

ОЦЕНКА ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ КОРПУСНЫХ МАТЕРИАЛОВ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

Э. У. Гриник, В. Н. Ревка, Л. И. Чирко, Ю. В. Чайковский

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

Ресурс корпусов реакторов типа ВВЭР-1000 в конечном итоге обусловлен вязкостью разрушения (трещиностойкостью) корпусных материалов. До сегодняшнего дня в соответствии с нормативной практикой вязкость разрушения характеризуется критической температурой хрупкости, которая определяется по результатам ударных испытаний образцов Шарпи. Подобный подход характерен для всех стран, эксплуатирующих ядерные водо-водяные реакторы под давлением. Однако из работ западных специалистов известно, что нормативный подход не всегда адекватно характеризует трещиностойкость корпусных материалов и в некоторых случаях существенно недооценивает их вязкие свойства в исходном состоянии, что приводит к неоправданно высокому консерватизму. Чрезмерный консерватизм может приводить к необоснованным ограничениям в режимах работы и сроках службы корпуса реактора. Поэтому появилась необходимость использовать иные подходы, которые основаны на последних достижениях экспериментальных методов механики разрушения и дают возможность адекватно оценивать параметры вязкости разрушения. В докладе проведено сравнение нормативного подхода и метода Мастер кривой с точки зрения адекватного определения параметров трещиностойкости корпусных материалов. На основании анализа экспериментальных данных по образцам-свидетелям показана потенциальная возможность использования нового статистического метода для продления ресурса корпусов реакторов типа ВВЭР-1000.

1. Введение

До сегодняшнего дня в соответствии с нормативной практикой ПНАЭ Г-7-002-86 [1] вязкость разрушения оценивается с помощью критической температуры хрупкости T_K . Адекватная оценка величины T_K является чрезвычайно важной, поскольку эта характеристика используется в прочностных расчетах корпуса реактора в условиях “термошока” и в конечном итоге определяют срок эксплуатации корпуса реактора (КР), а значит, и АЭС в целом.

Исторически нормативный подход для описания характеристик вязкости разрушения использует результаты ударных испытаний образцов Шарпи, как самый простой способ оценки прочности материала при наличии в нем концентратора напряжений. При прочностных расчетах нормативная кривая трещиностойкости индексируется температурой T_K , которая определяется из ударных испытаний по Шарпи. По своей сути нормативный подход косвенно характеризует трещиностойкость материалов, поскольку основан на корреляциях, а не прямых измерениях параметров вязкости разрушения.

Исследования последних десятилетий показали [2, 3], что нормативный подход существенно недооценивает вязкость разрушения корпусных материалов в некоторых случаях, что приводит к чрезмерно консервативным оценкам. Чрезмерный консерватизм при оценке целостности КР может необоснованно ограничивать эксплуатационные режимы и срок службы КР.

Альтернативой нормативному методу может быть подход Мастер кривой, который основан на статистической модели хрупкого разрушения ферритных сталей и прямых измерениях характеристик вязкости разрушения.

Целью данной работы было сравнение нормативного подхода и методологии Мастер кривой с точки зрения оценки вязкости разрушения корпусных материалов реакторов АЭС Украины.

2. Исследуемые материалы и условия облучения

В работе проанализированы материалы КР ВВЭР-1000. Корпусные материалы представляют собой малоуглеродистые низколегированные стали и их сварные соединения. Для анализа были использованы результаты испытаний образцов-свидетелей металла КР девяти энергоблоков АЭС Украины.

Для ударных испытаний применялись стандартные образцы Шарпи. Для определения статической вязкости разрушения испытывались нестандартные образцы на 3-точечный изгиб типа COD (образцы Шарпи с трещиной).

Образцы облучались в промышленных реакторах потоком нейтронов $\sim 10^{15}$ нейтрон/м² · с до флюенса быстрых ($E > 0,5$ МэВ) нейтронов $\sim 41 \cdot 10^{22}$ нейтрон/м². Температура облучения составляет ~ 300 °С.

Химический состав корпусных материалов с указанием легирующих элементов и “вредных” примесей приведен в таблице. Следует отметить, что рассматриваемые материалы являются ис-

ключительно чистыми в отношении меди и фосфора. В то же время сварные швы в большинстве случаев имеют высокое содержание никеля, что повышает их чувствительность к воздействию нейтронного облучения. Степень радиационного охрупчивания превышает нормативную величину, если металл сварного шва имеет одновременно высокую концентрацию атомов никеля и марганца. Такое неблагоприятное сочетание легирующих элементов наблюдается для сварных швов КР ХАЭС-1 и ЮУАЭС-2, которые далее будут рассмотрены более подробно.

Содержание основных легирующих элементов и примесей меди и фосфора в корпусных материалах

Блок	Содержание, % мас.							
	Ni	Mn	Cu	P	Ni	Mn	Cu	P
	Основной металл				Металл сварного шва			
ХАЭС-1	1,12	0,48	0,06	0,007	1,88	0,97	0,02	0,006
ЮУАЭС-1	1,17	0,46	0,05	0,008	1,70	0,94	0,04	0,007
ЮУАЭС-2	1,19	0,44	0,12	0,016	1,74	0,93	0,05	0,012
ЮУАЭС-3	1,12	0,35	0,05	0,008	1,72	0,74	0,06	0,005
ЗАЭС-1	1,20	0,48	0,08	0,007	1,10	0,78	0,03	0,005
ЗАЭС-3	1,10	0,43	0,05	0,007	1,55	0,67	0,05	0,007
ЗАЭС-4	1,34	0,41	0,07	0,010	1,70	0,65	0,06	0,009
ЗАЭС-5	1,28	0,51	0,05	0,008	1,60	0,86	0,08	0,009
ЗАЭС-6	1,26	0,46	0,10	0,010	1,67	0,74	0,04	0,006

3. Нормативный подход и методология Мастер кривой

Нормативная кривая вязкости разрушения была получена просто как нижняя огибающая для всех данных по трещиностойкости, которые были доступны на момент принятия норм ПНАЭ. В расчетах на хрупкую прочность нормативная кривая K_{JC} индексируется критической температурой хрупкости T_K . Фактически величина T_K размещает кривую трещиностойкости на температурной оси.

Однако температура T_K определяется на основании ударных испытаний образцов Шарпи независимо от измеренной вязкости разрушения. Таким образом, нормативный подход косвенно оценивает вязкость разрушения материалов.

В отличие от нормативного подхода ПНАЭ Мастер кривая основана на прямых измерениях и поэтому представляет собой более точную меру вязкости разрушения материалов.

Согласно методологии Мастер кривой значения критического коэффициента интенсивности

напряжений $K_{JC(0.4T)}$ для образцов COD толщиной $B_{0.4T} = 10$ мм с учетом требований деформационного критерия стандарта ASTM E1921 [4] пересчитываются на толщину 25 мм с помощью соотношения

$$K_{JC(1T)} = K_{min} + (K_{JC(0.4T)} - K_{min}) \cdot \left(\frac{B_{0.4T}}{B_{1T}} \right)^{1/4}, \quad (1)$$

где $K_{JC(1T)}$ – коэффициент интенсивности напряжений для образцов толщиной $B_{1T} = 25$ мм, $K_{min} = 20 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ – минимальное значение вязкости разрушения для ферритных сталей.

После размерной корректировки определяют переходную температуру T_0 с помощью метода максимального правдоподобия, численно решая следующее уравнение:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i \cdot \exp(0.019 \cdot (T_i - T_0))}{11 + 77 \cdot \exp(0.019 \cdot (T_i - T_0))} - \sum_{i=1}^n \frac{(K_{JC}^i - 20)^4 \cdot \exp(0.019 \cdot (T_i - T_0))}{(11 + 77 \cdot \exp[0.019 \cdot (T_i - T_0)])^5} = 0, \quad (2)$$

где символ Кронекера $\delta_i = 1$, если значение K_{JC} корректное и $\delta_i = 0$, если значение K_{JC} не удовлетворяет требованию деформационного критерия стандарта ASTM E1921.

Фактически процедура вычисления температуры T_0 сводится к совмещению Мастер кривой, уравнение которой имеет вид $K_{JC} = 30 + 70 \exp[0.019(T - T_0)]$, с экспериментально полученной температурной зависимостью величины $K_{JC(1T)}$, после чего T_0 определяется как температура, соответствующая уровню $K_{JC(1T)} = 100 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$. Поскольку методология Мастер кривой использует аппарат математической статистики, для данных K_{JC} могут быть определены 95 %-ная верхняя и 5 %-ная нижняя доверительные границы.

4. Анализ экспериментальных данных

В большинстве случаев для проверки применимости Мастер кривой для оценки вязкости разрушения использовались корпусные материалы реакторов западного типа. В данной работе проведен анализ корпусных материалов реактора типа ВВЭР-1000 с использованием методологии Мастер кривой. Были использованы данные для образцов в исходном состоянии и после нейтронного облучения.

Результаты анализа для металла сварного шва приведены на рис. 1. Всего было проанализировано 57 исходных и 98 облученных образцов. Максимальный радиационный сдвиг кривой вязкости разрушения составляет 86 °С.

Как видно из рис. 1, температурная зависимость параметров трещиностойкости и разброс значений K_{IC} для металла сварного шва хорошо согласуется с формой Мастер кривой и 5 %-ными и 95 %-ными доверительными границами.

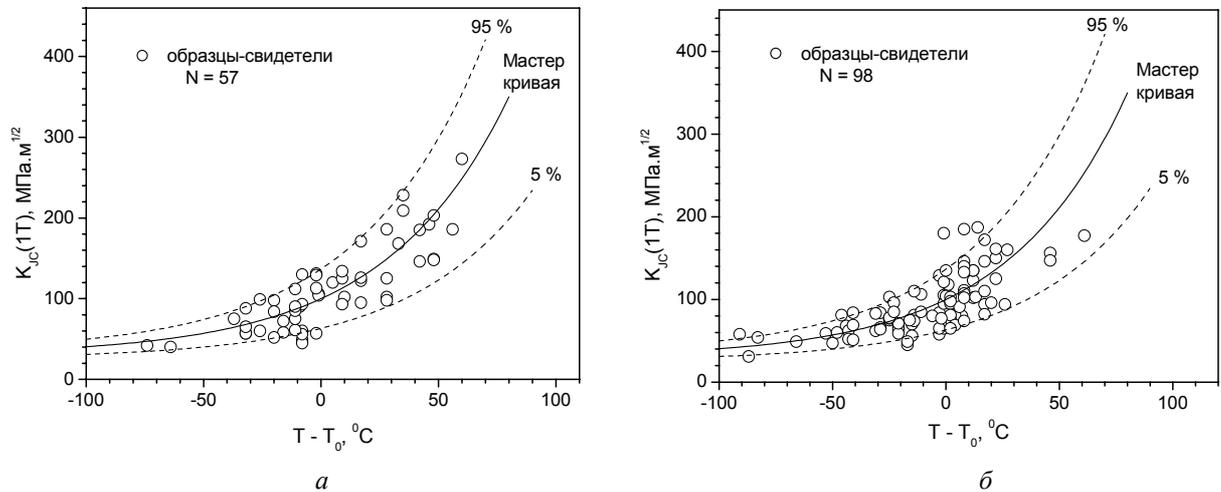


Рис. 1. Температурные зависимости вязкости разрушения и Мастер кривая для металла сварного шва до (а) и после (б) облучения в координатах приведенной температуры.

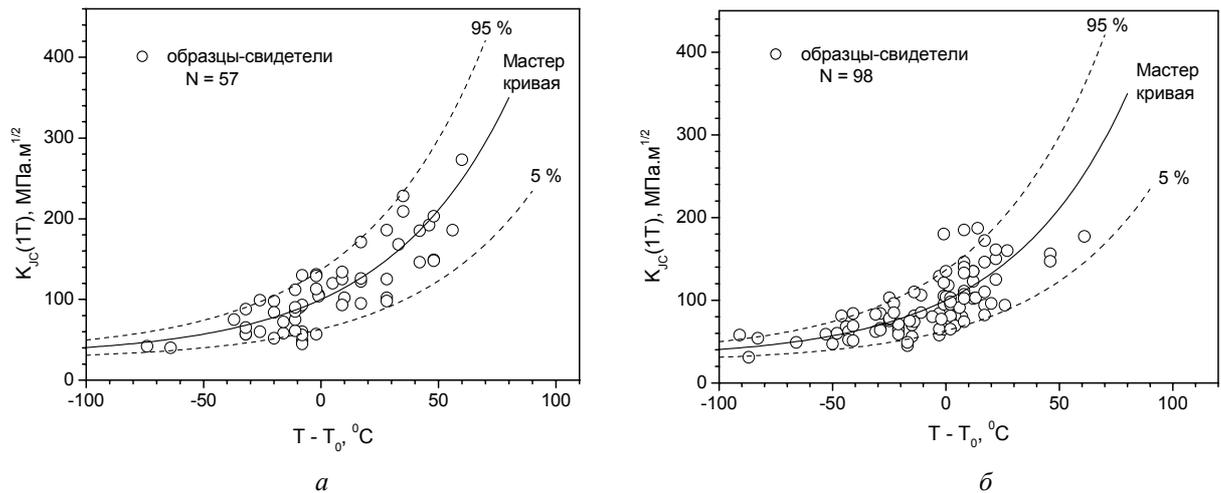


Рис. 2. Температурные зависимости вязкости разрушения и Мастер кривая для основного металла до (а) и после (б) облучения в координатах приведенной температуры.

Для основного металла методология Мастер кривой также удовлетворительно описывает полученные экспериментальные данные по вязкости разрушения (рис. 2).

Таким образом, проведенный анализ показывает, что подход Мастер кривой может успешно использоваться для описания трещиностойкости материала как в исходном, так и в облученном состоянии с максимальным радиационным сдвигом кривой $K_{IC} \sim 86$ °С.

Представляется важным рассмотреть взаимосвязь между температурами T_{K0} и T_0 , которые являются индексными параметрами для кривых вязкости разрушения, но при этом полу-

чены на основании данных различных подходов.

Для этого была проведена статистическая переоценка данных по вязкости разрушения для необлученных материалов с целью определения температуры T_0 . Затем величина T_0 сравнивалась с критической температурой хрупкости в исходном состоянии T_{K0} , полученной заводом-изготовителем КР на этапе аттестации металла.

Результаты такого сравнения для металла сварного шва приведены на рис. 3. Как можно видеть, наблюдается значительное отличие между двумя температурами, при этом величина T_0 всегда меньше температуры T_{K0} . Различие между двумя параметрами составляет в среднем 71 °С.

Также следует отметить, что соотношение между величинами T_K и T_0 заметно изменяется от материала к материалу. Это свидетельствует о том, что уровень консерватизма, задаваемый нормативным подходом, также не одинаков для материалов.

Рис. 4 наглядно демонстрирует результаты использования различных подходов для оценки вязкости разрушения материалов. На рисунке пока-

заны данные по вязкости разрушения, полученные при испытании необлученных образцов-свидетелей и приведенные к толщине 25 мм. Результаты получены для сварных швов КР энергоблоков ХАЭС-1 и ЮУАЭС-2. Также на рисунок нанесены нормативная зависимость и 5 %-ная доверительная граница Мастер кривой, индексированные температурами T_{K0} и T_0 соответственно.

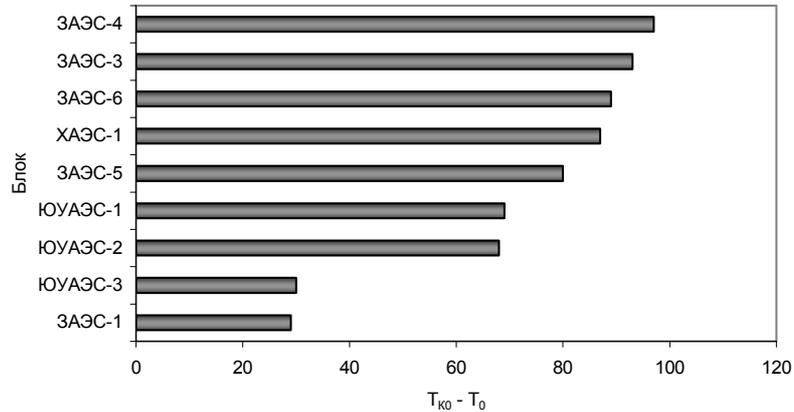


Рис. 3. Сравнение величин T_{K0} и T_0 для металла сварного шва.

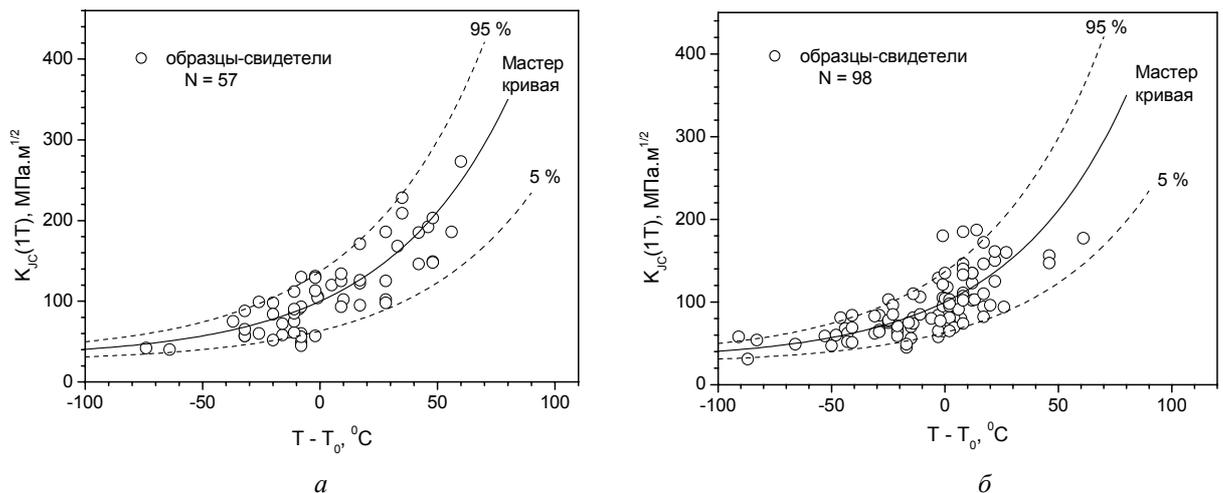


Рис. 4. Сравнение различных подходов для оценки вязкости разрушения сварных швов КР ХАЭС-1 (а) и ЮУАЭС-2 (б).

Как видно из рис. 4, температура T_0 и нижняя 5 %-ная доверительная граница Мастер кривой адекватно характеризуют экспериментальные данные. В то же время нормативный подход и критическая температура хрупкости T_{K0} существенно недооценивают трещиностойкость материала. Сдвиг между кривыми составляет ~ 50 °С для блока ХАЭС-1 и ~ 30 °С для блока ЮУАЭС-2.

Очевидно, что использование чрезмерно консервативных оценок параметров трещиностойкости материала для расчетов на хрупкую прочность может привести к неоправданным ограничениям в сроках службы корпуса реактора.

5. Критическая температура хрупкости для сварных швов

Следующая часть работы была посвящена прогнозу критической температуры хрупкости для сварных швов, скорость охрупчивания которых превышает нормативную из-за повышенного содержания никеля и марганца. На рис. 5 показано прогнозируемое увеличение критической температуры хрупкости T_K для металла сварного шва КР ЮУАЭС-2, полученное на основании испытаний образцов-свидетелей. Для сравнения на график нанесена допустимая критическая температура хрупкости T_K^a , равная 56 °С [5]. Для

обеспечения хрупкой прочности КР в условиях термошока критическая температура хрупкости T_K не должна превышать величину T_K^a .

Для блока ЮУАЭС-2 средняя скорость накопления флюенса на внутреннюю стенку КР в районе активной зоны составляет $1,0 \cdot 10^{22}$ нейтрон/м² за одну кампанию [6], т.е. за проектные сорок лет сварной шов КР наберет флюенсе $40 \cdot 10^{22}$ нейтрон/м². Как следует из рис. 5, при этом флюенсе значение T_K будет меньше T_K^a , тем самым хрупкая прочность КР будет обеспечена и, следовательно, КР отработает свой проектный ресурс.

Однако продление срока эксплуатации может оказаться проблематичным, поскольку нет температурного запаса по вязкости для дальнейшей

эксплуатации КР. В этом случае проблема может быть решена путем использования исходной критической температуры хрупкости, основанной на методологии Мастер кривой и величине T_0 . Использование более низкой критической температуры хрупкости автоматически снижает значение T_K в конце проектного срока эксплуатации, тем самым увеличивая температурный запас по вязкости и, следовательно, срок службы КР.

Такой же анализ был выполнен для металла сварного шва КР блока ХАЭС-1. Как демонстрирует рис. 6, в этом случае КР может не отработать проектный ресурс, поскольку температурный запас по вязкости исчерпывается до истечения проектного срока 40 лет. Продление срока службы КР тем более становится проблематичным.

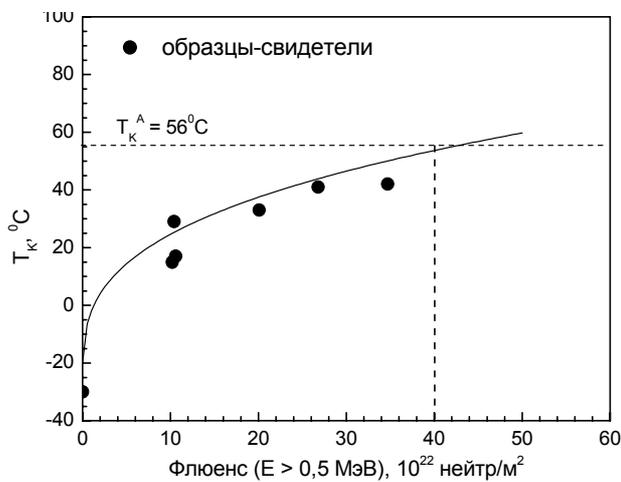


Рис. 5. Прогноз критической температуры хрупкости для металла сварного шва КР ЮУАЭС-2.

В данном случае переоценка исходной критической температуры хрупкости и использование более низкой температуры T_K , основанной на методологии Мастер кривой, дает потенциальную возможность обеспечить проектный ресурс и его продление, не прибегая к дополнительным дорогостоящим мерам, например отжигу КР.

6. Заключение

1. Мастер кривая, 5 %-ная и 95 %-ная доверительные границы адекватно характеризуют температурную зависимость вязкости разрушения и разброс значений K_{JC} для сварных швов КР

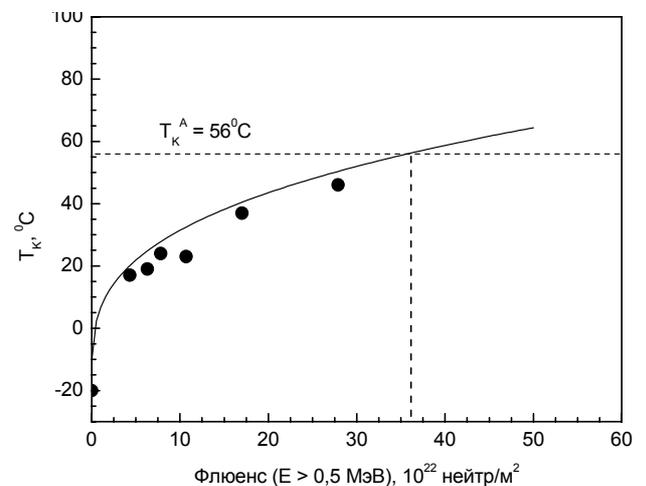


Рис. 6. Прогноз критической температуры хрупкости для металла сварного шва КР ХАЭС-1.

ВВЭР-1000 как в необлученном, так и в охрупченном состоянии (максимальный радиационный сдвиг ~ 86 °С).

2. Нормативный подход в некоторых случаях чрезмерно консервативно оценивает вязкость разрушения сварных соединений корпусных сталей реактора ВВЭР-1000.

3. Применение методологии Мастер кривой существенно улучшает оценку параметров вязкости разрушения корпусных материалов в необлученном состоянии и может сыграть ключевую роль в стратегии продления срока службы КР типа ВВЭР-1000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 525 с.
2. Sokolov M.A. Statistical Analysis of the ASME KIC Database // Journal of Pressure Vessel Technology. - 1998. - Vol. 120.
3. Kirk M., Mitchell M. Potential Roles for the Master Curve in Regulatory Application // Int. J. Pres. Ves. & Piping. - 2001. - Vol. 78, - P. 111 - 123.

4. *ASTM E 1921-97. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T₀, for Ferritic Steels in the Transition Range.* - ASTM, 1997.
5. *Оценка запаса ресурса корпуса реактора энергоблока № 1 Хмельницкой АЭС в обоснование срока выгрузки и состава выгружаемых образцов-свидетелей металла корпуса реактора 3-го срока освидетельствования: (Отчет) / ОКБ "Гидропресс".* - Подольск, Россия, 2004.
6. *Определение радиационной нагрузки корпуса реактора энергоблока № 2 ЮУАЭС в течение 17-й топливной кампании: (Отчет) / Ин-т ядерных исслед. НАН Украины.* - Договор № 09/05 от 04.03.05. - Киев, 2005. - 52 с.

ОЦІНКА В'ЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ КОРПУСНИХ МАТЕРІАЛІВ РЕАКТОРА ВВЕР-1000

Е. У. Гринік, В. М. Ревка, Л. І. Чирко, Ю. В. Чайковський

Ресурс корпусів реакторів типу ВВЕР-1000 обумовлений в'язкістю руйнування корпусних матеріалів. До теперішнього часу згідно з нормативною практикою в'язкість руйнування характеризується критичною температурою крихкості, що визначається за результатами ударних випробувань зразків Шарпі. Подібний підхід притаманний усім країнам, які експлуатують ядерні водо-водяні реактори під тиском. Проте з робіт західних спеціалістів відомо, що нормативний підхід не завжди адекватно характеризує в'язкість руйнування корпусних матеріалів і в деяких випадках значною мірою недооцінює їх в'язкі властивості у вихідному стані, що призводить до невиправдано високого консерватизму. Надмірний консерватизм може призводити до необґрунтованих обмежень у режимах роботи та термінах служби корпусу реактора. Тому з'явилася необхідність використовувати інші підходи, що ґрунтуються на останніх досягненнях експериментальних методів механіки руйнування та дають можливість адекватно оцінювати параметри в'язкості руйнування. У доповіді проведено порівняння нормативного підходу та методу Майстер кривої з точки зору адекватного визначення параметрів в'язкості руйнування корпусних матеріалів. Ґрунтуючись на аналізі експериментальних даних за зразками-свідками, показано потенційну можливість використання нового статистичного методу для подовження ресурсу корпусів реакторів типу ВВЕР-1000.

EVALUATION OF WWER-1000 VESSEL MATERIALS FRACTURE TOUGHNESS

E. U. Grynik, V. N. Revka, L. I. Chyrko, Yu. V. Chaikovsky

The lifetime of WWER-1000-type reactor vessels is finally conditioned by the fracture toughness (crack growth resistance) of RPV materials. Up to now in line with the regulations the fracture toughness is characterized by the critical temperature of brittleness determined by the results of the Charpy specimen impact testing. Such approach is typical for all countries operating the water pressure reactors. However, regulatory approach is known from the western specialists not always to characterize adequately the crack growth resistance of the vessel materials and in some cases to underestimate their characteristics in the reference state that leads to unreasonably high conservatism. Excessive conservatism may lead to the invalid restrictions in the operating modes and the service life of the reactor vessel. Therefore there appeared the necessity to apply another approaches based on the state-of-the-art experimental methods of the fracture mechanics and allowing evaluating the fracture toughness parameters sufficiently. The paper presents the results of the comparison of the regulatory approach and the Master curve approach from the point of view of the adequate determination of the vessel material crack growth resistance parameters. Analysis of the experimental data of the surveillance specimens illustrated the potential possibility of applying the new statistical method for the WWER-1000-type reactor vessel lifetime extension.

Поступила в редакцію 21.07.06,
после доработки – 19.04.07.