

ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ СТАЛЕЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Т. П. Раимбердиев, Н. С. Тагаев

*Южно-Казахстанский Государственный университет и
ШФ Казахской академии транспорта и коммуникации
486005 г.Шымкент, пр. Тауке-Хана, 5*

Рассматривается энергетический подход оценки долговечности сталей при малоцикловом разрушении в условиях простого и сложного нагружения. Предлагается уравнение повреждаемости и расчет малоцикловой прочности сталей на его основе. Результаты апробированы на образцах из сталей 45, 12Х18Н10Т, 08Х18Н10ТВД и жаропрочном сплаве ХН65ВМТЮ.

В настоящей работе рассматривается энергетический подход оценки долговечности (повреждаемости) сталей при малоцикловом разрушении в условиях простого и сложного нагружения.

Для расчета повреждений предлагается следующее уравнение

$$П(N) = \frac{\bar{\sigma}_{\max}(N)}{\bar{\sigma}_p} + \sum_1^N \varphi\left(\frac{\omega}{\omega_p}, R\right), \quad (1)$$

где ω – площадь расчетной петли пластического гистерезиса за цикл; N – количество циклов; ω_p – площадь под кривой статистического разрушения; $\varphi(\omega / \omega_p, R)$ – функциональный параметр, определенный из экспериментов на малоцикловую усталость при одноосном напряженном состоянии; R – коэффициент асимметрии цикла; $\bar{\sigma}_{\max}(N)$ – расчетное значение истинного максимального (главного) напряжения, которое определяется с учетом условия постоянства объема в зависимости от вида напряженного состояния.

В случае растяжения с кручением имеем

$$\bar{\sigma}_{\max}(N) = \frac{\sigma_{xx}}{2} [1 + e_{xx}(N)] [1 + \sqrt{1 + 4k^2 (1 + e_{xx}(N))}], \quad (2)$$

где $k = \tau / \sigma$; $e_{xx}(N)$ – компонента девиатора пластической деформации, равная

$$e_{xx}(N) = (e_{xx}^{(0)} + \sum_1^N \delta_{xx}) . \quad (3)$$

В последнем выражении $e_{xx}^{(0)}$ – расчетная пластическая деформация в нулевом (в исходном) полуцикле нагружения; $\sum_1^N \delta_{xx}$ – односторонне накопленная пластическая деформация, а в сумме представляет собой полную пластическую деформацию удлинения, накопившуюся за N циклов.

Параметры уравнений (1), (2) и (3) определяются на основании структурной модели пластичности [1,2,3] и согласно разработанной методики расчета [4] в условиях простого и сложного циклического нагружения. Данная методика позволяет строить диаграммы пластического деформирования для каждой компоненты девиатора напряжений S_{ij} на основе деформационного подхода теории пластичности. В общем случае сложного нагружения весь путь нагружения разбивается на ряд участков, в пределах каждого из которых нагружение является пропорциональным. При этом интенсивность приращений пластических деформаций на участках разбивки в общем находим по выражению

$$de_i = \frac{d\sigma_i}{E(d\sigma_i)}, \quad (4)$$

причем переход к каждому очередному участку, производится от состояния разгрузки и определяется новое начало координат.

Согласно данной методике, расчет ведется таким образом: если приращения интенсивности напряжений в соответствующих звеньях модели отрицательны от состояния текучести, т.е. $d\sigma_i < 0$, то тогда деформация имеет на данном интервале участка только упругую составляющую.

Приращение интенсивности напряжений для k -ой точки находим по формуле

$$d\sigma_i^{(k)} = \sigma_i^{(k)} - C^{(k)}(N), \quad (5)$$

где $\sigma_i^{(k)}$ – интенсивность напряжений в k -ой точке, $C^{(k)}(N)$ – параметр модели в k -ой точке для соответствующего цикла N (при $N=0$, $k=0$ этот параметр равен пределу текучести материала, т.е. $C=\sigma_T$). Соответствующие компоненты девиаторов напряжений в k -ой точке находим в виде

$$S_{ij}^{(k)} = S_{ij}^{(k)(0)} - [\alpha_{ij}^{(k-1)} + \lambda_{ij}^{(k-1)} d\sigma_i^{(k-1)}]. \quad (6)$$

Здесь: $S_{ij}^{(k)(0)}$ – компоненты девиатора напряжений в k -ой точке, определяемые относительно исходной координаты; $\lambda_{ij}^{(k-1)} = S_{ij}^{(k-1)} / \sigma_i^{(k-1)}$; $\alpha_{ij}^{(k-1)}$ – ордината нового начала отсчета. При этом $k = 1, 2, 3, \dots$; когда $k = 1$, они равны нулю, т.е. $\alpha_{ij}^{(k-1)} = \alpha_{ij}^{(0)} = 0$, что соответствует исходному состоянию материала.

Для k -го полуцикла, отсчитывая от исходной системы отсчета, вычисляем по формуле

$$\alpha_{ij}^{(k)} = \alpha_{ij}^{(k-1)} + S_{ij}^{(k-1)} (1 - C^{(k-1)}(N) / \sigma_i^{(k-1)}). \quad (7)$$

В случае, если в k -ой точке сложного циклического нагружения $d\sigma_i^{(k)} > 0$, то приращение компонентов пластических деформаций определяем в виде

$$de_{ij}^{(k)} = \frac{3}{2} \lambda_{ij}^{(k)} de_i^{(k)}. \quad (8)$$

Согласно трехзвенной структурной модели пластичности [1, 2, 3], приращение компонентов пластических деформаций находят по выражению

$$de_{ij}^{(k)} = (\lambda_{ij}^{(k)} de_i^{(k)} + \lambda_{ij}^{''(k)} de_{ij}^{''(k)} + \lambda_{ij}^{'''(k)} de_i^{'''(k)}) . \quad (9)$$

При этом деформации и напряжения каждого звена определяются от состояния их разгрузки и новых начал координат, т.е. $\alpha_{ij}'^{(k)}$; $\alpha_{ij}''^{(k)}$; $\alpha_{ij}'''^{(k)}$. Причем в рассматриваемой структурной модели пластичности количество звеньев по желанию можно и увеличить.

Расчет малоциклового прочностного состояния сталей на основе уравнения (1) апробированы на образцах сталей 45, 12Х18Н10Т, 08Х18Н10ТВД и жаропрочного сплава ХН65ВМТЮ [5].

Список литературы

1. Павлов П.А., Пенкин А.Н., Раимбердиев Т.П. Малоцикловая усталость при сложном напряженном состоянии и нестационарных циклических нагружениях // Малоцикловая усталость – критерий разрушения и структуры материалов/ Тез. докл. 5 Всесоюз. симпоз. – Волгоград, 1987.-Ч.2.-С.38.
2. Павлов П.А., Раимбердиев Т.П. Малоцикловая усталость при сложном напряженном состоянии и неизотермическом нагружении // Тез. докл. 3 Всесоюз. Симп. Киев. ИПП АН УССР, 1989. С.39.
3. Павлов П.А., Айнабеков А.И., Раимбердиев Т.П., Мельников Б.Е. Длительная прочность сталей в условиях сложного и термомеханического нагружения. Алматы: Гылым, 1996. 247с.
4. Раимбердиев Т.П. Циклическая прочность элементов конструкций машин и оборудования при малом числе циклов нагружения. Препринт. - Алматы, 1997. 53с.
5. Раимбердиев Т.П., Айнабеков А.И., Кирюхин Ш.Ю. Малоцикловая усталость стали 45, 08Х18Н10ТВД, 12Х18Н10Т и жаропрочного сплава ХН65ВМТЮ. – Препринт, Шымкент, 1995. 54с.