

УДК 004.4

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Даненова Г.Т., Алимбаев С.Т., Капжаппарова Д.У., Шодырова Б.Х.

*Карагандинский государственный технический университет,  
Караганда, e-mail: guldan72@mail.ru*

В данной статье показано применение коэффициента интенсивности напряжений для анализа прочности сварных конструкций. Решен ряд методических примеров по определению разрушающих напряжений. В данной работе определены коэффициенты интенсивности напряжений методом конечных элементов для стандартных образцов. Получены рекомендации к построению дискретных моделей. Исследовано влияние остаточного напряжения на параметры механики разрушения.

**Ключевые слова:** механика разрушения, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, конструкции, коэффициент интенсивности напряжений, остаточные напряжения

## CALCULATION METHODS OF PARAMETERS OF WELDED CONSTRUCTION SURVIVABILITY

Danenova G.T., Alimbaev S.T., Kapzhapparova D.U., Shodyrova B.H.

*Karaganda State Technical University, Karaganda, e-mail: guldan72@mail.ru*

It is shown that applying of a factor of stress intensity is very important at an estimation and survivability of welded metal constructions. Some methodical examples of definition of stresses are solved. The calculation formulas of stress intensity factors are determined on the basis of the finite element method. The recommendation for modeling constructions are obtained. The influence of residual stresses on a factor of stress is investigated.

**Keywords:** fracture mechanics, the method of finite elements, the stress-strained state, factor of stress intensity, residual stress

Опыт эксплуатации сварных металлических конструкций свидетельствует о наличии большого числа усталостных и хрупких разрушений. Однако, стоимость ущерба от разрушения может быть значительно снижена за счет правильной технической политики. Таким образом, научные исследования в области механики разрушения и применения их результатов могут сильно влиять на экономическую эффективность техники.

Поэтому в практике проектирования специалистами применяются апробированные критериальные параметры, хотя они и являются частными и используют те или иные дополнительные предположения о зоне и характере предразрушения в вершине трещины.

В развитии механики разрушения и, в частности, в исследованиях динамического распространения трещины концепция упругого коэффициента интенсивности напряжений (КИН) сыграла фундаментальную роль. Этот параметр линейной механики разрушения применяется не только для анализа причин разрушения уже разрушившихся конструкций или поиска способов предотвращения разрушения, но и с успехом – для выявления корреляции между напряженно-деформированным состоянием окрестности вершины трещины и скоростью распространения усталостной трещины [1], а также при исследовании коррозионного растрескивания.

В данной работе определены коэффициенты интенсивности напряжений  $K_I$  методом конечных элементов для стандартных образцов, которые обычно используются для определения вязкости разрушения  $K_{Ic}$  (рис. 1). Подобные случаи разрушений являются характерными для сварных конструкций в машиностроении. Для расчета значений коэффициентов интенсивности напряжений использовался метод  $J$ -интеграла [2], так как он наиболее предпочтителен как по точности, так и по времени. Расчеты производятся за один шаг. Указанные подходы вычисления КИН были реализованы в программном комплексе CRACK (МКЭ).

**Расчетное определение коэффициентов интенсивности напряжений.** В качестве методического примера рассмотрим решение задачи о растяжении образца с одной краевой трещиной при действии равномерно распределенной нагрузки (рис. 1, а). Данная схема моделирует деформирование стыкового сварного соединения, выполненного односторонней сваркой или сварного соединения с поверхностным дефектом. С целью оценки точности вышеописанных методов и определения рекомендаций к построению дискретных моделей варьировались как размеры конечных элементов (табл. 1), так и способы разбиения на конечные элементы в вершине трещины (рис. 2).

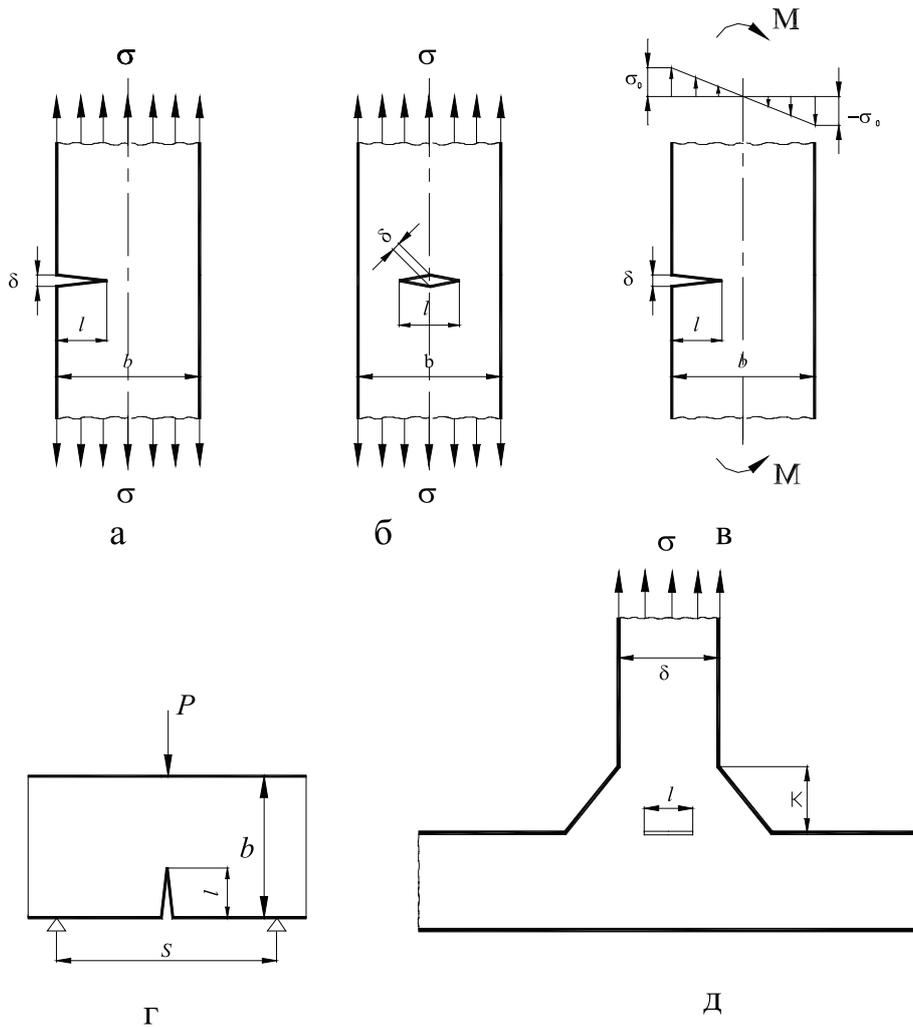


Рис. 1. Расчетные схемы стандартных образцов:  
 а – равномерное растяжение образца с одной краевой трещиной;  
 б – равномерное растяжение образца с центральной трещиной;  
 в – чистый изгиб полосы с краевой трещиной;  
 г – трехточечный изгиб полосы с краевой трещиной; д – тавровый образец

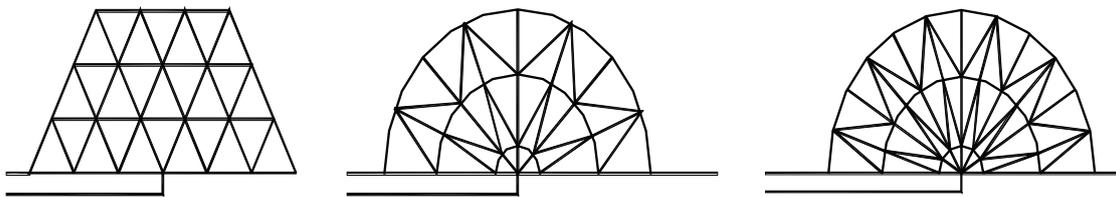


Рис. 2. Способы разбиения на конечные элементы

Приняты следующие механические характеристики: модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ . Для оценки точности расчета МКЭ сравнивались с аналитическими решениями КИН для данного образца [2]

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l} F(l/b), \quad (1)$$

где

$$F(l/b) = 1,12 - 0,231(l/b) + 10,55(l/b)^2 - 21,72(l/b)^3 + 30,39(l/b)^4.$$

В табл. 2 приведены результаты вычисления КИН на трех дискретных моделях. Для всех дискретных моделей выполнены

расчеты по двум схемам: для плоского напряженного состояния с использованием теории течения и для плоской деформации с использованием теории течения.

Численный анализ показал, что применение грубой сетки разбиения (модель 2) дает погрешность, приемлемую в инженерных методиках (10–15%). В табл. 3 приведены результаты вычисления КИН

различными методиками. Как и следовало ожидать, энергетический метод податливости и метод  $J$ -интеграла приводят к сопоставимым ошибкам. Однако применение метода  $J$ -интеграла позволяет получить расчет КИН за один шаг. Кроме того, использование последнего подхода позволяет легко перейти к решению нелинейных задач.

Таблица 1  
Параметры дискретных моделей образца с краевой трещиной

№ п/п	Дискретная модель	Количество элементов	Количество узлов	Размер конечного элемента, мм
1	Очень грубая	57	40	10
2	Грубая	151	95	1,25
3	Средняя	187	128	0,625

Таблица 2  
Таблица сравнения значений коэффициентов интенсивности  $K_I$  в случае образца с краевой трещиной ( $\sigma = 10$  Н/мм<sup>2</sup>)

Схема	№ п/п	$K_I$ , аналит., Н/мм <sup>3/2</sup>	$K_I$ , МПЭ, Н/мм <sup>3/2</sup>	Различие, %	$K_I$ , $J$ -инт, Н/мм <sup>3/2</sup>	Различие, %
ПНС	1	316,9	323,8	2,2	265,5	16,2
	2	316,9	299,3	5,5	294,9	6,9
	3	316,9	299,7	5,4	297,5	6,1
ПД	1	316,9	326,5	3,0	267,5	15,6
	2	316,9	298,7	5,7	294,2	7,2
	3	316,9	298,8	5,7	296,3	6,5

Следующей задачей было исследование влияния способа разбиения на точность расчета коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$ . В данной работе использовались три способа разбиения в окрестности трещины

(рис. 2). Размер конечного элемента (0,625 мм) был одинаков для всех схем. В табл. 3 приведены результаты вычисления КИН. Анализируя данные, мы установили, что точность результата не зависит от способа разбиения.

Таблица 3  
Результаты моделирования ( $\sigma = 10$  Н/мм<sup>2</sup>)

Схема	Способ разбиения	$K_I$ , аналит., Н/мм <sup>3/2</sup>	$K_I$ , МПЭ, Н/мм <sup>3/2</sup>	Различие, %	$K_I$ , $J$ -инт., Н/мм <sup>3/2</sup>	Различие, %
ПНС	1	316,9	299,3	5,5	297,5	6,1
	2	316,9	292,1	7,8	297,7	6,1
	3	316,9	289,6	8,6	296,8	6,3

**Рекомендации к построению дискретных моделей.** Таким образом, численный анализ позволяет заключить следующее.

1. Наиболее эффективным методом расчета КИН является метод  $J$ -интеграла.

2. Способ разбиения вершины трещины на конечные элементы не влияет на точность расчета КИН при использовании энергетических методов и метода  $J$ -интеграла.

3. Размер элементов в окрестности вершины трещины должен быть мал по сравнению с длиной трещины. Рекомендуется принимать размеры линейных элементов не более 1/60 длины трещин (но не более 0,625 мм) и они должны возрастать не быстрее, чем 1:2:4:8...:2<sup>(N-1)</sup> (N – номер слоя элементов).

Полученные рекомендации к построению дискретных моделей и выбору метода расчета КИН использовались в дальнейшем при проведении автоматизированного анализа НДС сварных соединений. Данные по выбору размеров конечных элементов использовались также и при нелинейном анализе поведения моделей с трещиноподобными дефектами.

**Влияние остаточного напряжения на параметры механики разрушения.** В соответствии с основными положениями автоматизированного анализа сварных конструкций влияние остаточного напряженно-деформированного состояния (НДС) изделий следует выразить через параметры механики разрушения. Для оценки влияния остаточных напряжений на прочность сварных соединений

на основе механики разрушения Уэллсом [3] была предложена формула

$$K_r = 2\sqrt{\frac{l}{2\pi}} \int_0^{l/2} \frac{\sigma_r dx}{\sqrt{(l/2)^2 - x^2}}, \quad (2)$$

где  $B$  – ширина пластины;  $l/2 < B/2$  – длина центральной трещины.

При  $\sigma_r$  есть напряжение на фронте трещины на расстоянии  $x$  от ее центра, или, как в данном случае, остаточные напряжения, существующие до образования трещины.

В работе [4] предлагаются приближенные соотношения определения нерелаксированных напряжений  $\sigma_r$  для стыковых соединений с продольными сварными швами. Так,

$$\left. \begin{aligned} &\text{если } \sigma_x < \sigma_T - \sigma_0, \quad \text{то } \sigma_r = \sigma_0 \\ &\text{если } \sigma_x > \sigma_T - \sigma_0, \quad \text{то } \sigma_r = \sigma_T - \sigma_x \\ &\text{при } -b < y < b, \\ &\sigma_r = -(\sigma_T - \sigma_x) \frac{b}{B - b} \\ &\text{при } b \leq |y| < B \end{aligned} \right\} (3)$$

где  $B$  – ширина пластины с центральной трещиной;  $\sigma_0$  – остаточные напряжения растяжения;  $b$  – зона действия  $\sigma_0$ ;  $\sigma_x^{\text{ост}}$  – остаточные напряжения сжатия;  $\sigma_x$  – внешние напряжения.

Однако, применение формул (2) и (3) связано с рядом ограничений. Во-первых, формула для определения  $K_r$  (1) справедлива для пластин бесконечных размеров с центрально расположенной трещиной ( $a \ll W$ ) и симметрично расположенными остаточными напряжениями  $\sigma_r$ . Во-вторых, формула (2) приведена для схематизированной эпюры распределения остаточных напряжений в стыковых сварных соединениях.

Использование МКЭ позволяет создать универсальный метод определения коэффициента интенсивности остаточных напряжений (КИОН), свободный от вышеуказанных недостатков. Алгоритм данного метода представлен на рис. 3. Особенностью данного подхода является то, что при определении и  $J$ -интеграла (блоки 4, 6) фронт трещины нагружается нерелаксированными остаточными напряжениями, существовавшими до ее появления.

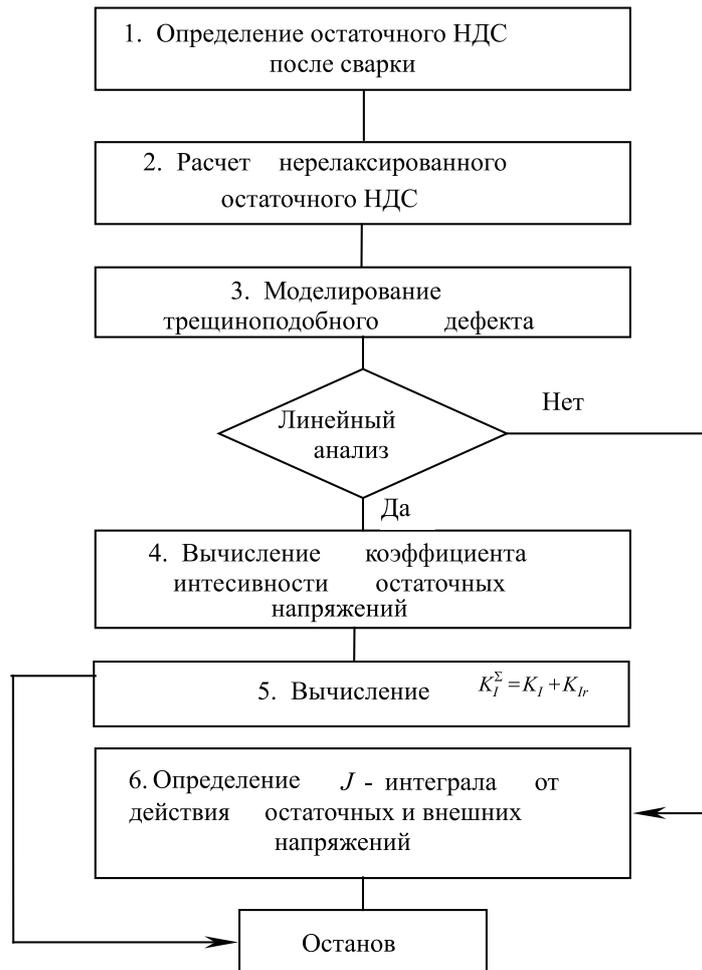


Рис. 3. Модель учета влияния остаточных напряжений на КИОН и  $J$ -интеграл

С целью оценки точности энергетического метода и метода  $J$ -интеграла при определении КИОН была решена тестовая задача. Рассматривается пластина ( $80 \times 80 \times 1$  мм) с центральной трещиной (рис. 4). Длина трещины изменялась от  $l/b = 0,1$  до  $l/b = 0,5$ . Использовались три схемы нагружения: а – на фронте трещины действует

сосредоточенная сила ( $P = 500$  Н); б – на фронте трещины действует распределенная нагрузка ( $\sigma = 10$  МПа); в – на боковые грани пластины действует сосредоточенная нагрузка ( $P = 4000$  Н). Результаты расчета, представленные в табл. 4, сравнивались с имеющимися аналитическими решениями [5].

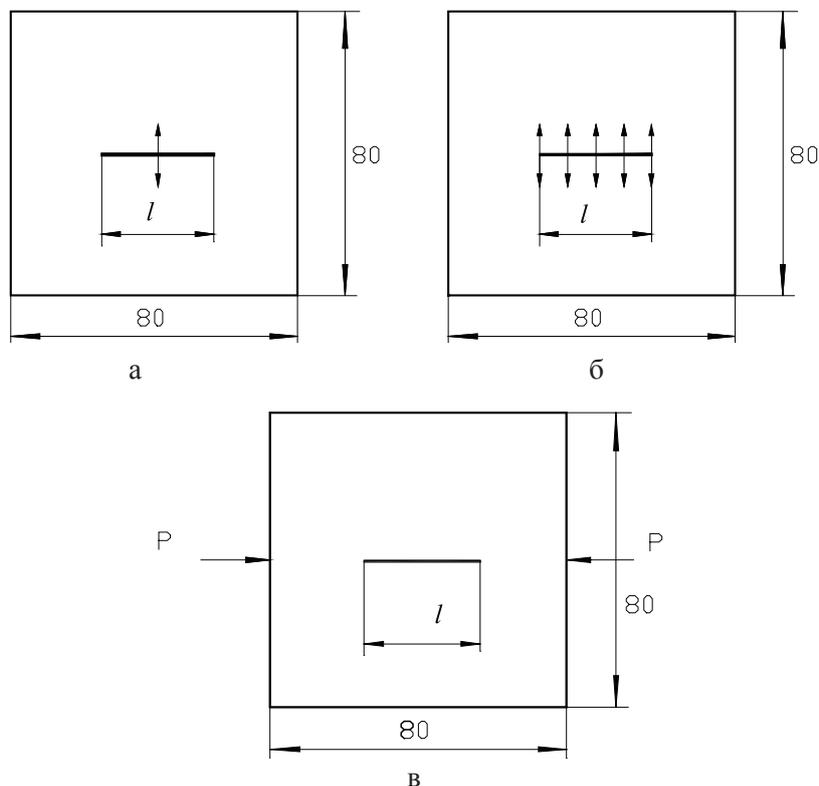


Рис. 4. Расчетные схемы:  
а – сосредоточенная нагрузка; б – распределенная нагрузка;  
в – сосредоточенная нагрузка на контуре пластины

Таблица 4

## Результаты расчета КИН

Расчетная схема (рис. 4)	$l/b$	$K_I^{\text{анал}}$ , Н/мм <sup>3/2</sup>	$K_I^{\text{МПЭ}}$ , Н/мм <sup>3/2</sup>	%	$K_I^{\text{ЖКОНТ}}$ , Н/мм <sup>3/2</sup>	%
А	0,1	200,939	188,660	6,1	202,370	0,7
	0,2	153,635	144,413	6,0	156,604	1,9
	0,3	141,042	133,594	5,3	136,945	2,9
	0,4	140,904	129,928	7,8	134,201	4,8
Б	0,2	73,304	63,465	13,4	61,916	15,5
	0,3	95,560	85,848	10,2	86,710	9,3
	0,4	119,482	105,311	11,9	108,241	9,4
	0,5	146,549	128,341	12,4	125,626	14,3
В	0,1	156,722	151,096	3,5	152,958	2,4
	0,2	229,977	218,785	4,9	220,010	4,3
	0,3	298,684	286,640	4,0	324,772	8,7
	0,4	366,500	353,114	4,9	366,520	1,3

Расчетные исследования позволяют заключить, что при действии сосредоточенной нагрузки метод  $J$ -интеграла дает бо-

лее высокую точность, чем метод полной энергии. Однако, при определении КИОН от распределенной нагрузки метод пол-

ной энергии более предпочтителен. Это связано с тем, что в процессе определения контурного  $J$ -интеграла участок вершины трещины внутри контура является нагруженным и свойство инвариантности  $J$ -интеграла теряется. Расположение контура  $\Gamma$  как можно ближе к вершине трещины позволяет свести данную ошибку к минимуму (см. табл. 4;  $l/b = 0.3 \dots 0.4$ ).

Таким образом, показана возможность определения КИОН и  $J$ -интеграла на основе МКЭ энергетическими методами. Показана применимость метода полной энергии и  $J$ -интеграла для его расчета.

Указанный подход реализован в программном комплексе CRACK.

#### Выводы

1. Разработан алгоритм численного определения коэффициентов интенсивности напряжений на основе МКЭ. Для его определения наиболее эффективным подходом является метод  $J$ -интеграла.

2. Разработан алгоритм определения коэффициента интенсивности остаточных

напряжений. В основу алгоритма положен МКЭ и принцип суперпозиции остаточных и внешних напряжений. Показана применимость метода полной энергии и  $J$ -интеграла для его расчета.

3. Создана универсальная программа CRACK для расчета НДС конструкции, вычисления КИОН,  $\delta$  и  $J$ -интеграла с учетом остаточных напряжений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парис П., Си Дж. Анализ напряженного состояния около трещины. В кн.: Прикладные вопросы вязкости разрушения. – М.: Мир, 1968. – С. 64–142.
2. Сиратори М., Миеси Т., Мацусита Х. Вычислительная механика разрушения. – М.: Мир, 1986. – 334 с.
3. Разрушение / под ред. Г. Либовиц. – М.: Машиностроение, 1977. – Т. 4 – Исследование разрушения для инженерных расчетов. – 400 с.
4. Сварные строительные конструкции / под ред. Л.М. Лобанова. – Киев: Наукова думка, 1993. – Т. 1. – Основы проектирования конструкций. – 416 с.
5. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие / под ред. В.В. Панасюка. – Киев: Наукова думка, 1988. – Т. 1 – Основы механики разрушения материалов. – 488 с.