
doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.10.056>

УДК 539.4

В.Т. Трощенко, Л.А. Хамаза

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

E-mail: lah3@ipp.kiev.ua

Стадии усталостного разрушения металлов и сплавов

Представлено академиком НАН Украины В.Т. Трощенко

Разработаны и обоснованы методы определения условий перехода от рассеянного к локализованному усталостному повреждению, основанные на анализе закономерностей распространения “коротких” и “длинных” трещин. С использованием разработанных методов определены размеры трещин и число циклов нагружения, соответствующие переходу от рассеянного к локализованному усталостному повреждению углеродистых, легированных, аустенитных сталей и алюминиевого сплава с учетом уровня напряжений и свойств исследованных материалов. Установлено, что размеры усталостных трещин, соответствующие указанному переходу при напряжениях выше предела выносливости, уменьшаются с увеличением напряжений и остаются меньшими, чем размеры трещин при пределе выносливости. Показано, что размеры магистральных трещин коррелируют с величиной предела выносливости исследованных материалов, уменьшаясь с увеличением предела выносливости.

Ключевые слова: *предел выносливости, короткие и длинные усталостные трещины, размеры магистральных трещин, рассеянное и локализованное усталостное повреждение.*

Одним из наиболее часто встречающихся в технике разрушений является усталостное разрушение. Оно имеет место в конструкциях, подверженных воздействию циклически изменяющихся во времени нагрузок.

Усталостное разрушение происходит путем зарождения усталостных трещин и их дальнейшего развития вплоть до окончательного разрушения конструктивного элемента. Общепринято считать, что усталостное разрушение состоит из двух стадий: стадии зарождения усталостной трещины, которая иногда называется стадией рассеянного усталостного повреждения, и стадии развития трещины, которая иногда называется стадией локализованного усталостного повреждения.

В литературе нет четкого определения условий (размеров трещин и числа циклов нагружения) перехода от одной стадии усталостного разрушения к другой. В одних случаях за размер трещины, соответствующий переходу от одной стадии усталостного разрушения к другой принимается размер структурных составляющих исследуемого материала, в

© В.Т. Трощенко, Л.А. Хамаза, 2018

других случаях этот размер принимается исходя из возможностей методов, используемых для определения размеров трещин, в третьих — этот размер принимается исходя из целей проводимого исследования и т.д. При этом предполагается, что размер этой трещины для исследуемого материала не зависит от величины напряжений, при которых проводятся испытания.

В данной статье предложено принимать за размер трещины перехода от стадии зарождения усталостной трещины к стадии ее развития размер трещины, соответствующий зарождению магистральной трещины, под которой понимается трещина (из всего многообразия микроскопических трещин, зародившихся в металле), начинающая развиваться с большой скоростью и приводящая к окончательному разрушению. Предлагаются и обосновываются методики определения размеров магистральных трещин и соответствующих им чисел циклов нагружения. С использованием предложенных методов выполнен анализ размеров трещин и чисел циклов до разрушения, соответствующих переходу от стадии зарождения до стадии развития усталостных трещин для различных металлов и сплавов.

Методы определения условий перехода от рассеянного к локализованному усталостному повреждению. Описываемые ниже методы определения размеров магистральных трещин и чисел циклов нагружения, соответствующих переходу от рассеянного к локализованному усталостному повреждению, основаны на анализе кинетики изменения размера и скорости развития магистральной трещины в процессе циклического нагружения.

О переходе от рассеянного к локализованному усталостному повреждению, который характеризуется, в первую очередь, резким увеличением скорости распространения магистральной усталостной трещины, можно судить по зависимости скорости развития коротких трещин от коэффициента интенсивности напряжений или от размера, величины которых находятся в определенной зависимости.

Размах коэффициента интенсивности напряжений и соответствующий ему размер трещины, при которых трещина начинает ускоренно развиваться, можно принять за условия перехода от рассеянного к локализованному усталостному повреждению.

На рис.1 приведены результаты исследования развития коротких трещин при разных напряжениях, превышающих предел выносливости, и кривые развития длинных трещин в низколегированной и малоуглеродистой сталях с мелкозернистой и крупнозернистой структурой при круговом изгибе [1, 2]. В виде темных точек на рисунке приведены результаты исследования развития магистральных коротких трещин, то есть трещин, развитие которых приводит к полному разрушению образцов. Как следует из результатов, приведенных на рис.1, короткие трещины, переходящие в длинные, достигают минимальной скорости развития приблизительно при одном и том же размахе коэффициента интенсивности напряжений. Вертикальной штриховой линией на рис. 1 отмечены значения размахов коэффициента интенсивности напряжений, соответствующие переходу магистральных трещин к развитию с большой скоростью.

Воспользовавшись зависимостью между коэффициентом интенсивности напряжений и глубиной трещины в виде $\Delta K = \sigma_a \sqrt{\pi a}$, где ΔK — размах коэффициента интенсивности напряжений, при симметричном цикле нагружения он равен максимальному значению этой величины; σ_a — амплитуда напряжений; a — глубина трещины, в предположении, что она равна половине длины трещины на поверхности, можно по результатам, приведенным на

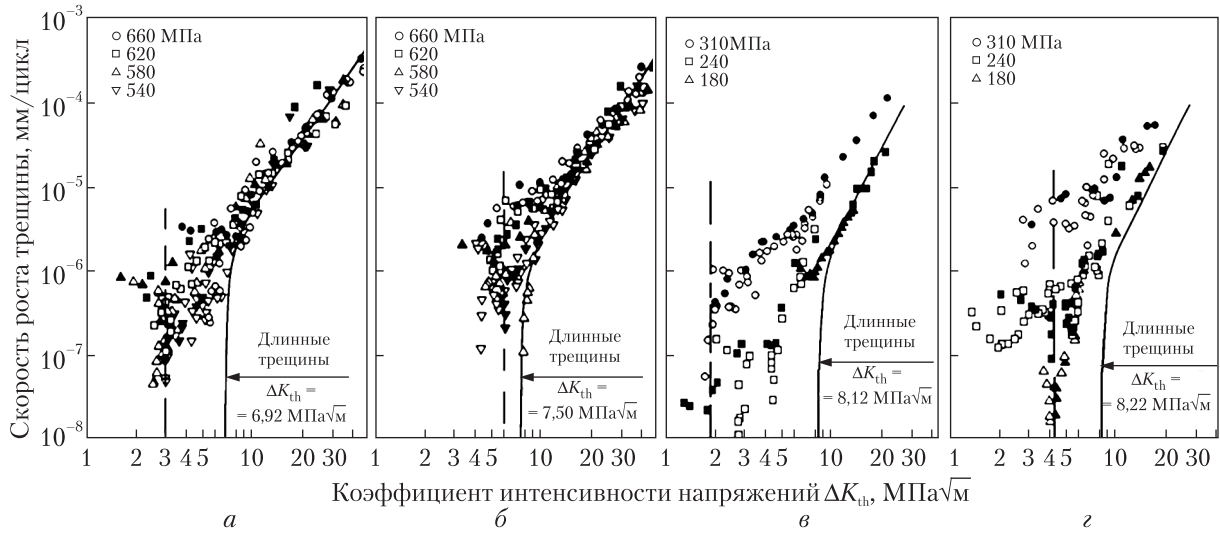


Рис. 1. Рост коротких трещин в низколегированной (а, б) и малоуглеродистой (в, з) сталях: а, в – мелкозернистые структуры; б, з – крупнозернистые структуры

Размеры усталостных трещин в низколегированной и малоуглеродистой сталях

Материал	Размер зерна D, мм	Предел выносливости, σ_{-1} , МПа	Размер трещин при σ_{-1} , d, мм	Амплитуда напряжения, σ_a , МПа	Размер трещин при σ_a , a, мм
Низколегированная сталь [1]					
Мелкозернистая	0,015	500	0,010	540	0,010
				620	0,08
Крупнозернистая	0,091	460	0,028	540	0,038
				620	0,029
Малоуглеродистая сталь [2]					
Мелкозернистая	0,024	220	0,026	240	0,018
				310	0,011
Крупнозернистая	0,084	190	0,174	240	0,101
				310	0,061

рис.1, найти значения размеров трещин, соответствующих переходу от рассеянного к локализованному усталостного повреждения при различных уровнях напряжений (табл.).

Данные таблицы свидетельствуют о том, что для всех исследованных материалов с увеличением напряжений размеры трещин, соответствующие переходу от рассеянного к локализованному усталостному повреждению, уменьшаются. Как правило, эти размеры меньше, чем экспериментально определенные размеры трещин при пределе выносливости.

Размеры трещин перехода от одной стадии усталостного повреждения к другой как для низколегированной, так и для малоуглеродистой стали возрастают с увеличением размера зерна.

Анализ экспериментальных данных о кинетике роста усталостных трещин с момента их зарождения до окончательного разрушения показывает, что описать зависимость длины

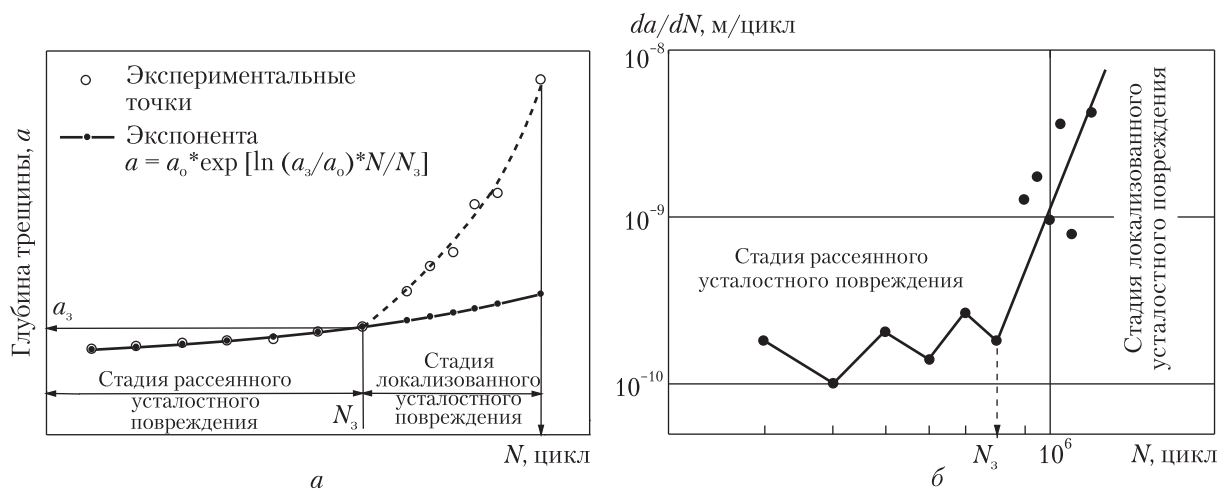


Рис. 2. Схема развития размера (а) и скорости (б) магистральной трещины

трещины от числа циклов нагружения единой экспоненциальной, трансцендентной или степенной зависимостью, как это предлагается в некоторых работах [3, 6], невозможно. Как правило, на ранней стадии развития трещина описывается с помощью экспоненциального закона (рис. 2, а). По достижении трещиной значения $a=a_3$ зависимость глубины трещины от числа циклов нагружения отклоняется от первоначально экспоненциального закона.

Основываясь на этой особенности, связанной со сменой функциональной зависимости роста трещины $a = f(N)$, предложена методика определения размера трещины, a_3 , и соответствующего ей числа циклов нагружения, N_3 [7]. Согласно этой методике предполагается, что участок зависимости размера трещины от числа циклов нагружения, соответствующий зарождению магистральной усталостной трещины, описывается зависимостью

$$a = a_0 \exp \left[\ln \left(\frac{a_3}{a_0} \right) \frac{N}{N_3} \right], \quad (1)$$

где a – размер трещины; a_0 – значение длины трещины при числе циклов $N = 0$.

Тогда размер трещины, соответствующий переходу от рассеянного к локализованному усталостному повреждению, a_3 , и необходимое число циклов нагружения, N_3 , будут соответствовать координатам точки на зависимости $a - N$, начиная с которой будет наблюдаться отклонение кривой, описываемой уравнением (1), от экспериментально наблюдаемой зависимости. Методика такого построения показана на рис. 2, а.

Путем последовательной подстановки в зависимость (1) текущих экспериментальных значений длины трещины, a , соответствующих ей долговечностей, N , и подбора параметра, a_0 , добиваемся наилучшего описания этой зависимостью экспериментальных данных на стадии рассеянного усталостного повреждения (см. рис. 2, а). Значения a и N , удовлетворяющие такому условию и по достижении которых наблюдается отклонение экспериментальных данных от экспоненциальной зависимости, и будут значениями размера трещины, a_3 , и долговечности, N_3 , соответствующими переходу от стадии рассеянного к стадии локализованного усталостного повреждения.

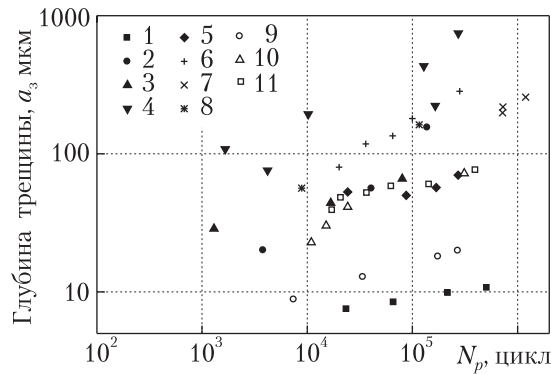


Рис. 3. Зависимость размеров магистральной трещины, a_3 , от числа циклов до разрушения для исследованных материалов: 1 – сталь 0,43%С [8]; 2 – алюминиевый сплав EN-AW 6082/T6 (L) [4]; 3 – алюминиевый сплав EN-AW 6082/T6 (T) [4]; 4 – аустенитно-ферритная сталь SAF 2205 [5]; 5 – сталь X10CrAl124 [11]; 6 – сталь 42CrMo4 [6]; 7 – аустенитная сталь 316L [3]; 8 – отожженная чистая медь [10]; 9 – сталь S45C [9]; 10 – сталь SCr440 [9]; 11 – сталь SCM435 [9]

Переход к стадии локализованного усталостного повреждения может быть определен также при представлении экспериментальных данных в виде зависимости скорости роста трещины, da/dN , от числа циклов нагружения, N (см. рис. 2, б). Характерной особенностью такой зависимости является наличие четкого перелома в точке, соответствующей размеру трещины, a_3 , и долговечности, N_3 , после которой процесс развития трещины заметно ускоряется.

Следует отметить, что для повышения достоверности определения размера магистральных трещин изложенные методы должны дополнять друг друга.

Зависимость размеров магистральных трещин и числа циклов нагружения до их зарождения от величины напряжений для различных металлов и сплавов. Описанная выше процедура по определению размеров магистральной трещины, соответствующих переходу от рассеянного к локализованному усталостному повреждению, и продолжительности стадии зарождения трещины была использована при исследовании кинетики роста трещин для материалов различных классов.

На рис. 3 приведены экспериментальные данные о зависимости размеров трещин, соответствующих переходу от рассеянного к локализованному усталостному повреждению, a_3 , от числа циклов до разрушения для материалов, перечень которых представлен в подрисуночной подписи. Из приведенных на рис. 3 данных следует, что размер магистральной трещины, a_3 , для каждого отдельного материала не является величиной постоянной, а зависит от напряжений (количества циклов до разрушения). Просматривается четкая тенденция возрастания размеров этих трещин с увеличением числа циклов до разрушения (уменьшением уровня напряжений).

Размеры магистральных трещин, a_3 , в зависимости от класса материала и уровня нагрузки изменяются в достаточно широких пределах, от 0,007–0,02 мм для углеродистых, легированных сталей и алюминиевого сплава при уровнях нагрузки, соответствующих небольшому числу циклов до разрушения, до 0,74 мм для аустенитно-ферритной стали при уровнях нагрузки, соответствующих большому числу циклов до разрушения. В области чисел циклов до разрушения 10^5 – 10^7 размер магистральной трещины, a_3 , для углеродистых и легированных сталей составляет 0,01–0,02 мм, для высокопластичных аустенитных сталей от 0,2 до 0,74 мм, для алюминиевого сплава – 0,155 мм.

Представленные на рис. 3 данные позволяют найти для исследованных материалов размеры трещин, соответствующие различным числам циклов до разрушения, в том числе для числа циклов, соответствующего пределу выносливости.

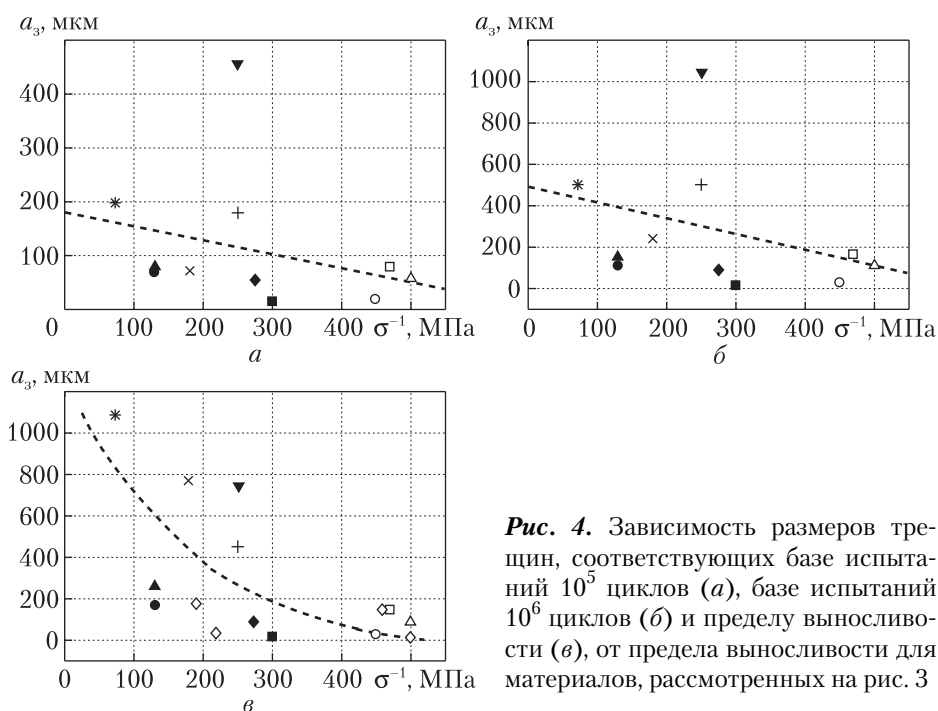


Рис. 4. Зависимость размеров трещин, соответствующих базе испытаний 10^5 циклов (*а*), базе испытаний 10^6 циклов (*б*) и пределу выносливости (*в*), от предела выносливости для материалов, рассмотренных на рис. 3

На рис. 4, *а* приведена зависимость величин, a_3 , найденных при числе циклов до разрушения $N = 10^5$, на рис. 4, *б* — зависимость величин, a_3 , найденных при числе циклов до разрушения $N = 10^6$, на рис. 4, *в* — зависимость величин, a_3 , соответствующих пределу выносливости, от предела выносливости каждого из исследованных материалов. На рис. 4 обозначение точек соответствует обозначению точек и номерам материалов, приведенных на рис. 3. На рис. 4, *в* дополнительно значком \diamond обозначены экспериментальные данные для материалов, представленных в таблице.

Из данных рис. 4 следует, что размеры трещин, соответствующие переходу от рассеянного к локализованному усталостному повреждению, определенные с использованием описанной выше методики (см. рис. 3) при числе циклов до разрушения 10^5 , 10^6 и при пределе выносливости, уменьшаются с увеличением предела выносливости. Наблюдается значительное рассеяние результатов, содержащихся на рис. 4.

Зависимость, приведенная на рис. 4, *в*, подобна зависимостям размеров трещин, соответствующих пределам выносливости, от величин пределов выносливости, найденным экспериментально, близки и размеры трещин, соответствующие пределам выносливости, найденные по данной методике и экспериментально.

Таким образом, разработаны методы, позволяющие определить размеры магистральных трещин и чисел циклов нагружения, соответствующих переходу от рассеянного к локализованному усталостному повреждению, основанные на интенсивном увеличении скорости роста магистральной трещины при таком переходе.

Показано, что размеры трещин, соответствующие переходу от стадии зарождения трещины к стадии ее развития, найденных по предложенной методике, зависят от величины напряжений испытания, уменьшаясь с увеличением этих напряжений.

Размеры магистральных трещин в зависимости от класса материала и уровня напряжений изменяются в довольно широких пределах — от 0,007 до 0,74 мм. Для углеродистых и легированных сталей в области чисел циклов до разрушения 10^5 – 10^7 размер магистральной трещины составляет 0,01–0,02 мм, для высокопластичных аустенитных сталей — 0,2–0,74 мм, для алюминиевого сплава — 0,155 мм.

Размеры магистральных трещин коррелируют с величиной предела выносливости исследованных материалов, уменьшаясь с увеличением предела выносливости.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Tokaji K., Ogawa T., Harada Y., Ando Z. Limitation of linear elastic fracture mechanics in respect of small fatigue cracks and microstructure. *Fatigue and Fracture of Eng. Materials and Structures*. 1986. **9**, № 1. P. 1–14.
2. Tokaji K., Ogawa T., Harada Y. The growth of small fatigue cracks in a low carbon steel, the effect of microstructure and limitations of linear elastic fracture mechanics. *Fatigue and Fracture Eng. Materials Structures*. 1986. **9**, № 3 P. 205–217.
3. Obrtlík K., Polák J., Hájek M., Vašek A. Short fatigue crack behavior in 316L stainless steel. *Int. J. Fatigue*. 1997. **19**, № 6. P. 471–475.
4. Jiša D., Liškutin P., Kruppl T., Polák J. Small fatigue crack growth in aluminium EN–AW 6082/T6. *Int. J. Fatigue*. 2010. **32**, № 12. P. 1913–1920.
5. Polák J., Zezulka P. Short crack growth and fatigue life in austenitic–ferritic duplex stainless steel. *Fatigue and Fracture of Eng. Materials and Structures*. 2005. **28**, № 10. P. 923–935.
6. Polák J. Plastic strain–controlled short crack growth and fatigue life. *Int. J. Fatigue*. 2005. **27**, № 10/12. P. 1192–1201.
7. Трощенко В.Т., Хамаза Л.А. Условия перехода от рассеянного к локализованному усталостному повреждению металлов и сплавов. Сообщение 3. Определение условий перехода на основе анализа кинетики развития трещин. *Пробл. прочности*. 2014. № 5. С. 5–19.
8. Zhixue W. Short fatigue crack parameters describing the lifetime of unnotched steel specimens. *Int. J. Fatigue*. 2001. **23**, № 4. P. 363–369.
9. Goto M., Nisitani Y. Fatigue life prediction of heat-treated carbon steels and low alloy steels based on a small crack growth. *Fatigue and Fracture of Eng. Materials and Structures*. 1994. **17**, № 2. P. 171–185.
10. Polák J., Liškutin P. Nucleation and short crack growth in fatigued polycrystalline copper. *Fatigue and Fracture of Eng. Materials and Structures*. 1990. **13**, № 2. P. 119–133.
11. Polák J. Mechanisms and kinetics of the early fatigue damage in crystalline materials. *Mater. Science and Engineering*. 2007. **A 468–470**. P. 33–39.

Поступило в редакцию 30.05.2018

REFERENCES

1. Tokaji, K., Ogawa, T., Harada, Y. & Ando, Z. (1986). Limitation of linear elastic fracture mechanics in respect of small fatigue cracks and microstructure. *Fatigue and Fracture of Eng. Materials and Structures*, 9, No. 1, pp. 1-14.
2. Tokaji, K., Ogawa, T. & Harada, Y. (1986). The growth of small fatigue cracks in a low carbon steel, the effect of microstructure and limitations of linear elastic fracture mechanics. *Fatigue and Fracture Eng. Materials Structures*, 9, No. 3, pp. 205-217.
3. Obrtlík, K., Polák, J., Hájek, M. & Vašek, A. (1997). Short fatigue crack behavior in 316L stainless steel. *Int. J. Fatigue*, 19, No. 6, pp. 471-475.
4. Jiša, D., Liškutin, P., Kruppl, T. & Polák, J. (2010). Small fatigue crack growth in aluminium EN–AW 6082/T6. *Int. J. Fatigue*, 32, No. 12, pp. 1913-1920.
5. Polák, J. & Zezulka, P. (2005). Short crack growth and fatigue life in austenitic-ferritic duplex stainless steel. *Fatigue and Fracture of Eng. Materials and Structures*, 28, No. 10, pp. 923-935.

6. Polák, J. (2005). Plastic strain–controlled short crack growth and fatigue life. *Int. J. Fatigue*, 27, No. 10/12, pp. 1192-1201.
7. Troshchenko, V. T. & Khamaza, L. A. (2014). Conditions for the transition from scattered to localized fatigue damage of metals and alloys. *Message 3. Determination of transition conditions on the basis of analysis of the kinetics of crack development. Probl. proch.*, No. 5, pp. 5-19 (in Russian).
8. Zhixue, W. (2001). Short fatigue crack parameters describing the lifetime of unnotched steel specimens. *Int. J. Fatigue*, 23, No. 4, pp. 363-69.
9. Goto, M. & Nisitani, Y. (1994). Fatigue life prediction of heat-treated carbon steels and low alloy steels based on a small crack growth. *Fatigue and Fracture of Eng. Materials and Structures*, 17, No. 2, pp. 171-185.
10. Polák, J. & Liškutín, P. (1990). Nucleation and short crack growth in fatigued polycrystalline copper. *Fatigue and Fracture of Eng. Materials and Structures*, 13, No. 2, pp. 119-133.
11. Polák, J. (2007). Mechanisms and kinetics of the early fatigue damage in crystalline materials. *Mater. Science and Engineering, A* 468-470, pp. 33-39.

Received 30.05.2018

В.Т. Трощенко, Л.А. Хамаза

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Київ
E-mail: lah3@ipp.kiev.ua

СТАДІЇ ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

Розроблено та обґрунтовано методи визначення умов переходу від розсіяного до локалізованого втомного пошкодження, засновані на аналізі закономірностей поширення “коротких” і “довгих” тріщин. З використанням розроблених методів визначені розміри тріщин і число циклів навантаження, що відповідають переходу від розсіяного до локалізованого втомного пошкодження вуглецевих, легованих, аустенітних сталей і алюмінієвого сплаву з урахуванням рівня напружень і властивостей досліджених матеріалів. Встановлено, що розміри втомних тріщин, що відповідають вказаному переходу при нарузі вище границі витривалості, зменшуються зі збільшенням напружень і залишаються меншими, ніж розміри тріщин на границі витривалості. Показано, що розміри магістральних тріщин корелюють з величиною границі витривалості досліджених матеріалів, зменшуючись зі збільшенням границі витривалості.

Ключові слова: границя витривалості, короткі і довгі втомні тріщини, розміри магістральних тріщин, розсіяне і локалізоване втомне пошкодження.

V.T. Troshchenko, L.A. Khamaza

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Kiev
E-mail: lah3@ipp.kiev.ua

STAGES OF FATIGUE FAILURE OF METALS AND ALLOYS

Methods for determining the conditions for the transition from a scattered to localized fatigue damage are developed and justified, based on the analysis of regularities of the propagation of “short” and “long” cracks. Using the developed methods, the crack sizes and the number of loading cycles corresponding to the transition from a scattered to localized fatigue damage in carbon, alloyed, and austenitic steels and an aluminum alloy are determined in view of the stress level and properties of the materials studied. It is established that the dimensions of the fatigue cracks corresponding to the indicated transition at stresses above the endurance limit decrease with increasing the stresses and remain smaller than the size of cracks at the limit of endurance. It is shown that the sizes of the main cracks correlate with the value of the endurance limit of the materials studied, by decreasing with an increase in the endurance limit.

Keywords: endurance limit, short and long fatigue cracks, sizes of main cracks, scattered and localized fatigue damages.