



УДК 621.791.053

ББК 22.251

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ РЕАКТОРНЫХ СТАЛЕЙ

Л.М. Семенова, Ю.С. Бахрачева

Показана возможность оценки уровня нейтронного облучения на характер температурной зависимости K_{IC} . Прогнозирование влияния радиационных повреждений на вязкость разрушения реакторной стали может быть получено на основе результатов испытаний маломерных цилиндрических образцов с кольцевыми надрезами.

Ключевые слова: трещиностойкость, реакторные стали, магистральная трещина, зародышевая трещина, функция вероятности разрушения.

Корпус реактора является главным объектом деятельности по обеспечению безопасности атомных электростанций (АЭС). К одной из проблем обеспечения безопасности работы корпусов реакторов атомных электростанций и прогнозирования их остаточного ресурса относится прогнозирование уровня трещиностойкости реакторных сталей. Причем важно знать, как трещиностойкость изменяется в зависимости от температуры и как эта зависимость изменяется при облучении материала. Поэтому, с точки зрения проблемы безопасности АЭС, главной задачей механики и физики материалов корпусов реакторов следует считать прогнозирование влияния радиационных повреждений на вязкость разрушения этих материалов.

Существующие стандартные подходы к решению этой задачи (использование «Master curve» – подхода, определение величины смещения критической температуры для заданного уровня ударной вязкости по Шарпи) по своей сути эмпирические, поэтому неприменимы для условий, когда наряду со смещением температурной зависимости трещиностойкости или ударной вязкости наблюдается изменение формы температурных зависимостей этих характеристик, а также при переходе на новые марки реакторных сталей.

Наиболее перспективный подход для прогнозирования трещиностойкости облученных реакторных материалов, который интенсивно развивается в настоящее время, основан на локальном подходе (ЛП) к анализу вязкого и хрупкого разрушения. Основная идея ЛП заключается в описании процесса роста магистральной трещины исходя из анализа разрушения металла в окрестности ее вершины. Как было показано в работах [2; 3], разрушение в вершине магистральной трещины инициируется в предельно малых объемах, величина которых, как правило, не превышает $1...50 \text{ мм}^3$.

В этой связи в работах [2–4] был предложен принципиально иной подход к решению рассматриваемой задачи, который заключается в расчете вероятности разрушения исходя из анализа элементарных актов разрушения, связанных с образованием, и потери устойчивости зародышевых трещин. В рамках такого подхода представляется возможным выразить параметры функции вероятности разрушения через константы, которые инвариантны к виду напряженно-деформированного состояния и характеризуют свойства металла. Это создает предпосылки для использования предложенной версии ЛП как инструмента для исследования эффекта изменения трещиностойкости стали после радиационного облучения.

Согласно современным представлениям физики разрушения, рост магистральной трещины в металле происходит путем разрушения

металла в окрестности вершины макротрещины в результате образования и потери устойчивости зародышевых трещин. Эти зародышевые трещины возникают в локальной области перед вершиной магистральной трещины. Условия образования и потери устойчивости зародышевых трещин контролируются локальным полем напряжений и деформаций, создаваемым магистральной трещиной. В этом случае ключевой проблемой описания разрушения является определение вероятности потери устойчивости одной зародышевой трещины p_0 при заданном уровне напряжения σ_F . Функция вероятности разрушения может быть получена исходя из анализа образования и потери устойчивости зародышевых трещин в металле.

В окрестности магистральной трещины или надреза поля напряжений и деформаций распределены неоднородно. В настоящее время для их расчета успешно используется метод конечных элементов. Выражение для вероятности p_i потери устойчивости не менее одной трещины в объеме металла, ограниченного одним конечным элементом, имеет вид

$$p_i(\sigma_F) = 1 - [1 - p_0(\sigma_F)]^{V_i \rho_i}, \quad (1)$$

где V_i – объем i -го конечного элемента;
 ρ_i – плотность зародышевых трещин, образующихся в этом объеме металла.

Условие хрупкого разрушения всего образца с магистральной трещиной или надрезом, состоящих из M -конечных элементов:

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^M [1 - p_i(\sigma_F)], \quad (2)$$

где P_f – допуск на вероятность рассматриваемого события.

При анализе температурных зависимостей трещиностойкости представляет интерес средняя величина значения допусков на вероятность разрушения $P_f = 0,5$.

Следует отметить, что длина зародышевой трещины не является произвольной, ее размер задается размерами микроструктуры металла. В зависимости от химического состава стали и ее термической обработки это может быть размер мартенситного или бейнитного пакета, ферритного зерна, диаметр

карбида. Указанное свойство зародышевых трещин очень важно, поскольку оно позволяет понять, каким образом размеры микроструктурных составляющих задают уровень хрупкой прочности стали R_{MC} .

Очень важное свойство зародышевых трещин, которое не учитывается в существующих моделях, заключается в том, что плотность этих трещин не является постоянной величиной. Она зависит от величины пластической деформации, предшествующей разрушению, и температуры испытания. В упрощенном виде влияние пластической деформации на плотность зародышевых трещин может быть описано зависимостью

$$\rho = k_p \int_{\varepsilon_c}^{\varepsilon_R} f(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (3)$$

где ρ – плотность зародышевых трещин;
 $f(\varepsilon)$ – функция плотности распределения микропластических деформаций в поликристалле;
 k_p – коэффициент, который зависит от вероятности образования заблокированного дислокационного скопления критической длины;
 ε_c – критическое значение интенсивности микропластической деформации, необходимой для образования зародышевых трещин;
 ε_R – критическое значение величины микропластической деформации, при которой вместо образования зародышевой трещины, в вершине дислокационного скопления, происходит релаксация напряжений.

Как отмечалось в работах [2; 4], зависимость плотности зародышевых трещин от величины пластической деформации и температуры испытаний является отличительной особенностью хрупкого (квазихрупкого) разрушения металлов в сравнении с разрушением таких хрупких материалов, как стекло. Это должно приводить к влиянию пластической деформации на величину масштабного эффекта, характерной особенностью локального разрушения. Перед надрезом или острой трещиной величина пластической деформации изменяется в широком интервале, поэтому влияние пластической деформации на ве-

личину масштабного эффекта имеет принципиальное значение при разрушении металла в условиях концентрации напряжений.

В работе предложена статистическая модель, которая описывает хрупкое разрушение поликристаллических металлов на основе перечисленных выше свойств зародышевых трещин. В рамках такого подхода ключевое для ЛП выражение имеет вид:

$$p_0(\sigma_F) = 0,5 \int_{\sigma_c^{\min}}^{\sigma_c^{\max}} f_1(\sigma_c) \left[1 - \left(\frac{\sigma_c - \sigma_F}{\sqrt{2} I_s \sigma_F} \right) \right] d\sigma_c. \quad (4)$$

где I_s – коэффициент вариации максимальных растягивающих микронапряжений;

σ_c^{\min} и σ_c^{\max} – минимальные и максимальные значения критического микронапряжения потери устойчивости зародышевой трещины случайной ориентации и случайной длины;
 $f_1(s_c)$ – функция плотности распределения этих напряжений.

В данной работе на примере корпусной реакторной стали 15X2МФА показана возможность для прогнозирования влияния нейтронного облучения на уровень и характер температурной зависимости K_{IC} . Данные о механических свойствах этой стали в исходном состоянии и после нейтронного облучения взяты из [3].

Используя экспериментальные данные для трещиностойкости стали K_{IC} в исходном состоянии при температурах от 77 до 273 К и значение хрупкой прочности стали $R_{MC} = 1500$ МПа, были определены константы в зависимости (3). Значения других констант слабо зависят от микроструктуры стали, поэтому были использованы данные для железа. На основе этих данных рассчитаны значения вязкости разрушения реакторной стали в исходном состоянии, а также предсказаны температурные зависимости трещиностойкости с наперед заданным значением вероятности разрушения 0,5 для флюенса 10^{19} (см. рис. 1).

Согласно полученным данным, результаты компьютерного моделирования хорошо согласуются с экспериментальной зависимостью трещиностойкости при флюенсе 10^{19} нейтр./см².

Предложенный вариант ЛП основывается на моделировании макроразрушения исхо-

дя из анализа элементарных актов процесса хрупкого разрушения металла. Это позволяет использовать его для решения как задач механики разрушения, так и материаловедческих задач. Для решения материаловедческих задач представляется возможным моделирование влияния параметров микроструктуры стали на уровень ее трещиностойкости в исходном и облученном состояниях. Применение ЛП для решения задач механики разрушения, связанных с прогнозированием изменения трещиностойкости реакторных сталей после нейтронного облучения, предполагает использование информации о стандартных свойствах облученной стали, определяемых на стандартных гладких образцах. Физический смысл процедуры выбора типа образцов и методики их испытания заключается в том, что для прогнозирования кроме определения стандартных свойств (предел текучести и показатель деформационного упрочнения) облученной стали необходимо получить информацию об уровне ее хрупкой прочности R_{MC} , а также о чувствительности напряжения хрупкого разрушения к изменению объема (масштабный эффект). В самом общем случае (новая марка стали, сварные швы, большие флюенсы и т. п.) эта информация может быть получена на основе результатов испытаний маломерных цилиндрических образцов с кольцевыми надрезами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баландин, Ю. Ф. Конструкционные материалы АЭС / Ю. Ф. Баландин. – М. : Энергтоиздат, 1984. – 275 с.
2. Котречко, С. А. Локальный подход к анализу хрупкого разрушения и его физическая интерпретация / С. А. Котречко // Проблемы прочности. – 2003. – № 4. – С. 14–31.
3. Котречко С. А. Основы физической теории квазихрупкого разрушения поликристаллических металлов в неоднородных полях, создаваемых концентраторами напряжений / С. А. Котречко, Ю. А. Мешков // Металлофизика и новейшие технологии. – 1998. – Т. 20, № 4. – С. 46–58.
4. Котречко, С. А. Статистическая модель хрупкого разрушения поликристаллических металлов / С. А. Котречко // Металлофизика и новейшие технологии. – 1994. – Т. 16, № 10. – С. 37–49.

**FORECASTING OF INFLUENCE OF RADIATION EXPOSURE
FOR CRACK RESISTANCE OF REACTOR STEELS**

L.M. Semenova, Yu.S. Bakhracheva

Possibility of an assessment of level of neutron radiation on nature of temperature dependence of KIC is shown. Forecasting of influence of radiation damages for viscosity of destruction of reactor steel can be received on the basis of results of tests of undersized cylindrical samples with ring cuts.

Key words: *crack resistance, reactor steels, the main crack, a germinal crack, function of probability of destruction.*