

## Влияние двухосного нагружения на характеристики трещиностойкости стали 12Cr–2Ni–Mo

В. В. Покровский, В. Н. Ежов, В. Г. Сидяченко

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

*Разработана методика оценки значений коэффициента интенсивности напряжений в крестообразном образце с трещиной, учитывающая схему нагружения и форму образца. Показано, как двухосное нагружение влияет на скорость роста трещин усталости в жаропрочном хромоникелевом сплаве.*

**Ключевые слова:** скорость роста трещины, двухосное нагружение, коэффициент интенсивности напряжений.

Развитие современных газотурбинных двигателей (ГТД) неразрывно связано с повышением рабочих температур, статических и циклических нагрузок, времени эксплуатации, а также уменьшением материалоемкости и материальных затрат. С учетом этого проектировщикам необходимо решать вопросы продления ресурса после отработки двигателем назначенного, т.е. оценивать остаточный ресурс по техническому состоянию.

Наиболее нагруженными и ответственными элементами двигателя являются диски компрессора и турбины, разрушение которых не локализуется внутри двигателя, что может привести к катастрофам. Для достоверной оценки критических размеров трещин в полотне диска ГТД необходимо учитывать особенности нагружения материала, в частности, наличие радиальных и окружных напряжений.

В нормативных документах [1, 2] регламентированы методы определения значений коэффициента интенсивности напряжений (КИН) и скорости роста трещины (СРТ) при циклическом нагружении в образцах различной формы с трещиной при разных схемах нагружения. Там же указано, что прикладываемая нагрузка должна быть перпендикулярна к плоскости трещины.

До настоящего времени не существует общепринятых нормативных документов для оценки влияния степени двухосного нагружения при определении КИН и СРТ при статическом и циклическом нагружении.

Основоположники классической механики разрушения [3–5] использовали асимптотическое поле упругих напряжений вблизи вершины трещины, и предельное состояние оценивали коэффициентом интенсивности напряжений. Авторы работ [3–5] пришли к выводу, что однородные напряжения, действующие вдоль плоскости трещины, не влияют на значения КИН. Однако при дальнейших многочисленных экспериментальных [6–8] и теоретических [9–11 и др.] исследованиях установлена зависимость характеристик разрушения от формы и геометрии образца, а также схемы нагружения.

При изучении закономерностей разрушения металлических материалов при сложном напряженном состоянии используются трубчатые, сферические, мембранные, плоские и т.п. образцы, в которых формируется поле одно-

родных напряжений. Однако в этом случае плосконапряженное состояние искажается из-за появления градиента напряжений по толщине образца. Для моделирования напряженно-деформированного состояния, возникающего в диске ГТД, наиболее подходят плоские крестообразные образцы, нагружение которых позволяет имитировать двухосное нагружение [12]. Образцы для исследований были разработаны и изготовлены по рекомендациям работ [13–15 и др.] (рис. 1). Для обеспечения разрушения в рабочей части образца и достижения поля однородных напряжений его размеры, радиусы сопряжений, наличие ряда сквозных параллельных прорезей в хвостовике принимались согласно [13–15] максимальными.



Рис. 1. Образец для исследований при двухосном нагружении.

При оценке напряженно-деформированного состояния рабочего поля решалась двумерная линейно-упругая задача с помощью конечноэлементного (КЭ) программного комплекса ANSYS [16], результаты расчетов представлены на рис. 2. Там же приведены размеры и конфигурация полей однородных напряжений в зависимости от степени двухосного нагружения, приложенного к хвостовикам образца по осям  $x$  и  $y$ :  $\lambda_{xy} = \sigma_x / \sigma_y$ . Расчеты выполнены при условии неоднородности напряжений в рабочем поле с допуском не более 5%.

Для учета особенностей формы образца были выполнены расчеты, свидетельствующие о том, что напряжения при упругих деформациях определяются по формулам

$$\sigma_2 = \beta \sigma_x + \alpha \sigma_y; \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \alpha \sigma_x + \beta \sigma_y, \quad (2)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – тарировочные коэффициенты, учитывающие особенности формы образца,  $\alpha = -0,177$ ,  $\beta = 1,182$ ;  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  – напряжения, приложенные к торцам хвостовиков;  $\sigma_2$ ,  $\sigma_1$  – истинные напряжения в поле однородных напряжений по осям  $x$  и  $y$  соответственно.

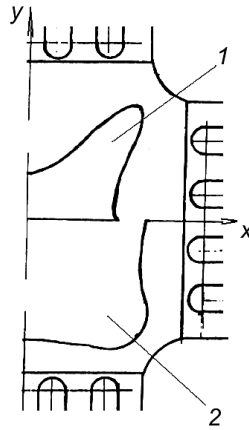


Рис. 2. Конфигурация полей однородных напряжений в рабочей части образца с допуском 5%: 1 –  $\lambda = 0$ ; 2 –  $\lambda = 1$ .

Действительные значения степени двухосного нагружения определяются так:

$$\lambda = \sigma_2 / \sigma_1. \quad (3)$$

На рис. 3 представлены расчеты действительных значений  $\lambda$  в зависимости от отношения прикладываемых внешних напряжений  $\lambda_{xy} = \sigma_x / \sigma_y$ .

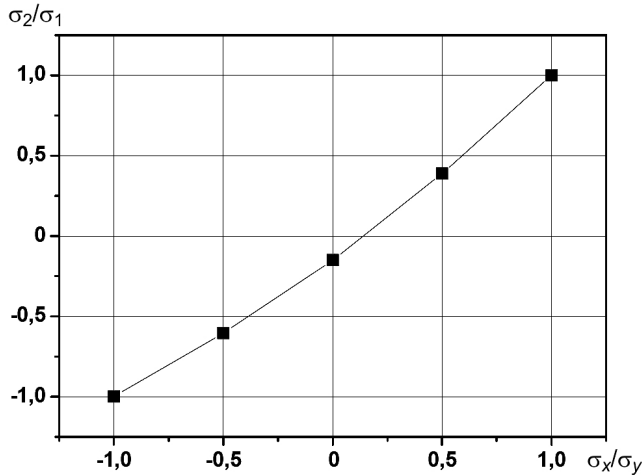


Рис. 3. Зависимость степени двухосного нагружения  $\sigma_2 / \sigma_1$  от отношения прикладываемых внешних напряжений к хвостовикам образца  $\sigma_x / \sigma_y$ .

Для определения значений КИН у фронта трещины в крестообразном образце с помощью КЭ-модели решалась двумерная линейно-упругая задача, что позволило оценить коэффициенты аппроксимирующих полиномов четвертой степени тарировочных функций  $F_x$  и  $F_y$  и представить  $K_I$  в виде зависимости от прикладываемых напряжений  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  и полудлины трещины  $l$ :

$$K_I = \sigma_x \sqrt{\pi l} F_x + \sigma_y \sqrt{\pi l} F_y; \quad (4)$$

$$F_x = -0,177 + 0,1224(2l/w) - 0,781(2l/w)^2 + 1,8132(2l/w)^3 - 1,2038(2l/w)^4; \quad (5)$$

$$F_y = +1,182 + 0,0005(2l/w) + 1,547(2l/w)^2 - 2,063(2l/w)^3 + 1,648(2l/w)^4, \quad (6)$$

где  $F_x$ ,  $F_y$  – тарировочные функции, учитывающие геометрию образца, длину трещины по компонентам нагружения;  $2l$  – длина трещины;  $w$  – ширина рабочего поля образца.

Из формулы (4) при  $\lambda_{xy} = 0$  следует

$$K_I = \sigma_y \sqrt{\pi l} F_y, \quad (7)$$

при  $\lambda_{xy} = 1 -$

$$K_I = \sigma_y \sqrt{\pi l} (F_y + F_x), \quad (8)$$

при  $\lambda_{xy} = -1 -$

$$K_I = \sigma_y \sqrt{\pi l} (F_y - F_x) \quad (9)$$

с учетом того, что сжимающие напряжения принимают отрицательные значения.

На рис. 4 представлены суммарные тарировочные функции, полученные по формулам (7)–(9), при различных значениях  $\lambda_{xy}$ . Там же в качестве сравнения приведена тарировочная функция для полосы конечной ширины с центральной трещиной [1].

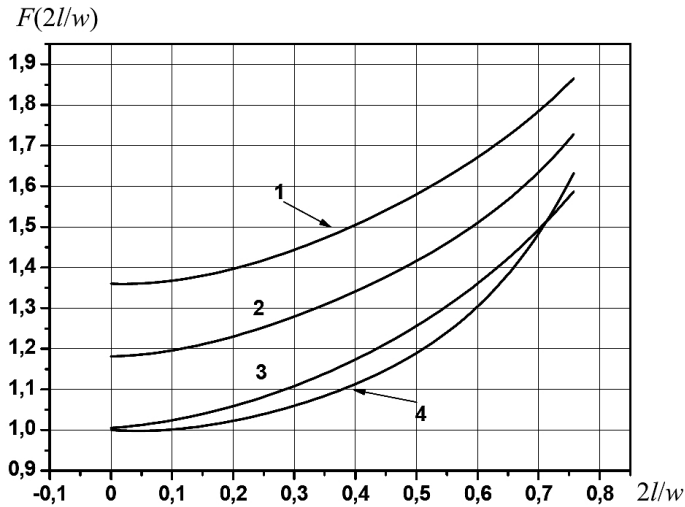


Рис. 4. Зависимость тарировочных функций от относительной длины трещины при различной степени двухосного нагружения: 1 –  $\lambda_{xy} = -1$ ; 2 –  $\lambda_{xy} = 0$ ; 3 –  $\lambda_{xy} = 1$ ; 4 – данные работы [1].

В Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины на базе сервогидравлической одноосной установки УЭ-50 был разработан испытательный комплекс для исследований при двухосном нагружении. Были спроектированы и изготовлены второй (горизонтальный) канал нагружения,

управляющий стенд с использованием ПК, что позволяет исследовать образцы в широком диапазоне изменения степени двухосности (от  $-\infty$  до  $+\infty$ ) при статическом и циклическом фазном и протифазном нагружении и температурах от  $-100$  до  $1000^\circ\text{C}$ .

Размеры образца и его рабочего поля определяются возможностями испытательного оборудования и измерениями модельного диска [12].

В качестве модельного материала для исследований выбрана жаропрочная мартенситная сталь типа 12Cr–2Ni–Mo, механические свойства которой представлены ранее [12].

Перед началом исследований СРТ в центре рабочего поля образца из концентратора размером  $10 \times 0,5$  мм, созданного электроискровым способом, выращивалась при одноосном нагружении исходная усталостная трещина размером до 15 мм.

При сжатии образца в горизонтальном направлении для исключения потери устойчивости проводились расчетные оценки критических сжимающих усилий по методике, описанной в работе [17]. При выбранных размерах образца (рис. 1) они составляли 179 кН, при исследовании СРТ при  $\lambda = -1$  не превышали 82 кН.

Скорость роста трещины при значениях  $\lambda = -1, 0, 1$  исследовали при циклическом нагружении с частотой 1,25 Гц, температуре  $20^\circ\text{C}$  и асимметрии цикла 0,1 при всех уровнях нагрузки.

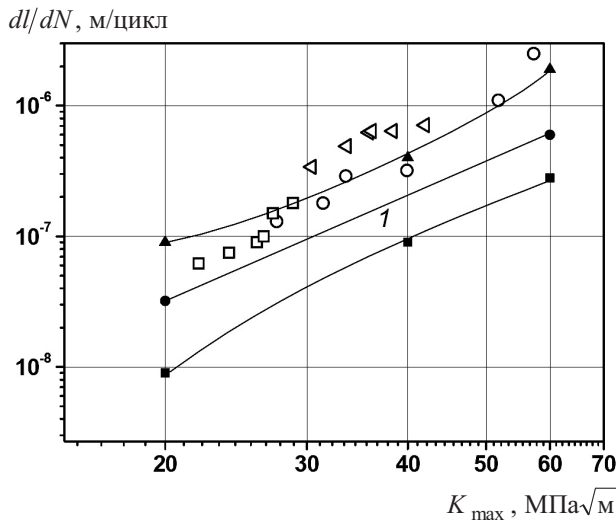


Рис. 5. Зависимость СРТ  $dl/dN$  от значений  $K_{\max}$ , рассчитанных по формуле (10): □ –  $\lambda_{xy} = 1$ ; ○ –  $\lambda_{xy} = 0$ ; ◁ –  $\lambda_{xy} = -1$ . (Здесь и на рис. 6: 1, темные точки – усредненные значения СРТ, полученные на образцах СТ [12].)

На рис. 5 представлена зависимость скорости роста трещины от КИН, где  $K_{\max}$  определяется по рекомендациям работ [1, 18] в полосе ограниченной ширины с центральной сквозной трещиной по формуле

$$K_{\max} = \sigma \sqrt{\pi l \sec(\pi l/w)}. \quad (10)$$

Такое упрощенное определение  $K_{\max}$  по формуле (10) для крестообразного образца с трещиной позволило наглядно отобразить влияние двухосного нагружения на СРТ. Так, при изменении  $\lambda$  от 1 до  $-1$  СРТ возрастает примерно в три раза во всем диапазоне изменения КИН. На рис. 5 приведены также результаты исследований работы [12] с оценкой верхней и нижней границы интервала с доверительной вероятностью 90%.

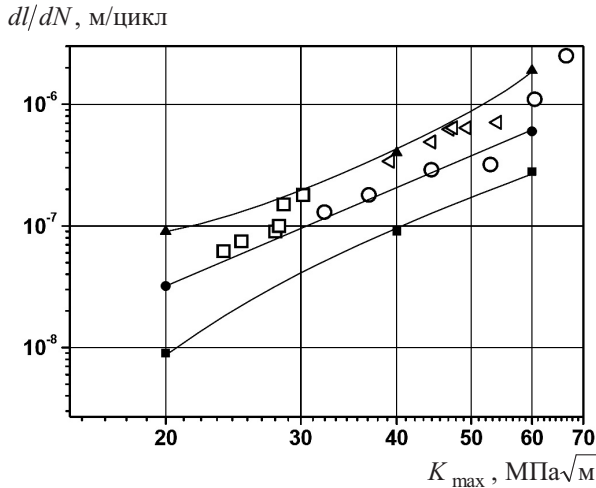


Рис. 6. Зависимость СРТ  $dl/dN$  от значений  $K_{\max}$ , рассчитанных по формулам (4)–(6):  $\square$  –  $\lambda_{xy} = 1$ ;  $\circ$  –  $\lambda_{xy} = 0$ ;  $\triangleleft$  –  $\lambda_{xy} = -1$ .

На рис. 6 представлены те же результаты, что и на рис. 5, но значения параметра  $K_{\max}$  определялись по формулам (4)–(6) с учетом особенностей формы образца и схемы нагружения. Как видно, результаты удовлетворительно попадают в 90%-ный доверительный интервал, при изменении  $\lambda$  от 1 до  $-1$  СРТ возрастает примерно в два раза.

## Выводы

1. Показана мера влияния степени двухосного нагружения  $\lambda$  на СРТ при циклическом нагружении. Так, изменение  $\lambda$  от 1 до  $-1$  увеличивает СРТ примерно в два раза.
2. Во всем диапазоне изменения прикладываемых нагрузок ( $-1 < \lambda < 1$ ) трещина распространяется по нормали к  $\sigma_y$ .
3. Показано, что результаты исследований, обработанные по предложенной методике, удовлетворительно согласуются с данными работы [12] и попадают в доверительный интервал с вероятностью 90%.
4. Зависимость (4) позволяет определить текущие значения КИН во всем диапазоне изменения промежуточных значений степени двухосного нагружения.

## Резюме

Розроблено методику оцінки значень коефіцієнта інтенсивності напружень у хрестоподібному зразку з тріщиною з урахуванням схеми навантаження і

форми зразка. Показано, як двовісне навантаження впливає на швидкість росту тріщин у жароміцному хромонікелевому сплаві за циклічного навантаження.

1. *РД 50-345–82*. Расчет и испытание на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. Методические указания. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 96 с.
2. *ASTM E 1820-01*. Standard Test for Measurement of Fracture Toughness. – Annual Book of ASTM Standards. – 1999.
3. *Griffith A. A.* The phenomena of rupture and flow in solids // *Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A.* – 1921. – **221**, No. 1. – P. 163 – 198.
4. *Irwin G. R.* Analysis of stresses and strain near end of a crack traversing a plate // *J. Appl. Mech.* – 1957. – **24**, No. 3. – P. 361 – 364.
5. *Orowan E.* Fracture and strength of solids // *Rep. Prog. Phys.* – 1949. – **12**. – P. 185 – 232.
6. *Штаюра С., Мольков Ю., Вергун І.* Оцінка водневої деградації конструкційних матеріалів за двовісного навантаження // *Машинознавство.* – 2008. – № 2 (128). – С. 44 – 47.
7. *Tchankov D., Sakane M., Itoh T., and Hamada N.* Crack opening displacement approach to assess multiaxial low cycle fatigue // *Int. J. Fatigue.* – 2008. – **30**, No. 3. – P. 417 – 425.
8. *Pei H. X., Miller K. J., and Brown M. W.* Fatigue crack propagation under complex biaxial stress cycling // *Biaxial and Multiaxial Fatigue, EGF3* (Eds. by M. W. Brown and K. J. Miller). – London: Mechanical Engineering Publications, 1989. – P. 587 – 603.
9. *Каминский А. А.* Неклассические проблемы механики разрушения. В 4 т. / Под. общ. ред. А. Н. Гузя. – Киев: Наук. думка, 1990. – Т. 1. – 312 с.
10. *Партон В. З., Морозов Е. М.* Механика упругопластического разрушения. – М.: Наука, 1985. – 504 с.
11. *Kfouri A. P.* Elastic-plastic FEM analyses of plates with central holes and cracks under biaxial loading // *Biaxial and Multiaxial Fatigue, EGF3* (Eds. by M. W. Brown and K. J. Miller). – London: Mechanical Engineering Publications, 1989. – P. 25 – 51.
12. *Покровский В. В., Ежов В. Н., Сидяченко В. Г. и др.* Результаты исследования характеристик трещиностойкости стали 12Cr–2Ni–Mo // *Пробл. прочности.* – 2012. – № 1. – С. 82 – 88.
13. *Monch E. and Galster D.* A method for producing a defined uniform biaxial tensile stress field // *Brit. J. Appl. Phys.* – 1963. – **14**, No. 11. – P. 810 – 812.
14. *Лебедев А. А., Музыка Н. Р.* Методы испытаний и механика разрушения листовых материалов при двухосном растяжении. – Луцк: Надстырьє, 2004. – 216 с.
15. *Писаренко Г. С., Науменко В. П., Онищенко Е. Е.* Методика исследования разрушения листовых материалов при двухосном нагружении // *Пробл. прочности.* – 1982. – № 3. – С. 3 – 9.

16. *Каплун А. Б., Морозов Е. М., Олферьева М. А.* ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
17. *Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.* Справочник по сопротивлению материалов / Под ред. Г. С. Писаренко. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
18. *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений.* В 2 т. Т. 1 / Пер. с англ. под ред. Ю. Мураками. – М.: Мир, 1990. – 448 с.

Поступила 11. 06. 2012