

Корреляционный подход к оценке критической температуры хрупкости материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 в необлученном состоянии

Проведен статистический анализ данных по 10 энергоблокам ВВЭР-1000 АЭС Украины для получения корреляционного соотношения между критическими температурами хрупкости $T_{к0}$ (по паспорту корпуса реактора) и $T_{ки}$ (по результатам испытаний образцов-свидетелей) основного металла и металла сварного шва в необлученном состоянии. Анализ показал, что увеличению температуры $T_{ки}$ сопутствует увеличение $T_{к0}$ и эта взаимосвязь является линейной для исследованных материалов. В рамках представленного корреляционного исследования предложена формула для оценки температуры $T_{к0}$, которая может быть использована для определения с необходимым уровнем консерватизма критической температуры хрупкости материалов при обосновании безопасной эксплуатации корпуса реактора ВВЭР-1000.

Ключевые слова: корпус реактора ВВЭР-1000, образцы-свидетели, ударная вязкость, критическая температура хрупкости.

В. М. Ревка

Кореляційний підхід до оцінки критичної температури крихкості матеріалів корпусів реакторів ВВЕР-1000 у неопромінену стані

Проведено статистичний аналіз даних по 10 енергоблоках ВВЕР-1000 АЕС України для отримання кореляційного співвідношення між критичними температурами крихкості $T_{к0}$ (за паспортом корпусу реактора) та $T_{ки}$ (за результатами випробувань зразків-свідків) основного металу та металу зварного шва в неопромінену стані. Аналіз показав, що збільшення температури $T_{ки}$ супроводжується зростанням $T_{к0}$ і цей взаємозв'язок є лінійним для досліджуваних матеріалів. У рамках наведеного кореляційного дослідження запропоновано формулу для оцінки температури $T_{к0}$, що може бути використана для визначення з необхідним рівнем консерватизму критичної температури крихкості матеріалів у процесі обґрунтування безпечної експлуатації корпусу реактора ВВЕР-1000.

Ключові слова: корпус реактора ВВЕР-1000, зразки-свідки, ударна в'язкість, критична температура крихкості.

© В. Н. Ревка, 2015

В настоящее время в Украине находится в эксплуатации 13 атомных энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000. Вопросы материаловедческого сопровождения занимают ключевое место в комплексе мероприятий по обеспечению безопасной эксплуатации АЭС, и в первую очередь корпусов ядерных реакторов (КР), на протяжении всего срока службы. Согласно правилам и нормам в атомной энергетике [1], важной частью этих мероприятий является контроль материалов КР в необлученном и облученном состояниях разрушающими методами испытаний. На основании результатов механических испытаний оценивают прочность и пластичность материалов КР, а также вязкость разрушения, т. е. способность сопротивляться хрупкому разрушению.

Одним из параметров, характеризующих склонность металла к хрупкому разрушению, является критическая температура хрупкости $T_{к}$. В процессе эксплуатации температура $T_{к}$ постепенно увеличивается под влиянием облучения и может достичь максимально допустимого значения, выше которого условия хрупкой прочности не выполняются. Вследствие этого возрастает вероятность хрупкого разрушения КР в случае аварийной ситуации, приводящей к “термошоку” (аварийное охлаждение активной зоны реактора).

Для оценки величины $T_{к}$, например для проектного флюенса нейтронов, необходимо знать критическую температуру хрупкости в необлученном состоянии и сдвиг $T_{к}$ вследствие облучения во время эксплуатации. Согласно ПНАЭ Г-7-002-86 [2], существуют две методики определения температуры хрупкости материалов КР в необлученном (исходном) состоянии. Одна из них является по своей сути детерминистической и основана на выполнении определенных критериев для установления критической температуры хрупкости ($T_{к0}$). Другая методика основана на регрессионном анализе температурной зависимости ударной вязкости с помощью функции гиперболического тангенса; в этом случае критическая температура хрупкости ($T_{ки}$) определяется как температура, соответствующая заданному уровню ударной вязкости.

Температуру $T_{к0}$ заносят в формуляр корпуса реактора каждого энергоблока АЭС как один из важных параметров механических свойств материалов КР и используют для определения $T_{к}$ для проектного флюенса нейтронов при обосновании безопасной эксплуатации КР. Однако не для всех энергоблоков АЭС определяли температуру $T_{к0}$ при сертификации материалов КР. По этой причине для обоснования безопасной эксплуатации КР используются нормативные значения $T_{к0}$, которые являются чрезмерно консервативными и могут неоправданно ограничивать радиационный ресурс КР.

В данной работе проведен статистический анализ данных 10 энергоблоков АЭС Украины для получения корреляционного соотношения между температурами $T_{к0}$ и $T_{ки}$ основного металла и металла сварного шва (СШ). Цель работы — оценить критическую температуру хрупкости материалов КР в необлученном состоянии $T_{к0}$, используя известные значения температуры $T_{ки}$, определенные в рамках программы образцов-свидетелей.

Нормативные методы определения критической температуры хрупкости. В нормативных методах определения критической температуры хрупкости используются результаты испытаний стандартных образцов Шарпи на ударный изгиб в выбранном диапазоне температур. При этом существуют некоторые методологические различия между нормативными подходами, которые заключаются в выборе температур испытаний и обработке данных.

Детерминистический подход. Согласно [2, прил. 2, раздел 5], температурный интервал испытаний должен быть таким, чтобы в него обязательно входили точки T_k , $(T_k \pm 10)^\circ\text{C}$, $(T_k + 20)^\circ\text{C}$, $(T_k + 30)^\circ\text{C}$ и $(T_k + 40)^\circ\text{C}$. При каждой температуре испытывают не менее трех образцов. Для каждого образца определяют ударную вязкость KCV, долю вязкой составляющей в изломе и поперечное расширение образцов на грани, противоположной надрезу. Затем определяют средние значения ударной вязкости, а также минимальные значения вязкой составляющей в изломе и поперечного расширения для трех образцов при каждой температуре испытаний.

На графиках «ударная вязкость (вязкая составляющая в изломе, поперечное расширение) — температура испытаний» наносят указанные значения и последовательно соединяют их прямыми линиями. На этих же графиках наносят значения ударной вязкости, волокнистости излома и поперечного расширения для каждого из испытанных образцов. Полученные графики служат исходной информацией для определения критической температуры хрупкости T_k (для материала в исходном состоянии — T_{k0}).

В качестве T_k принимают температуру, при которой выполняются следующие условия:

- при температуре T_k среднее значение ударной вязкости должно быть не ниже заданных значений KCV_I (в большинстве случаев для материалов КР ВВЭР-1000 критериальные значения KCV_I равны 49 или 59 Дж·см⁻²), а минимальное значение ударной вязкости — не ниже 70 % указанных значений;

- при температуре $(T_k + 30)^\circ\text{C}$ среднее значение ударной вязкости должно быть не ниже заданных значений KCV_{II} (в большинстве случаев критериальные значения KCV_{II} равны 74 или 89 Дж·см⁻²), а минимальное значение ударной вязкости — не ниже 70 % указанных значений, минимальное значение вязкой составляющей в изломе — не ниже 50 %.

Критериальные значения KCV_I и KCV_{II} зависят от предела текучести материала при комнатной температуре испытаний. Предел текучести определяют или как среднее значение результатов испытаний на растяжение трех и более образцов, или как максимальное значение, если испытаны только два образца.

Если для одного из трех испытанных образцов не будет удовлетворяться какое-либо из заданных условий, допускается проведение испытаний еще трех образцов. При этом, определяя соответствие полученных результатов нормативным условиям, используют данные пяти образцов, за исключением образца, для которого при первом испытании были получены неудовлетворительные результаты. Если при дополнительных испытаниях хотя бы по одному образцу будут получены неудовлетворительные показатели, за критическую температуру T_k принимают ближайшую высокую температуру, при которой результаты испытаний удовлетворяют нормативным требованиям.

Для необлученных материалов температуру T_k принимают равной T_{k0} . Величину T_{k0} определяют во время аттестации материалов КР и заносят в паспорт сосуда, работающего под давлением, для каждого энергоблока ВВЭР-1000. В дальнейшем температуру T_{k0} используют для оценки критической температуры хрупкости облученных материалов при обосновании безопасной эксплуатации КР.

Статистический подход. Согласно [2, прил. 2, раздел 8], количество образцов для испытания материала в необлученном состоянии должно соответствовать количеству образцов, требуемому для определения критической температуры

хрупкости согласно [2, прил. 2, раздел 5]. В случае ограниченного количества образцов для построения одной температурной зависимости KCV допускается использовать результаты испытаний меньшего количества образцов, но не менее 12.

Образцы испытывают в диапазоне температур, включающих переходную область, а также нижний и верхний шельфы кривой Шарпи. Экспериментальные данные обрабатывают следующим способом.

1. Температурную зависимость KCV аппроксимируют функцией гиперболического тангенса вида

$$KCV = A + B \cdot \text{th} \left(\frac{T - T_0}{C} \right), \quad (1)$$

где A — среднее значение KCV между верхним KCV_{\max} и нижним KCV_{\min} значениями ударной вязкости (верхний и нижний шельфы кривой Шарпи); $B = (KCV_{\max} - KCV_{\min})/2$; T_0 — температура, соответствующая значению A ; C — эмпирическая константа. Ударную вязкость на верхнем шельфе KCV_{\max} определяют как среднее значение для образцов, которые имеют полностью вязкий излом. Параметры T_0 и C определяют методом наименьших квадратов для случая нелинейной зависимости. Полученные графики служат исходной информацией при определении критической температуры хрупкости.

2. В зависимости от известного значения предела текучести материала в исходном состоянии при комнатной температуре выбирают критериальный уровень ударной вязкости KCV_I .

3. На графике «ударная вязкость — температура испытаний» на уровне KCV_I проводят линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой Шарпи. Температуру, соответствующую точке пересечения, обозначают T_1 .

4. На этом же графике на уровне 1,5 KCV_I проводят линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения с кривой Шарпи. Температуру, соответствующую точке пересечения, обозначают T_2 .

5. Если разность температур $(T_2 - T_1)$ окажется меньше 30°C , то температуру T_1 принимают в качестве значения $T_{ки}$ для необлученного материала. Если условие $(T_2 - T_1) < 30^\circ\text{C}$ не выполняется, в качестве $T_{ки}$ принимают значение $(T_2 - 30)^\circ\text{C}$.

Температуру $T_{ки}$ определяют на основании результатов испытаний образцов-свидетелей контрольного комплекта (необлученные образцы) и в дальнейшем используют для оценки сдвига критической температуры хрупкости вследствие облучения. Следует сказать, что для корпусов реакторов PWR температура хрупкости T_{41J} (функциональный аналог $T_{ки}$) соответствует фиксированному уровню энергии удара независимо от предела текучести материала [3].

Корреляционный анализ экспериментальных данных. Проведен сравнительный анализ для получения корреляционного соотношения между критическими температурами хрупкости $T_{ки}$ и T_{k0} для материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 в исходном состоянии. В анализ включены результаты испытаний на ударный изгиб образцов Шарпи основного металла и металла сварного шва (табл. 1). В большинстве случаев критические температуры хрупкости T_{k0} материалов КР взяты из соответствующих паспортов на сосуды давления, а по двум блокам — из технических решений. Корреляционная зависимость для температур хрупкости, определенных согласно различным подходам, показана на рис. 1.

Анализ показал, что увеличение $T_{ки}$ сопровождается систематическим увеличением T_{k0} , и это соотношение

Таблица 1. Критические температуры хрупкости $T_{ки}$ и $T_{к0}$ для основного металла и металла сварного шва КР ВВЭР-1000 в исходном состоянии

Индекс КР	Основной металл		Металл СШ	
	$T_{ки}, ^\circ\text{C}$	$T_{к0}, ^\circ\text{C}$	$T_{ки}, ^\circ\text{C}$	$T_{к0}, ^\circ\text{C}$
С	-39	-30	-31	-20
W	-73	-60	-22	-10
P	-37	-25	-57	-30
H	-64	-55	-36	-20
D	-75	-65	-46	-30
K	-81	-75	-62	-40
Q	-86	-68	-56	-30
N	-80	-75	-70	-50
L	-53	-35	-41	-20
Y	-79	-60	-43	-30

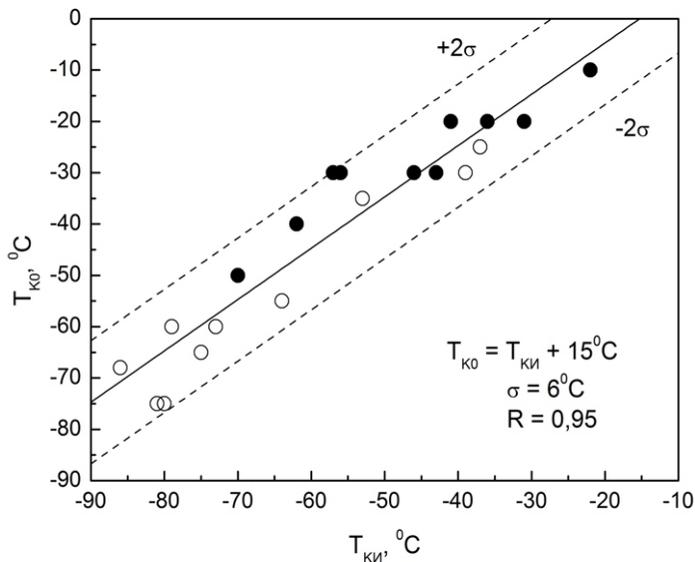


Рис. 1. Корреляция между температурами $T_{к0}$ и $T_{ки}$ для материалов КР ВВЭР-1000 (○ — основной металл, ● — металл СШ)

является линейным для исследованных материалов. В среднем для данной выборки $T_{к0}$ больше $T_{ки}$ на 15°C (рис. 1). Стандартное отклонение для корреляционной зависимости $\sigma = 6^\circ\text{C}$ с коэффициентом корреляции $R = 0,95$. Небольшой разброс данных относительно линии регрессии и значительная корреляция (коэффициент R близок к единице) свидетельствуют о том, что между двумя величинами существует сильная статистическая связь.

В рамках данного корреляционного исследования можно также предположить, что обнаруженная линейная зависимость будет справедлива и для другого набора данных. Это предположение основано на том, что величины $T_{ки}$ и $T_{к0}$ характеризуют температуру хрупкости материалов, которая определена различными методами. Очевидно, что между параметрами, которые характеризуют определенное свойство материала, должна наблюдаться закономерная взаимосвязь.

Таким образом, для оценки критической температуры хрупкости $T_{к0}$ может быть использовано следующее соотношение:

$$T_{к0} = T_{ки} + 15^\circ\text{C} (\sigma = 6^\circ\text{C}), \quad (2)$$

где $T_{ки}$ — температура хрупкости материалов в исходном состоянии, определенная при испытании контрольных образцов-свидетелей; σ — стандартное отклонение для корреляционной зависимости.

Данное соотношение может быть использовано в тех случаях, когда для материалов КР не определяли температуру $T_{к0}$ или проводили испытания только для ее подтверждения. В процедуре обоснования безопасной эксплуатации корпусов реакторов ВВЭР-1000 полученное уравнение и стандартное отклонение могут применяться для консервативной оценки критической температуры хрупкости $T_{к}$ лимитирующих материалов КР.

Выводы

Статистический анализ результатов испытаний образцов Шарпи на ударный изгиб необлученных материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 по 10 энергоблокам АЭС Украины позволяет сделать следующие выводы.

1. Увеличение температуры $T_{ки}$ (результаты испытаний образцов-свидетелей) сопровождается систематическим увеличением критической температуры хрупкости $T_{к0}$ (паспорт корпуса реактора) как для основного металла, так и для металла сварного шва.
2. Полученная корреляция является линейной, и для рассмотренных данных в среднем значение $T_{к0}$ больше значения $T_{ки}$ на 15°C с некоторым разбросом, который характеризуется стандартным отклонением $\sigma = 6^\circ\text{C}$.
3. Корреляционный подход к оценке $T_{к0}$ может быть использован для определения с необходимым уровнем консерватизма критической температуры хрупкости $T_{к}$ необлученных материалов в процедуре обоснования безопасной эксплуатации корпусов реакторов ВВЭР-1000.

Список использованной литературы

1. ПНАЭ Г-7-008-89. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 168 с.
2. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 524 с.
3. ASTM E 185-82. Standard Practice for Conducting Surveillance Tests For Light-Water Cooled Nuclear Power Reactor Vessels / Annual Book of ASTM Standards. — Vol. 03.01. — 1982. — 7 p.

References

1. PNAE G-7-008-89, Rules for Design and Safe Operation of Components and Piping of Nuclear Power Plants [Pravila ustroistva i bezopasnoi ekspluatatsii oborudovaniia i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok], Energoatomizdat, Moscow (1990), 168 p. (Rus)
2. PNAE G-7-002-86, Standards for Strength Calculations of Components and Piping of Nuclear Power Plants [Normy rascheta na prochnost oborudovaniia i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok], Energoatomizdat, Moscow (1989), 524 p. (Rus)
3. ASTM E 185-82, Standard Practice for Conducting Surveillance Tests For Light-Water Cooled Nuclear Power Reactor Vessels, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01 (1982), 7 p.

Получено 11.12.2014.