

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ МАЛОБАЗНОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ

О.В. Емельянов<sup>1</sup>, А.Н. Шувалов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск

<sup>2</sup> Московский государственный строительный университет, г. Москва

Прогнозирование распространения усталостной трещины, основано на концепции силового параметра механики разрушения – коэффициента интенсивности напряжений (КИН), полученного при анализе упругих напряжений у неподвижной трещины при статическом нагружении. При расчетах срока службы и надежности элементов металлических конструкций с применением параметров механики разрушения требуется знание выражения для определения КИН для элементов различной формы, отличающихся схемой приложения нагрузок и содержащих трещины произвольной ориентации. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований по совершенствованию определения коэффициента интенсивности напряжений методом малобазной тензометрии. Установлено, что распределение размахов напряжений на значительном участке в окрестности вершины трещины описывается КИН.

*Ключевые слова:* механика разрушения, усталостная трещина, коэффициент интенсивности напряжений, тензометрический метод, циклическая пластическая зона.

При расчетах срока службы и надежности элементов металлических конструкций с применением параметров механики разрушения требуется знание выражения для определения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) для элементов различной формы, отличающихся схемой приложения нагрузок и содержащих трещины произвольной ориентации.

Прогнозирование распространения усталостной трещины, основанное на концепции силового параметра механики разрушения – КИН, полученного при анализе упругих напряжений у неподвижной трещины при статическом нагружении, предполагает, что КИН сохраняет свое значение лишь тогда, когда пластическая зона мала. То есть условия локального пластического деформирования в вершине трещины определены для упруго-пластического тела с неподвижной трещиной подвергнутого статическому нагружению такой нагрузкой, при которой пластическая зона в вершине трещины локализуется внутри области, в которой упругие сингулярные поля доминируют [1]. В этом случае КИН является параметром поля напряжений, который включает эффекты схемы нагружения, геометрии и размера трещины и предполагает однозначный контроль размера пластики в вершине трещины.

В работе [2] была реализована методика определения КИН тензометрическим методом с использованием цепочек 2-компонентных тензорезисторов с базой 0,5 мм, обеспечивающими высокую чувствительность и широкий измерительный диапазон в окрестности вершины трещины. Однако в данной методике при вычислении напряжений игнориро-

валось наличие в вершине усталостной трещины зон пластических деформаций и остаточных сжимающих напряжений, сформировавшихся при разгрузке в ее окрестности (величина и распределение которых неизвестны), различия в закономерностях деформирования материала в пределах циклической пластической зоны (проявляется эффект Баушингера) и вне ее.

В работах [3, 4] установлено, что выражения линейной механики разрушения применимы для вычислений  $\Delta K_I$ , поскольку размер циклической пластической зоны впереди фронта трещины  $\Delta r_{\text{ц}}$  во много раз меньше ее длины  $\Delta r_{\text{ц}} \ll l$  и интенсивность циклических пластических деформаций полностью контролируется  $\Delta K_I$ , а распределение размаха напряжений  $\Delta \sigma_y$  за пределами зоны  $\Delta r_{\text{ц}}$  описывается асимптотическими выражениями

$$\Delta \sigma_{ij} = \frac{\Delta K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta), \quad (1)$$

где  $\Delta K_I$  – коэффициент интенсивности напряжений;  $f_{ij}(\theta)$  – тригонометрические функции от угла  $\theta$ ;  $\theta$  – угол между плоскостью трещины и радиусом вектором; при  $\theta = 0$ ,  $f_{ij}(\theta) = 1$ .

Это позволяет скорректировать тензометрический метод определения КИН: использовать предлагаемую в [2] методику для определения размаха КИН. В качестве примера на рис. 1 приведены эпюры распределения размахов деформаций  $\Delta \epsilon_y(r)$ ,  $\Delta \epsilon_x(r)$  и нормальных напряжений  $\Delta \sigma_y(r)$

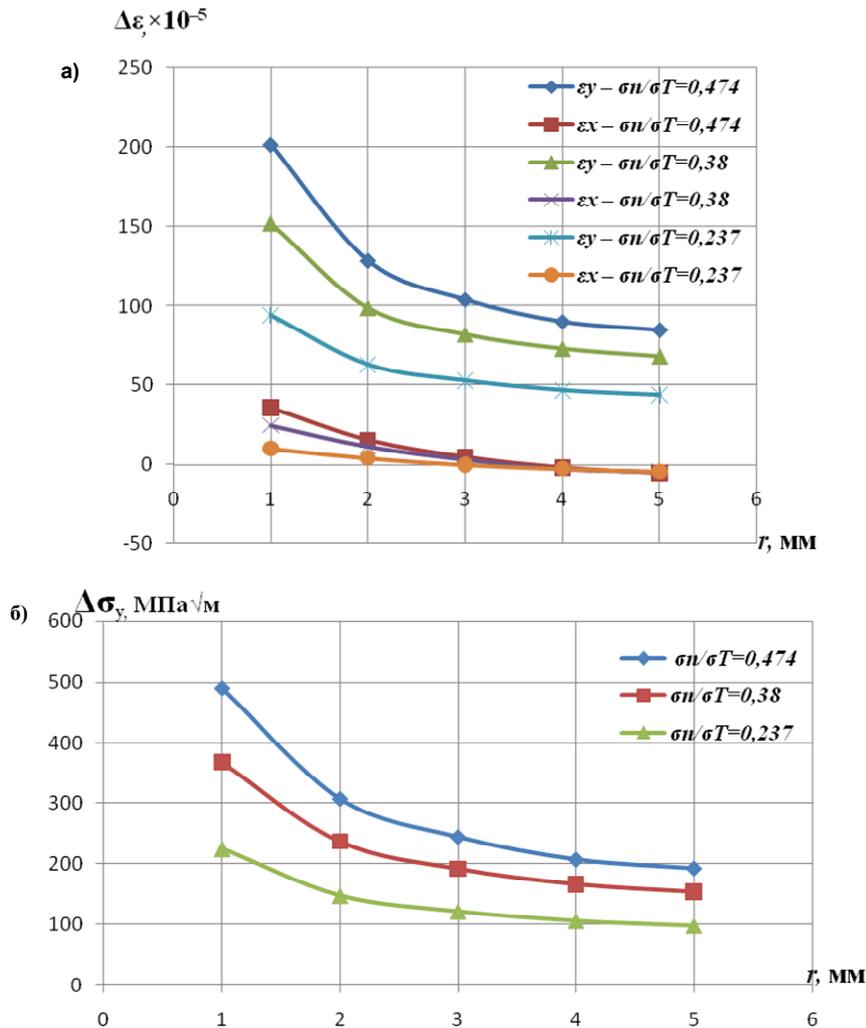


Рис. 1. Распределение размахов деформаций (а) и напряжений (б) перед вершиной трещины

в направлении продолжения трещины в образце на центральное растяжение (ЦР). Образец был изготовлен из стали 09Г2С. Переход от измеренных деформаций к напряжениям осуществлялся с использованием циклической диаграммы деформирования стали 09Г2С.

Экспериментальные зависимости  $\Delta \sigma_y(r)$ , полученные при различных уровнях номинальных напряжений и относительных длинах трещины  $l/W$ , были использованы для определения  $\Delta K_I$  по выражению (1) при  $\theta = 0$ ,  $f_{ij}(\theta) = 1$ .

На рис. 2 экспериментально полученные значения размаха КИН сопоставлены с вычисленными по формуле

$$\Delta K = \Delta \sigma_n \sqrt{\pi l \sec(\pi l/w)}. \quad (2)$$

Видно, что имеет место хорошее соответствие сравниваемых значений.

Данный подход был применен для экспериментального определения КИН для сварных на-

хлесточных соединений из двух спаренных уголков, изготовленных из стали С390.

Испытания проводили в следующей последовательности. После достижения усталостной трещиной относительной длины  $l/W = 0,15; 0,25; 0,3; 0,5$  при циклическом нагружении с уровнем напряжений  $\sigma_n/\sigma_T = 0,23; 0,26$  в сварных нахлесточных соединениях из двух спаренных уголков испытательную машину останавливали. Наклеивали непосредственно перед вершиной трещины в направлении траектории ее развития миниатюрные многокомпонентные цепочки фольговых тензорезисторов с базой 0,5 мм.

Затем к узлам прикладывали повторно-статическую нагрузку (с заданным уровнем номинальных напряжений и коэффициентом асимметрии цикла  $R$  по нагрузке) и измеряли деформации у вершин трещины. После измерений соединения подвергали циклическому нагружению до момента достижения трещиной следующей величины относительной длины. Последовательное повторение

## Теория расчета строительных конструкций

указанных операций позволило в процессе испытания соединений получить экспериментальные зависимости  $\Delta\varepsilon_y = f(r)$  (рис. 3) и  $\Delta\sigma_y = f(r)$  (рис. 4), вычислить размах КИН для испытанных соединений при различных относительных длинах трещины и определить функцию  $f_{1k}$  (рис. 5).

Экспериментальные зависимости  $\Delta\sigma_y(r)$  полученные при различных уровнях номинальных

напряжений и относительных длинах трещины  $l/W$ , были использованы для определения  $\Delta K_I$  следующим образом. В наиболее общем виде выражение для  $\Delta K_I$  для сквозных трещин можно записать:

$$\Delta K = \Delta\sigma_n \sqrt{l} f_{1k}, \quad (3)$$

где  $\Delta\sigma_n$  – размах номинальных напряжений, определяемый как отношение размаха приложенной на-

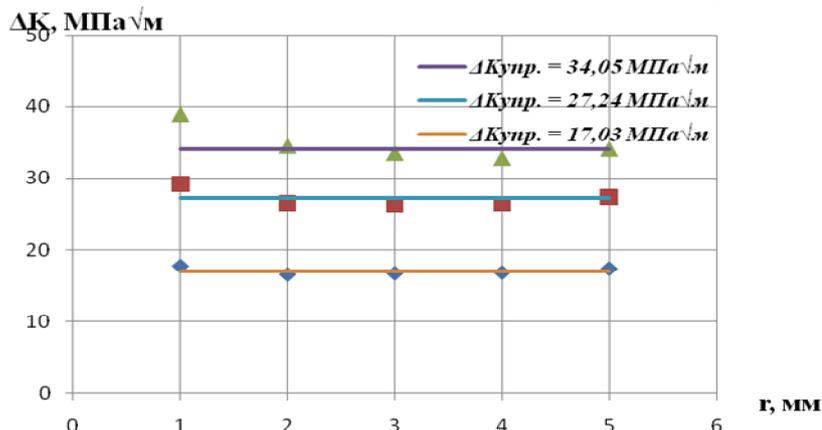


Рис. 2. Размах КИН на расстоянии  $r$  от вершины трещины в ЦР образце

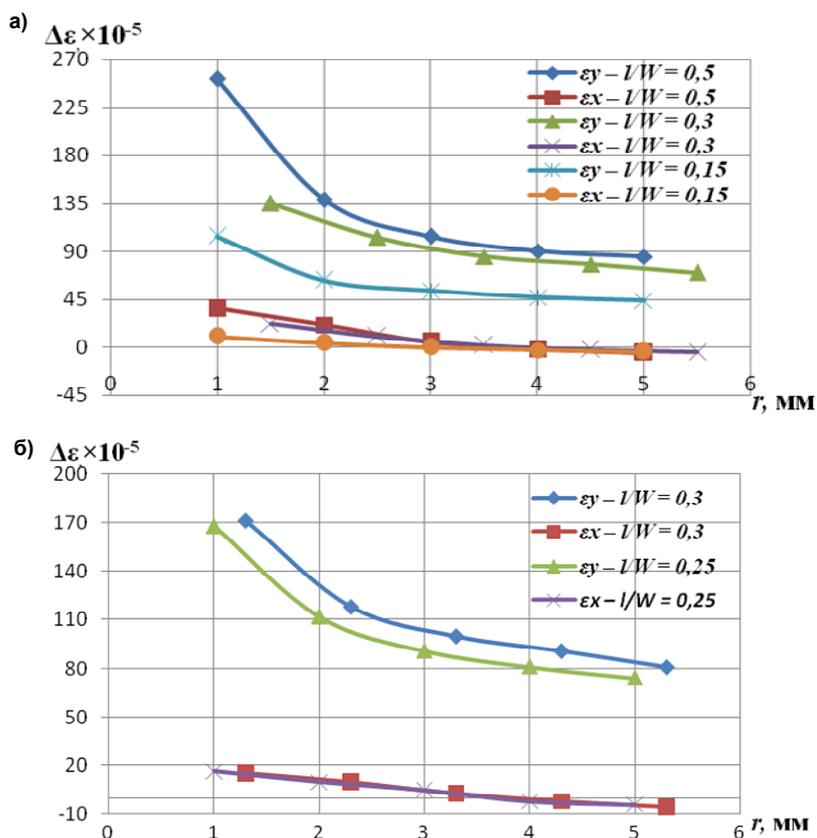


Рис. 3. Распределение размахов деформаций в вершине трещины в сварных нахлесточных соединениях из двух спаренных уголков при различных относительных длинах  $l/W$  и уровнях нагружения:

а)  $\Delta\sigma_n/\sigma_T = 0,23$ ; б)  $\Delta\sigma_n/\sigma_T = 0,26$

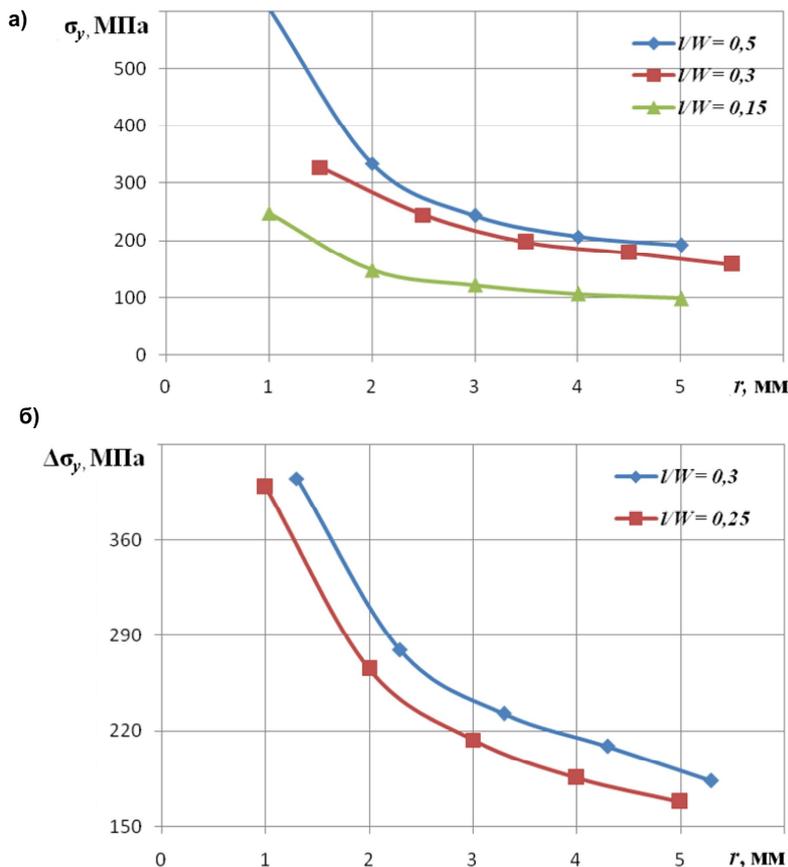


Рис. 4. Распределение размахов напряжений в вершине трещины в сварных нахлесточных соединениях из двух спаренных уголков при различных относительных длинах  $l/W$  и уровнях нагружения:

а)  $\Delta\sigma_n/\sigma_T = 0,23$ ; б)  $\Delta\sigma_n/\sigma_T = 0,26$

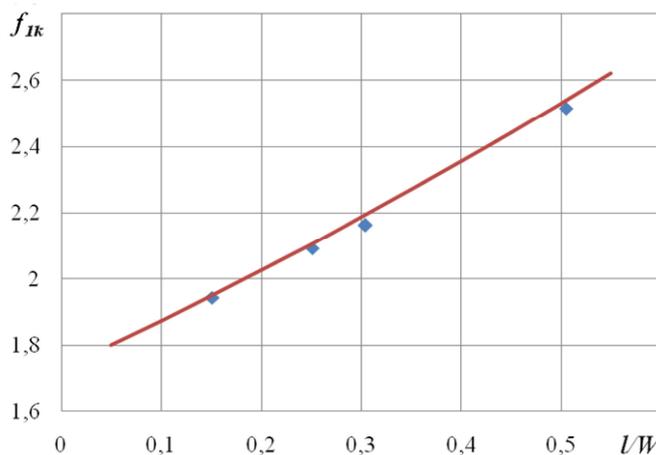


Рис. 5. Зависимость  $f_{Ik}$  от относительной длины трещины  $l/W$

грузки к площади сечения брутто;  $l$  – половина длины трещины;  $f_{Ik}$  – функция, характеризующая схему нагружения, форму и конечные размеры элемента с трещиной. Приравнявая (3) и (1), выразим  $f_{Ik}$ :

$$f_{Ik} = \left[ \Delta\sigma_y \sqrt{2\pi} / \Delta\sigma_n \sqrt{l} \right] r^{1/2}. \quad (4)$$

Следует отметить, что для указанных размахов номинальных напряжений и относительных длин трещин, распределение размахов напряжений на значительном участке в окрестности вершины трещины описывается КИН. Границы участка  $\Delta r_{и, \min}$  и  $\Delta r_{и, \max}$ , в пределах которого асимптотическое выражение линейной механики разрушения

## Теория расчета строительных конструкций

вполне согласуется с полученными экспериментальными данными, достигали значений:  $0,013 \div 0,038 \leq \Delta r_{II} / l \leq 0,1 \div 0,173$ , что для испытанных соединений составило примерно от 1 до 7 мм.

Экспериментально полученные значения  $f_{Ik}$  были аппроксимированы зависимостью

$$f_{Ik} = 1,7282 + 1,415 \left( \frac{l}{W} \right) + 0,3836 \left( \frac{l}{W} \right)^2. \quad (5)$$

Как видно из рис. 5, аппроксимирующая кривая хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными при испытании сварных нахлесточных соединений.

### Литература

1. Rice, J.R. *Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue* / J.R. Rice // *Fatigue crack propagation, ASTM STP 415*. – 1967. – pp. 246–309.

2. Злочевский, А.Б. *Определение коэффициента интенсивности тензометрическим методом* / А.Б. Злочевский, Л.А. Бондарович., А.Н. Шувалов // *Проблемы прочности*. – 1979. – № 6. – С. 44–47.

3. Емельянов, О.В. *Влияние пластических деформаций на величину коэффициента интенсивности напряжений* / О.В. Емельянов, И.А. Лядецкий // *Надежность и долговечность строительных материалов и конструкций: материалы III Международной научно-технической конференции*. – Волгоград: ВолГАСА, 2003. – Ч. II. – С. 22–24.

4. Емельянов, О.В. *Влияние пластических деформаций, протекающих в вершине трещины при циклическом изменении нагрузки, на величину коэффициента интенсивности напряжений* / О.В. Емельянов, И.А. Лядецкий // *Строительство и образование: сб. науч. тр.* – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. – Вып. 6. – С. 77–80.

**Емельянов Олег Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительные конструкции», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Магнитогорск), oleg\_emelianov58@mail.ru

**Шувалов Александр Николаевич**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Испытание сооружений», Московский государственный строительный университет (Москва), shuvalov@weld.su

*Поступила в редакцию 14 июля 2015 г.*

## IMPROVEMENT OF STRESS INTENSITY FACTOR DETERMINATION BY STRAIN-GAUGE METHOD

*O.V. Emelianov, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, oleg\_emelianov58@mail.ru*

*A.N. Shuvalov, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, Russian Federation, shuvalov@weld.su*

Prediction of the fatigue crack growth is based on the concept of fracture mechanics power parameter - stress intensity factor (SIF), obtained while analyzing elastic stresses in the stable crack under static loading. When calculating the service life and reliability of the metal structures elements using fracture mechanics parameters, knowledge of the formula to determine SIF for elements of various shapes, which have differences in the scheme of load application, and contain cracks of arbitrary orientation, is required. The results of experimental studies on improvement of stress intensity factor determination by the strain-gauge method are presented in this paper. It's specified that distribution of stress ranges within a remarkable area near the crack tip is described by SIF.

*Keywords: fracture mechanics, fatigue crack, stress intensity factor, strain-gauge method, cyclic plastic area.*

---

References

1. Rice J.R. [Mechanics of crack tip deformation and extension by fatigue]. [Fatigue crack propagation], ASTM STP 415, 1967, pp. 246–309.
2. Zlochevskiy A.B., Bondarovich L.A., Shuvalov A.N. [The definition of strain intensity factor method]. *Problemy prochnosti* [Problems of strength]. Kiev, 1979, no. 6, pp. 44–47.
3. Emel'yanov O.V., Lyadetskiy I.A. [The plastic strain influence on stress intensity factor value]. *Nadezhnost i dolgovechnost stroitelnykh materialov i konstrukcij: Materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii* [III International scientific and technical conference materials]. Volgograd, 2003, vol. II, pp. 22–24.
4. Emel'yanov O.V., Lyadetskiy I.A. [The plastic stress influence proceeding in a crack top at cyclic loading changing on the stress intensity factor value]. *Stroitelstvo i obrazovanie: Sbornik nauchnykh trudov* [ Building and education: collection of learned works]. Ekaterinburg, UGTU-UPI Publ., 2003, no. 6, pp. 77–80.

Received 14 July 2015

---

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Емельянов, О.В. Совершенствование определения коэффициента интенсивности напряжений методом малобазной тензометрии / О.В. Емельянов, А.Н. Шувалов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 32–37.

FOR CITATION

Emelianov O.V., Shuvalov A.N. Improvement of Stress Intensity Factor Determination by Strain-Gauge Method. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2015, vol. 15, no. 3, pp. 32–37. (in Russ.)