

АНАЛИЗ МЕТОДОЛОГИИ МАСТЕР КРИВОЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ОЦЕНКИ ЦЕЛОСТНОСТИ КОРПУСА РЕАКТОРА ВВЭР-1000

Э.У. Гриник, В.Н. Ревка, Л.И. Чирко

Институт ядерных исследований НАН Украины, г. Киев, Украина

Проведен анализ применения методологии Мастер кривой для оценки целостности корпуса реактора ВВЭР-1000. В анализ включены результаты испытаний необлученных образцов-свидетелей 6-ти корпусов реакторов украинских АЭС. Показано, что исходная критическая температура хрупкости $T_{ко}$ является неэффективным параметром в качестве температурного индекса для нормативной зависимости K_{IC} , и действующий подход существенно недооценивает трещиностойкость некоторых сварных швов. Применение методологии Мастер кривой позволяет получить реальную оценку параметров вязкости разрушения и тем самым избежать необоснованных ограничений в режимах эксплуатации и сроках службы корпуса реактора.

ВВЕДЕНИЕ

Целостность корпуса реактора (КР) является необходимым условием безопасной эксплуатации атомных электростанций (АЭС) на протяжении всего проектного срока службы. Оценка целостности основана на расчете хрупкой прочности КР в соответствии с подходами механики разрушения. Согласно действующего нормативного подхода ПНАЭ Г-7-002-86 [1] хрупкая прочность считается обеспеченной, когда действующий коэффициент интенсивности напряжений K_I меньше допустимой величины K_{IC} при расчетных температурах. Другими словами, должен существовать достаточный температурный запас по вязкости, чтобы избежать хрупкого разрушения КР во всех возможных режимах эксплуатации, включая аварийные ситуации.

Воздействие нейтронного облучения на материалы КР вызывает снижение их вязкости и, как следствие, уменьшение температурного запаса. Это явление известно как радиационное охрупчивание (РО) материала. Мерой РО служит сдвиг критической температуры хрупкости T_K .

Для расчетов на хрупкую прочность используется нормативная температурная зависимость вязкости разрушения K_{IC} , положение которой на температурной оси определяется значением T_K . Чтобы учесть радиационно-индуцированные изменения вязкости, вводят сдвиг переходной температуры ΔT_F , обусловленный облучением.

Как исходную критическую температуру хрупкости $T_{ко}$, так и величину сдвига ΔT_F , определяют по результатам ударных испытаний образцов типа Шарпи. Это косвенная методика, и в некоторых случаях она недооценивает вязкость разрушения корпусных сталей, что дает в результате искусственно заниженную оценку трещиностойкости при прочностных расчетах КР. Последнее обстоятельство, в свою очередь, может привести к необоснованному ограничению в режимах работы и сроках службы КР.

В последние годы подход Мастер кривой рассматривается мировым ядерным сообществом как перспективный с точки зрения оценки целостно-

сти КР [2]. Применение новой статистической методологии, которая непосредственно определяет вязкие свойства ферритных сталей в области хрупко-вязкого перехода, может решить проблемы, связанные с оценкой вязкости в соответствии с действующими нормативными подходами. Недавно, на основании анализа данных для корпусных материалов американских АЭС, М. Kirk и М. Mitchell из NRC (США) показали [2], что использование подхода Мастер кривой дает существенное улучшение оценки вязкости разрушения корпусов. Кроме того, авторы проанализировали существующие технические проблемы, которые необходимо решить прежде, чем методология Мастер кривой может быть принята в качестве нормативного подхода для оценки целостности корпусов.

В данной работе экспериментальные результаты по трещиностойкости для сталей марки 15X2НМ-ФАА и их сварных соединений, полученные при испытании образцов-свидетелей (ОС), переоценены с помощью статистического метода Мастер кривой. Целью работы было сравнить концепцию Мастер кривой и нормативные подходы, которые ныне используются для оценки целостности КР типа ВВЭР-1000 украинских АЭС.

СРАВНЕНИЕ ДЕЙСТВУЮЩИХ НОРМАТИВНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ С МАСТЕР КРИВОЙ

Как нормативная зависимость K_{IC} [1], так и Мастер кривая получены при статических испытаниях на трещиностойкость. Обе зависимости характеризуют материал с точки зрения сопротивления хрупкому распространению трещины. Однако между ними имеются важные различия.

Во-первых, нормативная кривая K_{IC} для корпусных сталей марки 15X2НМФАА была получена как нижняя огибающая всех имеющихся на момент принятия ПНАЭ Г-7-002-86 данных по вязкости разрушения для необлученного материала. При этом испытываемые образцы имели относительно большие размеры (толщина 25 мм и более), чтобы соответствовать требованиям линейно-упругой механики

разрушения для корректного определения величины K_{IC} [3]. Вследствие этого использование больших образцов для мониторинга РО корпуса было проблематичным, из-за ограниченного объема устройств для облучения ОС.

Метод Мастер кривой использует подходы нелинейной механики разрушения, что дает возможность определять эквивалент коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} посредством J -интеграла. Методология J -интеграла допускает незначительный статический подрост трещины до начала разрушения хрупким сколом. Это позволяет для оценки вязкости разрушения материала использовать малые образцы, такие как образцы типа Шарпи с усталостной трещиной (образцы типа COD).

Таким образом, с помощью методологии Мастер кривой можно непосредственно определять вязкие свойства корпусных материалов как до, так и после реакторного облучения, испытывая образцы COD, которые применяются в штатной программе ОС АЭС с реакторами типа ВВЕР-1000. Кроме того, статистический подход позволяет достоверно оценить трещиностойкость металла при испытании ограниченного количества образцов (6...10 шт.).

Во-вторых, форма и положение нормативной зависимости K_{IC} определяются по выборке данных, полученных для сталей различных плавок и поковок. Вследствие этого нижняя огибающая для всего массива данных строится по значениям K_{IC} для стали с наихудшими параметрами трещиностойкости. В то же время Мастер кривая основана на измерении вязкости конкретного материала.

Еще одно преимущество обусловлено тем, что Мастер кривая, в отличие от нормативной зависимости K_{IC} , может быть построена с определенным уровнем доверительной вероятности, основанной на статистике Вейбулла, что важно для вероятностного анализа безопасности.

В ряде работ российских исследователей дана оценка температурной зависимости трещиностойкости корпусных материалов КР типа ВВЭР [4,5]. Анализ основан на экспериментальных данных, накопленных за последние 25 лет. Согласно этим исследованиям, нормативные зависимости для основного материала и металла сварного шва не всегда адекватно характеризуют имеющийся массив данных. Для более надежной оценки целостности КР авторы [4, 5] предлагают новый вид температурных зависимостей K_{IC} . Важно отметить, что форма усовершенствованной кривой K_{IC} для оценки сопротивления хрупкому разрушению сталей марки 15X2М-ФА и их сварных швов практически совпадает с 5 % доверительной нижней границей Мастер кривой.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ T_0 В КАЧЕСТВЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ИНДЕКСА

Для оценки целостности КР температурную зависимость K_{IC} необходимо расположить на температурной оси, принимая во внимание температуру хрупковязкого перехода T_K . До настоящего времени величина T_K определяется по результатам ударных

испытаний образцов Шарпи независимо от измерений вязкости разрушения. Этот подход косвенным образом характеризует статическую вязкость разрушения, поскольку образцы Шарпи имеют в качестве концентратора механический надрез и испытываются при динамическом нагружении. Эти факторы влияют на параметры трещиностойкости.

В отличие от действующего подхода [1], методика Мастер кривой является экспериментальной процедурой, которая непосредственно оценивает вязкость разрушения и температуру хрупкости T_0 на основании данных, полученных при испытании образцов с острой трещиной и при статическом нагружении. В методике Мастер кривой значение T_0 соответствует температуре, при которой вязкость разрушения для образцов толщиной 25 мм равняется 100 МПа·√м.

Сравнивая значения переходных температур, полученных в соответствии с различными подходами, Wallin показал [6], что между температурами T_0 и RT_{NDT} (американский аналог величины T_{K0}) явно отсутствует корреляция. Вследствие этого, делает вывод автор, величина RT_{NDT} является неэффективным и в некоторых случаях чрезмерно консервативным параметром для оценки вязких свойств материала по сравнению с T_0 .

В настоящее время методология Мастер кривой включена в руководства американского общества инженеров-механиков (ASME). В 1998 году ASME

опубликовало нормативный документ Code Case № 29 [7], который допускает использование температурного индекса RT_{T_0} в качестве альтернативы RT_{NDT} , при этом форма нормативных температурных зависимостей вязкости разрушения остается прежней. Согласно этому документу температура RT_{T_0} определяется из соотношения $RT_{T_0} = T_0 + 19.4^\circ\text{C}$ и, подобно RT_{NDT} , применяется для индексации нормативной температурной зависимости критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC} на температурной оси. Значение 19.4°C было определено эмпирически и включает в себя погрешность определения T_0 и дополнительный температурный запас. Температурный сдвиг 19.4°C был выбран с таким расчетом, чтобы нормативная зависимость, индексированная RT_{T_0} , продолжала быть нижней огибающей для имеющегося массива данных по вязкости разрушения корпусных сталей.

В работе [2] проведен анализ данных для корпусных материалов АЭС США и показано, что использование величины RT_{T_0} в качестве температурного индекса для нормативных зависимостей K_{IC} приводит к более низкому значению температуры хрупкости на конец проектного срока эксплуатации корпусов в результате использования в качестве температурного индекса величины RT_{T_0} вместо RT_{NDT} . Авторы сравнивают величины переходных температур для корпусных сталей в исходном состоянии и показывают, что для большинства материалов значение RT_{T_0} меньше, чем RT_{NDT} . Этот подход дает потенциальную возможность обосновать увеличение ресур-

са корпуса путем простой переоценки исходной индексующей температуры, определенной на основании методологии Мастер кривой, не прибегая при этом к мерам по уменьшению скорости охрупчивания или термического отжига корпуса.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ T_0 К НЕОБЛУЧЕННЫМ КОРПУСНЫМ МАТЕРИАЛАМ РЕАКТОРА ВВЭР-1000

Согласно стандарту ASTM E 1921 [8] метод Мастер кривой применим для всех ферритных низколегированных сталей с пределом текучести 275...825 МПа. К этим сталям относится сталь марки 15X2Н-МФАА, применяемая для изготовления корпусов реакторов типа ВВЭР-1000. В работе [9] показано, что экспериментальный разброс и температурная зависимость вязкости разрушения хорошо согласуются с параметрами Мастер кривой, и новый статистический подход может быть успешно применен для оценки вязких свойств корпусных сталей реактора ВВЭР-1000.

Ниже проведено сравнение нормативных зависимостей K_{IC} и Мастер кривой. На рис. 1 и 2 показаны экспериментальные данные по трещиностойкости для двух сварных швов с повышенным содержанием никеля (1.88 вес.% и 1.72 вес.%). Результаты получены при испытании необлученных ОС (образцы типа COD) и приведены к эквиваленту $K_{IC(1T)}$, соответствующему образцам толщиной 25 мм.

На каждом рисунке также нанесена 5 % доверительная граница Мастер кривой в виде $K_{JC(0.05)} = 25.4 + 37.8 \exp[0.019(T - T_0)]$ и нормативная зависимость ПНАЭ для сварных соединений стали марки 15X2Н-МФАА в виде $[K_{IC}]_3 = 35 + 53 \exp[0.0217(T - T_{K0})]$. Зависимость ПНАЭ индексирована температурой хрупкости T_{K0} , определенной по результатам ударных испытаний образцов Шарпи заводом-изготовителем КР.

Температура T_0 получена в соответствии с подходом Мастер кривой. Значение T_0 включает в себя погрешность определения, которая вычисляется из соотношения:

$$\Delta T_0 = \frac{18}{\sqrt{N}} \cdot Z_{95}.$$

Здесь N – количество испытанных образцов; Z_{95} – коэффициент, задающий уровень доверительной вероятности (в данном случае $Z_{95} = 1.96$, что соответствует доверительной вероятности 95 %).

Из рис.1 и 2 видно, что нормативный подход неадекватно характеризует измеренную вязкость разрушения. В одном случае нормативная зависимость явно недооценивает экспериментальные результаты по сравнению с Мастер кривой, и различие между ними достигает ~ 50°C (см. рис.1).

В другом случае зависимость ПНАЭ и нижняя статистическая граница Мастер кривой практически одинаково характеризуют вязкость разрушения (см. рис.2).

Полученные результаты свидетельствуют, что критическая температура хрупкости T_{K0} является неэффективным параметром для индексации зависи-

мости K_{IC} , что может приводить к заниженной оценке вязкости разрушения при прочностных расчетах КР. Эти экспериментальные данные подтверждают выводы работ [2, 6], что Мастер кривая и температура T_0 , основанные на прямых измерениях статической вязкости, более точно характеризуют сопротивление материала хрупкому разрушению.

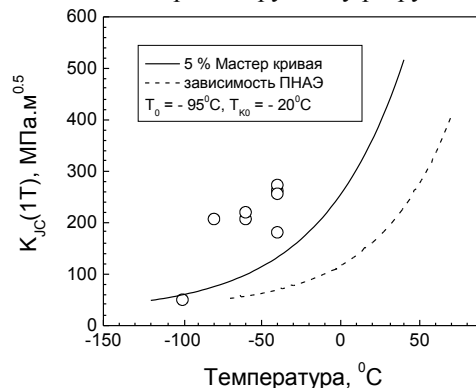


Рис.1. Сравнение нормативной зависимости и 5 % доверительной границы Мастер кривой (○ – данные ОС для сварного шва с 1.88 % Ni)

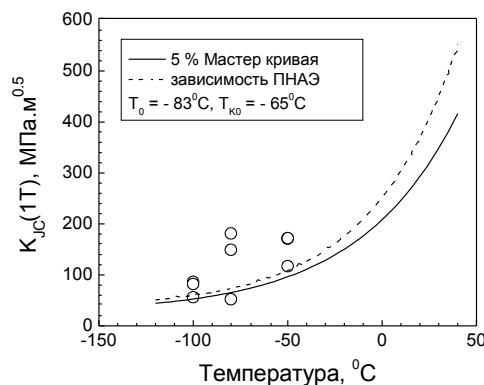


Рис.2. Сравнение нормативной зависимости и 5 % доверительной границы Мастер кривой (○ – данные ОС для сварного шва с 1.72 % Ni)

Рассмотрим взаимосвязь между температурами T_{K0} и T_0 . Результат сравнения этих экспериментальных величин показан на рис.3. В анализ включены температуры хрупкости для необлученного металла обечаек и сварных швов 6-ти корпусов реакторов украинских АЭС.

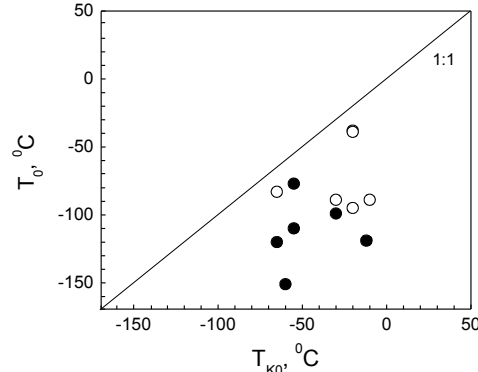


Рис.3. Связь между температурами хрупкости T_0 и T_{K0} для основного металла (●) и металла сварного шва (○)

Значения T_{K0} взяты из технической документации для ОС КР соответствующих энергоблоков. Значения T_0 получены путем статистической переоценки данных по трещиностойкости, полученных при испытании образцов в Киевском институте ядерных исследований и РНЦ "Курчатовский институт". Как видно из рис.3, между значениями T_0 и T_{K0} корреляция практически отсутствует, показан также излишний консерватизм, присущий нормативному подходу. Очевидно, что параметр T_{K0} является неэффективным для оценки статической вязкости материалов.

Полученные выше результаты для материалов КР типа ВВЕР-1000 согласуются с данными [6] об отсутствии корреляции между значениями T_0 и T_{NDT} для сталей корпусов АЭС США.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный в данной работе анализ литературных и экспериментальных данных дает основание рассматривать действующий нормативный подход как неэффективный с точки зрения реальной оценки вязких свойств материалов КР ВВЕР-1000. Сравнительный анализ результатов испытаний ОС показал, что для сварных швов некоторых КР украинских АЭС нормативный подход дает заниженные значения характеристик трещиностойкости по отношению к реальному состоянию материала. Использование этих характеристик при оценке целостности КР в переходных и аварийных режимах эксплуатации может приводить к необоснованному ограничению остаточного радиационного ресурса.

Выводы, полученные в научно-технических отчетах ряда исследовательских организаций США [10, 11], позволяют рассматривать концепцию Мастер кривой как альтернативу действующим регулирующим подходам.

Поскольку строгого теоретического обоснования для применения метода Мастер кривой ко всем классам корпусных сталей до сих пор не найдено, выводы, полученные в отношении американских

корпусных сталей, должны быть экспериментально проверены на сталях марки 15X2НМФАА, используемых при изготовлении КР типа ВВЭР-1000. Для этого необходима статистическая переоценка всех доступных на данный момент данных по трещиностойкости для корпусных материалов, а также проведение дополнительных испытаний реконструированных образцов-свидетелей в строгом соответствии с требованиями методологии Мастер кривой.

ЛИТЕРАТУРА

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: «Энергоатомиздат», 1989, 525 с.
2. M. Kirk, M. Mitchell Potential roles for the Master Curve in regulatory application // *Int. J. Pres. Ves. & Piping*. 2001, v. 78, p. 111–123.
3. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы испытания металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения). М.: Изд-во стандартов, 1985, 61 с.
4. B.T. Timofeev, G.P. Karzov, A.A. Blumin, V.V. Anikovskiy. Fracture toughness of 15X2NMFA steel and its welds // *Int. J. Pres. Ves. & Piping*. 1997, v. 74, p.165–172.
5. B.T. Timofeev, G.P. Karzov, A.A. Blumin, V.V. Anikovskiy. Fracture toughness of 15X2MFA steel and its weldments // *Int. J. Pres. Ves. & Piping*. 2000, v. 77, p. 41–52.
6. K. Wallin. Statistical re-evaluation of the ASME K_{IC} and K_{IR} fracture toughness reference curves // *Nucl. Eng. & Design*. 1999, v. 193, p. 317–326.
7. Code Case N-629. Use of fracture toughness test data to establish reference temperature for pressure retaining materials for Section XI. – NY.: ASME, 1999.
8. E 1921-97. Standard Test Method for Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range – ASTM, 1998, 17 p.
9. Э.У. Гриник, В.Н. Ревка, Л.И. Чирко. Применение методологии Мастер кривой для оценки вязкости разрушения корпусных сталей реактора ВВЭР-1000 // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2002, № 4, с. 17–27.
10. J.G. Merkle, K. Wallin, D.E. McCabe Technical Basis for an ASTM Standard on Determining the Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range. NUREG/CR-5504 (ORNL/TM-13631). Oak Ridge, 1998.
11. Application of Master Curve fracture toughness methodology for ferritic steels. EPRI- TR-108390, Revision 1, 1999.

АНАЛІЗ МЕТОДОЛОГІЇ МАСТЕР КРИВОЇ З ТОЧКИ ЗОРУ ОЦІНКИ ЦІЛІСНОСТІ КОРПУСУ РЕАКТОРА ВВЕР-1000

Е.У. Гринік, Л.І. Чірко, В.М. Ревка

Зроблено аналіз застосування методології Майстер кривої для оцінки цілісності корпусу реактора ВВЕР-1000. Аналіз ґрунтується на результатах випробувань неопромінених зразків-свідків 6-ти корпусів реакторів українських АЕС. Показано, що вихідна критична температура крихкості T_{K0} є неефективним параметром в якості температурного індексу для нормативної залежності K_{IC} і діючий підхід суттєво недооцінює трещиностійкість деяких зварних швів. Застосування методології Майстер кривої дає можливість отримати реальну оцінку параметрів в'язкості руйнування і тим самим уникнути необґрунтованих обмежень в режимах експлуатації та строках служби корпусу реактора.

MASTER CURVE ANALYSIS METHODOLOGY IN VIEW OF THE ASSESSMENT OF REACTOR WWER-1000 VESSEL INTEGRITY

E.U. Grinik, L.I. Tchirko, V.N. Revka

In a paper the analysis of Master curve methodology application to an assessment of VVER-1000 reactor pressure vessel integrity was done. Unirradiated surveillance specimen test results for six reactor pressure vessels of Ukrainian NPPs were included in the analysis. It has shown an initial brittleness temperature T_{K0} is an unreliable parameter as a temperature index for the normative K_{IC} dependence and a current approach underestimates essentially the fracture toughness of some welds. Application of the Master curve methodology allows to get real fracture toughness estimation and in this way to avoid unnecessary limitations for RPV operation conditions and service life.

