

ной матрицей. Методы определения характеристик трещиностойкости в статическом растяжении и изгибе. - Госстандарт, Минстанкопром.- 1980, с.17-24.

2. Митропольский А.К. Техника статических вычислений. - М.: Матгиз, 1961, с.31-56.

3. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения. - М.: Наука, 1975, с.206-210.

4. Усов А.Т. Приближенные методы расчета температур нестационально нагреваемых твердых тел простой формы. - М.: Машиностроение, 1973, с.9-56.

620.178.3

В.А.Мехеда

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕЛИНЕЙНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ЦИКЛ В КАЧЕСТВЕ МЕРЫ УСТАЛОСТНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

По усовершенствованной методике, изложенной в /1,2/, были построены петли гистерезиса для алюминиевого сплава Д16АТ и стали 1Х18Н9Т в координатах "напряжение - нелинейная деформация". Петля гистерезиса для стали 1Х18Н9Т приведена на рис.1, где четко проявилась нелинейность участка разгрузки. По петле гистерезиса в процессе усталостных испытаний с постоянной амплитудой перемещения конца консольного образца фиксировались две величины: неупругая деформация за цикл $\Delta \epsilon_n$ и нелинейная деформация за цикл $\Delta \epsilon$. Изменение этих величин в процессе усталостных испытаний образцов из алюминиевого сплава Д16АТ показано на рис.2. Амплитуда напряжения составляла 139 МПа, частота нагружения - 10 гц.

На рис.2 видно, что величины $\Delta \epsilon_n$ и $\Delta \epsilon$ в эксперименте ведут себя по-разному. Неупругая деформация (кривая 1) за цикл в течение 400 тысяч циклов почти не изменялась, в то время как нелинейная (кривая 2) монотонно возрастала. В процессе испытаний наблюдался небольшой поворот петли гистерезиса по ходу часовой стрелки.

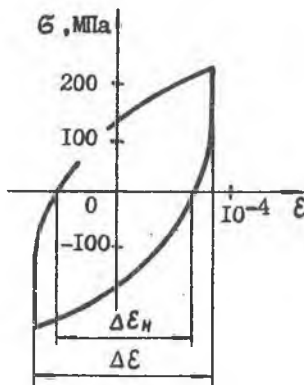


Рис. 1

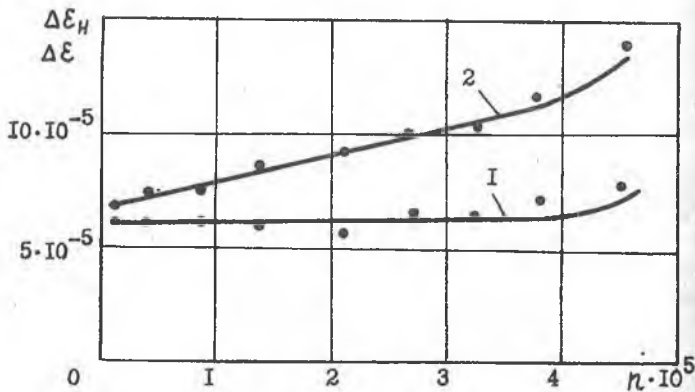


Рис. 2

По-видимому, величина $\Delta \epsilon$ более полно отражает процесс накопления повреждений в металле, чем $\Delta \epsilon_H$, так как она находится по двум состояниям металла под нагрузкой, когда возникшие в нем микротрещины усталости раскрыты. Тензорезистор, наклеенный на поверхность рабочей части образца, фиксирует не только упругую и пластическую деформации, но и деформацию недислокационной природы, обусловленную деструкцией твердого тела [3/].

В.Т.Трошенко /4/ разделяет весь процесс усталостных испытаний по характеру изменения петли гистерезиса на три периода.

Первый период характеризуется интенсивным изменением неупругой деформации за цикл для циклически упрочняющихся и циклически разупрочняющихся материалов. Однако при напряжениях, близких к пределу усталости, он может отсутствовать.

Во втором периоде, продолжительность которого весьма существенно зависит от уровня напряжения, величина $\Delta \epsilon_n$ остается неизменной или несколько увеличивается.

И, наконец, в третьем периоде при напряжениях, превышающих предел усталости, ширина петли гистерезиса резко увеличивается.

Такие же периоды можно выделить, анализируя поведение нелинейной деформации за цикл $\Delta \epsilon$. В наших экспериментах на стали IX18H9T (рис.3), а также на алюминиевом сплаве Д16АТ (рис.4) нелинейная деформация за цикл $\Delta \epsilon$ во втором периоде всегда монотонно возрастала, если уровень напряжения превышал предел выносливости. Минимальное значение величины $\Delta \epsilon$ в экспериментах наблюдалось в начале второго периода нагружения.

Если экстраполировать закон изменения величины $\Delta \epsilon$ во втором периоде, наиболее продолжительном, на первый и третий периоды, то нелинейная деформация за цикл как функция двух переменных - числа циклов нагружения и величины амплитуды напряжения - при регулярном нагружении удовлетворительно описывается следующим уравнением:

$$\Delta \epsilon (n, \sigma) = \Delta \epsilon_0(\sigma) + k \left(\frac{\sigma}{\sigma_{-1}} - 1 \right) \frac{n}{N}. \quad (1)$$

Здесь n - текущее число циклов нагружения; N - число циклов до разрушения образца; σ_{-1} - предел выносливости; $\Delta \epsilon_0(\sigma)$ - полуцикловая нелинейная деформация за цикл, соответствующая началу нагружения.

Коэффициент k для стали IX18H9T равен $k = 9 \cdot 10^{-5}$, а для алюминиевого сплава Д16АТ - $k = 2,63 \cdot 10^{-4}$.

На рис.5 представлены диаграммы деформирования, показывающие изменение минимального значения нелинейной деформации за цикл в зависимости от амплитуды циклической нагрузки. Из диаграмм видно, что на пределе выносливости стали IX18H9T, равном $\sigma_{-1} = 240$ МПа, наблюдается нелинейная деформация за цикл $\Delta \epsilon_{-1} = 5,5 \cdot 10^{-5}$. Для алюминиевого сплава Д16АТ соответственно получено: $\sigma_{-1} = 100$ МПа, $\Delta \epsilon_{-1} = 2 \cdot 10^{-5}$. Наличие нелинейных (а, следовательно, неупругих)

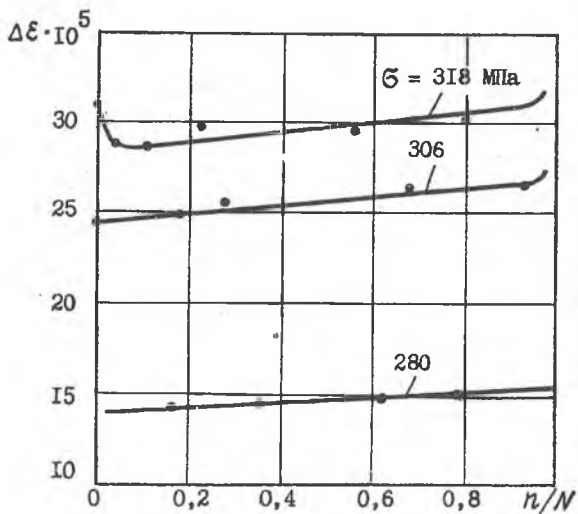


Рис. 3

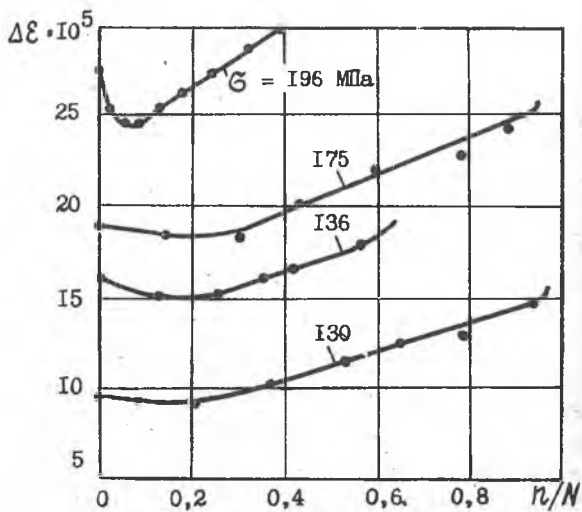


Рис. 4

деформаций на пределе выносливости свидетельствует о том, что нелинейная деформация за цикл $\Delta \varepsilon_{-1}$ является «неопасной» для металла.

Как видно из рис. 6, доля «неопасной» деформации $\Delta \varepsilon_{-1}$ в $\Delta \varepsilon$ весьма существенна в довольно широком диапазоне уровней нагрузки.

Отмеченную особенность деформирования металлов нельзя не учитывать при разработке деформационных критериев усталости. В связи с этим предлагается в качестве меры повреждения за цикл нагружения использовать не всю нелинейную деформацию за цикл, а только часть ее $(\Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon_{-1})$.

Обозначим через D меру усталостного повреждения, которая в начале испытаний равна нулю, а при разрушении — единице. Повреждение D , накапливаемое в материале за бесконечно малое число циклов dn , представим в следующем виде:

$$dD = C (\Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon_{-1})^\alpha dn, \quad (2)$$

где α и C постоянные.

Повреждение D_n , накапливаемое за n циклов нагружения, может быть определено интегрированием уравнения (2)

$$D_n = C \int_0^n (\Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon_{-1})^\alpha dn. \quad (3)$$

В момент разрушения получим

$$D_N = C \int_0^N (\Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon_{-1})^\alpha dn = 1. \quad (4)$$

Если в процессе усталостных испытаний амплитуда нелинейной деформации поддерживается постоянной, то уравнение (4) принимает вид:

$$(\Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon_{-1})^\alpha N = 1/C. \quad (5)$$

Это выражение по форме напоминает уравнение Коффина.

При определении значений коэффициентов α и C возникает определенная трудность. Воспользуемся результатами испытаний при регулярном нагружении. Подставим выражение (I) в (4) и проинтегрируем:

$$K \frac{cN}{\left(\frac{\sigma}{\sigma_{-1}} - 1\right)^{\alpha+1}} \left\{ \left[\Delta \varepsilon_0(\sigma) - \Delta \varepsilon_{-1} + K \frac{n}{N} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{-1}} - 1\right) \right]^{\alpha+1} - (\Delta \varepsilon - \Delta \varepsilon_{-1})^{\alpha+1} \right\} = 1. \quad (6)$$

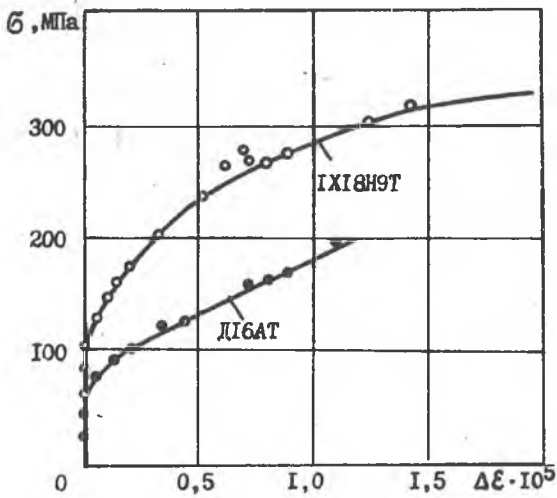


Рис. 5

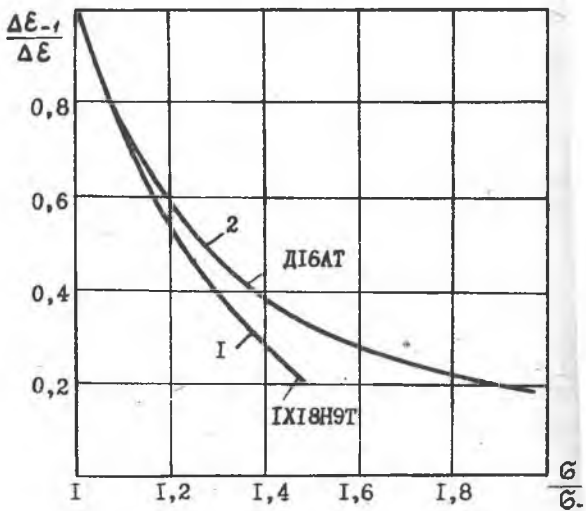


Рис. 6

Параметры α и C , входящие в полученное выражение, были определены приближенно с использованием методики статистической обработки наблюдений, описанной в /5/.

В результате для стали IX18H9T было получено $\alpha = 0,706$, $C = 0,0026$, а для алюминиевого сплава Д16АТ $\alpha = 0,810$, $C = 0,0064$.

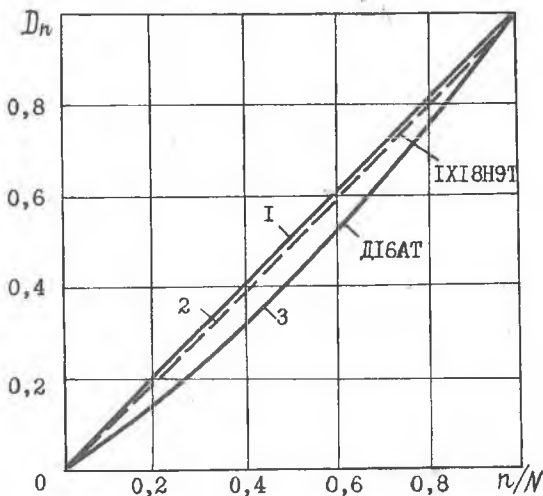


Рис. 7

Если бы в процессе усталостных испытаний амплитуда нелинейной деформации за цикл поддерживалась постоянной, то накопление повреждений D_n в материале, подсчитанное по формуле (3), следовало бы точно по линейному закону накопления повреждений Пальмгрен-Майнера (кривая I на рис.7):

$$D_n = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i}.$$

При этом повреждение, вносимое отдельным циклом, было бы одним и тем же, независимо от момента его приложения. В действительности расчеты по формуле (6) показывают, что скорость накопления повреждений D_n сначала ниже, а в конце усталостного испытания выше, чем скорость накопления по линейной теории (кривые 2 и 3 на рис.7). Этот результат не противоречит имеющимся пред-

ставлениям о характере накопления повреждений в металле при резком нагружении.

Исследование в процессе усталостных испытаний нелинейных деформаций за цикл наряду с неупругими позволяет глубже изучить характер происходящих изменений в металле.

Для стали IX18H9T и алюминиевого сплава Д16АТ нелинейная деформация за цикл при напряжениях области многоциклового усталостного соизмерима с ее значением на пределе выносливости. Эта особенность деформирования металлов должна учитываться при разработке деформационных критериев усталости.

Л и т е р а т у р а

1. Чернышев В.М. Методы прямого измерения нелинейной деформации (обзор). - Заводская лаборатория, 1971, № 3, с.341-343.

2. Мехеда В.А., Хазанов Х.С. О методах измерения динамической петли гистерезиса. - В кн.: Вопросы прикладной механики в авиационной технике. Труды Куйбышевского авиационного института, вып. 63, 1972, с.47-52.

3. Ровинский Б.М., Рыбакова Л.М., Меренкова Р.Ф. Диаграммы напряжений-деформаций и структурные изменения в металле при малочисловой усталости. - В сб.: Прочность при малом числе циклов нагружения. Изд-во "Наука", М., 1969, с.41-49.

4. Трощенко В.Т. Усталость и неупругость металлов. - Киев: Наукова думка, 1971. - 268 с.

5. ЩигOLEB Б.М. Математическая обработка наблюдений. - М.: Наука, 1969. - 344 с.