

ОЦЕНКА

вероятности крупномасштабного хрупкого разрушения

корпуса атомного реактора PWR.

Степаненко Ю.П. НИИ механики и прикладной математики.

1. Введение.

Корпус реактора - это толстостенный стальной сосуд, содержащий около 170 тонн воды под давлением 160 атмосфер при температуре 320 ° С. Крупномасштабное хрупкое разрушение такого сосуда - это катастрофа, не поддающаяся локализации; ее последствия практически не зависят от выучки и отваги обслуживающего станцию персонала.

Катастрофе предшествует процесс накопления повреждений в металле корпуса под действием механических напряжений. Физика явления такова, что даже малое напряжение рано или поздно разрушит металл. Действие таких факторов, как радиация и коррозия, повышают вероятность разрушения. В большинстве случаев трещина, прорастая на толщину стенки корпуса, вызывает течь, спасительную «течь перед разрушением». Гораздо реже реализуется сценарий крупномасштабного хрупкого разрушения без какого-либо предупреждения. Магистральная трещина оббегает корпус со скоростью, соизмеримой со скоростью звука. Давление в корпусе падает на порядок. Десятки тонн перегретой воды мгновенно превращаются в пар, который «сдувает», как лист бумаги, тысячетонную защитную плиту (если она есть) и сообщает многотонным кускам корпуса скорость артиллерийских снарядов. Одного процента внутренней энергии воды хватает, чтобы 60 т металла забросить на высоту 3000 м. Защитная оболочка выдерживает внешний удар 20-тонного самолета со скоростью 200 км/час (56 м/с), но не выдерживает удар изнутри двухтонным куском массивного металла на скорости 50 м/с. В течение нескольких секунд содержимое реактора оказывается за пределами поврежденной защитной оболочки. Все остальное - это десятикратный Чернобыль.

Какова вероятность крупномасштабного хрупкого разрушения сосуда высокого давления, разрушения внезапного, без каких-либо предупреждающих признаков катастрофы? Эту вероятность обычно относят к году эксплуатации сосуда. Для кислородного баллона величина этой вероятности не менее 10^{-4} , т.е. из 10 тыс. баллонов в течение года в среднем взрывается по чисто механическим причинам один. Для иных сосудов высокого давления указанная вероятность находится на том же уровне. Для корпусов атомных реакторов PWR, каким, например, является корпус атомного реактора Волгодонской АЭС, расчетная величина вероятности разрушения равна 10^{-5} (реактор·год)⁻¹. По нормам, принятым в России [1], вероятность крупномасштабного хрупкого разрушения корпуса реактора PWR должна быть не более 10^{-7} (реактор·год)⁻¹. Последнее, правда, следует отнести к мифотворчеству, в жанре которого российские чиновники не знают себе равных. Прочностного ресурса современных реакторных материалов едва ли хватит на обеспечение уровня 10^{-5} . При этом всегда остается неуверенность в данной плавке металла, специфике эксплуатационных режимов и т.п.

2. Два основных механизма хрупкого разрушения.

2.1. Термоактивированный процесс разрушения (длительная прочность).

Речь идет о кинетической природе прочности твердого тела [2]. В основе этого явления лежит длительный процесс движения дислокаций в поле механического напряжения, слияние этих дислокаций в микротрещины, их развитие и, наконец, быстрый

рост магистральной трещины, приводящий к собственно хрупкому разрушению. Радиация и коррозия способствуют этому процессу [3].

В аспекте статистической физики [4] правомерно рассмотреть вероятность μ разрушения твердого тела. Эта вероятность отнесена к единице времени, в нашем случае к 1 с.

$$\mu = f_0 \exp\left[-\frac{U - \gamma\sigma}{kT}\right] \quad (1)$$

где

f_0 - частота колебаний субатомных фрагментов в объеме дислокаций,

U - потенциальный барьер, который преодолевает дислокация в упомянутом движении,

σ - механическое напряжение,

γ - структурный параметр,

k - постоянная Больцмана,

T - абсолютная температура.

При разрушающих испытаниях, когда образец находится под максимальным напряжением σ_B в течение времени порядка 1 с, можно положить $\mu=1$. Для этого случая, с учетом (1),

$$\sigma_B = \frac{kT}{\gamma} \left[\frac{U}{kT} - \ln f_0 \right] \quad (2)$$

Это выражение позволяет в дальнейшем неведомые нам U , γ и f_0 выразить через предел прочности σ_B .

Рассмотрим идеализированный случай нестареющего материала, когда $\mu=\text{const}$. Тогда вероятность P разрушения за время t определяется распределением Пуассона [5].

$$P = 1 - \exp[-\mu t]$$

Для $P < 10^{-4}$ с точностью до малых второго порядка $P = \mu t$

Отсюда с учетом (1) и (2) и того факта, что разрушение - это предельный случай, следует для эксплуатационного режима:

$$\sigma_B > \sigma + \frac{kT}{\gamma} \ln t - \frac{kT}{\gamma} \ln P \quad (3)$$

Для режима разрушающих испытаний ($P=1$)

$$\sigma = \sigma_B - \frac{kT}{\gamma} \ln t$$

По результатам испытаний образцов стали [6] на длительную прочность (при $T=\text{const}$) можно определить γ из следующего выражения

$$\frac{kT}{\gamma} = -\frac{d\sigma}{d(\ln t)}$$

Для стали типа 15Х2НМФА, из которой изготовлен корпус атомного реактора Волгодонской АЭС, при эксплуатационной температуре $T=600$ °К

$$\frac{kT}{\gamma} \geq 13 \text{ МПа}$$

Используя это выражение при переводе (3) в шкалу десятичных логарифмов, получаем для упомянутой стали при рабочей температуре реактора

$$\sigma_B > \sigma + 30 \lg t - 30 \lg P \quad (4)$$

Проанализируем выражение (4) для $t=31536000$ с (1 год), $P=10^{-7}$, $\sigma_B=700$ МПа и $\sigma=340$ МПа. При этом расчетное напряжение $\sigma=170$ МПа намеренно увеличено в два раза согласно рекомендациям [7, гл. 11]. Эти рекомендации основаны на результатах разрушающих испытаний сферических сосудов высокого давления. Таким образом, прочностной ресурс в 700 МПа расходуется следующим образом: 340 МПа поглощает режим кратковременного нагружения, 220 МПа обеспечивают режимы длительной прочности и 210 МПа

обеспечивают заданную надежность. В итоге - перерасход 70 МПа. В данной ситуации выход один: необходимо повысить Р на два порядка, т.е. установить его на уровне 10^{-5} (реактор·год)⁻¹.

2.2. Рост усталостных трещин.

Математическая модель этого механизма предложена Парисом и Эрдоганом [8] и реализована для реактора PWR в работе [9]. Суть идеи такова. Скорость роста трещины длиной *l* определяется дифференциальным уравнением:

$$\frac{dl}{dn} = f(\Delta\sigma, l, C), -$$

где

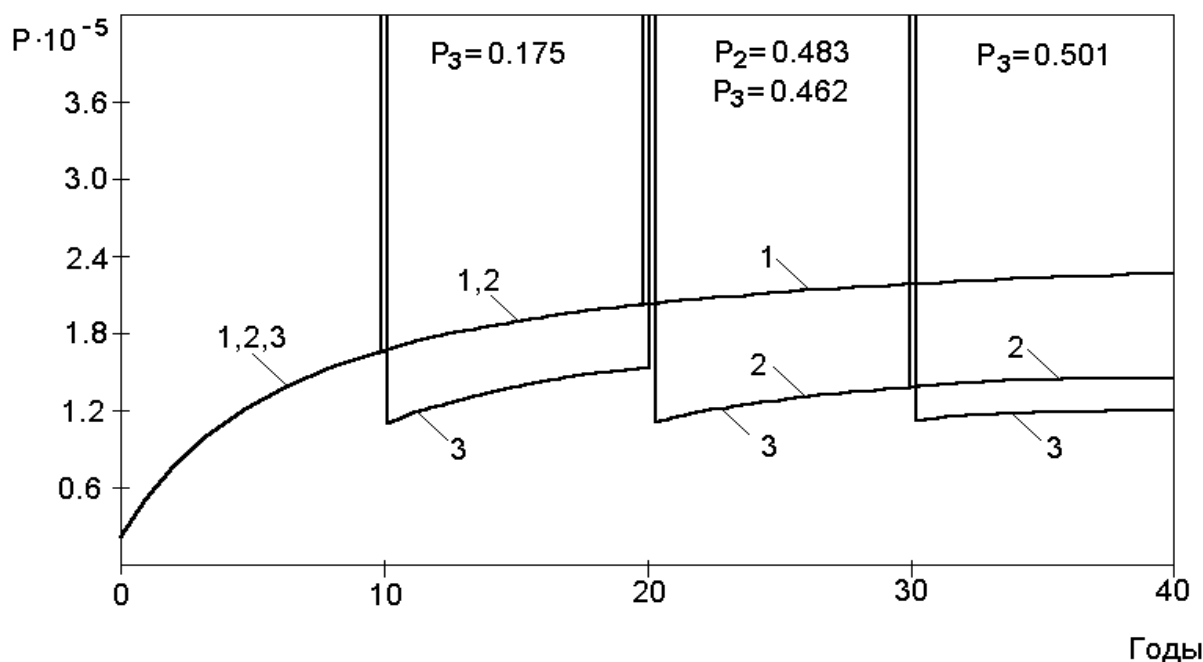
l - длина трещины,

n - число циклов,

$\Delta\sigma$ - размах номинального переменного напряжения,

C - параметр, зависящий от среднего значения нагрузки, материала и вида напряженного состояния.

Вероятность начала хрупкого разрушения оценивается по вероятности достижения какой-либо трещиной такой величины *l*, для которой коэффициент интенсивности напряжений достигает критического значения. Упомянутый механизм погружен в стохастическую систему изготовления, контроля и эксплуатации реактора. Результаты численного моделирования столь сложной системы правдоподобны, но восприятие деталей ее поведения требует специальной подготовки. Чтобы удержать вероятность разрушения на уровне 10^{-5} авторы работы [9] предлагают периодические гидроопрессовки с коэффициентом перегрузки, равном 1.2 (рис. 1).



Вероятность разрушения цилиндрической части корпуса реактора при его эксплуатации без проведения гидроопрессовок корпуса (1), при проведении гидроопрессовок корпуса с интервалом 20 лет (2) и 10 лет (3)

Рис 1

3. Заключение.

Для того, чтобы оперировать столь малыми вероятностями, как 10^{-7} , необходимо испытать несколько миллионов образцов [10]. И это не те образцы, которые лаборант сотнями переносит в одном ящике. Это образцы, установка которых на стенде требует применения подъемного крана. Такая программа испытаний непосильна даже для Соединенных Штатов Америки. К тому же никакие теоретические соображения не заменят в столь ответственном деле прямого эксперимента. На сегодняшний день таким экспериментом является столетний опыт теплоэнергетики и химической промышленности. Результат этого опыта таков: 10^{-4} (реактор·год)⁻¹. Может быть, для Запада и допустима натяжка на 10^{-5} , но для России в ее теперешнем состоянии - это 10^{-4} и не меньше.

Именно эту величину, 10^{-4} (реактор·год)⁻¹, надо иметь в виду, сопоставляя выгоды от АЭС с риском катастрофы. На житейском уровне этот риск для каждого из нас сопоставим с риском погибнуть в течение года в автомобильной катастрофе. Меру опасности последней мы хорошо себе представляем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88/97). Госатомнадзор России, Москва, 1997.
2. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974.
3. Абрамович М.Д., Вотинов С.Н., Иолтуховский А.Г. Радиационное материаловедение на АЭС. М.: Энергоатомиздат, 1984.
4. Исихара А. Статистическая физика. М.: Мир, 1973.
5. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1970.
6. Справочник по свойствам сталей, применяемых в котлотурбостроении. М.: Машиностроительная литература, 1958.
7. Коллакот Р. Диагностика повреждений. М.: Мир, 1989.
8. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение. М.: Мир, 1984.
9. Тутнов А.А., Ткачев В.В.. Расчет вероятности начала хрупкого разрушения сосудов под давлением. Атомная энергия, том. 64, вып. 3, март 1988, с. 188.. 194.
10. Справочник. Надежность технических систем. М.: Радио и связь, 1985.