

Прогнозирование долговечности тел с надрезами по локальному напряженно-деформированному состоянию. Сообщение 2. Определение параметра, характеризующего долговечность тел с концентраторами напряжений

П. А. Фомичев

Харьковский авиационный институт, Харьков, Украина

Проведено исследование зависимости долговечности гладких и надрезанных образцов от различных параметров напряженно-деформированного состояния в вершине надреза в области многоциклового усталости до возникновения трещины. Испытывали образцы из стали 30ХГСА и сплавов Д16АТ и АМцМ с различными концентраторами напряжений. Локальные деформации измеряли малобазными тензодатчиками с использованием метода петли гистерезиса. Показано, что долговечности совпадают при одинаковых значениях амплитуд остаточных деформаций. Предложена и сопоставлена с экспериментальными данными зависимость для вычисления амплитуды остаточной деформации.

В соответствии с основным допущением метода расчета долговечности по локальному напряженно-деформированному состоянию, долговечность тела с концентратором напряжений может быть рассчитана по усталостным и циклическим деформационным характеристикам материала, полученным в результате испытаний гладких образцов. В области малоциклового усталости принята следующая схема расчета долговечности.

Для гладких образцов при циклическом упругопластическом деформировании экспериментально получают кривую усталости, которую представляют в виде кривой Мэнсона или Велера. Зная амплитуды номинальных напряжений и характеристики надреза, находят амплитуды местных деформаций или напряжений. Затем с использованием кривой усталости гладкого образца рассчитывают число циклов до возникновения усталостной трещины. Однако эта схема не всегда обеспечивает удовлетворительное согласование с экспериментальными данными. В работе [1] проведено экспериментальное исследование локальных деформаций в надрезах при циклическом нагружении в области перехода от малоциклового к многоциклового и многоциклового усталости. Отмечено, что методика Нейбера с поправочной функцией Махутова по совокупности данных обеспечивает удовлетворительное согласование с результатами экспериментов.

Данная статья посвящена установлению параметра, позволяющего по усталостным характеристикам гладких образцов определять долговечность тел с концентраторами напряжений.

Известно [2–4], что помимо локальных напряжений и деформаций долговечность тел с надрезами зависит от распределения напряжений в области наибольшей концентрации, которое обычно характеризуют градиентом напряжений. Градиент упругопластических напряжений в направлении, перпендикулярном приложенной нагрузке, меньше градиента упругих напряжений, зависящего обратно пропорционально от радиуса надреза. При достаточно большом радиусе влиянием градиента напряжений и деформаций на долговечность можно пренебречь.

С целью установления параметра, характеризующего число циклов до возникновения усталостной трещины в телах с надрезом, проведено сопоставление кривых усталости гладких и надрезанных образцов. Рассмотрен ряд предложенных ранее подходов, в частности построение зависимостей долговечности от амплитуды локального напряжения, амплитуды локальной полной деформации, потенциальной энергии деформирования материала за цикл нагружения [5], произведения амплитуд полной деформации и локального напряжения [6]. Экспериментальные исследования долговечности образцов при циклическом нагружении выполнены старшим научным сотрудником, канд. техн. наук В. В. Звягинцевым.

На рис. 1 показаны кривые усталости в координатах логарифм амплитуды измеренной локальной полной деформации – логарифм числа циклов до возникновения трещины длиной 0,2...0,5 мм для стали 30ХГСА, сплавов Д16АТ и АМцМ при симметричном цикле нагружения. Точками обозначены результаты испытаний гладких образцов, значения теоретических коэффициентов концентрации напряжений приведены в подрисуночных надписях. Наименьший радиус надреза составлял 5,5 мм. Методика испытаний приведена в [1]. Видно, что кривые усталости гладких и надрезанных образцов принадлежат различным статистическим совокупностям. Отличие возрастает с увеличением коэффициента концентрации, базы испытаний, пластичности металла.

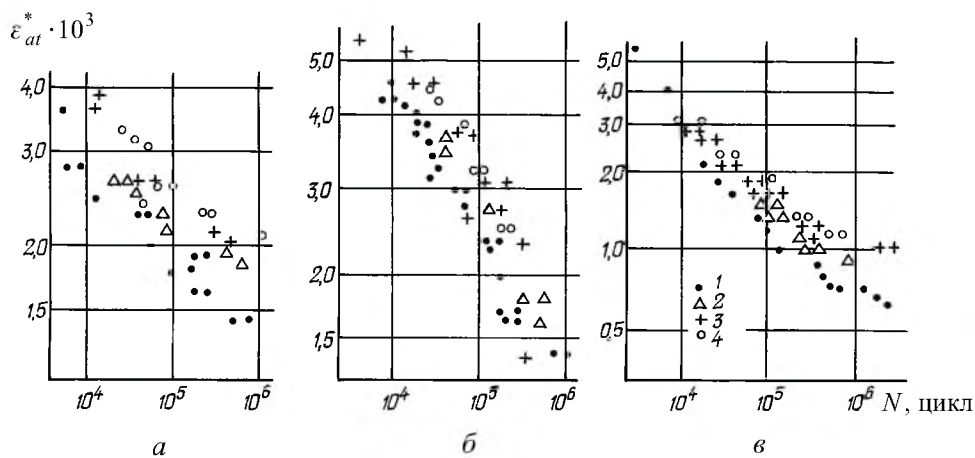


Рис. 1. Зависимость долговечности гладких и надрезанных образцов от амплитуды полной деформации: а – сталь 30ХГСА (1 – $K_T = 1$, 2 – $K_T = 1,23$, 3 – $K_T = 2,05$, 4 – $K_T = 2,27$); б – сплав Д16АТ (1 – $K_T = 1$, 2 – $K_T = 1,535$, 3 – $K_T = 2,15$, 4 – $K_T = 2,45$); в – сплав АМцМ (1 – $K_T = 1$, 2 – $K_T = 1,52$, 3 – $K_T = 2,15$, 4 – $K_T = 2,45$).

Согласование кривых усталости в координатах амплитуда локального напряжения – число циклов до возникновения трещины хуже, а для остальных упомянутых выше подходов не лучше, чем для показанных на рис. 1.

Применение метода петли гистерезиса позволило в процессе испытаний измерять амплитуды остаточной деформации в вершине надреза. Эта деформация численно равна половине ширины петли гистерезиса при равенстве нулю номинального напряжения в случае симметричного цикла

нагружения. Зависимость долговечности гладких и надрезанных образцов от среднего значения измеренной амплитуды остаточной деформации для трех материалов приведена на рис. 2. Среднее значение в случае кинетики амплитуды остаточной деформации находили так:

$$\varepsilon_{ar}^* = \int_0^1 \varepsilon_{ar} dx,$$

где $x = n / N_f$ (n – текущее число циклов, N_f – число циклов нагружения до появления трещины); ε_{ar} – текущее измеренное значение амплитуды остаточной деформации.

Следует отметить, что кинетика амплитуды остаточной деформации в надрезах проявляется меньше, чем в гладких образцах.

Представленные на рис. 2 экспериментальные данные позволяют заключить, что кривые усталости гладких и надрезанных образцов в зависимости от остаточной деформации принадлежат одной статистической совокупности.

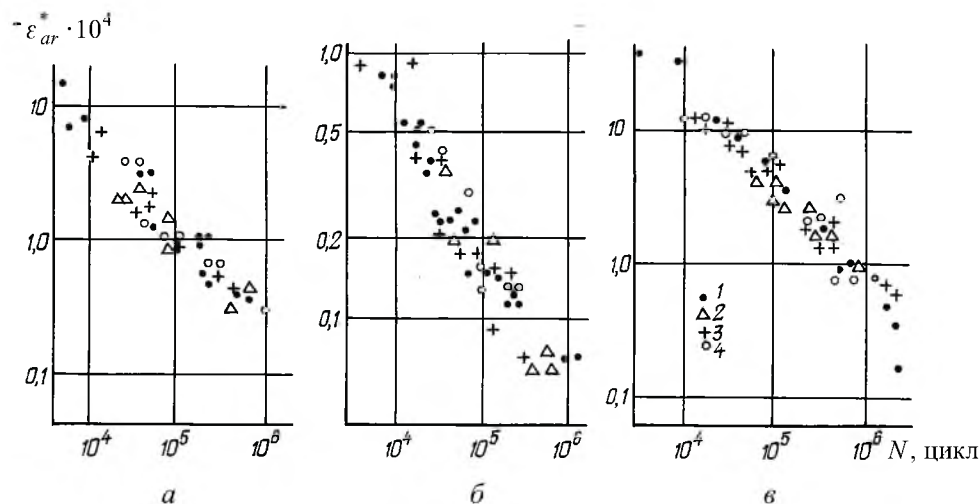


Рис. 2. Зависимость долговечности гладких и надрезанных образцов от амплитуды остаточной деформации. (Обозначения те же, что и на рис. 1.)

Качественно аналогичный результат, только для циклического изгиба гладких образцов, отмечен в работе [7], в которой экспериментально было установлено, что при одинаковой ширине петли гистерезиса долговечности образцов в условиях растяжения–сжатия и изгиба совпадают.

В соответствии с энергетическим подходом к анализу процесса усталостного разрушения [8], ответственной за возникновение трещины является часть суммарной рассеянной за цикл нагружения энергии. Для гладких образцов суммарная энергия W'_c определяется как площадь петли гистерезиса в координатах напряжение – деформация. Эта энергия пропорциональна произведению амплитуд напряжения и остаточной деформации.

По аналогии определим и рассеянную энергию в надрезе в зависимости от произведения амплитуд локального напряжения и локальной остаточной деформации:

$$W_r^* = K_\phi \sigma_a \varepsilon_{ar}^* \quad (1)$$

где σ_a – амплитуда локального напряжения; K_ϕ – коэффициент формы петли гистерезиса, который, как и для гладких образцов, приближенно может быть принят равным трем [9].

По мере уменьшения коэффициента концентрации напряжений энергия неупругого деформирования в надрезе приближается к W_c^* и, в пределе, при $K_T = 1$ эти энергии совпадают. Кривые усталости гладких и надрезанных образцов в зависимости от W_r^* показаны на рис. 3.

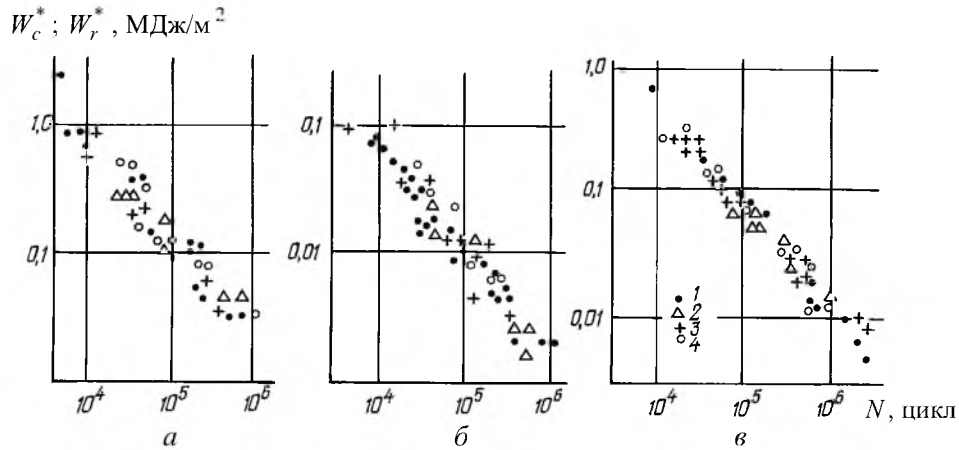


Рис. 3. Зависимость долговечности гладких и надрезанных образцов от энергии неупругого деформирования. (Обозначения те же, что и на рис. 1.)

Согласование кривых усталости гладких и надрезанных образцов в координатах $\lg W_r^* - \lg N_f$ и $\lg \varepsilon_{ar}^* - \lg N_f$ практически равнозначно по точности. Полученные экспериментальные данные позволяют заключить, что как рассеянная энергия, так и остаточная деформация являются параметрами, которые характеризуют долговечность тел с концентраторами напряжений и позволяют определять ее по результатам испытаний гладких образцов. Однако предпочтение может быть отдано W_r^* , так как она допускает физически ясную трактовку суммирования рассеянной энергии в виде работы, затрачиваемой на разрушение материала, и при нерегулярном нагружении [10].

Для нахождения величины ε_{ar} рассмотрим схему деформирования материала в концентраторе напряжений, приведенную на рис. 4. Кривая 1 соответствует диаграмме деформирования в координатах локальная деформация – произведение теоретического коэффициента концентрации на номинальное напряжение, кривая 2 – деформация – локальное напряжение в надрезе.

Вследствие нелинейного деформирования материала в вершине концентратора напряжений после снятия нагрузки образуются остаточные деформации и напряжения, обозначенные на рис. 4 соответственно ϵ_{ar} и σ_r . Возникновение остаточных напряжений не учитывают при расчете долговечности, за исключением случаев, когда они приводят к изменению средних напряжений локального цикла [11]. При регулярном симметричном нагружении остаточные напряжения возникают дважды за цикл и вследствие симметрии петли гистерезиса оказываются равными по величине и противоположными по знаку. Поэтому они не создают среднего напряжения и не влияют на амплитуды полной и пластической деформаций. По этим параметрам, если одинаковы амплитуды напряжений, диаграммы деформирования гладкого образца и материала в вершине надреза идентичны. Отличие заключается в величине остаточной деформации. Амплитуда остаточной деформации соответствует равенству нулю номинального напряжения на полцикле разгрузки, а пластическая деформация – нелинейная компонента амплитуды полной деформации [9]. Для гладкого образца амплитуды остаточной и пластической деформаций в области ограниченной долговечности достаточно близки. В концентраторе напряжений, как видно из рис. 4, отличие между ними значительно.

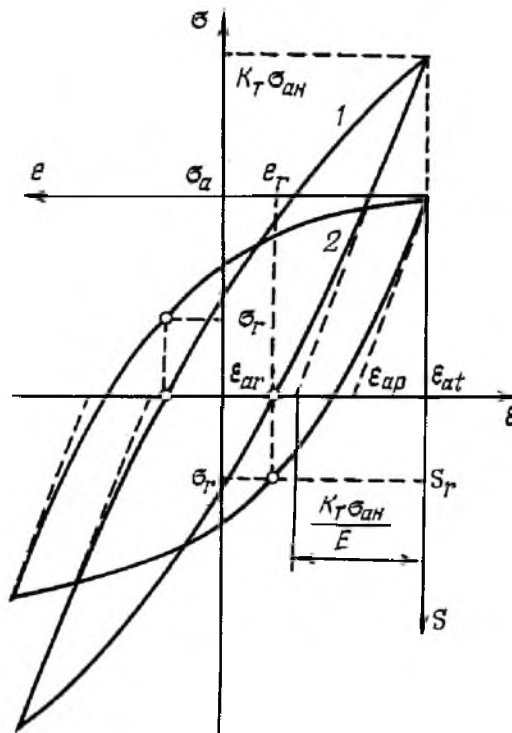


Рис. 4. Схема деформирования материала в вершине концентратора напряжений.

В координатах разгрузки $S - e$ при изменении номинального напряжения от $\sigma_{ан}$ до нуля деформация возрастает от нуля до e_r , а локальное напряжение – до S_r .

Деформацию e_r и напряжение S_r найдем из решения уравнения Нейбера

$$S_r e_r = K_T^2 S_H e_H. \quad (2)$$

Применительно к рассматриваемой задаче поправочную функцию Махутова F_M на полуцикле разгрузки можно принимать равной единице.

Номинальные напряжение и деформация в координатах разгрузки S_H и e_H составят $S_H = \sigma_{aH}$ и $e_H = \varepsilon_{aH}$. Уравнение диаграммы деформирования в координатах $S - e$ рассмотрено в [9], оно имеет вид

$$e = \frac{S}{E} + 2 \left(\varepsilon_{at} - \frac{\sigma_a}{E} \right) \left(\frac{S}{2\sigma_a} \right)^\gamma, \quad (3)$$

где

$$\gamma = 2 + h \left(1 - \frac{\sigma_a}{E \varepsilon_{at}} \right).$$

В случае отсутствия экспериментальных данных о контуре петли гистерезиса можно принимать среднее значение $h = 10$.

Зависимость (2) с учетом (3) приводит к нелинейному алгебраическому уравнению относительно S_r :

$$\frac{S_r^2}{E} + 2 \left(\varepsilon_{at} - \frac{\sigma_a}{E} \right) S_r \left(\frac{S_r}{2\sigma_a} \right)^\gamma = K_T^2 \sigma_{aH} \varepsilon_{aH}, \quad (4)$$

которое удобно решать по методу Ньютона. Амплитуды локальных напряжения и полной деформации считаем известными, методика их вычисления изложена в [1]. В качестве начального приближения целесообразно принять $S_r = K_T \sigma_{aH}$. Это значение напряжения будет тем более точным, чем ближе диаграммы разгрузки, соответствующие кривым 1 и 2 на рис. 4, к прямолинейным. В результате итерационного расчета из уравнения (4) найдем значение S_r , а по уравнению (3) – e_r .

Величина остаточной деформации в концентраторе напряжений после разгрузки составит

$$\varepsilon_{ar} = \varepsilon_{at} - e_r. \quad (5)$$

Приближенно, полагая деформирование материала в полуцикле разгрузки линейным, имеем

$$e_r = \frac{K_T \sigma_{aH}}{E},$$

где E – модуль упругости материала, тогда

$$\varepsilon_{ar} = \varepsilon_{at} - \frac{K_T \sigma_{an}}{E}. \quad (6)$$

Численный анализ результатов и их сравнение с измеренными значениями амплитуд остаточных деформаций для различных материалов и концентраторов напряжений показали, что в широком интервале амплитуд полных деформаций расчеты по формулам (5) и (6) согласуются удовлетворительно. Погрешность возрастает при малом значении теоретического коэффициента концентрации напряжений, но эта погрешность определения ε_{ar} обеспечивает расчет в запас долговечности, а найденные значения лежат в полосе разброса экспериментальных данных. В качестве примера на рис. 5 приведены зависимости ε_{ar} от ε_{at} для образцов из стали 30ХГСА с концентраторами напряжений. Уравнение (6) более удобно в плане практического использования, поскольку при этом не возникает необходимости в проведении итерационного расчета e_r .

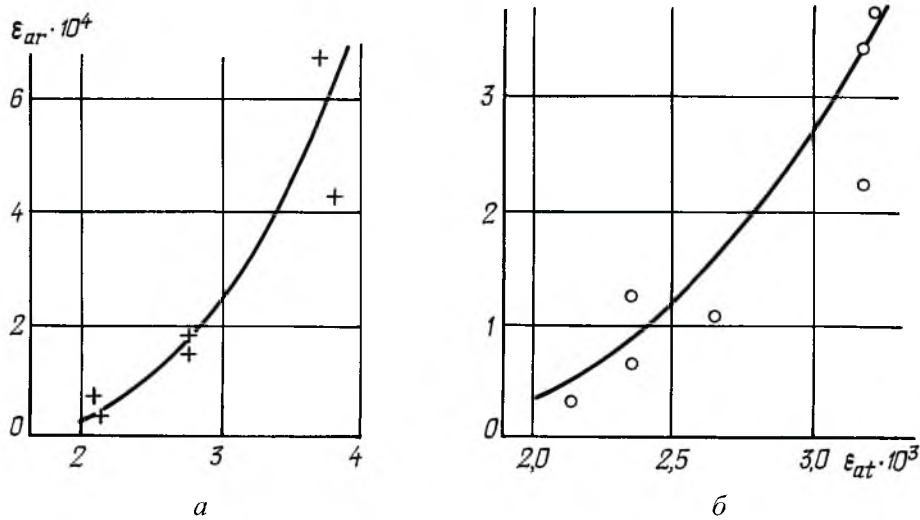


Рис. 5. Зависимость амплитуды остаточной от амплитуды полной деформации в вершине падеза для стали 30ХГСА: а - $K_T = 2,05$; б - $K_T = 2,27$.

Следовательно, при расчете долговечности тел с надрезами для нахождения амплитуды остаточной деформации необходимо иметь упругопластическое решение задачи и решение в упругой постановке при действующих нагрузках. Разность деформаций в вершине надреза и будет равна ε_{ar} .

В процессе численных расчетов локальных напряжений и деформаций и сопоставления с экспериментальными данными установлено, что учет пластической составляющей номинальной деформации целесообразен для пластичных металлов и малых значений коэффициента концентрации напряжений в области долговечности $N_f = 5 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$ цикл. Если $N_f > 5 \cdot 10^4$ цикл, то без существенной погрешности можно считать пластическую составляющую номинальной деформации равной нулю, а поправочную функцию $F_M = 1$.

Отметим наблюдаемое в расчетах напряженно-деформированного состояния образцов из сплава Д16АТ с концентраторами напряжений соотношение между амплитудами остаточных деформаций в вершине надреза и в гладком образце, в котором действует та же амплитуда напряжения. Это соотношение имеет место для малопластичных материалов и образцов с $K_T > 2$. Под малопластичными материалами будем понимать такие, у которых пластическая деформация намного меньше упругой. Для таких материалов $F_M = 1$ в широком интервале номинальных напряжений и теоретических коэффициентов концентрации, и амплитуда пластической номинальной деформации пренебрежимо мала по сравнению с амплитудой упругой деформации. В таком случае уравнение Нейбера примет вид

$$\sigma_a \varepsilon_{at} = \frac{(K_T \sigma_{aH})^2}{E} \quad (7)$$

или

$$\varepsilon_{ae} \varepsilon_{at} = \left(\frac{K_T \sigma_{aH}}{E} \right)^2,$$

где ε_{ae} – упругая составляющая амплитуды полной деформации.

В соответствии с формулой (6), запишем

$$\varepsilon_{ae} \varepsilon_{at} = (\varepsilon_{at} - \varepsilon_{ar})^2.$$

Возведя правую часть этого равенства в квадрат и отбрасывая слагаемые второго порядка малости, имеем

$$2\varepsilon_{ar} = \varepsilon_{at} - \varepsilon_{ae},$$

следовательно,

$$\varepsilon_{ar} = \frac{1}{2} \varepsilon_{ar}^{\Gamma.0}, \quad (8)$$

где $\varepsilon_{ar}^{\Gamma.0}$ – остаточная деформация гладкого образца, в котором действует та же амплитуда напряжения, что и в вершине надреза. Это соотношение выполняется также для пластичных металлов при номинальных напряжениях, близких к пределу выносливости тела с концентратором напряжений.

Соотношение (8) позволяет объяснить наблюдаемое для сплава Д16АТ отличие в долговечности гладких и надрезанных образцов при одинаковых локальных напряжениях и деформациях, которое составляет примерно два раза. В соответствии с энергетическим критерием усталостного разрушения [12], долговечность определяется величиной, рассеянной за цикл нагружения энергии, которая прямо пропорционально зависит от амплитуды остаточной деформации, а показатель степени в этом критерии для сплава Д16АТ близок к единице.

Таким образом, установлено, что кривые усталости гладких образцов и образцов с надрезами совпадают при равенстве амплитуд остаточных деформаций или энергий неупругого деформирования.

Амплитуду остаточной деформации материала в надрезе можно определять как разность амплитуд полных деформаций при упругопластическом и упругом деформировании материала в вершине надреза.

Резюме

Виконано дослідження залежності довговічності гладких і надрізаних зразків від різних параметрів напружено-деформованого стану у вістрі надрізу в області багатоциклової втоми до виникнення тріщини. Випробували зразки зі сталі 30ХГСА та сплавів Д16АТ і АМцМ із різними концентраторами напружень. Локальні деформації вимірювали малобазними тензометрами з використанням методу петлі гістерезиса. Показано, що довговічності співпадають за однакових значень амплитуд залишкових деформацій. Запропонована й співставлена з експериментальними даними залежність для розрахунку амплітуди залишкової деформації.

1. *Фомичев П. А., Звягинцев В. В.* Прогнозирование долговечности тел с надрезами по локальному напряженно-деформированному состоянию. Сообщ. 1. Определение напряжений и деформаций в надрезе при циклическом упругопластическом деформировании // Пробл. прочности. – 2000. – № 3. – С. 38 – 46.
2. *Hertel H.* Ermudungsfestigkeit der Konstruktionen. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1969. – 660 s.
3. *Heywood R. B.* Designing against fatigue. – London: Chapman and Hall Ltd., 1962. – 504 p.
4. *Forrest P. G.* Fatigue of metals. – Pergamon press, 1962. – 351 p.
5. *Хамза Л. А.* Закономерности деформирования и усталостного разрушения металлов при двухчастотном нагружении и рекомендации по оценке их долговечности. – Киев, 1988. – 48 с. – (Препр. / АН УССР. Ин-т пробл. прочности).
6. *Smith K. N., Watson P., Topper T. H.* A stress-strain function for the fatigue of metals // J. Mater. – 1970. – 5, N 4. – P. 767 – 778.
7. *Троценко В. Т., Жабко Н. И.* Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении в условиях неоднородного напряженного состояния. Сообщ. 1 и 2 // Пробл. прочности. – 1981. – № 9. – С. 3 – 11; № 11. – С. 3 – 10.
8. *Троценко В. Т.* Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1981. – 344 с.
9. *Фомичев П. А., Трубочанин И. Ю.* Уравнение контура и коэффициент формы петли гистерезиса // Пробл. прочности. – 1997. – № 3. – С. 30 – 38.

10. *Фомичев П. А.* Энергетический метод расчета долговечности при нерегулярном нагружении. Сообщ. 2. Долговечность при программном блочном нагружении // Пробл. прочности. – 1995. – № 8. – С. 3 – 11.
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. Wetzel. SAE Inc. Warrendale, PA. – 1977. – P. 55 – 84.
12. *Троценко В. Т., Фомичев П. А.* Энергетический критерий усталостного разрушения // Пробл. прочности. – 1993. – № 1. – С. 3 – 10.

Поступила 22. 01. 98