

УДК 539.43

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ИСТОРИИ НАГРУЖЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ПО ПАРАМЕТРАМ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ

© 2018 г.

Миронов А.А., Жуков А.Е.

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

miran56@mail.ru

Поступила в редакцию 20.11.2017

Рассмотрена проблема определения остаточного ресурса конструкций в условиях усталостного нагружения при отсутствии данных по параметрам действующих нагрузок. Для случая обнаружения в конструкции очагов усталостного разрушения показана возможность определения параметров нагружения, эквивалентных по повреждающему действию существующей истории нагружения. В качестве параметров эквивалентного нагружения принимаются амплитуда напряжения и число циклов нагружения. Для решения поставленной задачи используются модели образования и роста усталостных трещин в концентраторах напряжений. С использованием этих моделей строятся диаграммы связи числа циклов нагружения с амплитудой напряжения, удовлетворяющие размерам наблюдаемых усталостных трещин. Пересечение указанных диаграмм дает решение поставленной задачи. Приведены примеры определения неизвестных параметров нагружения в случае развития трещин усталости от дефектов сварных швов в виде внутренних пор и непроваров в корне шва.

Ключевые слова: ресурс, дефекты сварных швов, усталость, усталостная трещина.

Значительная часть объектов техносферы в процессе эксплуатации испытывает случайный характер нагружения. К таким объектам, прежде всего, относятся различные транспортные средства, объекты морской техники, гидроооружения. Априорная оценка ресурса конструкций таких объектов требует знания параметров случайных процессов нагружения и выполняется методами статистической механики [1–3]. В условиях эксплуатации для решения проблемы прогнозирования ресурса привлекаются как средства мониторинга нагруженности конструкций [4], так и непосредственно датчики накопления повреждений [5–8].

Ключевым моментом расчетной оценки ресурса является определение параметров нагружения конструкции. В настоящей статье в рамках проблемы оценки остаточного ресурса конструкций, решение которой осуществляется после проведения технического диагностирования, предлагается подход к определению параметров нагружения, эквивалентных по повреждающему действию существующей истории нагружения, представляющей собой неизвестный случайный процесс. Рассматри-

вается случай обнаружения очагов усталостного разрушения в сварных швах. Размеры обнаруженных при этом усталостных разрушений отражают в интегральной форме историю нагружения. В качестве параметров эквивалентного нагружения принимаются амплитуда напряжения и число циклов нагружения.

Решение поставленной задачи открывает возможность оценки остаточного ресурса конструкций, находящихся в идентичных условиях эксплуатации. Примером таких конструкций могут служить лопатки направляющего аппарата турбины ГЭС [9]. Для крупногабаритных конструкций переход от полученного уровня напряжений в области усталостного разрушения сварного шва к нагруженности произвольной области, для которой ставится задача определения ресурса, осуществляется на основе расчетной схемы конструкции. В качестве расчетной схемы эффективно использовать конечно-элементную модель конструкции.

С точки зрения расчета процесс усталостного разрушения от концентратора напряжений в виде дефекта сварного шва включает в себя две стадии – образование макротрещины и ее развитие до предельного состояния. По данным экспериментальных исследований [10, 11], стадия зарождения трещины является существенной для объемных дефектов в виде пор, включений и может не учитываться для плоскостных дефектов. Таким образом, в общем случае для решения поставленной задачи требуется разработка модели усталостного разрушения от дефектов сварных швов, объединяющей стадии образования и роста трещины.

Дефекты сварных швов характеризуются радиусом кривизны и теоретическим коэффициентом концентрации напряжений. Результаты многочисленных исследований, обзор которых приведен в статьях [12–14], показывают, что для концентраторов с малым радиусом кривизны в вершине необходим учет эффекта влияния на процесс усталостного разрушения градиента напряжений и деформаций. Из большого количества экспериментальных исследований, посвященных этому вопросу, выделим статьи [15–17], где для сплавов Д16Т, Д16ЧТ1 и стали 08кп в широком диапазоне изменения числа циклов до образования макротрещины, радиуса надреза, толщины образцов показано, что все многообразие кривых усталости материала сводится к единой кривой, если в качестве определяющего параметра использовать размах напряжения $\Delta\sigma_d$ на характерном расстоянии d от вершины концентратора, величина которого определяется экспериментально. Результаты наблюдения за процессом развития усталостного повреждения и образования макротрещины в концентраторе показали, что начальный размер образующейся макротрещины согласуется со значением параметра d .

В статье [18] предложена модель расчетного определения значения параметра d на основе использования результатов испытания материала на циклическую трещиностойкость. С учетом поправки Дж.Р. Ирвина на перераспределение напряжений в вершине трещины в результате пластического деформирования выражение для параметра d , определяемого как расстояние, на котором амплитуда напряжения достигает значения предела усталости σ_r при размахе коэффициента интенсивности напряжений (КИН), равном пороговому значению ΔK_{th} , принимает вид:

$$d = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{(1-r)\sigma_{0,2}} \right)^2 + \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{2\sigma_r} \right)^2. \quad (1)$$

Здесь r – коэффициент асимметрии цикла нагружения при испытании на циклическую трещиностойкость ($r \geq 0$).

Таким образом, расчетная модель первой стадии усталостного разрушения включает в себя определение параметра d по зависимости (1), расчет напряжений в области концентратора напряжений в упругой постановке на расстоянии d и определение числа циклов до образования макротрещины по кривой усталости материала. Начальная глубина макротрещины l_0 принимается равной величине d . Альтернативным подходом к определению начального размера трещины может служить модель [19], основанная на определении расстояния от концентратора, на котором достигается равенство скоростей разрушения материала по механизмам усталости и роста трещины.

Вторая стадия усталостного разрушения описывается скоростью роста трещины. При рассмотрении дефектов малых размеров принципиально важным является выбор для описания скорости роста трещины зависимости, содержащей пороговое значение КИН. Одной из таких зависимостей является полученное в [19] выражение, описывающее все три участка кинетической диаграммы усталостного разрушения:

$$v = \zeta_* \left[\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{K_{fc}^4 - (K_{\max}^2 - K_{th}^2)^2}{(K_{\max}^2 - K_{th}^2)^2 \cos^2 \pi r / 2} \right]^{-\alpha}, \quad (2)$$

где K_{fc} – циклическая вязкость разрушения, K_{\max} – максимальное в цикле нагружения значение КИН в точке фронта трещины; ζ_* , α – параметры циклической трещиностойкости материала.

В расчетной практике при описании развития несквозных дефектов используются модели внутренней эллиптической и поверхностной полуэллиптической трещин, характеризуемых размерами полуосей по глубине h и протяженности c , включающими начальные размеры концентратора и размер образовавшейся макротрещины. Отношение выражений для скоростей развития дефекта (2) по протяженности и глубине дает дифференциальное уравнение, позволяющее для заданных начальных размеров получить функциональную зависимость $c = c(h)$ [20].

Число циклов нагружения, соответствующее развитию дефекта от начальной глубины h_0 до обнаруженного размера h , определяется выражением:

$$n_p = \int_{h_0}^h \frac{1}{v(h, c(h))} dh.$$

Использование приведенных моделей образования и развития усталостного разрушения в концентраторе напряжений позволяет для размера обнаруженной трещины построить зависимость числа циклов нагружения от величины действующего напряжения. Искомые параметры нагружения в виде амплитуды напряжения и числа циклов нагружения, эквивалентные по повреждающему действию существующей истории нагружения, определяются пересечением указанных зависимостей, полученных для двух или более выявленных усталостных разрушений.

Результаты вычислительного эксперимента, выполненного для параметров материала, соответствующих стали 09Г2С, представлены на рис. 1. Рассмотрены случаи развития усталостного разрушения от внутренних объемных дефектов сварных швов в виде пор, результаты расчетов для которых представлены на рис. 1а, где кривая 1 соответствует сферической поре диаметром 3 мм и $h = 1,8$ мм, кривая 2 – вытянутой поре диаметром 1,2 мм и $h = 1,8$ мм, кривая 3 – вытянутой поре диаметром 1,6 мм и $h = 10$ мм. Результаты расчетов для плоскостных дефектов в виде

непроваров в корне шва представлены на рис. 1б, где кривая 1 соответствует непровару с $h_0 = 1,5$ мм, $c_0 = 25$ мм и $h = 3$ мм, кривая 2 – непровару с $h_0 = 2,5$ мм, $c_0 = 10$ мм и $h = 5,4$ мм, кривая 3 – непровару с $h_0 = 5$ мм, $c_0 = 10$ мм и $h = 10$ мм. Для плоскостных дефектов стадия образования макротрещины не учитывалась.

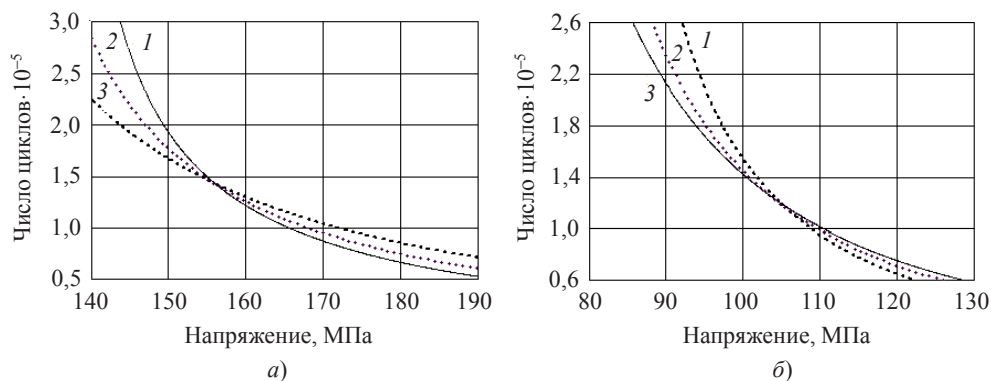


Рис. 1

Результаты расчетов показывают, что кривые зависимости числа циклов нагружения от амплитуды напряжения для различных дефектов имеют точку пересечения, которая определяет неизвестные параметры нагружения конструкции. Отсутствие точек пересечения кривых при варьировании размеров дефектов в ходе вычислительного эксперимента свидетельствует о невозможности реализации развития усталостных разрушений с заданными параметрами в одинаковых условиях нагружения. При обнаружении в конструкции более двух очагов усталостного разрушения следует ожидать на практике разброса точек пересечения кривых, что связано со стохастической природой усталости. В этом случае будут определены интервалы возможных значений числа циклов нагружения и амплитуды напряжения. Альтернативным вариантом в данной ситуации является использование в рамках предложенного подхода вероятностных моделей усталостного разрушения.

Зоны усталостного разрушения в рамках предложенного подхода могут рассматриваться как датчики повреждения, преимуществами которых являются их расположение в наиболее нагруженных зонах концентрации напряжений, возможность определения параметров нагружения конструкции и использование при дальнейших оценках остаточного ресурса тех же расчетных моделей, что и при анализе наблюдаемой поврежденности.

Дальнейшим развитием предложенного подхода могут служить его распространение на концентраторы произвольного вида и получение вероятностных оценок параметров нагружения конструкций с использованием стохастических моделей развития усталостного разрушения [21–23].

Список литературы

1. Болотин В.В. *Прогнозирование ресурса машин и конструкций*. М.: Машиностроение, 1984. 312 с.
2. Бойцов Г.В., Крыжевич Г.Б. *Вероятностные методы в расчетах прочности и надежности судовых конструкций*. СПб.: ЦНИИ им. А.Н. Крылова, 2007. 262 с.
3. Гусев А.С. *Вероятностные методы в механике машин и конструкций*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 224 с.

4. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. Eds. Ch. Boller, Fou-Kuo Chang, Yozo Fujino. John Wiley & Sons, 2009. 2960 p.
5. Копнов В.А., Тимашев С.А. *Датчики усталостного повреждения*. Екатеринбург: Наука (УрО), 1992. 87 с.
6. Сызранцев В.Н., Голофаст С.Л. *Измерение циклических деформаций и прогнозирование долговечности деталей по показаниям датчиков деформаций интегрального типа*. Новосибирск: Наука, 2004. 206 с.
7. Сызранцев В.Н., Сызранцева К.В. Определение напряжений и остаточного ресурса по показаниям датчика деформаций интегрального типа переменной чувствительности. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2017. Т. 328. № 9. С. 82–93.
8. Thursby G.J., Sorazu B.L., Betz D., Staszewski W., Culshaw B. The use of fibre optic sensors for damage detection and location in structural materials. *Applied Mechanics and Materials*. 2004. Vol. 1–2. P. 191–196.
9. Руденко А.Л., Миронов А.А., Мишакин В.В., Гончар А.В. Исследование развития дефектов лопаток направляющего аппарата ГЭС после длительной эксплуатации. *Труды Нижнегород. гос. техн. ун-та им. П.Е. Алексеева*. 2015. №1 (108). С. 169–176.
10. Куркин С.А. Модели развития разрушения от дефектов типа несплошностей при циклическом нагружении, основанные на методах механики разрушения. *Контроль. Диагностика*. 1998. №2. С. 17–20.
11. Smith I.F.C., Smith R.A. Defects and crack shape development in fillet welded joints. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 1982. Vol. 5. P. 151–165.
12. Трощенко В.Т. Усталость металлов при неоднородном напряженном состоянии. Сообщение 1. Методы оценки напряженного состояния и результаты исследования. *Проблемы прочности*. 2010. №2. С. 5–24.
13. Трощенко В.Т. Усталость металлов при неоднородном напряженном состоянии. Сообщение 2. Методы анализа результатов исследования. *Проблемы прочности*. 2010. №3. С. 5–28.
14. Трощенко В.Т. Усталость и неупругость металлов при неоднородном напряженном состоянии. *Проблемы прочности*. 2010. №5. С. 14–30.
15. Панасюк В.В. и др. Образец для исследования закономерностей зарождения трещин. *Физико-химическая механика материалов*. 1984. №4. С. 66–77.
16. Панасюк В.В., Остаф О.П., Костык Е.М. Зарождение усталостных трещин у концентраторов напряжений. *Физико-химическая механика материалов*. 1985. №6. С. 3–10.
17. Панасюк В.В. и др. Применение δ_k -модели для оценки периода зарождения усталостной трещины. *Физико-химическая механика материалов*. 1987. №1. С. 55–61.
18. Миронов А.А. Модель определения эффективного коэффициента концентрации напряжений дефектов сварных швов. *Труды Нижнегород. гос. техн. ун-та им. П.Е. Алексеева*. 2012. №1 (94). С. 169–176.
19. Волков В.М., Миронов А.А. Объединенная модель образования и роста усталостных трещин в концентраторах напряжений. *Проблемы прочности и пластичности*. 2005. Вып. 67. С. 20–25.
20. Варфоломеев И.В., Вайншток В.А., Красовский А.Я. Критерии и устойчивые формы роста несквозных трещин при циклическом нагружении. *Проблемы прочности*. 1990. №8. С. 3–10.
21. Миронов А.А., Волков В.М. Оценка надежности сварных соединений в условиях циклического нагружения по результатам неразрушающего контроля. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2011. №1. С. 38–42.
22. Волков В.М. Исследование остаточного ресурса и надежности тонкостенных конструкций в рамках принципа безопасного повреждения. *Проблемы прочности и пластичности*. 2014. Вып. 76. С. 70–75.
23. Миронов А.А. Анализ данных неразрушающего контроля с учетом их стохастичности. *Дефектоскопия*. 2015. №3. С. 45–50.

References

1. Bolotin V.V. *Prognozirovaniye resursa mashin i konstruktsiy* [Forecasting of Resource of Machines and Structures]. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1984. 312 p. (In Russian).
2. Boitsov G.V., Kryzhevich G.B. *Veroyatnostnyye metody v raschetakh prochnosti i nadezhnosti sudovykh konstruktsiy* [Probabilistic Methods in the Calculations of Strength and Reliability of Ship Structures]. SPb. TsNII im A.N. Krylova Publ. 2007. 262 p. (In Russian).
3. Gusev A.S. *Veroyatnostnyye metody v mekhanike mashin i konstruktsiy* [Probabilistic Methods in Mechanics of Machines and Structures]. Moscow. MGТУ im. N.E. Bauman Publ. 2009. 224 p. (In Russian).
4. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. Eds. Ch. Boller, Fou-Kuo Chang, Yozo Fujino. John Wiley & Sons. 2009. 2960 p.
5. Kopnov V.A., Timashev S.A. *Datchiki ustalostnogo povrezhdeniya* [Sensors Fatigue Damage]. Ekaterinburg. Nauka (Ural branch) Publ. 1992. 87 p. (In Russian).
6. Syzrantsev V.N., Golofast S.L. *Izmereniye tsiklicheskiykh deformatsiy i prognozirovaniye dolgovechnosti detaley po pokazaniyam datchikov deformatsiy integralnogo tipa* [Measurement of Cyclic Deformations and Forecasting of Durability of Details on Indications of Sensors of Deformations of Integral Type]. Novosibirsk. Nauka Publ. 2004. 206 p. (In Russian).
7. Syzrantsev V.N., Syzrantseva K.V. *Opreделение napryazheniy i ostatochnogo resursa po pokazaniyam datchika deformatsiy integralnogo tipa peremennoy chuvstvitelnosti* [Determination of stresses and residual life according to readings of strain gauge of integral type of variable sensitivity]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2017. Vol. 328. No 9. P. 82–93 (In Russian).
8. Thursby G.J., Sorazu B.L., Betz D., Staszewski W., Culshaw B. The use of fibre optic sensors for damage detection and location in structural materials. *Applied Mechanics and Materials*. 2004. Vol. 1–2. P. 191–196.
9. Rudenko A.L., Mironov A.A., Mishakin V.V., Gonchar A.V. *Issledovaniye razvitiya defektov lopatok napravlyayushchego apparata GES posle dlitel'noy ekspluatatsii* [Investigation of HPP guide blades defects development after a prolonged use]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva* [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2015. No 1 (108). P. 169–176 (In Russian).
10. Kurkin S.A. *Modeli razvitiya razrusheniya ot defektov tipa nesploshnostey pri tsiklicheskom nagruzenii, osnovannyye na metodakh mekhaniki razrusheniya* [Development models of fracture from defects, such as discontinuities in cyclic loading, based on the methods of fracture mechanics]. *Kontrol. Diagnostika* [Testing. Diagnostics]. 1998. No 2. P. 17–20.
11. Smith I.F.C., Smith R.A. Defects and crack shape development in fillet welded joints. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 1982. Vol. 5. P. 151–165.
12. Troshchenko V.T. Fatigue of metals under nonuniform stressed state. Part 1. Stressed state assessment methods and results of investigation. *Strength of Materials*. 2010. Vol. 42. Iss. 2. P. 123–149.
13. Troshchenko V.T. Fatigue of metals under nonuniform stressed state. Part 2. Methods of the analysis of research results. *Strength of Materials*. 2010. Vol. 42. Iss. 3. P. 241–257.
14. Troshchenko V.T. Fatigue and inelasticity of metals under nonuniform stressed state. *Strength of Materials*. 2010. Vol. 42. Iss. 5. P. 494–505.
15. Panasyuk V.V. et al. *Obrazets dlya issledovaniya zakonmernostey zarozhdeniya treshchin* [The sample for the study of the laws of crack nucleation]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov* [Journal of Materials Science]. 1984. No 4. P. 66–77 (In Russian).
16. Panasyuk V.V., Ostash O.P., Kostyk E.M. *Zarozhdeniye ustalostnykh treshchin u kontsentratorov napryazheniy* [Nucleation of fatigue cracks from stress raisers]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov* [Journal of Materials Science]. 1985. No 6. P. 3–10 (In Russian).
17. Panasyuk V.V. et al. *Primeneniye δ_k -modeli dlya otsenki perioda zarozhdeniya ustalostnoy treshchiny* [The use of models δ_k to assess the period of origin of fatigue cracks]. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov* [Journal of Materials Science]. 1987. No 1. P. 55–61 (In Russian).
18. Mironov A.A. *Model opredeleniya effektivnogo koeffitsienta kontsentratsii napryazheniy*

defektov svarnykh shvov [A model for determining the fatigue-strength reduction factor of defects in welds joints]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva* [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2012. No 1 (94). P. 169–176 (In Russian).

19. Volkov V.M., Mironov A.A. Obedinennaya model' obrazovaniya i rosta ustalostnykh treshchin v kontsentratorakh napryazheniy [Unified model of fatigue crack formation and growth in stress concentrations]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2005. Iss. 67. P. 20–25 (In Russian).

20. Varfolomeev I.V., Vainshtok V.A., Krasovskii A.Ya. The criteria and stable form of non-through crack growth during cyclic loading. Report 1. *Strength of Materials*. 1990. Vol. 22. Iss. 8. P. 1107–1116.

21. Mironov A.A., Volkov V.M. How to estimate the reliability of a weld joint under conditions of cyclic loading according to the results of a nondestructive check. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2011. Vol. 40. No 1. P. 31–34.

22. Volkov V.M. Issledovanie ostatochnogo resursa i nadezhnosti tonkostennykh konstruksiy v ramkakh printsipa bezopasnogo povrezhdeniya [The study of the residual life and reliability of thin-walled structures in terms of the principle of safe damage]. *Problemy prochnosti i plastichnosti* [Problems of Strength and Plasticity]. 2014. Vol. 76. No 1. P. 70–75 (In Russian).

23. Mironov A.A. An analysis of nondestructive testing data with consideration for their stochasticity. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015. Vol 51. Iss. 3. P. 166–170.

DETERMINING THE EQUIVALENT LOADING HISTORY OF STRUCTURES BASED ON THE FATIGUE FAILURE PARAMETERS

Mironov A.A., Zhukov A.E.

*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

The problem of determining residual life of structures under fatigue loading in the absence of data on the parameters of the effective loads is considered. It is shown that, in the case when fatigue failure zones are detected in the structure, it is possible to determine loading parameters that are equivalent in their damaging effect according to the real loading history. Stress amplitude and number of loading cycles are taken as parameters of equivalent loading. To solve this problem, models of the nucleation and growth of fatigue cracks in stress concentrators are used. Based on these models, diagrams correlating the number of loading cycles and stress amplitude, adequate to the dimensions of the observed fatigue cracks, are constructed. The intersection of the diagrams corresponds to the solution of the problem in question. Examples of determining unknown loading parameters for the case of fatigue cracks developing from defects of welded seams in the form of internal pores and cold welds in the root of the seam are given.

Keywords: resource, defects of welded joints, fatigue, fatigue crack.