструкций, выведенных из эксплуатации. В этом случае определяются фактические свойства материалов на момент прекращения работы объекта. Эта технология широко применялась при исследовании корпусных сплавов реактора ВВЭР–440 (230). Исследовались характеристики деградации эксплуатационных свойств на пробах металла, вырезанных из внутренней стенки корпусов реакторов, выведенных из эксплуатации.

В последнее время для изучения изменения механических свойств конструкционных материалов оборудования и трубопроводов АЭС стал применяться так называемый **безобразцовый метод** испытаний. Он не требует отбора проб, изготовления специальных образцов и их облучения. Безобразцовый метод основан на измерении различных видов твердости материала на функционирующем объекте. По этим данным с помощью специальных методик и определяются пределы текучести, прочности и другие механические характеристики материала. Для этих целей успешно применяются автоматизированные твердомеры типа ДТ-4 различных модификаций и ряд других аппаратно-программных средств, созданных во ВНИИАЭС.

Безобразцовый метод используется не только для оценки деградации эксплуатационных характеристик материалов, но и контроля восстановления их свойств. Например, разработана методика оценки степени восстановления металла корпусов ВВЭР первого поколения по данным измерений кинетической твердости материала. Восстановление корпусных сталей происходит за счет управляемой термообработки. Суть метода кинетической твердости состоит в том, что исследуется кинетика процесса вдавливания сферического индентора на стадии активного нагружения, выдержки под нагрузкой и при разгрузке материала. При этом предусмотрена возможность многократного

циклического нагружения. На основе зарегистрированной диаграммы вдавливания шарового индентора с помощью численных методов рассчитывается диаграмма деформирования контролируемых сплавов. И по ее виду судят о степени восстановления физико-механических свойств. Разработка такой методики является важным шагом к решению задачи продления проектных сроков службы ядерных энергетических установок.

Существуют и другие инструментальные методы изучения деградации свойств. Например, метод, основанный на измерении параметров ультразвуков волн, распространяющихся в контролируемых элементах конструкции.

Несмотря на известные ограничения перечисленных выше методов, их применение в различных сочетаниях позволяет собрать данные для моделирования процесса деградации эксплуатационных характеристик конструкционных материалов. В дальнейшем разработанные модели можно использовать в расчетах по прогнозированию безопасного срока службы оборудования и элементов конструкций АЭС.

Обсуждая организацию диагностического обслуживания энергетических установок, нельзя не сказать о дефектоскопии оборудования. За время длительной эксплуатации в конструкциях и трубопроводах образуются и развиваются различные дефекты. Для обнаружения, определения типа и оценки размеров дефектов используются различные методы неразрушающего контроля. К числу наиболее опасных относятся трещины, являющиеся сильными концентраторами напряжений.

Для эксплуатационников наибольшую опасность представляют развивающиеся, растущие дефекты, которые, достигнув критических размеров, приводят к разрушению конструкции. Выявление таких дефектов — первоочередная задача дефектоскопического обследования. Для этих целей хорошо зарекомендовал себя метод акустической эмиссии. Физическая сущность метода состоит в том, что развивающиеся дефекты являются источником акустических волн с широким спектром частот. Регистрируя эти волны и анализируя их характеристики, удастся обнаружить и локализовать места возможного разрушения конструкции — растущие трещины, зоны значительных коррозионных повреждений и пластической деформации, утечки среды через сквозные дефекты в трубопроводах и сосудах давления. Основное преимущество метода акустической эмиссии состоит в том, что с его помощью можно обнаружить только развивающиеся и, следовательно, наиболее опасные дефекты. Обработка и анализ сигналов акустической эмиссии позволяют классифицировать дефекты по степени опасности. Акустико-эмиссионный контроль, что немаловажно, может проводиться непосредственно в процессе эксплуатации контролируемых объектов. Инструментальная система регистрации и

обработки сигналов акустической эмиссии, как правило, включает несколько первичных преобразователей, размещаемых на контролируемом объекте, предварительные усилители и каналы связи с вычислительным комплексом. Определение разнообразных параметров акустико-эмиссионных сигналов, координат их источников, отображение, протоколирование и хранение дефектоскопической информации реализуется с помощью соответствующего программного обеспечения. С его помощью также оценивается потенциальная опасность обнаруженных дефектов.