

УДК 539.42:669.14

КРИТЕРИИ МАЛОЦИКЛОВОГО РАЗРУШЕНИЯ И УРАВНЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Б.Р.Арапов, К.К.Сырманова, А.А.Джумабаев
ЮКГУ им. М.Ауезова, г.Шымкент

Расчеты на малоцикловую усталость при одноосном напряженном состоянии в настоящее время детально разработаны. Значительно менее изучены вопросы малоциклового нагружения при сложном напряженном состоянии и сложных путях нагружения. Известные обобщения на сложное напряженное состояние классических критериев применимы, главным образом, в условиях пропорционального нагружения, когда материал от цикла к циклу проходит один и тот же путь пластического деформирования. Кроме того, экспериментальные исследования относятся, в первую очередь, к условиям жесткого нагружения, в то же время как натурные конструкции работают часто в условиях мягкого нагружения.

Развитие экспериментальных исследований долговечности материалов при малоцикловом нагружении шло, в основном, по пути усложнения напряженного состояния, реализуемого в опытах. Кроме того, в последнее время при испытаниях практикуется не только синхронное изменение в цикле отдельных компонент тензоров напряжений. Также делается акцент на создание более сложного, чем в традиционных испытаниях на малоцикловую усталость, пути нагружения с сохранением многократной повторяемости напряжений. С практической точки зрения это обосновано тем, что материал в реальных конструкциях часто испытывает строго циклическое нагружение. С другой стороны, при гармоническом циклическом нагружении элемента материала в работе конструкции возможны непредвиденные ситуации, приво-

дающие к разовым или многократным перегрузкам, которые создают напряжения, значительно превосходящие по величине амплитуду рабочих напряжений.

Наряду с экспериментальным изучением долговечности материала при сложных циклических путях нагружения производится проверка применимости в этих условиях известных критериев малоциклового усталости [1].

Так как в основу малоциклового разрушения заложен кинетический подход, то соотношение

$$\Delta \varepsilon^{(\rho)} N_p^m = C \text{ или } (\Delta \varepsilon^{(\rho)})^{1/m} N_p = C^{1/m} \quad (1)$$

целесообразно обобщить в виде кинетического уравнения повреждений, введя в него меру повреждений $0 < \Pi < 1$. Допустим, что величина Π определяется как:

$$\Pi = \frac{\phi(\varepsilon)}{\phi(\varepsilon_p)} \quad (2)$$

где ε_p - величина предельной деформации разрушения. Примем поврежденность в виде степенной зависимости $\Pi = (\varepsilon / \varepsilon_p)^{1/m}$ и запишем при N циклах с различной шириной петель гистерезиса $\Delta \varepsilon_k^p$ в виде:

$$\Pi = 2 \sum_{k=1}^N \left(\frac{\Delta \varepsilon_k^p}{c} \right)^{1/m} \quad (3)$$

Далее, учитывая, что ε_p в деформационном критерии должна рассматриваться как постоянная материала, перепишем зависимость (3):

$$\Pi = \sum_{k=1}^N \left(\frac{\Delta \varepsilon_k^p}{\varepsilon_p} \right)^{1/m} \quad (4)$$

При этом условие разрушения имеем в виде:

$$\sum_{k=1}^N \left(\frac{\Delta \varepsilon_k^p}{c} \right)^{1/m} = 1 \quad (5)$$

Постоянные m и c , определяемые по условиям аппроксимации кривой усталости (рисунок 1) для стали О8Х18Н10Т имеют следующие значения:

$$m=0,62; \quad c=0,432$$

В случае неодноосного циклического нагружения в формулу (3) на основании [2] вносилась интенсивность амплитуд пластической деформации $\Delta \varepsilon_{ij}^p$:

$$\Delta \varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\Delta \varepsilon_x^p - \Delta \varepsilon_\theta^p)^2 + (\Delta \varepsilon_\theta^p - \Delta \varepsilon_r^p)^2 + (\Delta \varepsilon_r^p - \Delta \varepsilon_x^p)^2 + 6 \left[(\Delta \varepsilon_{x\theta}^p)^2 + (\Delta \varepsilon_{\theta r}^p)^2 + (\Delta \varepsilon_{rx}^p)^2 \right]} \quad (6)$$

Как известно, интенсивность амплитуд компонент $\Delta \varepsilon_{ij}^p$ в общем случае не равна интенсивности амплитуд пластической деформации, но в частном случае пропорционального нагружения эти величины совпадают.

Аналогично выводу кинетического уравнения (4) построим уравнение повреждения энергетического типа. Полагаем, что

$$\Pi = \frac{\phi(\omega)}{\phi(\omega_p)}, \quad (7)$$

где ω - работа пластического деформирования за один цикл, ω_p - постоянная материала.

По аналогии с (4), полагая $\Pi = \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{1/m}$, запишем для циклического нагружения:

$$\Pi = \sum_{k=1}^N \left(\frac{\omega_k}{B} \right)^{1/n} \quad (8)$$

Для жесткого стационарного нагружения получим:

$$\omega N_p^n = B \quad (9)$$

Постоянные n и B определены из кривой усталости $\omega - \lg N_p$ (1- кривая на рисунке 2), построенной для стали 08X18H10ТВД и имеют следующие значения: $n=0,87$; $B=1245$.

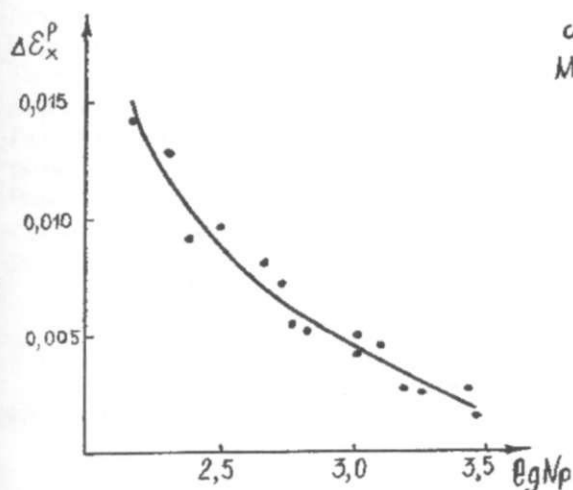
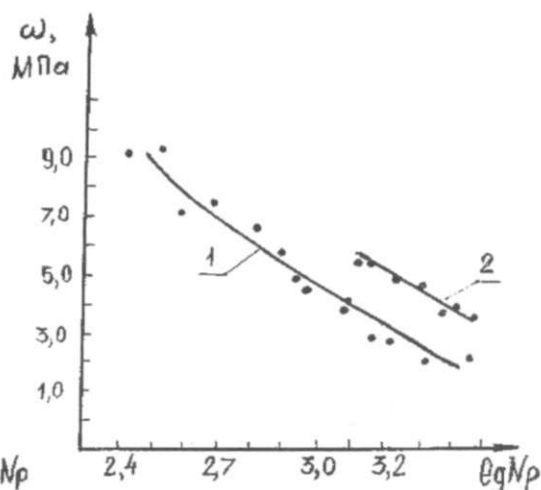


Рисунок 1 - Кривая усталости для стали 08X18H10ТВД



1-при линейном напряженном состоянии,
2-при плоском напряженном состоянии

Рисунок 2 - Зависимость числа циклов до разрушения от величины работы пластического деформирования за цикл

Следуя предложению Гарруда [3], при неоднoосном напряженном состоянии в формулу (8) подставлялась величина работы пластического деформирования за цикл. Значение весового коэффициента $b = 0,5$ получено путем приведения графика долговечности при плоском напряженном состоянии (2 на рисунке 2) к графику долговечности при линейном напряженном состоянии.

При постоянстве максимальных и минимальных за период цикла истинных напряжений уравнение повреждений упрощается [4]:

$$\Pi(N) = \frac{\bar{\sigma}_{\max}(N)}{\sigma_p} + \sum_{k=1}^n \phi \left(\frac{\omega_k}{\omega_p}, R_k \right) N_k, \quad (10)$$

где $\sigma_{\max}$ - максимальное за период цикла напряжение; σ_p - истинное сопротивление статического разрыва; n - число ступеней (блоков) нагружения; N_k - число циклов в k -ом блоке; ω_k - площадь петли пластического гистерезиса; ω_p - площадь под кривой статического разрушения.

В таблице 1 приведены расчетные значения повреждений, полученные по уравнениям (5), (8), (10). Анализ представленных данных показывает следующее:

1. Применение уравнения типа Мэнсона - Коффина в условиях сложного циклического нагружения может привести к существенным ошибкам в оценке долговечности материала. Для

некоторых режимов нагружения величина поврежденности отклонялась от единицы до трех раз. Среднее по всем опытам значение поврежденности получилось при этом в 1,558 раза выше единицы, а отклонение среднего составило 1,114 – 1,333.

2. Энергетический подход и концепция накопления поврежденностей свидетельствуют о хорошем совпадении расчетных и экспериментальных результатов, что позволяет рекомендовать использование при расчете на малоцикловую усталость конструкций, работающих в условиях сложного малоциклового нагружения.

Таблица 1 - Сопоставление расчетных значений поврежденности

№ опыта	Поврежденность по уравнениям:		
	(5)	(8)	(10)
1	2	3	4
1	2,004	1,047	1,246
2	1,841	0,946	1,173
3	2,211	1,136	1,382
4	2,451	1,260	1,514
5	2,672	1,374	1,585
6	2,563	1,322	1,586
7	1,988	1,016	1,241
8	0,370	0,521	0,769
9	0,394	0,544	0,778
10	0,346	0,487	0,745
11	0,342	0,483	0,736
12	0,862	0,975	0,981
13	0,876	1,011	1,014
14	0,734	0,896	0,937
15	0,225	0,404	0,704
16	0,227	0,391	0,696
17	0,243	0,417	0,702
18	2,647	1,449	1,616
19	2,280	1,352	1,457
20	2,370	1,418	1,527
21	2,622	1,680	1,685
22	1,921	1,213	1,315
23	2,388	1,511	1,640
24	2,003	1,334	1,702
25	2,093	1,305	1,438
26	2,267	1,514	1,592
27	1,088	1,349	1,332
28	1,052	0,890	1,248
29	1,768	1,272	1,357
30	1,274	1,217	1,324
31	1,495	1,131	1,241
32	1,542	1,188	1,236
33	1,931	1,724	1,455
34	1,874	1,653	1,343
35		0,928	1,109
36		0,684	1,177
37		0,850	1,226
38		1,129	1,011
39		1,146	1,030

Величина среднего для всех опытов значения поврежденности, рассчитанная по уравнениям (8) и (10), оказалась равной 1,031 и 1,280 соответственно, а отклонение от среднего составило 0,6-0,3 для уравнения (8) и 0,474-0,56 для уравнения (10). При этом для применения урав-

нения (8) требуется проведение двух видов базовых испытаний – циклическое нагружение при линейном и плоском напряженном состояниях. В то же время уравнение (10) требует только одноосные испытания. Кроме того, зависимость (10) может применяться при разной асимметрии цикла, что нельзя сказать о выражении (8).

Следует также отметить, что в случае неодноосного циклического напряженного состояния поврежденность принципиально нельзя вычислить как сумму поврежденностей, создаваемых отдельными компонентами напряжений, исходя из производимой ими работы пластического деформирования. Поврежденность в указанном смысле не должна обладать свойствами коммутативности.

Литература

- 1 Павлов П.А. и др. Об известных критериях малоциклового усталости в условиях сложного циклического нагружения с перегрузками / КазХТИ.- Шымкент, 1995.- 11с.- Деп. в КазГосНТИ 27.03.95. № 5971- Ка95.
- 2 Костюк А.Г., Трухний А.Д., Мичулин В.И. Критерии прочности материалов при малоциклового усталости при сложном напряженном состоянии // Машиноведение.- 1974. – № 5. –С.63-67.
- 3 Гарруд С. Новый подход к расчету усталости при многоосных нагружениях // Теорет. основы инж. расчетов. -1981. – № 2. –С.41-50.
- 4 Раимбердиев Т.П. Экспериментальное исследование малоциклового усталости стали 45 и 12Х18Н10Т в условиях нормальных и повышенных температур // Защита от коррозии металлов и сплавов: Сб. науч. тр.- Шымкент: КазХТИ, 1991.-С.52-56.

Қорытынды

Жұмыста күрделі кернеулі күйдегі аз циклді кәжу кезіндегі болаттың беріктік критериялары қарастырылған. Жүктеудің әртүрлі жағдайларындағы зақымдалудың есептеу тендеулері келтірілген.

Summary

In the given work are considered criterion of durability steel at low-cycle of weariness in conditions of the complex intense status. Also is resulted the settlement equations of damages in various modes obligations.