

Прогнозирование долговечности тел с надрезами по локальному напряженно-деформированному состоянию. Сообщение 1. Определение напряжений и деформаций в надрезе при циклическом упругопластическом деформировании

П. А. Фомичев, В. В. Звягинцев

Харьковский авиационный институт, Харьков, Украина

Проведено экспериментальное исследование локальных деформаций в образцах с различными концентраторами напряжений при циклическом и монотонном нагружении. Деформации в надрезах измерялись с помощью малогабазных тензодатчиков. По результатам испытаний гладких образцов построены диаграммы циклического деформирования стали и двух алюминиевых сплавов. Выполнено сопоставление амплитуд полных деформаций, рассчитанных по известным приближенным методикам, с экспериментальными данными. Установлено, что наилучшее согласование обеспечивает формула Нейбера с поправочной функцией Махутова. Отмечены рекомендации по применению этой функции для расчета амплитуд локальных деформаций при нагрузках, соответствующих многоциклового усталости и области перехода от малоциклового к многоциклового усталости.

Разрушение элементов конструкций практически всегда начинается в зонах концентрации напряжений. В настоящее время известны два подхода к расчетам долговечности элементов конструкций в области многоциклового усталости до возникновения усталостной трещины – по номинальным напряжениям и по локальному напряженно-деформированному состоянию (НДС).

Расчет по номинальным напряжениям находит применение при решении конкретных инженерных задач. Он основан на использовании базовой кривой усталости, получаемой для элемента конструкции с типовым концентратором напряжений, и эффективного коэффициента концентрации напряжений, характеризующего долговечность зоны конструктивной нерегулярности. Эффективный коэффициент концентрации определяют экспериментально, в некоторых случаях он может быть рассчитан по предварительно установленным эмпирическим соотношениям.

Определение долговечности по локальному НДС основано на учете реального деформирования материала в вершине надреза. В качестве исходной информации о материале служат усталостные и циклические деформационные характеристики, получаемые при испытаниях гладких образцов. Этот подход получил широкое распространение в области малоциклового усталости, он более универсален, но требует углубленного изучения процессов циклического деформирования материала в надрезе при регулярном и нерегулярном нагружении. О недостаточном уровне развития метода свидетельствуют парадоксальные факты, отмеченные одним из его разработчиков Н. Даулингом. В частности, для конструкционных сталей получено хорошее согласование результатов расчетов долговечности и экспериментов при сложных программах испытаний, в то время как при простом регулярном симметричном нагружении результаты отличались в несколько раз [1].

Существует несколько модификаций этого метода, отличие между которыми заключается в конкретных подходах к решению двух основных задач. Такими задачами являются:

- расчет локальных напряжений и деформаций в вершине надреза;
- выбор параметра, характеризующего долговечность тела с концентратором напряжений до возникновения усталостной трещины.

Цель данной работы состоит в анализе первой задачи применительно к многоцикловой усталости и области перехода от малоцикловой к многоцикловой усталости.

Эту задачу решают экспериментально или расчетным путем. При экспериментальном определении локальных напряжений и деформаций используют метод параллельного образца (образца-свидетеля), который заключается в регистрации с помощью тензометра деформаций в вершине надреза и воспроизведении этих деформаций в образце без концентратора (гладком образце) в параллельно работающей испытательной машине. По величине нагрузки на гладкий образец находят напряжение, которое ставят в соответствие деформации в надрезе.

Численный анализ локального НДС проводят методом конечных элементов (МКЭ). Этот метод наиболее эффективен при решении задач в упругой постановке, либо проведении упругопластических расчетов при монотонном нагружении. Применение МКЭ с целью определения локального упругопластического НДС в соответствии с блоком нагрузок, реализуемых в эксплуатации, сопряжено с большими затратами машинного времени, задача еще более усложнится при учете неустойчивости деформационных свойств материала в процессе циклического нагружения.

На практике широкое распространение получили приближенные методы, устанавливающие соотношение между коэффициентами концентрации локальных напряжений и деформаций при упругопластическом и упругом деформировании материала в надрезе. Известны предложенные с этой целью уравнения Хардрата и Омента [2], Биргера [3], Молски и Глинки [4], Полака [5].

Наиболее широко применяемым является уравнение Нейбера [6]

$$K_{\sigma} K_{\varepsilon} = K_T^2, \quad (1)$$

где K_{σ} , K_{ε} – коэффициенты концентрации локальных напряжений и деформаций, $K_{\sigma} = \sigma / \sigma_H$, $K_{\varepsilon} = \varepsilon / \varepsilon_H$; σ , ε – локальные напряжение и деформация; σ_H , ε_H – номинальные напряжение и деформация; K_T – коэффициент концентрации напряжений и деформаций при упругом деформировании материала (теоретический коэффициент концентрации).

В результате анализа данных многочисленных экспериментальных исследований в области малоцикловой усталости Н. А. Махутов [7] ввел поправочную функцию в уравнение Нейбера

$$K_{\sigma} K_{\varepsilon} = K_T^2 F_M, \quad (2)$$

$$F_M = \left(\frac{K_T \sigma_H}{\sigma_T} \right)^{-n'(1-m)} \left(1 - \frac{\sigma_H}{\sigma_T} + \frac{1}{K_T} \right), \quad (3)$$

где σ_T – предел текучести материала; m – показатель степени в уравнении диаграммы деформирования материала; n' – показатель степени.

Сравнение ряда из упомянутых уравнений между собой, но без сопоставления с экспериментальными данными, проведено в [8].

В зависимости от решаемой задачи в качестве физического закона применяют диаграммы циклического или монотонного деформирования материала, получаемые при однородном напряженном состоянии. Для циклически нестабильных металлов целесообразно использовать диаграмму циклического деформирования, которая характеризует зависимость средних значений амплитуд деформаций от амплитуд напряжений в гладком образце. Эти диаграммы могут быть заданы уравнением в виде суммы линейного и степенного слагаемых:

$$\varepsilon_{ai}^* = \frac{\sigma_a}{E} + \varepsilon_{ar}^* = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K} \right)^{1/m}, \quad (4)$$

где K и m – параметры кривой циклического деформирования материала; σ_a , ε_{ai}^* и ε_{ar}^* – соответственно амплитудные значения напряжения, полной и остаточной деформаций.

Если анализ локального НДС проводится для монотонного (статического) нагружения, то в уравнение диаграммы деформирования следует подставлять параметры K_c и m_c , а расчет осуществлять для текущих значений напряжений и деформаций.

Отмеченные выше зависимости для расчета локальных напряжений и деформаций и, в частности, (1) и (2) совместно с уравнением диаграммы деформирования приводят к нелинейному алгебраическому уравнению относительно напряжения, которое удобно решать численно по методу Ньютона [9]:

$$\sigma_{ai} = \sigma_{ai-1} - \frac{\Phi(\sigma_{ai-1})}{\Phi'(\sigma_{ai-1})},$$

где i – номер итерации.

Если уравнение диаграммы циклического деформирования принято в виде (4), то функции $\Phi(\sigma_a)$ для формул (1) и (2) необходимо находить так:

$$\Phi(\sigma_a) = \frac{\sigma_a^2}{E} + \sigma_a \left(\frac{\sigma_a}{K} \right)^{1/m} - K_T^2 \sigma_{aH} \varepsilon_{aH};$$

$$\Phi(\sigma_a) = \frac{\sigma_a^2}{E} + \sigma_a \left(\frac{\sigma_a}{K} \right)^{1/m} - K_T^2 \sigma_{aH} \varepsilon_{aH} F_M,$$

а производную от этих функций –

$$\Phi'(\sigma_a) = \frac{2\sigma_a}{E} + \frac{1+m}{m} \left(\frac{\sigma_a}{K} \right)^{1/m}.$$

Итерационный процесс расчета локальных напряжений следует продолжать до достижения требуемой точности, в качестве напряжения исходного приближения рационально принять

$$\sigma_{a0} = K^{1/(1+m)} (K_T^2 \sigma_{ан} \varepsilon_{ан})^{m/(1+m)}.$$

В связи с многообразием предложенных зависимостей возникает вопрос о выборе конкретного уравнения для расчета локальных напряжений и деформаций при нагрузках, соответствующих многоциклового усталости и области перехода от малоциклового к многоциклового усталости.

Экспериментальное оборудование и материалы. Экспериментальные исследования при циклическом нагружении проведены для девяти типоразмеров образцов из стали 30ХГСА, сплавов Д16АТ и АМцМ. Выбраны материалы с контрастными свойствами пластичности – это малопластичный сплав Д16АТ, пластичный АМцМ и сталь 30ХГСА со средними пластическими свойствами в состоянии поставки. Кроме того, выполнены испытания при монотонном нагружении для десяти типоразмеров образцов из сплавов Д16АТ, В95пчАТ2, АМцМ. Из указанных материалов были изготовлены плоские гладкие образцы и образцы с концентраторами напряжений в виде центральных круговых отверстий и круговых боковых выточек. Значения теоретических коэффициентов концентрации напряжений изменялись от 1,2 до 2,5, а радиусы концентраторов – от 5 до 12,5 мм. Испытания при монотонном нагружении проведены на машине ZD-10/20, а при циклическом нагружении – на усталостной машине УММ-01.

Локальные деформации измеряли с помощью тензодатчиков с базой 2 мм, которые устанавливали в вершине концентраторов напряжений. Для гладких образцов с этой целью использовали тензодатчики с базой 15 мм. Деформации в гладких и в надрезанных образцах при циклическом нагружении измеряли по методу петли гистерезиса. Сигнал, пропорциональный действующей на образец силе, после соответствующего усиления подавался на вертикальную ось осциллографа, а пропорциональный деформации – на горизонтальную ось. Это позволило регистрировать как амплитуду полной деформации, так и амплитуду остаточной деформации в момент равенства нулю внешней нагрузки. Разрешающая способность метода измерений по относительной деформации составляла около $5 \cdot 10^{-6}$ мм/мм. Для измерения деформаций при монотонном нагружении использовали тензостанцию СИИТ-3. Образцы с концентраторами напряжений испытывали до момента образования усталостной трещины длиной 0,2...0,5 мм.

Анализ полученных результатов. В результате проведенного комплекса экспериментальных работ получены для гладких образцов характеристики сопротивления усталости и деформированию исследованных материалов. В частности, зависимости средних значений амплитуд остаточных деформаций от амплитуд напряжений для стали 30ХГСА и сплавов Д16АТ и АМцМ представлены на рис. 1. Для первых двух материалов в логарифмических координатах имеет место перелом диаграмм, в связи с чем в таблице указаны значения параметров K и m , соответствующие нижней и верхней прямой. Параметры определены по методу наименьших квадратов [9]. Там же приведены значения напряжений временного сопротивления σ_B и модулей упругости E материалов.

Значения параметров уравнения диаграммы циклического деформирования

Материал	σ_B , МПа	E , МПа	K_1 , МПа	m_1	K_2 , МПа	m_2
Сталь 30ХГСА	720	$2,03 \cdot 10^5$	2754	0,22	735	0,073
Сплав Д16АТ	465	$7,03 \cdot 10^4$	200984	0,64	3352	0,25
Сплав АМцМ	110	$7,0 \cdot 10^4$	103	0,09	–	–

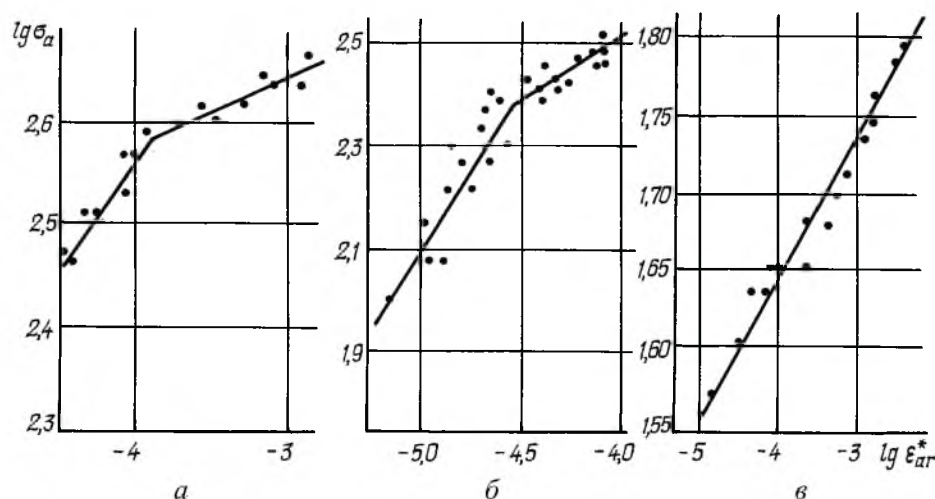


Рис. 1. Зависимости средних значений амплитуд остаточных деформаций от амплитуд напряжений: a – сталь 30ХГСА; b – сплав Д16АТ; v – сплав АМцМ.

Результаты измерений локальных деформаций в надрезах сопоставлены с расчетными значениями, полученными по различным приближенным методикам. Для примера на рис. 2 показаны характерные графики зависимости полной деформации от произведения теоретического коэффициента концентрации напряжений на номинальное напряжение в сечении “нетто”, цифры обозначены следующие методики: 1 – Нейбера; 2 – Нейбера с поправочной функцией Махутова; 3 – Биргера; 4 – Мольски–Глинки; 5 – Полака; 6 – Хардрата–Омена. Рис. 2, a соответствует монотонному деформированию надрезанных образцов из сплава Д16АТ, для которого параметры диаграмм-

мы деформирования имеют значения $K_c = 587$ МПа, $m_c = 0,068$. На рис. 2,б приведены такие же графики для циклического деформирования надрезанных образцов из стали 30ХГСА. Удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных наблюдается для уравнения Нейбера с поправочной функцией Махутова (кривая 2).

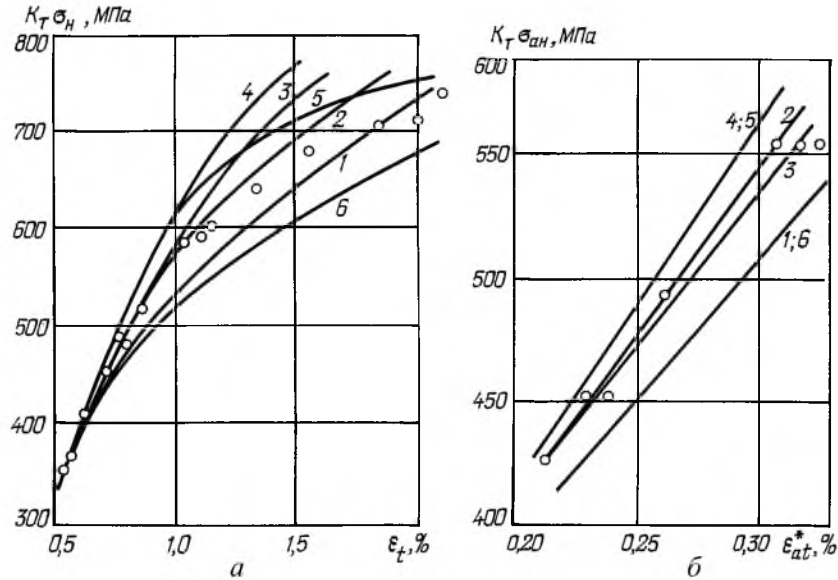


Рис. 2. Диаграммы деформирования металла в надрезе: а – сплав Д16АТ, $K_T = 2,16$, монотонное нагружение; б – сталь 30ХГСА, $K_T = 2,27$, циклическое нагружение.

На рис. 3–5 результаты расчетов по этому уравнению амплитуд полных деформаций при циклическом нагружении образцов с концентраторами напряжений (кривые 2) сопоставлены с экспериментальными данными в зависимости от амплитуд номинальных напряжений. Цифрами 1 обозначены зависимости при линейном деформировании материала. Для малопластичного сплава Д16АТ отличие кривых 2 от 1 невелико, и результаты расчета амплитуд полных деформаций по уравнениям (1) и (2) в области многоциклового усталости совпадают. Наибольшие значения ϵ_{at}^* , приведенные на рис. 3–5, соответствуют $5 \cdot 10^3$, а наименьшие – 10^6 циклов нагружения до образования усталостной трещины. При циклически нестабильном поведении материала средние значения деформаций в надрезе, рассчитанные по уравнению диаграммы циклического деформирования, хорошо согласуются со средними измеренными деформациями, вычисленными так:

$$\epsilon_{at}^* = \int_0^1 \epsilon_{at} dx,$$

где $x = n / N_f$ (n – текущее число циклов нагружения, N_f – число циклов до образования трещины); ϵ_{at} – текущая измеренная амплитуда полной деформации.

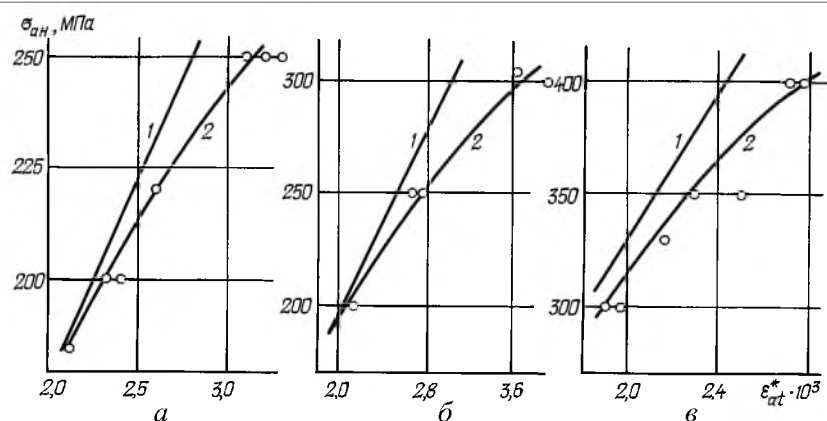


Рис. 3. Зависимости амплитуд полных деформаций в надрезах от амплитуд номинальных напряжений для стали 30ХГСА: а - $K_T = 2,27$; б - $K_T = 2,05$; в - $K_T = 1,23$.

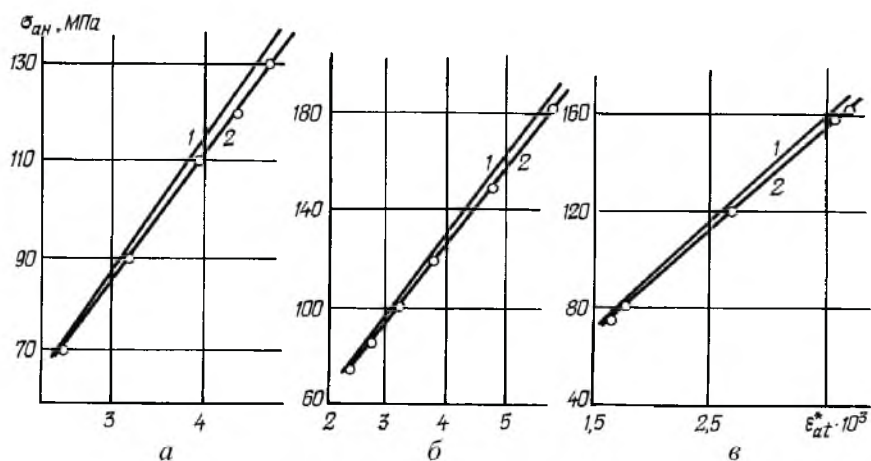


Рис. 4. Зависимости амплитуд полных деформаций в надрезах от амплитуд номинальных напряжений для сплава Д16АТ: а - $K_T = 2,45$; б - $K_T = 2,15$; в - $K_T = 1,535$.

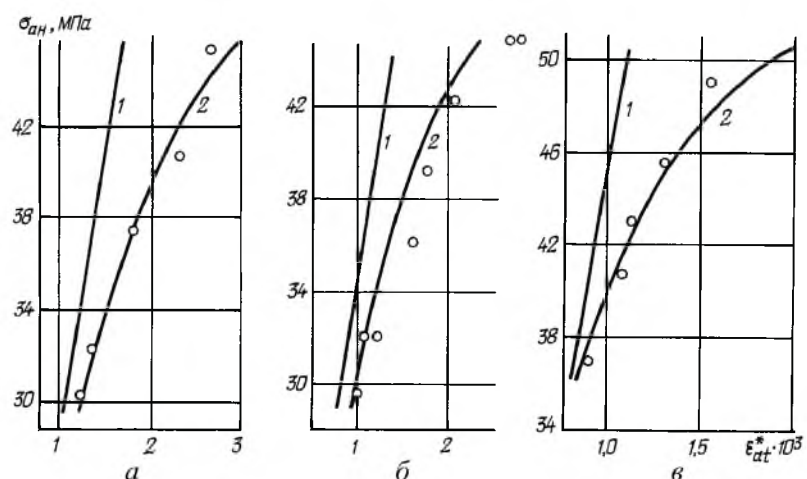


Рис. 5. Зависимости амплитуд полных деформаций в надрезах от амплитуд номинальных напряжений для сплава АМцМ: а - $K_T = 2,45$; б - $K_T = 2,15$; в - $K_T = 1,52$.

Кроме анализа отмеченных выше результатов экспериментальных исследований проведен также анализ данных, полученных методом муара [10] для сплава Д19АТ при монотонном нагружении, результатов исследований Р. Ландграфа [11], которые были проведены на образцах SAE из сталей Man-Ten и RQC-100 при циклическом нагружении, деформации в вершине надреза были измерены малобазными тензорезисторами. Рассмотрены экспериментальные данные, полученные на образцах с различными концентраторами напряжений при монотонном и циклическом нагружении [12–14].

Выводы

1. В области перехода от малоциклового к многоциклового и многоциклового усталости для умеренных значений теоретического коэффициента концентрации напряжений локальные напряжения и деформации целесообразно рассчитывать по формуле Нейбера с поправочной функцией Махутова. Этот вывод качественно согласуется с рекомендациями ИМАШ РАН для малоциклового усталости.

2. Поправочную функцию F_m следует вычислять с учетом показателя степени m в уравнении диаграммы циклического деформирования в виде суммы линейного и степенного слагаемых.

3. Для большинства исследованных металлов в качестве циклического предела текучести следует принимать напряжение, при котором остаточная деформация составляет 0,02% по диаграмме циклического деформирования. Показатель степени n' в функции F_m , как и рекомендовано в [7], можно принимать равным 0,5.

С учетом этих уточнений, согласование результатов расчета амплитуды полной деформации в вершине концентратора напряжений с экспериментальными данными удовлетворительное.

Резюме

Проведено експериментальне дослідження локальних деформацій у зразках із різними концентраторами напружень при циклічному та монотонному навантаженні. Деформації в надрізах вимірювались малобазними тензомерами. За результатами випробовувань гладких зразків побудовано діаграми циклічного деформування сталі та двох алюмінієвих сплавів. Виконано співставлення амплітуд повних деформацій, розрахованих за відомими наближеними методиками, з експериментальними даними. Встановлено, що найкраще узгодження забезпечує формула Нейбера з поправковою функцією Махутова. Відмічено рекомендації по застосуванню цієї функції для розрахунку амплітуд локальних деформацій при навантаженнях, які відповідають багатоциклової утоми та області переходу від малоциклової до багатоциклової утоми.

1. Dowling N. E. A review of fatigue life prediction methods // SAE Techn. Pap. Ser. – 1987. – N 871966. – P. 1 – 22.

2. *Hardrath H. F., Ohman L.* A study of the elastic and plastic stress concentration factors due to notches and fillets in flat plates. – 1951. – NASA; TN 2566.
3. *Биргер И. А.* Прогнозирование ресурса при малоциклового усталости // Пробл. прочности. – 1985. – № 10. – С. 39 – 44.
4. *Глинка Г.* Анализ локальных деформаций и напряжений и прогнозирование усталостной долговечности // Механическая усталость металлов. Тр. VI Междунар. коллоквиума. – Киев: Наук. думка, 1981. – С. 54 – 60.
5. *Polak J.* Equivalent energy approach to stress and strain concentration factors // Kovove mater. – 1982. – **14**. – P. 329 – 340.
6. *Neuber H.* Theory of stress concentration for shear-strained prismatical bodies with arbitrary nonlinear stress-strain law // Trans. ASME E, J. Appl. Mech. – 1961. – **28**. – P. 544 – 550.
7. *Махутов Н. А.* Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
8. *Циклические деформации и усталость металлов.* В 2-х т. Малоцикловая и многоцикловая усталость металлов / Под ред. В. Т. Трощенко. – Киев: Наук. думка, 1985. – Т. 1. – 216 с.
9. *Korn G. A., Korn T. M.* Mathematical handbook. McGraw-Hill Book Company, 1968. – 832 p.
10. *Новопашин М. Д., Бочкарев Л. И., Сукнев С. В.* Определение напряжения локального течения материала в зоне концентрации напряжений // Пробл. прочности. – 1988. – № 1. – С. 75 – 76.
11. *Dowling N. E., Brose W. R., Wilson W. K.* Notched member fatigue life predictions by the local strain approach // Fatigue under Complex Loading. Analyses and Experiments / Ed. R. M. Wetzal. SAE Inc. Warrendale, PA. – 1977. – P. 55 – 84.
12. *Glinka G.* A notch stress-strain analysis approach to fatigue crack growth // Eng. Fract. Mech. – 1985. – **21**, N 2. – P. 245 – 261.
13. *Glinka G.* Energy density approach to calculation of inelastic stress-strain near notches and cracks // Ibid. – **22**, N 3. – P. 485 – 508.
14. *Glinka G.* Calculation of inelastic notch-tip strain-stress histories under cyclic loading // Ibid. – **22**, N 5. – P. 839 – 854.

Поступила 22. 01. 98