

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ МАТЕРИАЛОВ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ

А.И.Айнабеков, Т.П. Раимбердиев, А.А.Джумабаев
ЮКГУ им.М.Ауезова, г.Шымкент, МКТУ им. А.Ясави, г. Туркестан

Модель длительного разрушения предполагает одновременное протекание двух или более процессов разрушения, которые не зависят друг от друга или взаимодействуют друг с другом.

Обычно уравнение повреждений от действия различных механизмов (усталость, ползучесть, мгновеннопластическое деформирование и т.д.) можно представить в виде:

$$\Pi = \phi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_k) \quad (1)$$

В работе [1] предлагается записывать критерий разрушения смешанного типа, основанный на гипотезе линейного суммирования повреждений в виде:

$$N_p \int_0^{\tau_y} \frac{d\tau}{\tau_0} + \int_0^{N_p} \frac{dN}{N_0} = 1, \quad (2)$$

где N_p и N_0 - число циклов до разрушения при ползучести и в условиях ее отсутствия; τ_y - время действия одного цикла; τ_0 - время до разрушения при отсутствии циклической смены напряжений.

Путем умножения первого слагаемого уравнения (2) на коэффициент μ авторы работы [2] попытались учесть взаимное влияние повреждений:

$$\mu N_p \int_0^{\tau_y} \frac{d\tau}{\tau_0} + \int_0^{N_p} \frac{dN}{N_0} = 1 \quad (3)$$

Проверка в опытах критериев (2) и (3) показала, что фактическое разрушение при малоциклового усталости происходит раньше, чем предсказывают данные критерии.

Момент разрушения материала, основанный на разбиении процессов повреждаемости на этапах быстрого (пластического) и длительного (вязкого) деформирования предлагается записывать в виде [3]:

$$\Pi_p + \Pi_c + \Pi_s = 1, \quad (4)$$

где Π_p - повреждения от мгновеннопластической деформации, Π_c - повреждения от вязкопластической деформации, Π_s - квазистатические повреждения от односторонне накопленной пластической деформации.

Уравнения для циклического растяжения-сжатия, определяющие скорости повреждений $\dot{\Pi}_p$ и $\dot{\Pi}_c$, имеют вид:

$$\dot{\Pi}_p = H(|\theta| - \theta_c) D(\theta, T) p_*^{a(T)} \dot{p}_* \quad (5)$$

$$\dot{\Pi}_c = H(\Pi_c) H(\theta_c - |\theta|) D(\theta, T) p_*^{a(T)} \dot{p}_*,$$

где H - функция Хевисайда; $D(\theta, T), a(T)$ - функции состояния; T - температура; p, θ - параметры состояния.

Величина $\theta_c = \theta_c(T)$ параметра θ разграничивает области реализации механизмов вязкого ($|\theta| < \theta_c$) и пластического ($|\theta| > \theta_c$) повреждения.

Помимо этого, предложены и критерии смешанного типа, основанные на правиле нелинейного суммирования повреждений. К ним относится критерий Вуда [4]:

$$\lg\left(\frac{\tau}{\tau_p}\right) + a_p \left[\left(\frac{N_p}{N_0}\right)^2 + b_p \left(\frac{N_p}{N_0}\right) \right] = 0 \quad (6)$$

и критерий Р.А.Дульнева [5]:

$$\left[\int_0^{\tau_p} \left(\frac{d\tau}{\tau_p} \right)^\alpha \right] + \left[\int_0^{N_p} \left(\frac{dN}{N_0} \right)^\beta \right] = 1, \quad (7)$$

где $a, b/a_p$ и b_p - коэффициенты, учитывающие взаимное влияние статических и циклических повреждений.

В работе [6] предлагается кинетическое уравнение повреждений комбинированного типа, позволяющее определять поврежденность при чередовании циклического и статического нагружения:

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3, \quad (8)$$

где Π - обратимая величина поврежденности, определяемая по формуле:

$$\Pi_1 = \frac{\bar{\sigma}_{\max}(\tau)}{\bar{\sigma}_p} \quad (9)$$

Здесь $\bar{\sigma}_{\max}(\tau)$ - максимальное за период цикла напряжение на тот момент, для которого определяется величина Π , $\bar{\sigma}_p$ - истинное сопротивление разрыву.

Накапливающаяся в результате выдержки элемента материала под нагрузкой поврежденность Π_2 зависит от уровня действующих напряжений и определяется следующим образом:

$$\Pi_2(\tau) = \int_0^{\tau} \frac{1 - \frac{\bar{\sigma}_{\max}(\theta)}{\sigma_p}}{C_0} \exp \frac{\bar{\sigma}_{\max}(\theta)}{A_0} d\theta, \quad (10)$$

где A_0 и C_0 - постоянные, определяемые по кривой длительной прочности.

Поврежденность циклической усталости Π_3 связана с образованием петель склерономного пластического гистерезиса и определяется по формуле:

$$\Pi_3 = \sum_{k=1}^N \phi \left(\frac{\omega_k}{\omega_p} \right), \quad (11)$$

где ω_k - площадь петли пластического гистерезиса в k -м цикле; ω_p - предельная работа при статическом разрыве.

В случае ступенчатого циклического нагружения текущая поврежденность определяется следующим образом:

$$\Pi(N) = \frac{\bar{\sigma}_{\max}(N)}{\bar{\sigma}_p} + \sum_{k=1}^n \left[\frac{1 - \frac{\bar{\sigma}_{\max}^{(k)}}{\bar{\sigma}_p}}{C_0} \exp \frac{\bar{\sigma}_{\max}^{(k)}}{A_0} T_p N_k \right] + \sum \phi \left(\frac{\omega_k}{\omega_p} \right) N_k, \quad (12)$$

где k - номер блока, N_k - число циклов в k -м блоке, n - количество блоков.

Уравнение (12) также обобщается на случай сложного напряженного состояния. Эффективность данного уравнения проверялась по опытам на комбинированное нагружение в условиях линейного и сложного напряженного состояния. К моменту фактического разрушения теоретическая величина меры повреждения согласно уравнению (12) составляла вместо ожидаемой единицы 0,734-1,170.

Для оценки совместного действия малоциклового усталости и ползучести в работе [7] предлагается уравнение вида:

$$\frac{N_f}{N_{f_0}} + B \left(\frac{N_f}{N_{fc}} \frac{N_f 2t_f}{t_{fc}} \right)^{1,2} - \frac{N_f 2t_f}{t_{fc}} = 1, \quad (13)$$

где N_{f_0} - число циклов до разрушения в чисто усталостном опыте без введения периодов выдержки; t_{fc} - долговечность до разрушения в опыте на чистую ползучесть; t_f - время периода выдержки; B - постоянная.

Полученные по уравнению (13) данные хорошо согласуются с экспериментальными результатами при $B=2,9$, $\Delta \varepsilon_p=13,5\%$ и $\sigma=7,0$ кг/мм². Второе слагаемое выражения (13) учитывает взаимное влияние процессов усталости и ползучести. В работе [8] авторами рассматриваются два варианта критерия разрушения для случая малоциклового усталости с учетом ползучести при высоких температурах. Первый вариант основан на невзаимодействии усталости и ползучести, который выражает линейный закон суммирования повреждений:

$$\frac{N_f}{N_{ff}} + \frac{t_f}{t_{fc}} = 1, \quad (14)$$

где N_{ff} - число циклов до разрушения при независимой от времени усталости; N_{fc} - время до разрушения при независимой от числа циклов ползучести.

Другой вариант критерия разрушения предполагает взаимодействие усталости и ползучести. Исходя из этого, предлагается записывать критерий, выражающий нелинейный закон суммирования повреждений в виде:

$$\left(\frac{N_f}{N_{ff}} \right)^{\gamma^* - \lambda - 1} + \left(\frac{t_f}{t_{fc}} \right)^{\eta^* - \phi - 1} = 1, \quad (15)$$

где γ^* , λ , η^* , ϕ - постоянные материала.

Принцип линейного суммирования повреждений, связанных ползучестью и пластическим деформированием, может быть использован в качестве приближенного расчета.

