

Оценка J -интеграла у вершины кольцевой краевой трещины в толстостенной трубе при быстром охлаждении ее внутренней поверхности

Г. В. Степанов

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Сопrotивление хрупкому разрушению трубы с кольцевой краевой трещиной при термошоке определяется максимальной величиной J -интеграла на стадии роста пластической деформации у вершины трещины. В упругопластическом металле величина J -интеграла при термошоке достигает максимального значения на стадии повышения энергии деформации у вершины трещины.

Ключевые слова: трещина, пластическая деформация, J -интеграл, термошок, сопротивление разрушению.

Введение. Для упругой модели поведения металла величина коэффициента интенсивности напряжений (КИН) у вершины трещины служит оценкой сопротивления хрупкому разрушению (СХР) элементов конструкций с трещинами [1]. СХР при упругопластическом деформировании металла у вершины трещины оценивают значением КИН, рассчитываемым по величине J -интеграла [2–5]. Например, для трещины нормального отрыва при плоском деформированном состоянии коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины $K_{1J} = \sqrt{JE/(1-\nu^2)}$ (E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона). СХР конструкции оценивают путем сравнения расчетного значения K_{1J} с критическим значением K_{1c} , определяемым при испытаниях образцов с трещиной в соответствующих условиях нагружения, $K_{1J} \leq K_{1c}$.

Расчет J -интеграла при неупругом деформировании металла выполняют для трещины, встроенной в конструктивный элемент, используя метод конечных элементов (МКЭ). Расчет изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) элемента сводится к последовательному решению задачи нестационарной теплопроводности и нелинейной термомеханической задачи. Такая методика используется и для расчета J -интеграла при наличии трещины. Однако использование J -интеграла на стадии разгрузки недостаточно обосновано [5]. Публикации по оценке влияния нагрузки–разгрузки на величину J -интеграла ограничены, что определяет целесообразность дальнейших исследований в данном направлении. Среди таких работ следует отметить анализ НДС у вершины трещины, основанный на феноменологическом представлении процесса упругопластической деформации при нагрузке–разгрузке [6]. КИН на стадии разгрузки у вершины трещины определяли по методике [7], основанной на вычислении “интеграла закрытия трещины” [8]. Такая проблема представляет практический интерес в связи с оценкой СХР корпуса реактора, однако ее исследование при реальных режимах нагружения затруднено параллельным действием ряда факторов, связанных с нестационарным

изменением температуры, ее неоднородным распределением по внутренней поверхности, реальным изменением давления при режимах нагружения типа термошока.

Анализ более простого осесимметричного нагружения, характерного для нестационарного НДС в толстостенной трубе с кольцевой трещиной при быстром охлаждении ее внутренней поверхности, позволяет выявить изменение деформаций металла у вершины трещины в режиме термошока и их влияние на J -интеграл на стадии снижения термомеханических напряжений. Такой анализ применим как при упругом, так и упругопластическом деформировании металла.

Конечноэлементная модель трубы. Для выполнения расчетов использована конечноэлементная (КЭ) модель половины осесимметричной трубы (наружный диаметр – 4000 мм, толщина стенки – 200 мм, длина – 4000 мм) с кольцевой краевой трещиной у внутренней поверхности глубиной $a_{cr} = B/8 = 25$ мм. Сингулярные элементы у вершины трещины (6 треугольных элементов радиусом $r_1 = 0,5$ мм, радиусы следующих рядов элементов $r_2 = 2$ мм и $r_3 = 4$ мм – рис. 1) обеспечивают достаточно точную оценку НДС у вершины трещины.

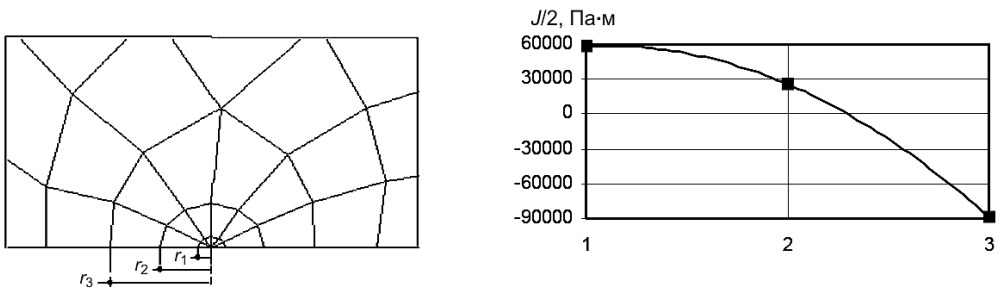


Рис. 1. Схематическое представление сингулярных элементов у вершины трещины и изменение J -интеграла, рассчитанного по первому–третьему контурам интегрирования в области вершины трещины через 250 с от начала охлаждения.

В расчетах использованы физико-механические характеристики металла трубы (сталь 15Х2НМФА) с учетом их изменения в диапазоне температур от 0 до 300°C (таблица). Влияние неупругого поведения металла на НДС в вершине трещины и J -интеграл определяли, сравнивая результаты расчетов на основе упругой и упругопластической моделей металла.

Величину J -интеграла при упругом и упругопластическом деформировании рассчитывали по единой процедуре (ANSYS [9]) для контура интегрирования S , охватывающего область у вершины трещины:

$$J = \int_S W dy - \int_S \left(t_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + t_y \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) dS, \quad (1)$$

где W – плотность энергии деформации; t_x, t_y – составляющие вектора нагрузки на контуре, $t_x = \sigma_x n_x + \sigma_{xy} n_y$, $t_y = \sigma_y n_y + \sigma_{xy} n_x$, n_x, n_y – составляющие внешней единичной нормали к контуру.

Физико-механические характеристики стали 15Х2НМФА

Характеристика	0°С	300°С
Модуль упругости E , ГПа	211	195
Предел текучести $R_{p0,2}^T$, МПа	520	471
Модуль деформационного упрочнения M , МПа	313	313
Относительное сужение Z^T , %	50	50
Удельная теплоемкость C_V , Дж/(м ³ ·К)	3,8	4,2
Коэффициент линейного расширения α , К ⁻¹	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$1,22 \cdot 10^{-5}$
Коэффициент теплопроводности k , Вт/(м ² ·К)	24,0	26,5

При использовании линейно-упругой модели поведения материала J -интеграл может быть дополнительно рассчитан по величине K_1 (при плоском деформированном состоянии $J = K_1^2(1 - \nu^2)/E$), определяемой перемещением точек Δv по берегам трещины относительно ее вершины в направлении нормали к плоскости трещины [9],

$$K_1 = \sqrt{2\pi} \frac{G}{2(1 - 2\nu)} \frac{\Delta v}{\sqrt{r}}, \quad (2)$$

где G – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона.

Обычно расчеты изменения J -интеграла в зависимости от температуры у вершины трещины основаны на оценке НДС трубы при последовательности распределений температур, определяемых решением нестационарной задачи теплопроводности [7]. Результаты таких расчетов могут не совпадать с параллельным решением нестационарной задачи теплопроводности и изменениями НДС.

Помимо силовой характеристики K_1 в линейной механике разрушения используется энергетическая характеристика G_1 , связанная с изменением энергии упругих деформаций в образце с трещиной. Она определяется как часть этой энергии, которая высвобождается при бесконечно малом продвижении трещины, контролируемой величиной поверхностной энергии γ . При плоском деформированном состоянии связь этих характеристик определяется выражениями:

$$G_1 = K_1^2(1 - \nu^2)/E; \quad G_{1c} = J_{1c} = 2\gamma.$$

Для анализа разрушений, сопровождающихся возникновением ограниченной области пластических деформаций у вершины трещины, используется эффективная поверхностная энергия, включающая энергию пластической деформации γ_p , $G_{1c} = 2(\gamma + \gamma_p)$ [10]. При продвижении трещины эта энергия определяет работу деформации слоя упругопластического деформирования по берегам трещины толщиной δ , следовательно

$$\gamma_p = \int_{(y)} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dy \approx E_c \delta.$$

Эффективная величина δ определяется из соотношения $\delta = (J/2)/E_c$ (по результатам расчетов δ примерно постоянна при заданном размере сингулярных элементов у вершины трещины). Уменьшение размеров этих элементов (следовательно, сохранение нагрузки и значения J -интеграла) не изменяет величины γ_p . Пропорциональность J -интеграла величине E_c на стадии нагрузки позволяет оценивать влияние режима нагружения по изменению E_c , величина которого имеет четкую физическую интерпретацию, в том числе на стадии разгрузки.

Нагружение трубы при охлаждении внутренней поверхности. Начальное состояние (напряжения и деформации) трубы при начальной температуре 280°C принимается нулевым. Изменение нестационарного НДС трубы определяется охлаждением ее внутренней поверхности, рассчитанное при постоянном коэффициенте теплопередачи $5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, величина которого близка к реальным условиям охлаждения корпуса реактора (режим “термошока”).

Расчетное значение J -интеграла при нестационарном термомеханическом нагружении зависит от выбранного пути интегрирования в области вершины трещины. Увеличение пути интегрирования как в упругом, так и в упруго-пластическом металле с изменением (градиентом) температуры по радиусу трубы вызывает существенное изменение расчетного значения J -интеграла. На рис. 1 приведено его изменение при контуре интегрирования, включающего три слоя элементов у вершины трещины через 250 с от начала охлаждения, близкого к максимальному значению J -интеграла (при начальной температуре стенки трубы 280°C температура в вершине трещины $T_{cr} \approx 120^\circ\text{C}$). На третьем контуре расчетная величина J -интеграла имеет отрицательное значение (результат влияния термонапряжений). Перепад температур на первом контуре интегрирования не превышает $3,5^\circ\text{C}$, что позволяет пренебречь его влиянием на расчетную величину J -интеграла. Перепад температур на втором ($\Delta T_2 \approx 14^\circ\text{C}$) и третьем ($\Delta T_3 \approx 27^\circ\text{C}$) контурах интегрирования значительно больше. Поэтому приведенные далее результаты получены для наиболее короткого контура интегрирования, включающего точки на границе шести сингулярных элементов с радиусом $r_1 = 0,5 \text{ мм}$ у вершины трещины.

При упругом поведении металла величина K_1 , определенная по трем точкам с использованием уравнения (2), отличается примерно на 6% от расчетного значения K_1 , определяемого по величине J -интеграла, рассчитанного по первому контуру интегрирования. Следует отметить, что при упругом деформировании относительное различие расчетных значений J -интеграла по первому–третьему контурам интегрирования значительно меньше. Это подтверждает приемлемость расчетов по первому контуру, используемому в дальнейших расчетах.

Результаты расчетов НДС у вершины трещины для упругой и упруго-пластической моделей поведения металла приведены на рис. 2–6.

При упругом деформировании металла (без необратимого изменения его состояния) величина J -интеграла определяется величинами температуры и нагрузки независимо от предыстории нагружения. При упругопластическом деформировании величина J -интеграла определяется значениями температуры, нагрузки и пластической деформации. Следовательно, при увеличении интенсивности нагружения у вершины трещины, вызывающей повышение

уровня пластической деформации, и при снижении нагрузки (без изменения пластической составляющей деформации) величина J -интеграла зависит от предыстории нагружения. Это обуславливает различие хода кривых напряжение–деформация при нагрузке и разгрузке.

Если принять, что уровень неупругой деформации у вершины трещины определяет предельное состояние металла, снижение нагрузки в области вершины трещины на стадии начальной упругой разгрузки с последующим возникновением напряжений сжатия не вызывают изменения предельного состояния металла. Следовательно, предельное состояние при нагрузке–разгрузке определяется максимальным уровнем J -интеграла (соответствующего величине полной или пластической деформации).

По достижении максимума пластической деформации при охлаждении (режим термошока) снижение напряжений не вызывает изменения предельного состояния металла (пластическая деформация не изменяется, интенсивность напряжений снижается), которое определяется достигнутым ранее максимальным уровнем J -интеграла. Разгрузка в области вершины трещины вызывает снижение упругих напряжений и на ее конечной стадии приводит к возникновению остаточных напряжений сжатия, вызванных неупругой деформацией обратного знака.

Принимая, что $E_c = \sigma_1(\varepsilon_1^e + \varepsilon_1^p)$, ее температурные зависимости в области вершины трещины для упругой и упругопластической моделей металла приведены на рис. 2. В процессе нестационарного охлаждения металла трубы, предварительно нагретого до 280°C , величина E_c достигает максимума при температуре 120°C и времени от начала охлаждения 300 с.

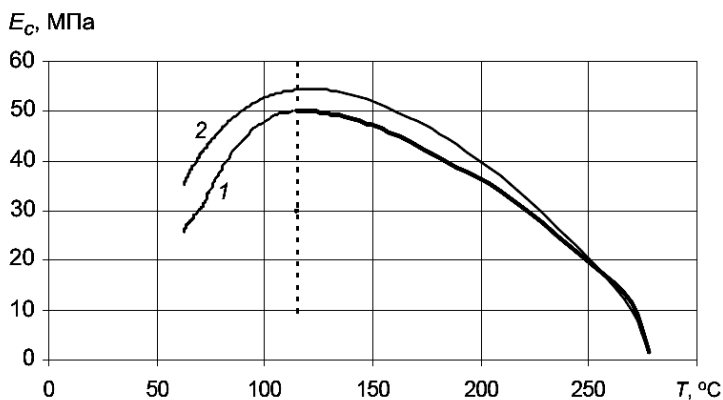


Рис. 2. Температурные зависимости энергии деформации E_c у вершины трещины при термошоке для упругопластической (1) и упругой моделей металла (2).

На стадии нагрузки величина J -интеграла связана со значением E_c коэффициентом пропорциональности, определяющим толщину деформированного слоя $\delta \approx 0,865$ мм (рис. 3). На стадии разгрузки расчетная температурная зависимость J -интеграла и E_c характеризуется их резким снижением с переходом в область отрицательных значений (рис. 4).

Исходя из физического смысла, J -интеграл определяет изменение энергии при развитии трещины. Следовательно, его снижение по достижении

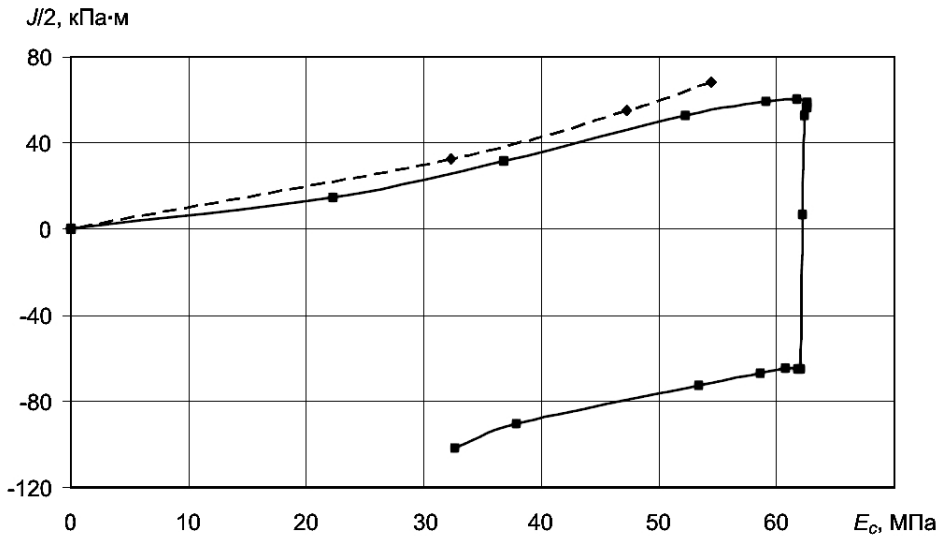


Рис. 3. Зависимость между J -интегралом и расчетной величиной энергии деформации у вершины трещины $E_c = \sigma_1(\varepsilon_1^e + \varepsilon_{eq}^p)$ для упругой (штриховая линия) и упругопластической (сплошная линия) моделей деформирования металла.

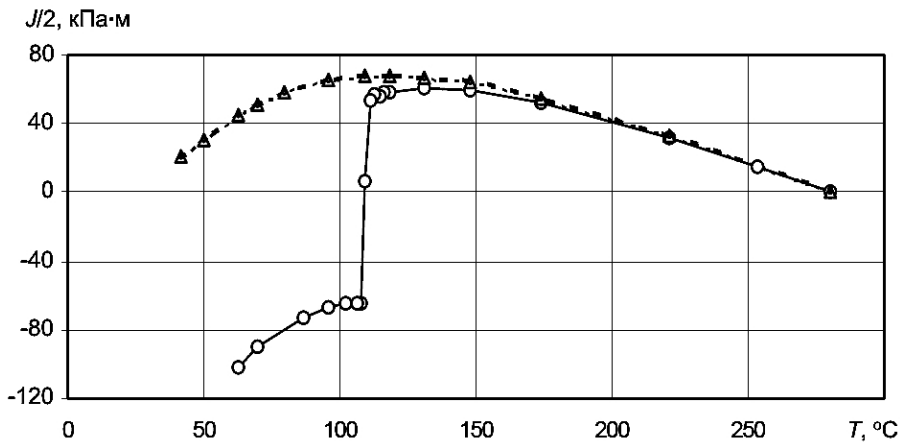


Рис. 4. Температурная зависимость J -интеграла у вершины трещины при термошоке для упругой (пунктирная кривая) и упругопластической (сплошная кривая) моделей металла.

максимального уровня не характеризует развития трещины (т.е. определяет упругое восстановление, обусловленное упругой разгрузкой в области вершины трещины). Начальный период разгрузки металла протекает без изменения пластической деформации (рис. 5, 6). На этой стадии разгрузки происходит снижение КИН, а при отрицательной величине J -интеграла определение КИН теряет смысл, поскольку развитие трещины на стадии упругой или упругопластической разгрузки не обосновано теоретически.

При упругом деформировании металла значение E_c несколько выше, чем при упругопластическом (рис. 2–4). Причем зависимость от J -интеграла как при нагрузке, так и разгрузке (вызванной охлаждением) описывается монотонной кривой.

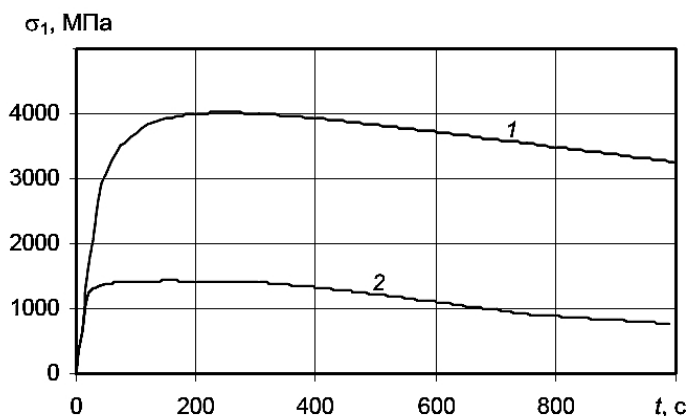


Рис. 5. Временная зависимость главного растягивающего напряжения у вершины трещины при упругом (1) и упругопластическом (2) деформировании металла.

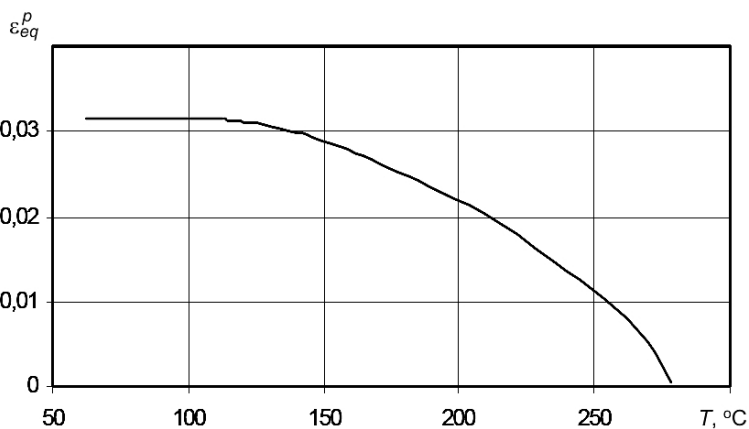


Рис. 6. Температурная зависимость эквивалентной пластической деформации у вершины трещины при термошоке.

Использование в расчетах распределения температуры, определяемой в соответствующий момент времени от начала охлаждения (без учета влияния предшествующего изменения температуры на неупругую деформацию у вершины трещины), вызывает плавное изменение J -интеграла от температуры (рис. 4). Следовательно, реальная история термомеханического нагружения в вершине трещины (влияние предшествующего изменения температуры и НДС, а не их текущих значений) проявляется в быстром снижении величины J -интеграла по достижении его максимума при охлаждении до 120°C .

Уменьшение раскрытия трещины при разгрузке подтверждает упругое снижение нагрузки. Момент уменьшения раскрытия трещины соответствует максимальному уровню E_c (и J -интеграла). Максимальное раскрытие трещины при термошоке, равное 156 мкм (на расстоянии 1 мм от вершины трещины), снижается до 78 мкм при полном охлаждении, т.е. полного закрытия трещины не происходит. Величина раскрытия трещины на заданном расстоянии от ее вершины не изменяется при снижении в два раза размеров КЭ в вершине трещины.

Из распределения осевых напряжений в плоскости трещины (рис. 7) видно, что растягивающие напряжения в области ее вершины при максимальном уровне нагрузки (300 с от начала охлаждения) сменяются снижением напряжений и сжатием при последующем охлаждении.

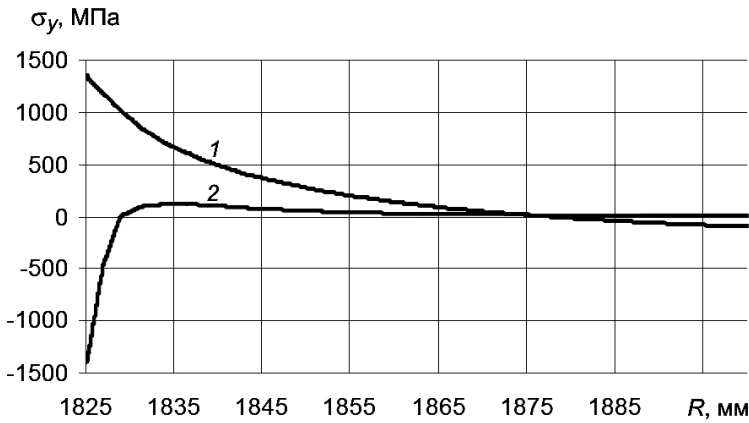


Рис. 7. Радиальное распределение напряжений σ_y , нормальных к плоскости трещины перед ее вершиной через 250 (1) и 10000 с (2) от начала охлаждения.

Приведенные на рис. 3 и 4 зависимости позволяют заключить, что предыстория нагружения в упругопластическом металле существенно изменяет величину J -интеграла на стадии снижения E_c при термошоке. По результатам расчетов этот эффект связан со ступенчатым изменением первого слагаемого в уравнении (1) при снижении температуры. Пренебрежение указанным влиянием истории нагружения приводит к завышенным расчетным значениям J -интеграла на стадии дальнейшего охлаждения, что существенно влияет на оценку сопротивления трубы хрупкому разрушению.

Заключение. Надежность расчета J -интеграла при упругом и упругопластическом деформировании металла с учетом градиента температур при термошоке обеспечивается использованием минимального контура интегрирования, охватывающего слой сингулярных элементов, прилегающих к вершине трещины.

На стадии повышения нагрузки у вершины трещины при охлаждении расчетная величина J -интеграла пропорциональна усредненной упругопластической энергии деформации, определяемой произведением напряжений и деформаций. Коэффициент пропорциональности характеризует эффективную толщину слоя упругопластического деформирования.

В упругопластическом металле величина J -интеграла при термошоке достигает максимального значения на стадии повышения энергии деформации у вершины трещины. Резкое снижение расчетной величины J -интеграла по достижении его максимального значения вызвано упругой разгрузкой. Дальнейшее охлаждение вызывает неупругое деформирование обратного знака и возникновение остаточных напряжений сжатия.

Оценка условий надежного определения НДС у вершины эллиптической краевой трещины и ее развития при различной предыстории нагружения является задачей дальнейших исследований.

Резюме

Опір крихкому руйнуванню труби з кільцевою крайовою тріщиною при термошоді визначається максимальною величиною J -інтеграла на стадії росту пластичної деформації у вістрі тріщини. У пружно-пластичному металі величина J -інтеграла при термошоді сягає максимального значення на стадії підвищення енергії деформації у вістрі тріщини.

1. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 525 с.
2. РД ЭО-606-2005. Методика расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР. – СПб.; М., 2004. – 65 с.
3. МТ-Д.0.03.391-06. Методика оценки прочности и ресурса корпусов реакторов ВВЭР в процессе эксплуатации. – Киев, 2009. – 50 с.
4. Rice J. R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks // J. Appl. Mathem. – 1968. – 35. – P. 379 – 386.
5. Астафьев В. И., Радаев Ю. Н., Степанова Л. В. Нелинейная механика разрушения. – Самара: Изд-во “Самарский университет”, 2004. – 562 с.
6. Покровский В. В., Иванченко А. Г. Прогнозирование влияния предварительного термомеханического нагружения на повышение сопротивления хрупкому разрушению конструкционных теплоустойчивых сталей с трещинами. Сообщ. 1. Модель и методика расчета эффекта предварительного термомеханического нагружения // Пробл. прочности. – 2002. – № 6. – С. 96 – 106.
7. Харченко В. В., Чирков А. Ю., Кобельский С. В. и др. Влияние истории термомеханического нагружения на напряженность корпусов реакторов ВВЭР АЭС при термошоке // Там же. – 2010. – № 1. – С. 27 – 36.
8. Чирков О. Ю. Розвиток та реалізація змішаного методу скінченних елементів у задачах міцності, коливань та стійкості елементів конструкцій: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – К., 2008. – 41 с.
9. Documentation for ANSYS. Release 10.0.
10. Красовский А. Я., Краси́ко В. Н. Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 176 с.

Поступила 15. 10. 2009