

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ ПО ОБРАЗОВАНИЮ ПЕРВОЙ МАКРОТРЕЩИНЫ ПРИ ИЗГИБЕ

Кольцун Ю.И.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Интенсивное развитие авиа и двигателестроения показало, что в изделиях отдельные детали работают при наличии в них трещин усталости. В этой связи за последние десятилетия остро стоит вопрос о надежности деталей с трещинами с точки зрения остаточного ресурса. Для этого необходимо знать величину предела выносливости материала по образованию первой макротрещины. Этой проблемой длительное время занимались Н.Д. Кузнецов, В.С. Иванова, И.В. Кудрявцев и другие ученые и руководители крупнейших предприятий.

Для решения поставленной задачи Кудрявцев П.И. [1] использовал сталь 45 ($\sigma_{\sigma} = 500$ МПа, $\sigma_{-1} = 235$ МПа). Результаты исследования зависимости предела выносливости по образованию трещины σ_{-1}^{TP} от теоретического коэффициента концентрации напряжений α_{σ} представлены на рис. 1.

В настоящей работе предлагается экспериментально-аналитический метод расчета предела выносливости по образованию первой макротрещины для пластичных материалов. С этой целью использовались цилиндрические образцы из стали 45 ($\sigma_{\sigma} = 624$ МПа, $\sigma_T = 375$ МПа) диаметром $D=25,0$ мм с кольцевым надрезом полукруглого профиля радиуса $r = 1,0$ мм, нанесенного безнаклепным способом по предварительно упрочненной поверхности обкаткой роликом с усилием $F = 1500$ Н. Испытания проводились по симметричному циклу при частоте $f = 19,5$ Гц на базе $N = 3 \cdot 10^6$ и $3 \cdot 10^{10}$ циклов. Образцы, выстоявшие базу испытаний на предельной амплитуде σ_{Ra} были подвергнуты разрушению при растяжении или при изгибе в другой плоскости жесткости. После разрыва таких образцов в опасном сечении отчетливо видны две серповидные трещины усталости, максимальная глубина которых t_{max} находится на пересечении попереч-

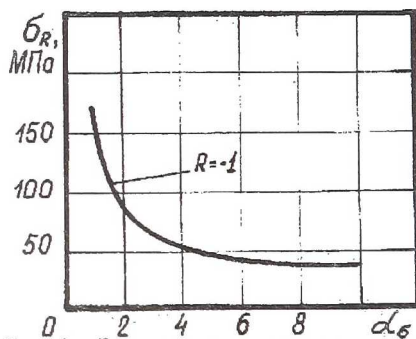


Рис. 1. Зависимость предела выносливости по образованию трещины от теоретического коэффициента концентрации напряжений

ного сечения и главной плоскости жесткости YOZ, т.е. в плоскости силового нагружения (рис.2).

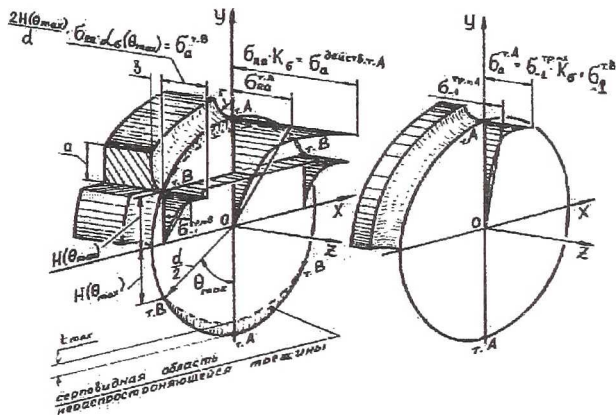


Рис.2. Схема нагружения образцов

трещины в силу уменьшения действительных амплитудных напряжений $\sigma_a^{действ}$ в зависимости от уменьшения размера $H(\Theta_0)$, эквивалентного текущей координате y в формуле для номинальных амплитудных напряжений σ_a от $d/2$ (т. А) до размера $H(\Theta_{max})$ в точке В. Здесь Θ - угловая координата движения фронта трещины по поверхности опасного сечения цилиндрического образца.

$$\sigma_a = \frac{M_{изг}}{I_x} \cdot y, \quad (1)$$

где $M_{изг}$ - изгибающий момент в силовой плоскости,

I_x - момент инерции опасного сечения.

Исходя из равенства отношения номинальных напряжений $\sigma_{Ra}^{T.A} / \sigma_a^{T.B} = d / 2H(\Theta_{max})$, следует

$$\sigma_a^{T.B} = \frac{2H(\Theta_{max})}{d} \cdot \sigma_{Ra}^{T.A}. \quad (2)$$

В тоже время действительные амплитудные напряжения в т.В в силу концентрации напряжений равны

$$\sigma_a^{действ.Т.В} = \sigma_a^{T.B} \cdot \alpha_{\sigma}(\Theta_{max}) = \frac{2H(\Theta_{max})}{d} \cdot \sigma_{Ra}^{T.A} \cdot \alpha_{\sigma}(\Theta_{max}). \quad (3)$$

С другой стороны при незначительном превышении номинальных амплитудных напряжений предельной величины σ_{Ra} произойдет разру-

На рис. 2а изображено опасное сечение после разрыва образца с указанием границ фронтов серповидных нераспространяющихся трещин усталости, выделенных дугами, проходящими через точки В. Положение точек В определяет остановку движения

шение образца. В этом случае действительные напряжения в точке В будут равны произведению эффективного коэффициента концентрации напряжений $K_{\sigma}(\alpha_{\sigma}[\Theta_{\max}])$ и $\sigma_a^{T.B}$. Тогда номинальные амплитудные напряжения в точке В $\sigma_a^{T.B}$ можно переобозначить в предел выносливости по образованию первой макротрещины в точке В - $\sigma_{-1}^{TPm.B}$. Аналогично в точке А:

$$\sigma_a^{\text{действ.Т.А}} = K_{\sigma}(\alpha_{\sigma}(\Theta_0)) \cdot \sigma_{-1}^{TPm.A} \quad (4)$$

Формула (4) определяет напряжения излома детали с конструктивным концентратором. Сам факт появления трещины представляет собой начальную стадию излома детали. Превышение величины действительных амплитудных напряжений относительно $\sigma_a^{\text{действ}}$ в точке В может вызвать появление трещины усталости в цилиндрическом образце диаметром $2H(\Theta_{\max})$ в точке А. В этом случае можно утверждать, что точка В опасного сечения исследуемых образцов обладает «особенностью». Если учесть масштабный фактор, определяемый коэффициентом влияния абсолютного размера K_d , то в точке А для исследуемого образца будет выполняться тождественное равенство

$$\frac{\sigma_a^{\text{действ.Т.В}}}{K_d(2H(\Theta_{\max}))} \equiv \frac{\sigma_a^{\text{действ.Т.А}}}{K_d(d)}, \quad (5)$$

где $H(\Theta_{\max}) = \frac{d}{2} \cdot \cos(\Theta_{\max})$.

Если в т. А действительные напряжения будут равны действительным напряжениям в т. В, то предельную величину номинальных амплитудных напряжений, превышение которых приведет к так называемой первой стадии разрушения – возникновению первой трещины, $\sigma_a^{T.A}$ справедливо назвать пределом выносливости материала по первой макротрещине и обозначить $\sigma_{-1}^{TPm.A}$ (рис 26).

При подстановке уравнений (3), (4) в (5) и, выделяя предел выносливости по первой трещине, получаем следующее выражение:

$$\sigma_{-1}^{TPm.A} = \frac{2H(\Theta_{\max})}{d} \cdot \sigma_{Ra}^{T.A} \cdot \alpha_{\sigma}(\Theta_{\max}) \cdot \frac{1}{K_{\sigma}(d) \cdot K_{\sigma}(\alpha_{\sigma}(2H(\Theta_{\max})))} \cdot \frac{K_d(d)}{K_d(2H(\Theta_{\max}))} \quad (6)$$

В выражении (6) теоретический коэффициент концентрации напряжений $\alpha_{\sigma}(2H(\Theta_{\max}))$ можно определять путем использования прочностных программ ANSYS или MNS NASTRAN. Эффективный коэффициент концентрации напряжений определяется по известной формуле [2]:

$$K_{\sigma} = 1 + q_{\sigma} \cdot (\alpha_{\sigma} - 1), \quad (7)$$

где q_{σ} - коэффициент чувствительности к концентрации напряжений. В силу изменения формы концентратора в секущей вертикальной плоскости при изменении текущего угла Θ (рис. 1а) концентрация напряжений по контуру сечения должна увеличиваться. Учитывая вышесказанное, расчет теоретического коэффициента концентрации напряжений в силовой плоскости можно выполнять по формуле Нейбера [3] для эллиптического концентратора

$$\alpha_{\sigma} \cong 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} = 1 + 2 \cdot \frac{a}{b}, \quad (8)$$

где b - малая полуось эллипса (половина ширины концентратора);

a - большая полуось эллипса (глубина концентратора);

ρ - радиус кривизны эллипса на конце полуоси a ($\rho = b^2/a$).

В случае изменения текущего центрального угла Θ глубина концентратора b в вертикальной секущей плоскости, параллельной силовой плоскости YOZ , определяется по формуле

$$a = \frac{1}{2} \cdot \left(D \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D} \cdot \sin \Theta \right)^2} - d \cdot \cos \Theta \right), \quad (9)$$

где D - наибольший диаметр лабораторного образца;

d - диаметр опасного сечения образца.

В соответствии с формулами (7,8,9) получаем:

- при $\Theta = 0^{\circ}$: $b \equiv r = 1$ мм, $a = r = 1$ мм, $\alpha_{\sigma}(d) = 3,0$, $K_{\sigma} = 2,16$;

- при $\Theta \equiv \Theta_{max} = 60^{\circ}$: $b \equiv r = 1$ мм, $a = 1,8$ мм, $\alpha_{\sigma}(2H(60^{\circ})) = 4,6$, $K_{\sigma} = 3,1$.

На основании формулы (6) теперь можно вычислить предел выносливости по образованию первой макротрещины, зарождающейся в т.А исследуемого образца, в условиях концентрации напряжений

$$\sigma_{-1}^{TP.m.A} = \frac{2 \cdot 5,75}{23} \cdot 192,3 \cdot \frac{4,6}{2,16 \cdot 3,1} \cdot \frac{0,9}{0,97} \approx 61,3 \text{ (МПа)}.$$

Сравнивая полученное значение с вышеприведенной зависимостью предела выносливости по первой макротрещине от теоретического коэффициента концентрации напряжений при $\alpha_{\sigma}(d) = 3,0$ для стали 45, видна вполне удовлетворительная сходимость с результатами исследования, проведенного П.И. Кудрявцевым.

Зная предел выносливости по образованию первой трещины, на основании кинетики трещины при напряжениях, превышающих предельную амплитуду в пределах эффективного центрального угла

$\Theta_{эф} = \Theta_{\max} / 2$, можно определить допустимую амплитуду напряжений гарантированной безопасной работы детали с трещинами. Для этого целесообразно вычислить по формуле (6) напряжения при $\Theta_{эф} = 60^0 / 2 = 30^0$, которые соответственно равны 108 МПа.

В случае отсутствия концентратора напряжений, т.е. для гладкой рабочей зоны лабораторного образца, когда $\alpha_{\sigma} = 1,0$; $K_{\sigma} = 1,0$, предел выносливости по образованию первой макротрещины для стали 45 равен

$$\sigma_{-1}^{TP} = \frac{2 \cdot 5,75}{23} \cdot 192,3 \cdot \frac{1,0}{1,0 \cdot 1,0} \cdot \frac{0,9}{0,97} \cong 90 \text{ (МПа)}.$$

Таким образом, используя предложенную методику постановки эксперимента, а также формулу (6) можно прогнозировать величину предела выносливости по образованию первой макротрещины для любых пластичных материалов в условиях как концентрации напряжений, так и для гладкой рабочей зоны образца.

Список литературы

1. Кудрявцев П.И., Морозова Т.И. О критическом размере нераспространяющихся усталостных трещин в стальных поверхностно наклепанных деталях/ Вопросы прочности крупных деталей машин.- М.: Машиностроение.-1976г.-С.247...256.
2. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов.- Киев: Вища школа.-1982г.
3. Нейбер Г.Концентрация напряжений.М.-Л., Гостехиздат.-1947г.

КРИТЕРИИ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Леонов О.А., Приходько И.Л.

Московский государственный агроинженерный университет, г. Москва

В настоящее время технологическое оборудование для выполнения конкретных операций подбирается и оценивается по следующим основным критериям:

1. Стоимость;
2. Производительность;
3. Эксплуатационные затраты;
4. Точность.

Первые три критерия являются экономическими, а точность - техническим, поэтому их взаимная увязка составляет существенную про-