

Сазанов В.П., Шадрин В.К., Письмаров А.В., Пилипив О.М., Калакова Е.С.

О МЕТОДАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ УПРОЧНЁННЫХ ДЕТАЛЕЙ

В исследовании с позиций линейной механики разрушения проведён анализ использования двух методов (критериев) учёта влияния остаточных напряжений на предел выносливости: по осевым остаточным напряжениям на поверхности надреза σ_z^{nos} [1] и по среднеинтегральным остаточным напряжениям $\bar{\sigma}_{ocm}$ [2]:

$$\Delta\sigma_{-1} = \psi_{\sigma} |\sigma_z^{nos}|, \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_{-1} = \bar{\psi}_{\sigma} |\bar{\sigma}_{ocm}|. \quad (2)$$

Здесь $\Delta\sigma_{-1}$ – приращение предела выносливости за счёт поверхностного упрочнения; ψ_{σ} , $\bar{\psi}_{\sigma}$ – коэффициенты влияния поверхностного упрочнения на предел выносливости по критериям σ_z^{nos} и $\bar{\sigma}_{ocm}$, соответственно;

$$\bar{\sigma}_{ocm} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_z(\xi)}{\sqrt{1-\xi^2}} d\xi; \quad (3)$$

$\sigma_z(\xi)$ – осевые остаточные напряжения в опасном сечении образца с концентратором по толщине поверхностного слоя a ; $\xi = a/t_{kp}$ – расстояние от поверхности опасного сечения образца до текущего слоя, выраженное в долях t_{kp} ; t_{kp} – критическая глубина нераспространяющейся трещины усталости, возникающей в упрочнённом образце (детали) с концентратором напряжений при работе на пределе выносливости.

Первый критерий σ_z^{nos} , учитывающий влияние остаточных напряжений на поверхности упрочнённой детали, вполне пригоден для расчёта предела выносливости по трещинообразованию. Однако, как следует из проведённых исследований, при рассмотрении предела выносливости по разрушению формула (1) оказывается несостоятельной, что можно было предвидеть в связи с наличием нераспространяющихся трещин усталости [1,3].

Обоснование по использованию критериев для оценки эффективности упрочнения можно получить, если рассмотреть причину остановки усталостной трещины с позиций линейной механики разрушения. Основным параметром, обобщающим условия нагружения материала при вершине трещины, является коэффициент интенсивности

напряжений K (КИН), зависящий одновременно от уровня нагружения и глубины трещины. Перепад (размах) этого коэффициента $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ определяет скорость роста усталостной трещины согласно уравнению, предложенному Пэрисом [3]:

$$dt/dN = C(\Delta K)^n, \quad (4)$$

где t – глубина трещины; N – число циклов нагружения; C – константа, зависящая от свойств материала и режима нагружения; n – показатель степени, изменяющийся в зависимости от свойств материала от 1 до 6.

Экспериментально доказано [4], что существует минимальное значение K , ниже которого рост трещины невозможен. Данное значение, обозначаемое через K_{th} , есть пороговый коэффициент интенсивности напряжений, ниже которого роста усталостной трещины не происходит.

В данном исследовании в зависимости от размера трещины представлено изменение коэффициента интенсивности напряжений K_I в цилиндрических образцах диаметром $d = 10$ мм с концентратором в виде полукруглого надреза радиусом $\rho_0 = 0,5$ мм с упрочнением поверхности и без упрочнения. В среде программного продукта ANSYS был проведён расчёт K_I . Остаточные напряжения моделировались методом термоупругости [5] с использованием расчётно-экспериментальной зависимости осевых остаточных напряжений σ_z по толщине упрочнённого слоя a [2].

На конечно-элементной модели образца задавалась распределённая нагрузка, соответствующая изгибающему моменту, который создаёт в наименьшем сечении максимальные растягивающие напряжения 137,5 МПа в деталях с упрочнением поверхности и 120 МПа в деталях без упрочнения [2]. Данные значения напряжений соответствуют пределам выносливости σ_{-1} , полученным при испытаниях. Изменение коэффициентов интенсивности напряжений K_I при увеличении глубины трещины t для образцов с упрочнением поверхности и без упрочнения показаны на рис. 1.

Из рис. 1 следует, что для образцов рассматриваемого размера с концентратором на начальном участке роста трещины наблюдаются два экстремума коэффициента интенсивности напряжений – максимальное и минимальное значения.

В начальный период развития из-за малой глубины, несмотря на очень высокий градиент напряжений у её вершины, трещина оказывает незначительное влияние на исходное поле напряжений у концентратора.

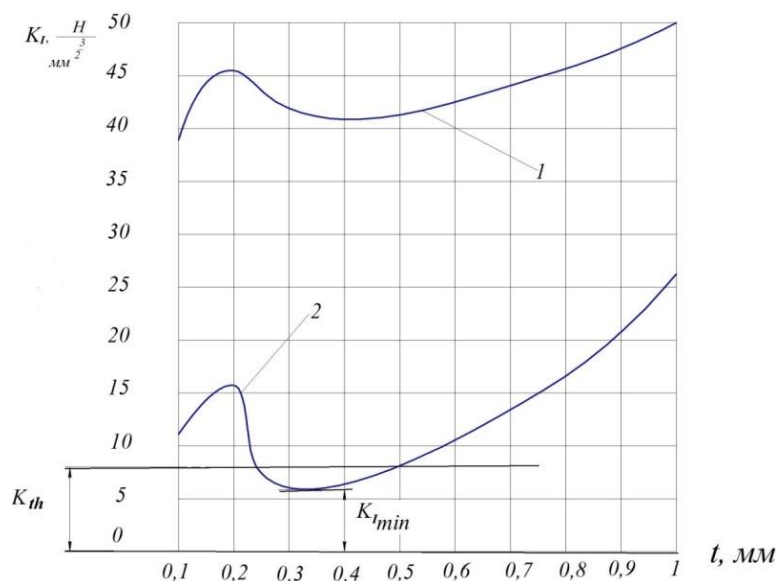


Рис. 1. Изменение коэффициента интенсивности напряжений K_I при увеличении глубины трещины в образцах диаметром $d = 10$ мм с надрезом $\rho_0 = 0,5$ мм из стали 20: 1 – поверхность без упрочнения, 2 – поверхность упрочнена

Однако, начиная с некоторой глубины, при которой влияние концентратора ослабевает, а размер трещины становится значительным, определять дальнейшее развитие трещины начинает концентрация напряжений у её вершины. Остановка роста трещины возможна в том случае, когда минимальное значение K_I будет меньше его порогового значения K_{th} . Судя по характеру зависимостей рассмотренных образцов такое возможно только в образцах с концентратором и упрочнённой поверхностью. Приведённое на рис. 1 значение K_{th} принято в соответствии со справочными материалами работы [4] для конструкционных сталей. В неупрочнённых образцах с концентраторами нераспространяющиеся трещины усталости обнаружены не были. Следовательно, полученные результаты расчёта достаточно точно подтверждаются результатами испытаний на усталость рассматриваемых образцов [2].

Расчёты на моделях без упрочнения поверхности и с низким уровнем упрочнения (небольшие сжимающие остаточные напряжения, малая толщина слоя) показали, что в этих случаях минимальное значение K_I превышает его пороговое значение K_{th} и, следовательно, остановки усталостной трещины не происходит.

В ранее проведённых исследованиях на конечно-элементных моделях было установлено, что коэффициент интенсивности напряжений K_I достигает максимального значения при глубине трещины, равной примерно $0,02D$ [6], где D – диаметр в наименьшем сечении детали (образца с концентратором). Это достаточно точно согласуется с размером критической глубины $t_{кр}$ нераспространяющейся трещины

усталости для сплошных цилиндрических образцов и деталей с концентраторами напряжений, которая определяется по эмпирической формуле $t_{kp} = 0,0216D$ [2].

Таким образом, для оценки влияния остаточных напряжений на предел выносливости деталей и его прогнозирования рассматриваемые критерии необходимо использовать следующим образом:

– при низком уровне упрочнения, когда K_{Imin} превышает K_{th} , следует применять критерий осевых остаточных напряжений на поверхности надреза σ_z^{nos} (по трещинообразованию);

– при оптимальном уровне упрочнения, когда K_{Imin} меньше K_{th} , следует применять критерий среднеинтегральных остаточных напряжений $\bar{\sigma}_{ocm}$ (по разрушению).

Библиографический список

1. Иванов, С.И. Влияние остаточных напряжений и наклёпа на усталостную прочность [Текст] / С.И. Иванов, В.Ф. Павлов // Проблемы прочности. – 1976. – №5. – С. 25-27.

2. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2012. – 125 с.

3. Кудрявцев, П.И. Нераспространяющиеся усталостные трещины [Текст] / П.И. Кудрявцев. – М.: Машиностроение, 1982. – 171 с.

4. Трощенко, В.Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении [Текст] / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 256 с.

5. Сазанов, В.П. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN [Текст] / В.П. Сазанов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк, В.Ф. Павлов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – №2 (68). – С. 35-40.

6. Сургутанов, Н.А. Исследование влияния глубины трещины на коэффициент интенсивности напряжений в надрезанных и гладких пластинах [Текст] / Н.А. Сургутанов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2017. – Т.16. – №1. – С. 176-185.