

Г.Х. Самигуллин, А.А. Лягова

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ ТРЕЩИНОПОДОБНЫХ ДЕФЕКТОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЯХ

Для совершенствования методов определения параметров трещиностойкости поставлена задача механических испытаний в условиях двухосного нагружения. Испытания проводились в условиях циклического двухосного нагружения образцов, изготовленных из стали марки Ст3. Для определения скорости роста трещины, оценки трещиностойкости и составления усталостной диаграммы выбраны образцы крестообразной формы. Использование диаграмм усталостного разрушения для прикладных инженерных задач затруднительно в силу их индивидуальности. Необходимо разработать экспериментальный и аналитический инструментарий, позволяющий описывать скорость роста усталостных трещин единой диаграммой усталостного разрушения. Проведение безразмерной нормировки позволяет сводить в одну линию диаграммы усталостного разрушения для различных условий и материалов. Полученная нормированная диаграмма представляет единую экспериментальную кривую, которая связывает между собой скорость роста трещины и коэффициент интенсивности напряжений (КИН) при различных условиях проведения циклических испытаний. Она описывает значения параметров трещиностойкости как одноосного, так и двухосного нагружения и позволяет на основе единичных экспериментальных данных по скорости роста трещины при двухосном нагружении получить характеристики циклической трещиностойкости элементов при любом сочетании внешних силовых воздействий.

Ключевые слова: трещиностойкость, металлические конструкции, двухосное нагружение, диаграмма, усталостное разрушение.

Общеизвестно, что трещины являются наиболее опасными дефектами в любых технических объектах из-за своей склонности к росту с последующим внезапным и лавинообразным характером разрушения. Наиболее важным параметром, характеризующим способность элемента конструкции противостоять разрушению такого рода является трещиностойкость, т.е. способность материала оказывать сопротивление образованию и росту трещин [2]. Достоверно определить данный

параметр можно только экспериментальным путем, проводя испытания с измерениями скорости роста трещин в специально подготовленных образцах при действии статических либо циклических нагрузок.

Анализ литературы [1], [8] показал, что получено большое количество частных закономерностей, описывающих скорость роста усталостной трещины в зависимости от параметров нагружения и свойств материалов и универсальной аналитической зависимости до настоящего момента не выявлено. Несмотря на такую ситуацию, в инженерной практике необходимо решать множество задач, связанных с эксплуатацией оборудования и сооружений, эксплуатируемых в условиях с высокой вероятностью образования трещин и трещиноподобных дефектов [5].

Результаты ранее проведенных исследований носят неоднозначный характер, например, исследования, авторов [11], [14] позволили установить, что скорость роста трещины при двухосном нагружении уменьшается по сравнению с одноосным растяжением.

Однако, другие экспериментальные исследования [12, 13] привели к противоположным результатам — влияние двухосного нагружения на скорость увеличения размеров трещины наблюдается на тонких стальных пластинах и было показано, что скорость роста трещины возрастает при увеличении значений нагрузки по обеим осям.

Исходя из представленных результатов можно констатировать отсутствие исчерпывающих сведений о том, каким образом двухосное (плоско-напряженное) состояние материала сказывается на скорости роста трещины в сравнении с одноосным напряженным состоянием. Таким образом, данная проблема может быть исследована только экспериментально, путем механического испытания образцов на циклические нагрузки в условиях двухосного нагружения, с применением специальных методик и приборного обеспечения [7]. Для экспериментального исследования трещиностойкости стальных образцов из малоуглеродистых сталей была использована машина VI-00-502 50kN Biaxial test system.

Условия проведения эксперимента. На основе проанализированных данных по практической реализации подобных экспериментальных исследований [3], [9] для определения скорости роста трещины в условиях циклического двухосного нагружения и оценки трещиностойкости были выбраны крестообразные образцы (рис. 1).

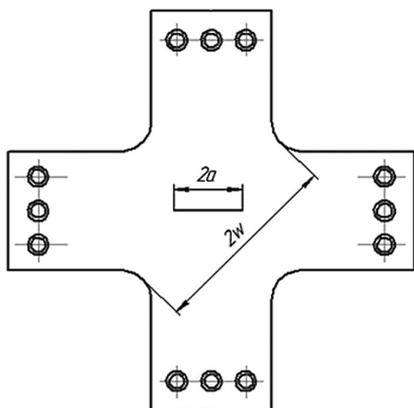


Рис. 1. Модель крестовидного образца с прямолинейной горизонтальной центральной трещиной

В качестве исследуемого материала была выбрана сталь Ст3, вследствие ее широкого применения для различных нефтегазовых объектов [4], [6].

Предварительно в центре данных образцов проводилась инициация и подращивание трещины как исходного концентратора напряжений 0,2 мм и длиной 20 мм. Испытательная нагрузка при проведении эксперимента определялась как отношение нагрузок P_x и P_y по осям X и Y соответственно, а так же использовался коэффициент двухосности η_1 —

отношение напряжений в образце (например, для равнодвухосного растяжения $\eta_1 = 1$).

По ходу проведения испытаний проводилось фиксирование величины нагрузки и изменения размеров трещины с точностью 0,04375 мм с помощью микроскопа МСБ-10, по результатам измерений была построена диаграмма усталостного разрушения в координатах ($da/dN, K_{max}$) (рис. 2.)

По результатам испытаний, представленных на диаграммах, можно сделать выводы о влиянии вида двухосной нагрузки на скорость роста трещины: наличие растягивающих усилий в плоскости, поперечной направлению роста трещины, приводит к

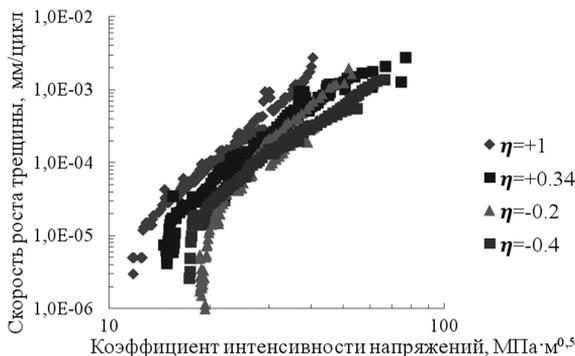


Рис. 2. Кинетические диаграммы усталостного разрушения крестообразных образцов

увеличению скорости ее роста вследствие увеличения раскрытия трещины. Изменение отношения двухосных нагрузок (снижение растягивающей силы) приводит к снижению скорости роста трещин.

Практическое использование диаграмм усталостного разрушения бывает затруднительным в силу их индивидуальности, поскольку их получают экспериментальным путем в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. Различающиеся условия проведения циклических испытаний, неидентичные нагрузки и размеры образцов приводят к получению разнородных диаграмм, что лишает их универсальности. Одним из методов использования параметров трещиностойкости, полученных в различных условиях, является проведение безразмерной нормировки [10], позволяющей сводить в одну линию диаграммы усталостного разрушения для различных условий. При этом точки на сводной диаграмме удовлетворительно укладываются в ограниченную область рассеяния. Нормирование значений диаграммы усталостного разрушения производится в безразмерных координатах ξ , χ , значения которых определяются по формулам:

$$\xi = 2 \frac{\lg(\Delta K_{\max} / \Delta K_s)}{\lg(\Delta K_{fc} / \Delta K_{th})}, \quad (1)$$

$$\chi = \lg(v / v_s) \quad (2)$$

где v_s – скорость роста усталостной трещины при

$\Delta K_s = \sqrt{\Delta K_{fc} \cdot \Delta K_{th}}$, ΔK_{\max} – значения КИН, соответствующие экспериментальным значениям скорости роста трещины.

Критическими значениями КИН ΔK_f при проведении нормировки были приняты значения, которые соответствуют наибольшим значениям КИН на диаграммах усталостного разрушения (рис. 2), полученных путем экспериментальных испытаний крестообразных образцов.

Полученная таким образом нормированная диаграмма усталостного разрушения показана на рис. 3. Полученная нормированная диаграмма представляет из себя единую экспериментальную кривую, которая связывает между собой скорость роста трещины и КИН при различных условиях проведения циклических испытаний.

Диаграмма описывает значения параметров трещиностойкости как одноосного, так и двухосного нагружения, т.е. обладает свойством универсальности. Значения критического и

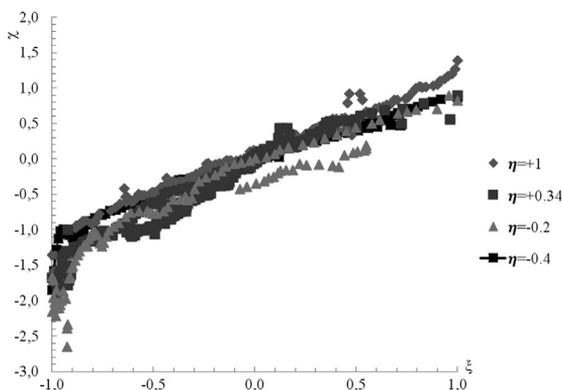


Рис. 3. Диаграмма усталостного разрушения в нормированных координатах

порогового КИН на нормированной диаграмме соответствуют областям с координатами $\zeta = +1, -1$, диапазон изменений КИН соответствует разности ординат точек $\chi_A - \chi_B = \lg(v_A / v_B) = 2,9$.

Данная диаграмма, приведенная в безразмерных координатах, позволяет на основе единичных экспериментальных данных по скорости роста трещины при двухосном нагружении с помощью обратного перехода к базовым координатам получить характеристики циклической трещиностойкости элементов металлических конструкций из стали Ст3 при любом сочетании внешних силовых воздействий.

Кроме того, нормированная диаграмма может быть использована для интерпретации результатов диагностирования при обнаружении усталостных трещин в металлоконструкциях из углеродистых сталей, эксплуатируемых в условиях воздействия знакопеременных циклических нагрузок (стенок резервуаров, металлических дымовых труб, опор под грузоподъемные механизмы, оборудование и технологические трубопроводы). Оценку степени опасности трещин, имеющей некоторый конечный размер, можно провести по следующему алгоритму:

1) Для крестообразных образцов Ст3 экспериментально определяются соответствующие показатели скорости роста трещины и коэффициентов интенсивности напряжений с максимальной имитацией условий эксплуатации, которые определяются коэффициентом двухосности η_1 .

2) По экспериментальным точкам строится кинетическая диаграмма усталостного разрушения в нормированных координатах, по диаграмме определяется местоположение точки с параметрами, соответствующими наблюдаемой реальной трещины.

3) При нахождении точки левее значения абсциссы с нулевым значением говорит о стабильности наблюдаемой трещины, по значению скорости роста которой может быть оценен ресурс конструкции до разрушения. В обратном случае, при нахождении точки в правой части диаграммы трещина будет являться нестабильной, возможно наступление лавинообразного роста скорости ее роста, что свидетельствует об отсутствии ресурса эксплуатации данной конструкции.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований была установлена зависимость скорости роста трещины от условий двухосного циклического нагружения – с увеличением коэффициента двухосности увеличивается скорость роста трещины.

Полученная диаграмма усталостного разрушения может быть переведена в нормированный вид, что позволяет объединить кинетические диаграммы разрушения с различными условиями циклических испытаний и по оценить степень опасности трещин и трещиноподобных дефектов в элементах металлических конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белозеров В. В., Кузеев И. Р., Наумкин Е. А. Оценка критического коэффициента интенсивности напряжений с помощью компактных образцов / Проблемы строительного комплекса России. Материалы X международной научно-технической конференции при X Международной специализированной выставке «Строительство. Коммунальное хозяйство-2006». – Уфа, 2006. – С. 165–166.

2. Болотин В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.

3. Герасименко А. А. Прогнозирование остаточного ресурса стальных вертикальных резервуаров по параметрам циклической трещиностойкости в условиях двухосного нагружения: Дис. ... кан. техн. наук. – СПб.: НМСУ «Горный», 2014. – 160 с.

4. Кондрашова О. Г., Назарова М. Н. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров // Электронный журнал «Нефтегазовое дело». – 2004. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Kondrashova/Kondrashova_1.pdf (дата обращения: 23.11.15).

5. Кузеев И. Р., Баязитов М. И., Сельский Б. Е., Газиев Р. Р. Трещиностойкость циклически нагруженной стали 16ГС / Техническая диагностика, промышленная и экологическая безопасность. – Уфа, 1996. – С. 100–105.

6. Мустафин Ф. М., Жданов Р. А., Каравайченко М. Г. и др. Резервуары для нефти и нефтепродуктов. Т. 1. Конструкция и оборудование: учебник для вузов. – СПб.: Недра, 2010. – 480 с.

7. Самигуллин Г. Х., Герасименко А. А. Определение коэффициента интенсивности напряжений для резервуара РВС 10 000 м³ // Пробле-

мы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 1. – С. 102–111.

8. Школьник Л. М. Методика усталостных испытаний. Справочник. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.

9. Шлянников В. Н., Захаров А. П. Образцы для испытаний при двухосном циклическом нагружении // Труды Академэнерго. – 2013. – № 3. – С. 70–79.

10. Ярема С. Я. О корреляции параметров уравнения Пэриса и характеристиках циклической трещиностойкости материалов // Проблемы прочности. – 1981. – № 9. – С. 20–28.

11. Braude N. Z., Shkanov I. N., Galeeva F. U. Predicting the rate of fatigue crack growth in biaxial low-cycle loading // Plenum publishing corporation. – 1992. – P. 503–510.

12. Ito Y., Shimamoto A. Fatigue crack propagation of magnesium alloy in biaxial stress fields // Mechanical Engineering – 2005. V. 5769. – I. 1. – P. 89–100.

13. Lee E. U., Taylor R. E. Fatigue behavior of aluminum alloys under biaxial loading // Engineering Fracture Mechanics. – 2011. Vol. 78 (8). – P. 555–1564.

14. Sunder R., Ilchenko B. V. Fatigue crack growth under flight spectrum loading with superposed biaxial loading due to fuselage cabin pressure // International journal of fracture. – 2011. – Vol. 33 (8). – P. 1101–1110. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Самигуллин Гафур Халафович – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой, e-mail: samgafur@gmail.com,

Лягова Анастасия Андреевна – кандидат технических наук, ассистент кафедры,

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный».

UDC 621.642

G.Kh. Samigullin, A.A. Lyagova

METHODS RISK ASSESSMENT CRACK-LIKE DEFECTS IN THE METAL STRUCTURES

Cracks are the most dangerous defects because of its tendency to increase, followed by an avalanche of destruction. The parameter which characterizes the ability of the structural member to resist the destruction of this kind is a crack. There are a significant number of dependencies crack growth rate on the mechanical properties of the material and loading parameters. However, a universal analytic dependence, reflecting the peculiarities of fatigue failure for a variety of materials and allowing to predict this process has not yet been found.

For further improvement of test methods in the evaluation of the parameters of fracture toughness, it has been tasked to implement them under biaxial loading, as real metal structures operate in complex stress state. Tests were conducted under biaxial loading of samples using the testing machine. As the test material was selected steel St3. To determine the rate of crack growth under cyclic biaxial loading and evaluation of fracture toughness were selected cross-shaped patterns.

Practical use of diagrams of fatigue failure for applied engineering problems is difficult because of their personality. There is an urgent need to develop experimental and analytical tools, allowing to describe the rate of fatigue crack growth of fatigue failure of a single

diagram. Carrying dimensionless normalization allows us to reduce to a single line diagram of fatigue failure for a variety of conditions and materials.

The obtained normalized chart represents a single experimental curve, which connects the rate of crack growth and stress intensity factor under various conditions of cyclical testing. The diagram describes the values of fracture toughness both uniaxial and biaxial loading, and has the property of universality. This diagram allows on the basis of individual experimental data on crack growth rate under biaxial loading characteristics to obtain cyclic crack resistance elements in any combination of external force.

Key words: crack, metal structures, biaxial loading, chart, fatigue failure.

AUTHORS

*Samigullin G. Kh.*¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Head of Chair, e-mail: samgafur@gmail.com,

*Lyagova A. A.*¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant of Chair,

¹ National Mineral Resource University «University of Mines», 199106, Saint-Petersburg, Russia.

REFERENCES

1. Belozеров V. V., Kuzeev I. R., Naumkin E. A. *Problemy stroitel'nogo kompleksa Rossii. Materialy X mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii pri X Mezhdunarodnoy spetsializirovannoy vystavke «Stroitel'stvo. Kommunal'noe khozyaystvo-2006»* (The problems of the construction complex of Russia. Materials of the X international scientific and technical conference during the X International specialized exhibition «Construction. Utilities-2006»). Ufa, 2006, pp. 165–166.

2. Bolotin V. V. *Prognozirovanie resursa mashin i konstruktsey* (Forecasting of resource of machines and constructions), Moscow, Mashinostroenie, 1984, 312 p.

3. Gerasimenko A. A. *Prognozirovanie ostatochnogo resursa stal'nykh vertikal'nykh rezervuarov po parametram tsiklicheskoy treshchinostoykosti v usloviyakh dvukhosnogo nagruzheniya* (Forecasting residual life of steel vertical tanks in the parameters of cyclic crack resistance under biaxial loading), Candidate's thesis, Saint-Petersburg, NMSU «Gornyy», 2014, 160 p.

4. Kondrashova O. G., Nazarova M. N. *Elektronnyy zhurnal «Neftegazovoe delo»*, 2004, available at: http://www.ogbus.ru/authors/Kondrashova/Kondrashova_1.pdf (accessed 23.11.15).

5. Kuzeev I. R., Bayazitov M. I., Sel'skiy B. E., Gaziev R. R. *Tekhnicheskaya diagnostika, promyshlennaya i ekologicheskaya bezopasnost'* (Technical diagnostics, industrial and environmental safety), Ufa, 1996, pp. 100–105.

6. Mustafin F. M., Zhdanov R. A., Karavaychenko M. G. *Rezervuary dlya nefiti i nefteproduktov*. T. 1. Konstruktsiya i oborudovanie: uchebnik dlya vuzov (Tanks for oil and oil products: vol. 1. Construction and equipment: textbook for universities), Saint-Petersburg, Nedra, 2010, 480 p.

7. Samigullin G. Kh., Gerasimenko A. A. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefiti i nefteproduktov*, 2014, no 1, pp. 102–111.

8. Shkol'nik L. M. *Metodika ustalostnykh ispytaniy*. Spravochnik (Methods of fatigue testing. Directory), Moscow, Metallurgiya, 1978, 304 p.

9. Shlyannikov V. N., Zakharov A. P. *Trudy Akademenergo*. 2013, no 3, pp. 70–79.

10. Yarema S. Ya. *Problemy prochnosti*. 1981, no 9, pp. 20–28.

11. Braude N. Z., Shkanov I. N., Galeeva F. U. Predicting the rate of fatigue crack growth in biaxial low-cycle loading. *Plenum publishing corporation*. 1992. P. 503–510.

12. Ito Y, Shimamoto A. Fatigue crack propagation of magnesium alloy in biaxial stress fields. *Mechanical Engineering*. 2005. V. 5769. I. 1. P. 89–100.

13. Lee E. U., Taylor R. E. Fatigue behavior of aluminum alloys under biaxial loading. *Engineering Fracture Mechanics*. 2011. Vol. 78 (8). P. 555–1564.

14. Sunder R., Ilchenko B. V. Fatigue crack growth under flight spectrum loading with superposed biaxial loading due to fuselage cabin pressure. *International journal of fracture*. 2011. Vol. 33 (8). P. 1101–1110.