

УДК 539.4:620.178

Л. Хамаза, докт. техн. наук; О. Кононученко, канд. техн. наук

Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ СТАДИИ ЗАРОЖДЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В ОБРАЗЦАХ С КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРЯЖЕНИЙ

Резюме. Предложена и обоснована методика определения продолжительности стадии зарождения и раннего развития усталостной микротрещины в образцах с концентраторами напряжений. Количественное описание границы между зарождением микротрещины и распространением магистральной макротрещины представляется на основе модели критических микротрещин, наблюдаемых при уровнях напряжений, близких к пределу выносливости. Исходными данными для построения кривой усталости, соответствующей зарождению критической трещины в образце с надрезом являются параметры надреза (D, ρ) и кривая усталости по окончательному разрушению такого образца. Показано, что предложенная методика достаточно хорошо описывает экспериментальные данные по зарождению критической трещины.

Ключевые слова: зарождение усталостной микротрещины, развитие усталостной микротрещины.

L. Khamaza, O. Kononuchenko

A PROCEDURE FOR DETERMINING THE DURATION OF THE STAGE OF FATIGUE CRACK INITIATION IN SPECIMENS WITH STRESS CONCENTRATORS

The summary. A procedure for determining the duration of the stage of fatigue microcrack initiation and early propagation in specimens with stress concentrators is proposed and justified. A quantitative description of the boundary between the microcrack initiation and main macrocrack propagation is presented based on the model for critical microcracks observed at the stress levels close to the fatigue limit. The initial data for constructing the fatigue curve that corresponds to the critical crack initiation in the notched specimen are the notch parameters (D, ρ) and the fatigue curve for the final failure of this specimen. It has been shown that the proposed procedure describes sufficiently well the experimental data on the critical crack initiation.

Key words: fatigue microcrack initiation, fatigue macrocrack propagation.

Вступление. Определение продолжительности стадии зарождения и раннего развития усталостной микротрещины и соответственно критического размера такой трещины в концентраторах напряжений (надрезах) имеет важное значение для конструкторов при проектировании ответственных деталей и элементов конструкций в машиностроении, авиации, атомной энергетике и других отраслях промышленности.

Данные о продолжительности стадии зарождения усталостной микротрещины особенно важны и необходимы при разработке и исследовании критериев усталостного разрушения при многоосном нагружении. Использование этих критериев применительно к задаче прогнозирования продолжительности стадии зарождения усталостной трещины заключается в комбинации того или иного критерия с уравнением кривой усталости по зарождению трещины при простом нагружении (растяжение–сжатие, кручение).

В настоящее время считается, что количественное описание границы между зарождением микротрещины и распространением магистральной макротрещины может быть дано на основе модели критических микротрещин [1–3]. Под критическими

микротрещинами, называемыми также нераспространяющимися трещинами, в данном случае понимаются максимальные размеры микротрещин, наблюдаемых при уровнях напряжений, близких к пределу выносливости. При амплитудах напряжений, равных или несколько ниже предела выносливости, такие трещины всегда начинают образовываться после достаточно большого числа циклов нагружения. Это подтверждается исследованиями на гладких образцах [4] и на образцах с надрезом [5]. Таким образом, микротрещины, не достигшие критических значений, не могут оказывать воздействия на предел выносливости. Однако они могут способствовать понижению числа циклов до зарождения трещины, т.е. могут оказывать влияние на кривую усталости выше предела выносливости.

В фундаментальных работах Миллера [6–8] показано, что процесс зарождения и раннего развития микротрещины в надрезе контролируется и является результатом возникновения пластической зоны, генерируемой собственно надрезом (рис.1).

Скорость раннего развития трещины уменьшается с увеличением ее длины пока не будет превышено пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений K_{th} . Пока трещина находится в зоне влияния надреза, коэффициент интенсивности напряжений K увеличивается в соответствии с зависимостью

$$K = \left[1 + 7,69 \sqrt{\frac{D}{\rho}} \right]^{0,5} \cdot \sigma \sqrt{\pi l}, \quad (1)$$

где D – глубина надреза; ρ – радиус надреза; l – длина трещины от основания надреза.

Таким образом, $K = 0$, когда $l = 0$. Для трещины длиннее, чем протяженность зоны влияния надреза, размер эквивалентной трещины принимается равным $(l + D)$. С этого момента развитие трещины контролируется законами линейной механики разрушения.

Как отмечается в работах [6–8] размеры зоны влияния надреза δ весьма незначительны и составляют величину

$$\delta = 0,13 \sqrt{D\rho}. \quad (2)$$

Таким образом, можно полагать, что величина δ соответствует критическому размеру нераспространяющейся трещины l_0 .

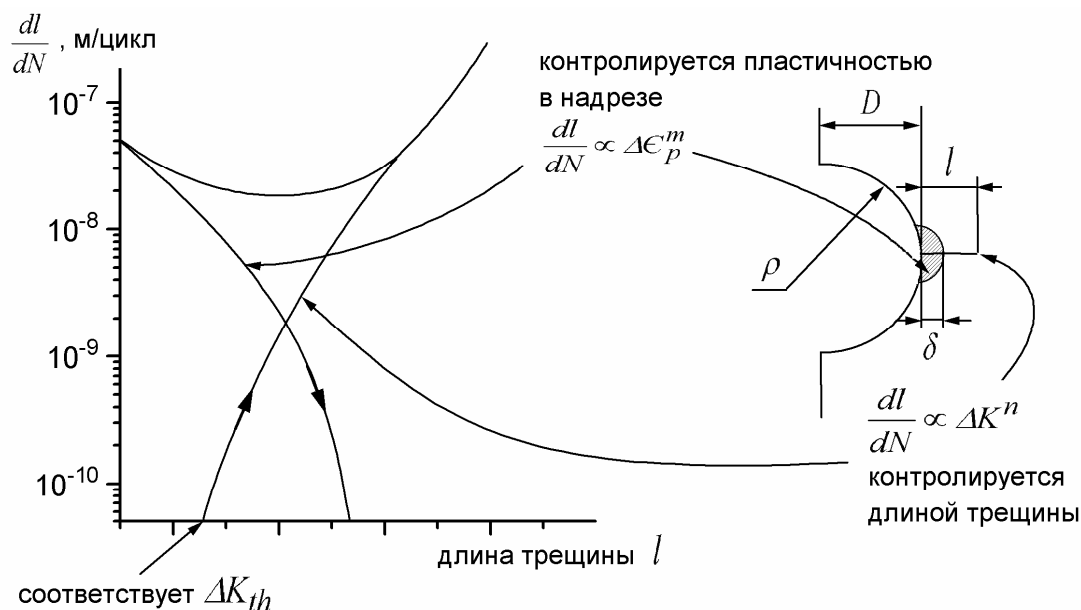


Рисунок 1. Схема двустадийного процесса развития микротрещины [6]

Минимальное напряжение, необходимое для инициирования микротрещины, определяется путем деления величины предела выносливости гладкого образца, σ_0 , на эффективный коэффициент концентрации напряжений

$$K_f = \left[1 + 7,69 \sqrt{\frac{D}{\rho}} \right]^{0,5} . \quad (3)$$

В данной работе на основе изложенных выше закономерностей зарождения и развития коротких трещин в надрезах и известных экспериментальных данных по зарождению критических микротрещин в углеродистой стали С35 предлагается методика построения кривой усталости в координатах амплитуда напряжения – число циклов до зарождения критической трещины.

Схематическое описание методики. Исходными данными для построения кривой усталости, соответствующей зарождению критической трещины в образце с надрезом (кривая 1 на рис.2), являются параметры надреза (D, ρ) и кривая усталости по окончательному разрушению такого образца (кривая 2 на рис. 2) в виде

$$\sigma_a = (\sigma'_f)_p \cdot (N_p)^b , \quad (4)$$

где σ_a – амплитуда напряжения; $(\sigma'_f)_p$ – коэффициент циклической прочности; b – экспонента циклической прочности; N_p – число циклов до разрушения.

Как было отмечено выше

- (1) микротрещины, не достигшие критических значений, не могут оказывать воздействия на предел выносливости;
- (2) критические трещины способствуют понижению числа циклов до зарождения трещины, т.е. оказывают влияние на кривую усталости по зарождению критической трещины выше предела выносливости.

В соответствии с пунктом (1) принимаются следующие допущения. Предел выносливости кривой усталости по окончательному разрушению и кривой усталости по зарождению критической трещины принимается одинаковым и равным $(\sigma_{-1})_H$ (рис.2). Кроме того, число циклов до зарождения критической трещины на пределе выносливости принимается равным числу циклов до разрушения.

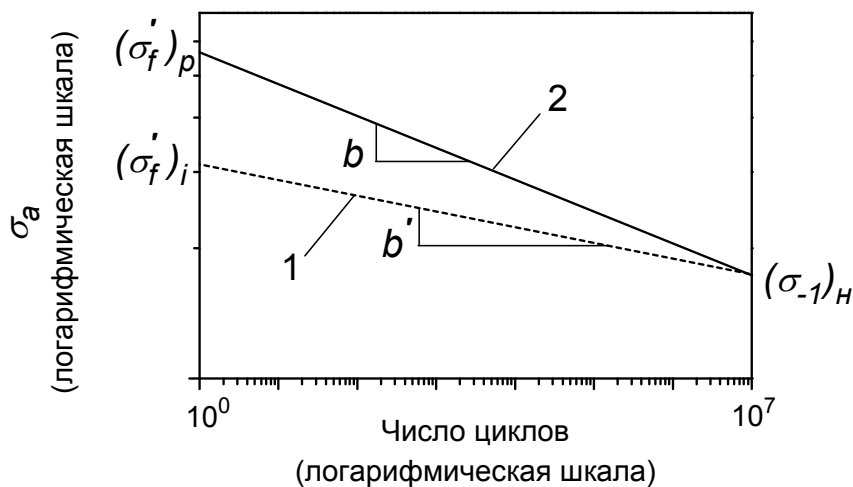


Рисунок 2. Схема построения кривой усталости по зарождению критической трещины

В соответствии с пунктом (2) коэффициент циклической прочности по зарождению критической трещины $(\sigma'_f)_i$ принимается равным коэффициенту циклической прочности по разрушению $(\sigma'_f)_p$, деленному на эффективный коэффициент концентрации напряжений в соответствии с уравнением (3)

$$(\sigma'_f)_i = \frac{(\sigma'_f)_p}{K_f} = \frac{(\sigma'_f)_p}{\left[1 + 7,69 \sqrt{\frac{D}{\rho}}\right]^{0,5}}, \quad (5)$$

а уравнение кривой усталости по зарождению критической трещины принимает вид

$$\sigma_a = \frac{(\sigma'_f)_p}{\left[1 + 7,69 \sqrt{\frac{D}{\rho}}\right]^{0,5}} \cdot (N_p)^{b'}. \quad (6)$$

Экспонента циклической прочности b' определяется в соответствии с зависимостью

$$b' = \frac{\lg(\sigma'_f)_i - \lg(\sigma_{-1})_H}{\lg(N_p = 1) - \lg(N_p)_{(\sigma_{-1})_H}}. \quad (7)$$

В работе [9] предложено выражение для эффективного коэффициента концентрации напряжений

$$K_f = \frac{\alpha_\sigma}{\sqrt{1 + c\sqrt{\bar{\eta}}}}, \quad (8)$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений; $\bar{\eta}$ – относительный градиент напряжений; c – коэффициент, определяемый в соответствии с зависимостью

$$c = 1 - \sigma_{0,2} / \sigma_B + 0,25(\sigma_{0,2} / \sigma_B)^2, \quad (9)$$

где σ_B и $\sigma_{0,2}$ – предел прочности и предел текучести исследуемого материала соответственно.

С учетом (8) уравнение кривой усталости по зарождению критической трещины принимает вид

$$\sigma_a = \frac{(\sigma'_f)_p \cdot \sqrt{1 + c\sqrt{\bar{\eta}}}}{\alpha_\sigma} \cdot (N_p)^{b'}. \quad (10)$$

Материал и описание эксперимента. Подтверждение возможности использования зависимостей (6) и (10) для построения кривых усталости по зарождению критической трещины основывается на результатах экспериментальных исследований, полученных в работе [10]. Исследовалась углеродистая сталь С35 со следующими механическими свойствами: предел прочности $\sigma_B=580$ МПа; предел текучести $\sigma_{0,2}=350$ МПа; модуль упругости $E=205$ ГПа. Испытывались при комнатной температуре полированные цилиндрические образцы диаметром 5 мм при симметричном цикле растяжения–сжатия. В середине рабочего участка образца наносился электроискровым способом полусферический дефект радиусом 250 мкм (рис. 3).

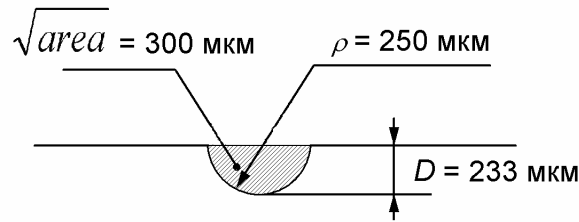


Рисунок 3. Схема полусферического дефекта

С целью снятия остаточных напряжений в зоне нанесения дефекта образцы подвергались в течение 1 ч старению в вакууме при температуре 500°C.

Наблюдение за механизмом зарождения и раннего развития микротрещины осуществлялось с использованием сканирующего электронного микроскопа.

Прямые экспериментальные наблюдения показали, что по контуру дефекта зарождаются многочисленные микротрещины, которые развиваясь сливаются в единую непрерывную трещину, окружающую полусферический дефект (рис.4).

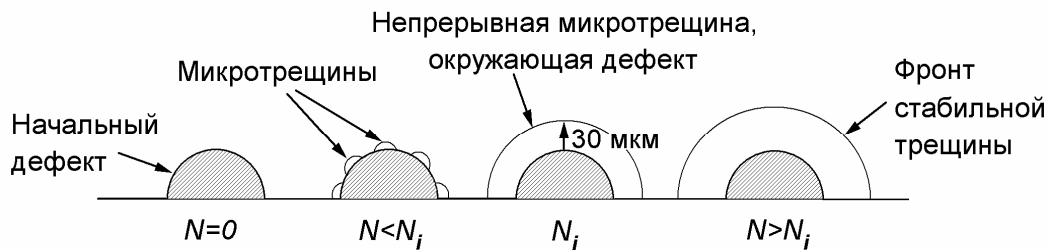


Рисунок 4. Развитие усталостного повреждения вокруг дефекта

Это соответствует разрушению всех зерен, окружающих дефект. Глубина этого слоя составляет 30 мкм. Он включает в себя, как и полагал Миллер [6], зону микропластичности и раннее развитие многочисленных трещин. Таким образом, можно полагать, что глубина единой непрерывной трещины $l_0=30$ мкм соответствует критическому размеру, после которого развитие трещины контролируется законами линейной механики разрушения.

Это подтверждается и тем фактом, что размер зоны влияния дефекта, определяемого в соответствии с зависимостью (2), также приблизительно равен 30 мкм:

$$\delta = 0,13\sqrt{D\rho} = 0,13\sqrt{233 \cdot 250} \approx 30 \text{ мкм.}$$

Экспериментальная проверка методики. На рис.5 приведены кривые усталости стали С35 с указанным выше полусферическим дефектом. На этом рисунке кривая 1 – кривая усталости по окончательному разрушению образцов (экспериментальные точки обозначены темными кружочками). Она описывается уравнением

$$\sigma_a = (\sigma'_f)_p \cdot (N_p)^b = 3586 \cdot (N_p)^{-0,20971}. \tag{11}$$

Предел выносливости на базе 10^7 циклов нагружения, определенный в соответствии с уравнением (11), равен

$$(\sigma_{-1})_n^{разр} = 122 \text{ МПа.}$$

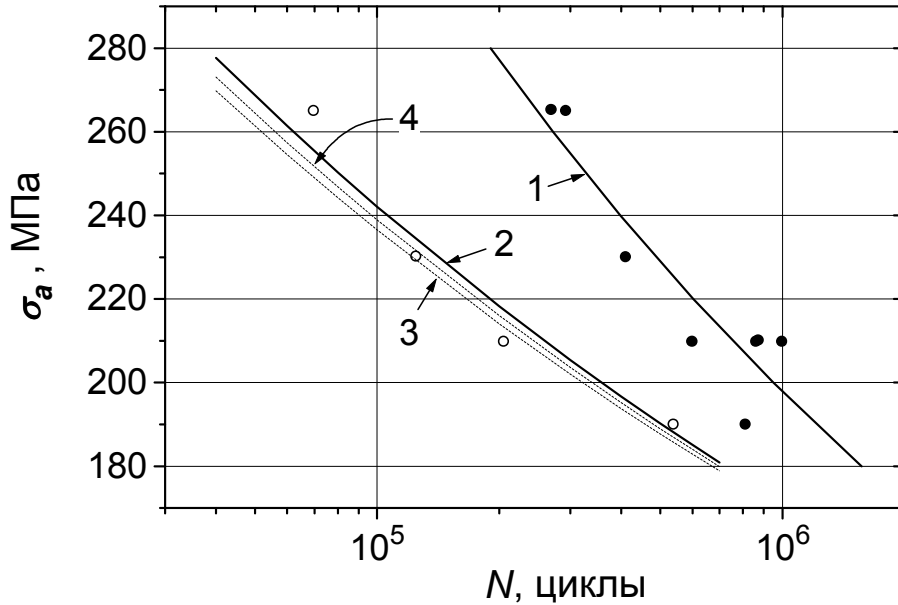


Рисунок 5. Кривые усталости стали С35 с поверхностным полусферическим дефектом ($\sqrt{\text{area}} = 300 \mu\text{m}$) [10]: •, 1 – экспериментальные точки и кривая усталости по окончательному разрушению; ○, 2 – экспериментальные точки и кривая усталости по зарождению критической длины трещины ($l_o = 30 \mu\text{m}$); 3 – расчетная кривая усталости по зарождению критической длины трещины согласно уравнению (6); 5 – расчетная кривая усталости по зарождению критической длины трещины согласно (10)

На рис. 5 кривая 2 – кривая усталости по зарождению критической длины трещины $l_o = 30$ мкм (экспериментальные точки обозначены светлыми кружочками). Она описывается уравнением

$$\sigma_a = (\sigma'_f)_i \cdot (N_p)^{b'} = 1358 \cdot (N_p)^{-0,14978}. \quad (12)$$

Предел выносливости на базе 10^7 циклов нагружения, определенный в соответствии с уравнением (12), равен

$$(\sigma_{-1})_H^{\text{зарожд}} = 122 \text{ МПа}.$$

Тот факт, что $(\sigma_{-1})_H^{\text{разр}} \approx (\sigma_{-1})_H^{\text{зарожд}}$, подтверждает высказанное выше допущение, что на пределе выносливости кривая усталости по окончательному разрушению и кривая усталости по зарождению критической трещины “сходятся”, т.е. число циклов до зарождения критической трещины на пределе выносливости принимается равным числу циклов до разрушения (см. рис. 2).

Расчетная кривая усталости по зарождению критической длины трещины согласно уравнению (6)

$$\sigma_a = \frac{(\sigma'_f)_p}{\left[1 + 7,69 \sqrt{\frac{D}{\rho}}\right]} \cdot (N_p)^{b'} = \frac{3586}{\left[1 + 7,69 \sqrt{\frac{233}{250}}\right]^{0,5}} \cdot (N_p)^{-0,14359}$$

представлена на рис. 5 в виде кривой 3.

Видно, что эта кривая весьма близко расположена к экспериментальной кривой усталости по зарождению критической длины трещины. Это дает основание отметить, что уравнение (6) достаточно хорошо описывает экспериментальные данные по зарождению критической трещины.

Рассмотрим теперь возможность описания экспериментальных данных по зарождению критической трещины с использованием уравнения (10). Величинами, определяющими эффективный коэффициент концентрации напряжений в данном случае, являются относительный градиент напряжений $\bar{\eta}$ и теоретический коэффициент концентрации напряжений α_σ . Определение этих величин осуществляется исходя из следующих соображений.

Критический размер микротрещины, l_0 , для образца, показанного на рис. 6а, предполагается таким же, как и для образца с надрезом (рис. 6б). При этом радиус надреза ρ_0 принимается равным l_0 .

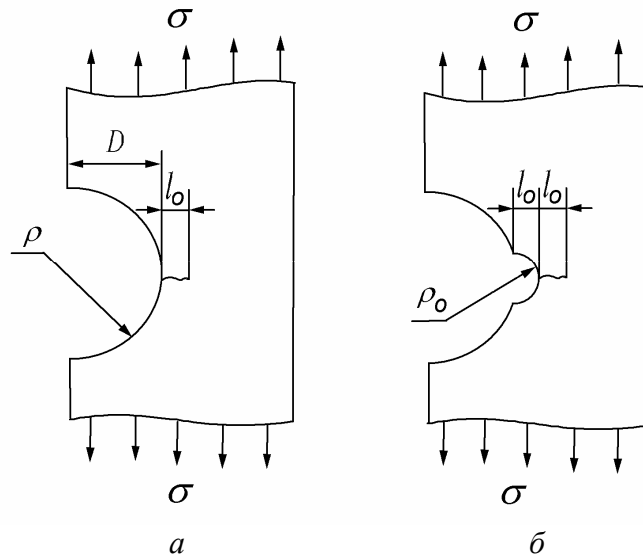


Рисунок 6. Трещина в корне надреза (D, ρ) (а) и (б) в корне надреза (l_0, ρ_0)

Расчет величин α_σ и $\bar{\eta}$ проводился с использованием метода конечных элементов для полосы с надрезом, конфигурация которого приведена на рис. 6б. Для данной конфигурации надреза ($D = 233\text{мкм}; \rho = 250\text{мкм}; l_0 = 30\text{мкм}; \rho_0 = 30\text{мкм}$) теоретический коэффициент концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 6,59$, а относительный градиент напряжений $\bar{\eta} = 87,3$.

Расчетная кривая усталости по зарождению критической длины трещины согласно уравнению (10)

$$\sigma_a = \frac{(\sigma'_f)_p \cdot \sqrt{1 + c\sqrt{\bar{\eta}}}}{\alpha_\sigma} \cdot (N_p)^{b'} = \frac{3586 \cdot \sqrt{1 + 0,485\sqrt{87,3}}}{6,59} \cdot (N_p)^{-0,14579}$$

представлена на рис. 5 в виде кривой 4.

Видно, что эта кривая практически совпадает с экспериментальной кривой усталости по зарождению критической длины трещины. Это дает основание отметить, что и уравнение (10) достаточно хорошо описывает экспериментальные данные по зарождению критической трещины.

Заключение.

1. Предложена и обоснована методика определения продолжительности стадии зарождения и раннего развития усталостной микротрещины в образцах с концентраторами напряжений.

2. Количественное описание границы между зарождением микротрещины и распространением магистральной макротрещины представляется на основе модели

критических микротрещин. Под критическими микротрещинами, называемыми также нераспространяющимися трещинами, в данном случае понимаются максимальные размеры микротрещин, наблюдаемых при уровнях напряжений, близких к пределу выносливости.

3. Исходными данными для построения кривой усталости, соответствующей зарождению критической трещины в образце с надрезом, являются параметры надреза (D, ρ) и кривая усталости по окончательному разрушению такого образца.

4. Показано, что предложенная методика достаточно хорошо описывает экспериментальные данные по зарождению критической трещины.

Литература

1. Miller K.J. Initiation and growth rates of short fatigue cracks. In: Bilby B.A., Miller K.J., Willis J.R. editors. IUTAM Eshelby memorial symposium. Cambridge University Press: 1985. p. 477–500.
2. Yamada K., Kim M., Kunio T. Tolerance microflaw sizes and non-propagating crack behaviour. In: Miller K.J., de los Rios E.R. editors. The behaviour of short fatigue cracks. EGF Publication 1. London: Mechanical Engineering Publication: 1986. p. 261–274.
3. Lukáš P., Kunz L., Weiss B., Stickler R. Non-damaging notches in fatigue. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 1986; 9(3). p. 195–204.
4. Kunio T., Shimizu M., Yamada K. and Tamura T. Endurance limit and threshold condition for microcracks in steels. In: *Fatigue* (Edited by Beevers C.J.), EMAS: 1984. p. 817.
5. Murakami Y. and Endo M. Quantitative evaluation of fatigue strength of metals containing various small defects or cracks. *Engng. Fract. Mech.* 1983; 17(1). p. 1–15.
6. Smith R.A. and Miller K.J. Prediction of fatigue regimes in notched components. *Int. J. Mech. Sci.* 1978; 20. p. 201–206.
7. Miller K.J. The behaviour of short fatigue cracks and their initiation part II – general summary. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 1987; 10. p. 93–113.
8. Miller K.J. *The Behaviour of Short Fatigue Cracks*. (EGF 1) (Egf Publication): 2005.
9. Трощенко, В.Т. Учет влияния градиента напряжений на предел выносливости сталей [Текст] / В.Т. Трощенко, Л.А. Хамаза / Прочность материалов и элементов конструкций: Труды Международной научно-технической конференции “Прочность материалов и элементов конструкций” (Киев, 28–30 сентября 2010 г.) / Отв. ред. В.Т. Трощенко. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г.С.Писаренко НАН Украины, 2011. – С. 777–787.
10. Nasr A., Nadot Y., Bouraoui Ch., Fathallah R., Jouiad M. Fatigue initiation in C35 steel: Influence of loading and defect. *Int. J. of Fatigue.* 2010; 32. p. 780–787.