

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.191.33:620.171.5

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ДЛЯ НАКЛОННЫХ ПОЛУЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН¹

© Н. А. Махутов, И. В. Макаренко, Л. В. Макаренко²*Статья поступила 8 декабря 2015 г.*

Приведены данные исследования характеристик линейной и нелинейной механики разрушения численными методами расчета. Эти характеристики позволяют прогнозировать развитие поверхностных исследуемых трещин вплоть до выхода на поверхность детали. Кроме того, они дают возможность уточнить оценку живучести и прочности элементов ответственного оборудования с учетом кинетики локальных процессов разрушения по контуру поверхностных разноориентированных полуэллиптических трещин с учетом локальной объемности напряженного состояния и их относительной глубины.

Ключевые слова: относительный коэффициент интенсивности деформаций; наклонные полуэллиптические малоцикловые трещины; упругие и упругопластические деформации; объемность напряженно-деформированного состояния; живучесть и прочность элементов конструкций.

Цель работы — исследование характеристик линейной и нелинейной механики разрушения численными методами расчета.

Для поставленной задачи на основе программного комплекса ANSYS создан специальный макрос, позволяющий проводить расчеты параметров механики разрушения при различных относительных размерах и ориентации исследуемых трещин вплоть до сквозных как с линейными, так и нелинейными граничными условиями.

Результаты исследования позволили дать уточненную оценку живучести и прочности элементов ответственного оборудования с учетом кинетики локальных процессов разрушения по контуру поверхностных разноориентированных полуэллиптических трещин с учетом локальной объемности напряженного состояния.

Полученные значения коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) и коэффициентов интенсивности деформаций (КИД) по контуру исследуемых трещин в зависимости от их геометрии и объемности номинального и локального напряженно-деформированного состояния согласуются с результатами решений методами интегральных преобразований Меле-

ра – Фока, М. Isida, F. Erdogan, G. P. Sendekyj и асимптотических аппроксимаций J. L. Swedlow, J. S. Raju, J. C. Newman, а также с расчетно-экспериментальными данными [1 – 10]:

$$K_i = 2\sqrt{\frac{l_i}{\pi}} \int_0^l \frac{p_i(z_i) dz_i}{\sqrt{l_i^2 - z_i^2}}, \quad (1)$$

где K_i — КИН при $i = I, II, III$ соответственно для трещин нормального отрыва, поперечного и продольного сдвигов.

При решении задач теории упругости для тел с трещинами применяют широкий ряд методов.

Метод комплексных потенциалов в двумерных задачах теории упругости использует представления соответствующих функций комплексной переменной. Метод конформных отображений применяют при решении двумерных задач теории упругости как для ограниченной односвязной области с краевыми трещинами, так и для бесконечной плоскости. Решение смешанных задач методами интегральных преобразований приводит к дуальным интегральным уравнениям (интегральные преобразования Фурье, Мелера – Фока, Ханкеля, Конторовича – Лебедева и т.д.). Метод сингулярных интегральных уравнений (СИУ), при котором дуальные интегральные уравнения могут быть сведены к СИУ, используют при решении широкого

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-08-00839_А).

² Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия; e-mail: I.V.Makarenko@yandex.ru

класса задач с различными конфигурацией трещин и формой тела.

В некоторых случаях теории трещин применяют метод Винера – Хопфа, метод объемных (массовых) сил, альтернативный метод, предназначенный для областей, ограниченных несколькими контурами. Метод асимптотических аппроксимаций позволяет в некоторых задачах получить асимптотические разложения для КИН при малых значениях некоторых безразмерных параметров. Наиболее общим методом решения краевых задач сплошной среды является метод конечных элементов (МКЭ). Он состоит в разбиении тела на отдельные малые элементы (объемы), соединяемые между собой только в узловых точках. В итоге краевая задача сводится к определению неизвестных перемещений узлов из системы линейных алгебраических уравнений. Этот метод модифицируется при учете особенности решения в вершине трещины.

В общем случае математическая формулировка трехмерных статических задач теории упругости включает требуемый ряд гармонических функций на основе решения известных уравнений равновесия в смещениях. В отсутствие объемных сил уравнения имеют вид

$$(\lambda + \mu)\nabla\nabla \cdot \mathbf{U} + \mu\nabla^2\mathbf{U} = 0, \quad (2)$$

где $\mathbf{U}$ — вектор смещения; ∇ — оператор градиента; λ и μ — постоянные Ламе для изотропной среды. Тензор напряжения $\boldsymbol{\sigma}$ связан с вектором $\mathbf{U}$ следующим соотношением

$$\boldsymbol{\sigma} = \lambda(\nabla\mathbf{U})\mathbf{I} + \mu(\nabla\mathbf{U} + \mathbf{U}\nabla), \quad (3)$$

где $\mathbf{I}$ — изотропный тензор.

В результате исследования НДС вблизи развившихся поверхностей разрушения с помощью программного комплекса ANSYS [7] путем численных решений методом конечных элементов получены функциональные зависимости соответствующих параметров линейной и нелинейной механики разрушения от соответствующих относительных геометрических параметров трещин и элементов конструкции, механических свойств материала.

Уравнения начальной поверхности усталостной трещины и ее контура задают в векторной форме радиус-вектором

$$\mathbf{r}_0 = \mathbf{r}_0(\theta, \alpha). \quad (4)$$

Углы θ и α и другие параметры определяют положение точки контура трещины в соответствующей системе координат. Скорость роста усталостной трещины в направлении угла α (при $\alpha = \text{const}$)

$$\mathbf{v} = \partial\mathbf{r}/\partial N. \quad (5)$$

А. Е. Андрейкив в своих работах определяет кинетические уравнения роста макротрещины вдоль неко-

торой поверхности в трехмерном квазихрупком теле, подвергнутом циклическому нагружению, а также время (число циклов $N = N_q$), при котором трещина подрастает до критического размера и происходит разрушение. При этом из условия, что распространение усталостной трещины происходит в нормальной к подвижному контуру плоскости, получает уравнение

$$\frac{\partial\mathbf{r}}{\partial N} \mathbf{n}_b = \sin \chi_k, \quad (6)$$

где $\mathbf{n}_b$ — вектор бинормали к линии $N = \text{const}$; χ_k — угол между векторами $(\partial\mathbf{r}/\partial N)$ и $\mathbf{n}_0$.

В данной работе на базе экспериментальных [2] и численных результатов исследования проведен анализ влияния объемности номинального напряженно-деформированного состояния на кинетику развития исходных дефектов (разноориентированных поверхностных полуэллиптических трещин) $\tilde{V}^* = V_{b^*}/V_{a^*}$, где V_{b^*} , V_{a^*} — скорости роста трещины в направлении расчетных полуосей b^* и a^* соответственно от числа циклов нагружения:

$$\tilde{V}_i^* = \left(K_i, A_i, \frac{\sigma_{bi}}{\sigma_{ti}}, \frac{b^*}{t}, \frac{b^*}{a^*}, \mathbf{e}_{fi} \right). \quad (7)$$

Здесь t — толщина образца; σ_{bi} и σ_{ti} — локальные пределы прочности и текучести материала в i -й зоне; $\mathbf{e}_{fi} = \mathbf{e}_c D_e / I$ — относительная разрушающая деформация в локальной зоне трещины ($\mathbf{e}_c$ — относительная разрушающая местная деформация для гладкого образца; D_e — коэффициент снижения предельных пластических деформаций в зоне вершины трещины; I — коэффициент повышения первого главного напряжения в зоне вершины трещины за счет возникновения объемного напряженного состояния). Для рассматриваемого класса сталей параметры A_i — характеристики материала. Результаты расчета по уравнению (6) согласуются с экспериментальными данными, описанными уравнением (7).

Полученные численными методами расчета отношения коэффициентов интенсивности напряжений $K_{I\varphi}$ (как и коэффициентов интенсивности деформаций $K_{Ie\varphi}$) в самой глубокой точке полуэллиптической трещины ($\varphi = \pi/2$) и поверхностной точке трещины ($\varphi = 0$)

$$\tilde{K}_I^* = K_{I(\varphi=\pi/2)} / K_{I(\varphi=0)} \quad (8)$$

представлены функцией $\tilde{K}_I^* = f(b/t)$ на рис. 1; эти данные совпали с экспериментальными результатами.

С учетом экспериментальных и полученных численными методами расчета данных с помощью программного комплекса ANSYS зависимость $\tilde{K}_I^* = f(b/t)$ как в упругой, так и в упругопластической областях номинальных напряжений для разных исходных углов

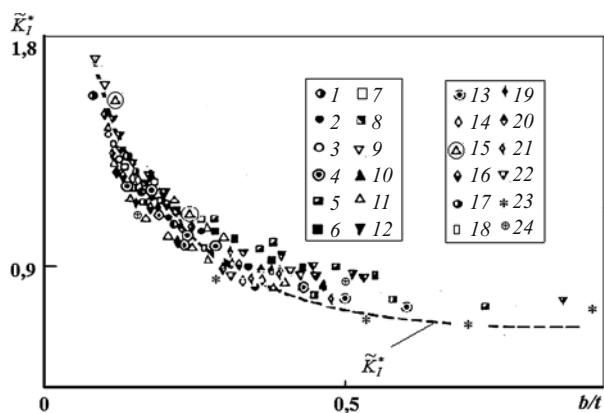


Рис. 1. Зависимости $\tilde{K}_I^*$ от относительной глубины трещины b/t для разных исходных углов β и уровней нагружений для стали 08X18H10T: 1–4 — $(\bar{\sigma}_n)_1 = \pm 1,04$; 5–8 — $(\bar{\sigma}_n)_2 = \pm 1,40$; 9–12 — $(\bar{\sigma}_n)_3 = \pm 1,90$; 1, 5, 9 — $\beta = \pi/2$; 2, 6, 10 — $\beta = 5\pi/12$; 3, 7, 11 — $\beta = \pi/3$; 4, 8, 12 — $\beta = \pi/4$ рад; для стали 12Х2МФА: 13–17 — $(\bar{\sigma}_n)_1 = \pm 1,000$; 18–22 — $(\bar{\sigma}_n)_2 = \pm 1,040$; 13, 18, 23 — $\beta = \pi/2$; 14, 19 — $\beta = 5\pi/12$; 15, 20 — $\beta = \pi/3$; 16, 21 — $\beta = \pi/4$; 17, 22 — $\beta = \pi/6$ рад; 23 — численные методы расчета; 24 — Newman J. C. [8]; $\tilde{K}_I^*$ — пунктирная линия описана уравнением (9)

наклона полуэллиптических поверхностных трещин можно описать следующей функцией:

$$\tilde{K}_I^* = d_1 (b/t)^{d_2}, \quad (9)$$

где $d_1 = 0,58$; $d_2 = -0,5$ при относительной глубине трещины до 95 %.

На рис. 2 приведена расчетная схема поверхностных полуэллиптических трещин нормального отрыва.

Численные результаты расчета коэффициентов интенсивности напряжений $K_{I\phi} = f(r/t)$ в зависимости от эллиптического угла ϕ вблизи контура трещины представлены на рис. 3. При этом расстояние r отсчитывали от контура трещины в перпендикулярном направлении к нему. Расчет проводили для трещин с соотношением полуосей $b/a = 2/3$ и разной относительной глубиной b/t при $\phi = 0,3$. Для сравнения на рис. 3 показаны результаты распределения коэффициента интенсивности напряжений $K_{I\phi}$ по фронту трещины (кривая 1), полученные методом СИУ (сингулярных интегральных уравнений) [1] в полубесконечном пространстве, ослабленном краевой полуэллиптической трещиной под действием номинального растягивающего напряжения, направленного перпендикулярно к плоскости трещины, и данные расчета по работам [8].

Из представленных результатов следует, что в месте выхода трещины на поверхность полупространства ($\phi = 0$) сингулярность напряжений на контуре трещины выше, чем во внутренних точках ($0 < \phi < \pi$). При переходе от свободной поверхности тела в глубину вдоль контура трещины наблюдается влияние объема напряженно-деформированного состояния. Расчет КИН по работам И. К. Ньюмана, учитывающий модификацию КИН в функции отношения глубины

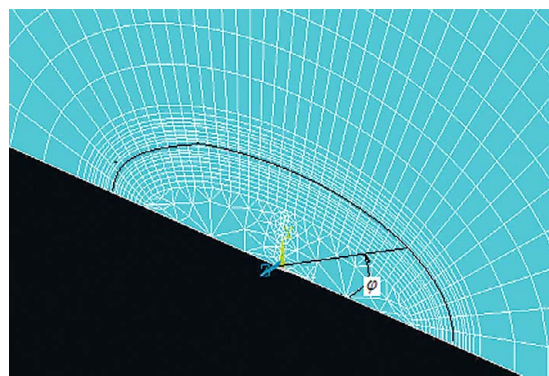


Рис. 2. Расчетная схема поверхностных полуэллиптических трещин нормального отрыва

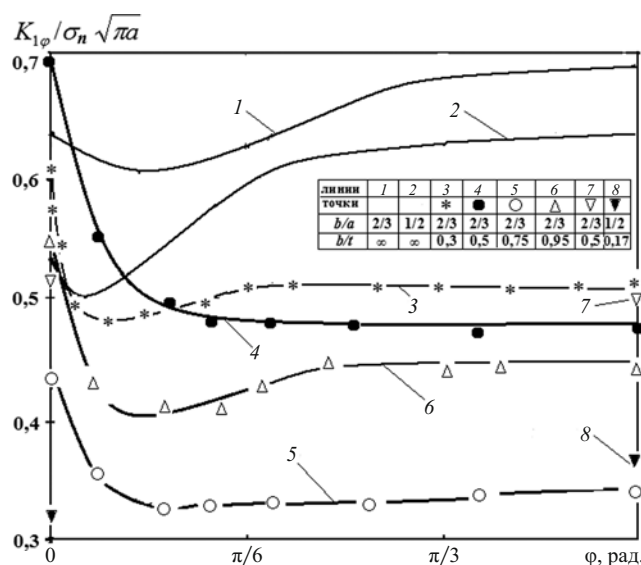


Рис. 3. Распределение коэффициента интенсивности напряжений K_I по фронту полуэллиптической трещины в упругой области нагружения: 1 и 2 — результаты из работы [1]; 3–6 — расчет численными методами; 7, 8 — расчет по работам [8]

трещины к толщине пластины, проводили с учетом поправок на переднюю поверхность в функции формы трещины для наиболее ее глубокой точки, предложенных Р. С. Шехом и А. С. Кобаяши. Проведенные численные расчеты качественно соответствовали результатам работы [11].

На рис. 4 показаны зависимости изменения объема напряженно-деформированного состояния вблизи контура полуэллиптической трещины заданной геометрии и разной относительной глубины для соответствующих эллиптических углов.

Объемность напряженного состояния определяется уравнением

$$I_\sigma = \bar{\sigma}_i / \bar{\sigma}_{cp}, \quad (10)$$

где $\bar{\sigma}_i = \sigma_i / \sigma_T$ — интенсивность напряжений; $\bar{\sigma}_{cp} = (\bar{\sigma}_1 + \bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_3) / 3$ — относительная величина среднего напряжения.

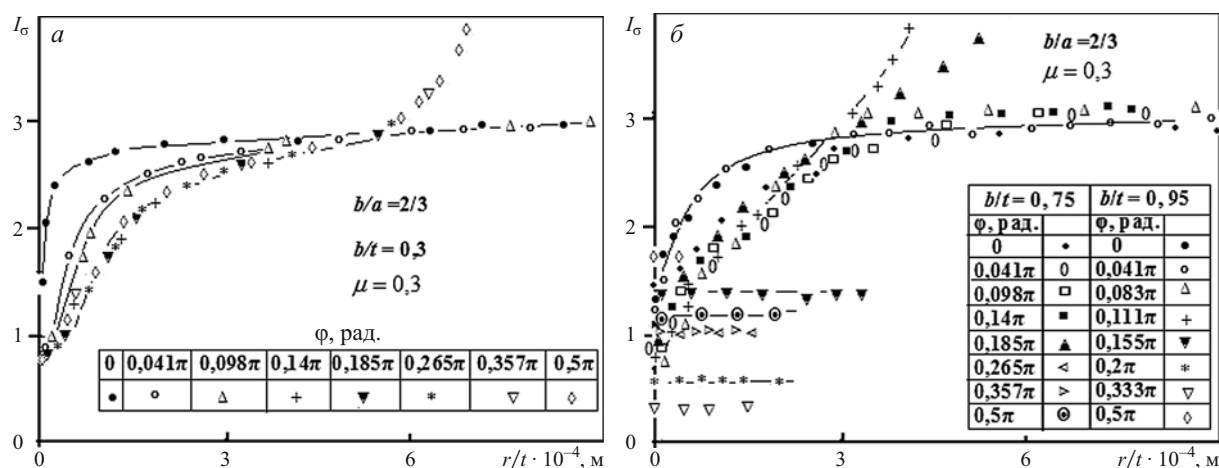


Рис. 4. Изменения объемности напряженного состояния вблизи контура полуэллиптической поверхностной трещины нормального отрыва для разных углов ϕ при относительной ее глубине b/t , равной 0,3 (а), а также 0,75 и 0,95 (б)

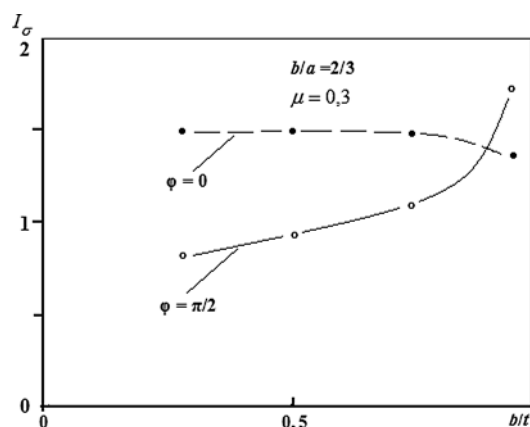


Рис. 5. Зависимости изменения объемности I_σ на контуре полуэллиптической трещины для разных углов ϕ от ее относительной глубины в пластине

На рис. 5 приведены зависимости изменения объемности I_σ на контуре полуэллиптической трещины в поверхностной точке ($\phi = 0$) и в самой глубокой точке ($\phi = \pi/2$) от ее относительной глубины в пластине.

При относительной глубине 0,95 (геометрия трещины близка к сквозной) наблюдается существенное изменение объемности, особенно для самой глубокой точки трещины. Для поверхностной точки трещины при номинальном плоском напряженном состоянии это изменение не существенно. В точке контура с углом $\phi = \pi/2$ происходит увеличение объемности напряженного состояния в поле плоского деформированного номинального состояния.

Таким образом [10], можно определять функциональную зависимость относительной разрушающей деформации в локальной зоне полуэллиптической поверхностной трещины по уравнению

$$\epsilon_{\bar{r}} = \epsilon_c D_e / I. \quad (11)$$

Это позволяет прогнозировать ресурс элементов конструкций, условие предразрушения при выходе по-

луэллиптической трещины на поверхность в виде сквозного дефекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hayashi K., Abe H. Stress intensity factors for a semi-elliptical crack in the surface of a semi-infinite solid / Int. J. Fract. 1980. Vol. 16. N 3. P. 275 – 285.
2. Isida M., Noguchi H. A circular inclusion and an arbitrary array of cracks in infinite body under in-planes loads / Trans. Jap. Mech. Eng. 1983. Vol. A49. N 438. P. 147 – 155.
3. Makhutov N. A., Makarenko I. V., Makarenko L. V. Studies on the fracture mechanism and kinetics of randomly oriented surface semielliptic cracks at the multiaxial stress-strain state with deformation criteria of nonlinear fracture mechanics / Strength of Materials. 2013. Vol. 45. N 4. July. P. 454 – 458.
4. Makhutov N. A., Makarenko I. V., Makarenko L. V. Studies on the fracture mechanism and kinetics of randomly oriented surface semielliptic cracks at the multiaxial stress-strain state with deformation criteria of nonlinear fracture mechanics / Strength of Materials. 2013. Vol. 45. N 4. July. P. 454 – 458.
5. Махутов Н. А., Макаренко И. В., Макаренко Л. В. Расчетно-экспериментальное исследование развития поверхностных полуэллиптических наклонных малоцикловых трещин / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 11. С. 39 – 44.
6. Makhutov N. A., Makarenko I. V., Makarenko L. V. Tensely-deformed conditions in conditions of complex circuits loading and non-uniform properties at top of the crack / Abstracts of the 5th International Conference «Problems of dynamics and strength in gas-turbine construction» / Ed. A. P. Zinkovskyy. — Kyiv. 27 – 31 May, 2014) G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Acad. Sci. of Ukraine, 2014. — 314 p.
7. ANSYS, 2010. Structural Analysis Guide. 660578.
8. Newman J. C. Fracture analysis of surface and through-cracked sheets and plates / Eng. Fract. Mech. 1973. Vol. 4. P. 667 – 689.
9. Rice J. R., Levy N. Part-through surface in an elastic plate / J. of Appl. Mech. 1972. Vol. 39. N 1. P. 185 – 200.
10. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В двух частях. — Новосибирск: Наука, 2005. — 1110 с.
11. Shlyannikov V. N., Tumanov A. V. An inclined surface crack subject to biaxial loading / Int. J. Solids Struct. 2011. Vol. 48. P. 1778 – 1790.

REFERENCES

1. Hayashi K., Abe H. Stress intensity factors for a semi-elliptical crack in the surface of a semi-infinite solid / Int. J. Fract. 1980. Vol. 16. N 3. P. 275 – 285.

2. **Isida M., Noguchi H.** A circular inclusion and an arbitrary array of cracks in infinite body under in-planes loads / Trans. Jap. Mech. Eng. 1983. Vol. A49. N 438. P. 147 – 155.
3. **Makhutov N. A., Makarenko I. V., Makarenko L. V.** Studies on the fracture mechanism and kinetics of randomly oriented surface semi-elliptic cracks at the multiaxial stress-strain state with deformation criteria of nonlinear fracture mechanics / Strength of Materials. 2013. Vol. 45. N 4. July. P. 454 – 458.
4. **Makhutov N. A., Makarenko I. V., Makarenko L. V.** Studies on the fracture mechanism and kinetics of randomly oriented surface semielliptic cracks at the multiaxial stress-strain state with deformation criteria of nonlinear fracture mechanics / Strength of Materials. 2013. Vol. 45. N 4. July. P. 454 – 458.
5. **Makhutov N. A., Makarenko I. V., Makarenko L. V.** Raschetno-eksperimental'noe issledovanie razvitiya poverkhnostnykh poluellipticheskikh naklonnykh malotsiklovyykh treshchin [Numerical and experimental study of developing semi-elliptical inclined low-cycle surface cracks] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2013. Vol. 79. N 11. P. 39 – 44 [in Russian].
6. **Makhutov N. A., Makarenko I. V., Makarenko L. V.** Tensely — deformed conditions in conditions of complex circuits loading and non-uniform properties at top of the crack / Abstracts of the 5th International Conference «Problems of dynamics and strength in gas-turbine construction» / Ed. A. P. Zinkovskyy. — Kyiv. 27 – 31 May, 2014) G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Ac. Sci. of Ukraine, 2014. — 314 p.
7. ANSYS, 2010. Structural Analysis Guide. 660578.
8. **Newman J. C.** Fracture analysis of surface and through-cracked sheets and plates / Eng. Fract. Mech. 1973. Vol. 4. P. 667 – 689.
9. **Rice J. R., Levy N.** Part-through surface in an elastic plate / J. of Appl. Mech. 1972. Vol. 39. N 1. P. 185 – 200.
10. **Makhutov N. A.** Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost' [Constructional durability, a resource and technogenic safety]. In two parts. — Novosibirsk: Science, 2005. — 1110 p. [in Russian].
11. **Shlyannikov V. N., Tumanov A. V.** An inclined surface crack subject to biaxial loading / Int. J. Solids Struct. 2011. Vol. 48. P. 1778 – 1790.

УДК 620.191.33:620.198

ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЮ И РАЗРУШЕНИЮ МАТЕРИАЛА ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН

© В. Н. Шляnnиков, Р. Р. Яруллин, А. П. Захаров¹

Статья поступила 13 февраля 2015 г.

Исследованы образцы, изготовленные из рабочих лопаток паровых турбин после эксплуатации, с исходным состоянием поверхности и с нанесенным защитным покрытием. Для оценки влияния глубины эрозионного повреждения на характеристики долговечности материала рабочих лопаток и для проведения испытаний на циклическую трещиностойкость использованы цилиндрические образцы с односторонним боковым надрезом различной глубины. Приращение длины трещины на поверхности образца фиксировали с помощью оптического инструментального микроскопа, а визуально недоступные приращения глубины трещины определяли путем установленной взаимосвязи между длиной трещины на поверхности и раскрытием берегов трещины. Получены оценки влияния защитных покрытий на характеристики статической прочности, долговечности и циклической трещиностойкости материала рабочих лопаток.

Ключевые слова: лопатки паровых турбин; защитные покрытия; прочность; долговечность; циклическая трещиностойкость.

Опыт эксплуатации последних ступеней мощных конденсационных и теплофикационных паровых турбин свидетельствует о том, что одним из основных повреждающих факторов, приводящих к снижению надежности рабочих лопаток, является капельная эрозия [1, 2]. Она приводит к износу входных и выходных кромок рабочих лопаток под действием капель жидкости, натекающих на поверхность с большой скоростью, появлению концентрации напряжений и снижению конструкционной прочности и долговечности лопаток (рис. 1). Вследствие эрозионного износа рабочих лопаток потери мощности турбоагрегатов могут составлять более 6 %. Степень эрозионного износа лопаток зависит от конструкции турбины, условий ее

эксплуатации, материала лопаток и способов защиты поверхности.

Для защиты от эрозии рабочих лопаток первых ступеней компрессоров газотурбинных двигателей и последних ступеней цилиндров низкого давления мощных паровых турбин разработаны различные противозерозионные мероприятия пассивного типа [3 – 9].

В ООО «Технологические системы защитных покрытий» предложена технология нанесения защитных покрытий на рабочие лопатки по методу высокоскоростного газопламенного напыления (High Velocity Air Fuel (HVAF)) [10].

Высокоскоростное газопламенное напыление порошков твердых сплавов металлов на поверхность детали — один из наиболее эффективных методов увеличения срока жизни детали, обеспечивающих полное

¹ Казанский научный центр РАН, г. Казань, Россия;
e-mail: shlyannikov@mail.ru