Проведена проверка метода на ряде конструкционных материалов /дюрали, углеродистые стали/.

М.Н.СТЕПНОВ, М.А.ТРУШКИН

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ВТОРИЧНЫХ КРИВЫХ УСТАЛОСТИ

В связи с двумя стадиями усталостного повреждения вторичные кривые усталости могут быть двух типов. Первый тип имеет материал, поврежденный без образования трещины. Вторичные кривые усталости второго типа соответствуют материалу, предварительно поврежденному до образования трещины определенной длины. Среди бесконечного множества вторичных кривых усталости первого и второго типа имеется кривая, лежащая на границе между двумя типами вторичных кривых. Эта кривая усталости описывается уравнением

$$\sigma_a = a_3\left[\lg\left(N_{pт} + A_3\right)\right]^{-\alpha_3}, \qquad /1/$$

где $N_{pт}$ – долговечность с момента возникновения трещины до разрушения; a_3, A_3, α_3 – параметры. В дальнейшем эта кривая называется характеристической кривой усталости.

Полагаем, что вторичные кривые I типа сходятся в общую точку с исходной кривой усталости, имеющую координаты $\sigma_a = \sigma_{в0}$, $N = N_I = 1$, и соответствуют материалу предварительно поврежденному трещиной одинаковой длины и пересекают ось ординат при $\sigma_a = \sigma_в$, $N = N_{II} = 1$. Эти кривые усталости являются кривыми равной повреждаемости.

Пусть вторичные кривые I типа выражаются уравнением

$$\sigma_a = \sigma_{-1} + a_I\left[\lg\left(N_I + A_I\right)\right]^{-\alpha_I}. \qquad /2/$$

Анализ результатов усталостных испытаний алюминиевых сплавов показывает, что вторичные кривые II типа выражаются уравнением

$$\sigma_a = a_{II}\left[\lg\left(N_{II} + A_{II}\right)\right]^{-\alpha_{II}}. \qquad /3/$$

Рассмотрим способ оценки изменения усталостных свойств после образования трещины, позволяющий определить величину статической прочности $\sigma_в$ при изгибе, необходимую для расчета параметров уравнений /3/. Статическую прочность при числе циклов с момента образования трещины $n_{рт}$ представим выражением

$$\sigma_{в} = \sigma_{в0} - в\, n_{рт}^{\beta}, \qquad /4/$$

полагая $\beta = const$, $в = f(\sigma_a)$ текущую статическую прочность можно определить по формуле

$$\sigma_{в} = \sigma_{в0} - (\sigma_{в0} - \sigma_a) D_{II}^{\beta} \ . \qquad /5/$$

Вычисление накопленной величины D_{II} при нестационарном нагружении производится путем приведения наработанного числа циклов к нижнему уровню напряжений спектра. Пусть при σ_{a_1} имеем n_1 циклов, а при $\sigma_{a_2} - n_2$, тогда

$$D_{II} = (n_{2,1} + n_2)/N_{рт2} = n_{2экв}/N_{рт2} \ , \qquad /6/$$

где $n_{2,1}$ – наработка при σ_{a2}, эквивалентная наработка при $\sigma_{a1} n_1$ циклов в смысле равенства снижения статической прочности,

$$n_{2экв} = n_1 (в_1/в_2)^{1/\beta} + n_2 \ . \qquad /7/$$

При разделении нестационарного режима на К ступеней, имеем

$$D_{II} = n_{кэкв}/N_{ртк} \ , \qquad /8/$$

где

$$n_{кэкв} = \sum_{i=1}^{к} (в_i / в_к)^{1/\beta} \ . \qquad /9/$$

При программном нагружении условие прочности для вероятности неразрушения P в предложении нормального распределения предела прочности будет иметь вид

$$\sigma_{max} \leq \bar{\sigma}_в - z_p S\sigma_в \ . \qquad /10/$$

где σ_{max} – наибольшая амплитуда напряжений програмного блока; $\bar{\sigma}_в$ и $S\sigma_в$ – среднее значение и среднее квадратическое отклонение предела прочности; Z_P – квантиль нормального распределения, соответствующая вероятности Р. Характер изменения $\bar{\sigma}_в$ в течение первого блока программного нагружения так же, как при стационарном нагружении определяется уравнением /5/. Изменение среднего квадратического отклонения предела прочности при стационарном нагружении и в случае его нормального распределение происходит в соответствии с уравнением

$$S_{\sigma_в}=\frac{n_{рт}^{\beta}}{z_p}\left(\sigma_{во}-\sigma_a\right)\left[\frac{1}{(N_{рт})_p^{\beta}}-\frac{1}{(N_{рт})_{0,5}^{\beta}}\right] \quad . \qquad /11/$$

При программном нагружении изменение среднего квадратического отклонения предела прочности в течение первого блока выражено уравнением

$$S_{\sigma_в}=\frac{n_{кжв}^{\beta}}{z_p}\left(\sigma_{во}-\sigma_{ак}\right)\left[\frac{1}{(N_к)_p^{\beta}}-\frac{1}{(N_к)_{0,5}^{\beta}}\right] \quad . \qquad /12/$$

Как показывает анализ, эквивалентность нагружения по изменению предела прочности и его среднее квадратическое отклонение одновременно имеют место лишь в случае независимости дисперсии величины $\lg N_{рт}$ от уровня напряжения.

Среднее значение и среднее квадратическое отклонение предела прочности после λ блоков программного нагружения с момента образования трещины определяются уравнениями:

$$\bar{\sigma}_в=\sigma_{во}-\left(\sigma_{во}-\sigma_{ак}\right)\frac{\lambda^{\beta}n_{к\,экв}^{\beta}}{(N_к)_{0,5}^{\beta}}, \qquad /13/$$

$$S_{\sigma_в}=\frac{\lambda^{\beta}n_{к\,экв}^{\beta}}{z_p}\left(\sigma_{во}-\sigma_{ак}\right)\left[\frac{1}{(N_к)_p^{\beta}}-\frac{1}{(N_к)_{0,5}^{\beta}}\right] \qquad /14/$$

Среднее квадратическое отклонение предела прочности $S\sigma_в$, подсчитываемое по формулам /11/, /12/, /14/, следует скорректировать с учетом среднеквадратического отклонения прочности образцов, поврежденных без образования трещины $S\sigma_{в_о}$ с помощью уравнения

$$S'\sigma_в=\sqrt{S^2\sigma_{в_о}+S^2\sigma_в} \quad , \qquad /15/$$

где $S'\sigma_в$ - корректированное значение предела прочности

Совместное решение уравнений /10/, /13/,/14/, дает выражение для предельного числа блоков нагружения соответствующего вероятности разрушения

$$\lambda=\left(\frac{\sigma_{во}-\sigma_{max}}{\sigma_{во}-\sigma_{ак}}\right)^{1/\beta}\frac{(N_к)_p}{n_{к\,экв}} \quad . \qquad /16/$$

Если в качестве эквивалентного напряжения использовать максимальную амплитуду программного блока, то уравнение /I6/ примет вид

$$\lambda = \frac{(N_к)_р}{n_{к\,экв}} \qquad /I7/$$

или с учетом уравнений /I/, /4/, /9/

$$\lambda = \frac{\left(\exp 2,3\left[\left(\frac{a_3}{\sigma_{ak}}\right)^{1/\alpha_3} - z_p S\right]\right.}{\sum_{i=1}^{k} n_i \left(\frac{\sigma_{в0} - \sigma_{ai}}{\sigma_{в0} - \sigma_{0k}}\right)^{1/\beta} \exp\left[\left(\frac{a_3}{\sigma_{ak}}\right)^{1/\alpha_3} - \left(\frac{a_3}{\sigma_{ai}}\right)^{1/\alpha_3}\right.}, \qquad /I8/$$

где a_3, α_3 - параметры уравнения /I/;

σ_{ak} - максимальная амплитуда программного блока,

S - среднее квадратическое отклонение величины $\lg N_{p}$

По формуле /I8/ были подсчитаны значения долговечности нагружений образцов по нормальному спектру мгновенных значений случайного процесса и при программном нагружении по спектру, соответствующему нагруженности силового элемента лопатки вертолета. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

А.С.МОСТОВОЙ

О ПРОГНОЗИРОВАНИИ ЛИНИИ ФРОНТА УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ

Прогнозирование линии фронта трещины на разных стадиях усталостного повреждения и в момент разрушения тесно связано с прогнозированием долговечности и позволяет анализировать причины усталостных разрушений.