

НЕЛИНЕЙНОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОМ КРУЧЕНИИ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Общепринято [1,2] нелинейность накопления повреждаемости при монотонном деформировании описывать уравнением:

$$\Pi = \int_0^{\Pi} d\Pi = \left(\frac{\Lambda}{\Lambda_{\text{пр}}} \right)^{a+1}, \quad (1)$$

где Π – повреждаемость металла, при разрушении $\Pi=1$;

Λ – степень интенсивности сдвига при пластической деформации;

$\Lambda_{\text{пр}}$ – предельная (или критическая) степень интенсивности сдвига, при которой происходит разрушение металла;

a – параметр, характеризующий нелинейность накопления повреждаемости.

В работе [1] показано, что параметр a не может быть определен экспериментально при монотонном деформировании, -возможно только определить его относительную величину $(a_i + 1)/(a_j + 1)$, где параметр a_i соответствует среднему напряжению s_i , а параметр a_j соответствует среднему напряжению s_j . Установлено, что увеличение среднего напряжения s (или снижение гидростатического давления) приводит к увеличению нелинейности накопления повреждаемости, т.е. росту параметра a .

Рассмотрим возможность определения нелинейности накопления повреждаемости при знакопеременном кручении. С этой целью нами выгачивались трубчатые образцы (см. рис.1) из технического свинца, которые затем подверглись кручению как в одном направлении до разрушения, так и знакопеременному кручению с различной амплитудой так же до разрушения.

При кручении в одну сторону была определена предельная степень интенсивности сдвига:

$$\Lambda_{\text{пр}} = \frac{\pi D \varphi_{\text{пр}}}{1 \cdot 360^\circ}, \quad (2)$$

где D – наружный диаметр рабочей части образца;

l – длина диаметр рабочей части образца;

$\varphi_{\text{пр}}$ – угол в градусах, на который закручена одна жесткая часть образца относительно второй жесткой части.

При знакопеременном кручении жесткие части образца поворачиваются на углы $\pm 22,5^\circ; \pm 90^\circ; \pm 180^\circ$. Деформации за цикл нагружения N вычислялась по формуле:

$$\Lambda_{\text{ц}} = 2\Lambda_i = \frac{2\pi D \cdot 2\varphi_i}{1 \cdot 360^\circ}, \quad (3)$$

где угол $2\varphi_i$ соответствует амплитуде деформации, один цикл нагружения N подразумевает вращения в одну и в противоположную сторону.

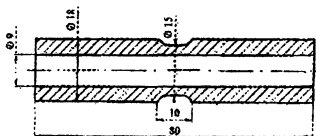


Рис. 1

Разрушение при знакопеременном кручении (или, так называемая малоцикловая усталость) в литературе [1-4] определяется зависимостью:

$$\Lambda_{\text{ц}} N_{\text{пр}} = \Lambda_{\text{пр}} (2N_{\text{пр}})^{1-\gamma}, \quad (4)$$

где γ – коэффициент Менсона-Коффина [5, 6];

$N_{\text{пр}}$ – количество циклов до разрушения.

Именно на особенности указанной зависимости (4) построено наше исследование нелинейности повреждаемости при малоцикловой усталости. Рассмотрим состояние металла после N_i цикла нагружения. Повреждаемость металла в этот момент равна Π_i . Считаем, что это квази-исходное состояние металла, который мы якобы вновь знакопеременно деформируем с прежней амплитудой и он разрушается после $N_{\text{доп}}$ количества циклов нагружения. Так как зависимость (4) должна распространяться и на этот этап деформирования, то возможно определить предельную степень интенсивности сдвига $L_{\text{пр-доп}}$, соответствующее повреждаемости Π_i :

$$\Lambda_{\text{ц}} N_{\text{доп}} = \Lambda_{\text{пр-доп}} (2N_{\text{доп}})^{1-\gamma}. \quad (5)$$

Возьмем логарифм обеих частей выражения (5):

$$\ln(\Lambda_{\text{ц}} N_{\text{доп}}) = \ln \Lambda_{\text{пр-доп}} + (1-\gamma) \ln(2N_{\text{доп}}). \quad (6)$$

Из выражения (6) определим:

$$\ln \Lambda_{\text{пр-доп}} = \ln(\Lambda_{\text{ц}} N_{\text{доп}}) - (1-\gamma) \ln(2N_{\text{доп}}). \quad (7)$$

Коэффициент g определяется из эксперимента на полный этап деформирования исходного металла до разрушения при $N_{пр}$ по формуле (4). По формуле (7) может быть определена степень интенсивности сдвига на любом этапе деформирования от 0 до $L_{пр}$. Результаты расчета представим в виде графика в координатах Π - ψ , где повреждаемость $\Pi = (L_{пр} - L_{пр доп}) / L_{пр}$ изменяется от нуля в начале деформации, когда $L_{пр доп}$ равно $L_{пр}$, – до 1 в конце деформации, когда

$L_{пр доп} = 0$; ψ – относительная деформация металла $L_i / L_{пр}$, для знакопеременного кручения $\psi = N_i / N_{пр}$ и изменяется от 0 в начале деформации до 1 в конце. Таким образом выражение (1) может быть представлено в виде:

$$\Pi = \psi^{a+1}. \quad (8)$$

Коэффициент a может быть определен из выражения (8):

$$a = \frac{\ln \Pi}{\ln \psi} - 1. \quad (9)$$

Результаты обсчета экспериментальных данных для кручения образца циклически закручиваемого на угол $\phi = \pm 22,5^\circ$ представлены в табл. 1.

Таблица 1

$N_{пр} = 70$; $\Lambda_i = 0,589$; $\Lambda_{пр} = 16$; $\gamma = 0,6682$

N	ψ	Π	a
0	0	0	-
10	0,14	0,09	0,17
20	0,29	0,21	0,26
30	0,43	0,31	0,39
40	0,57	0,43	0,50
50	0,71	0,57	0,64
60	0,86	0,73	1,09
65	0,93	0,83	1,57
67	0,96	0,88	2,40
70	1	1	-

Согласно [2] зависимость между g и a может быть представлена в виде:

$$a = \frac{1}{\gamma} - 1. \quad (10)$$

Для $\gamma = 0,6682$ коэффициент a должен быть равен 0,497.

Эксперимент (см. табл.1) показывает, что параметр a меняется от 0,17 до 2,40. Сделаем попытку уточнить результаты эксперимента. Будем исходить из вполне логичной предпосылки о том, что исходный материал имеет некоторую повреждаемость, т.е. $\Pi \neq 0$. Определить это состояние возможно по углу наклона касательной в теоретической кривой $\Pi = \Pi(\psi)$ и в экспериментальной аналогичной кривой:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{0,10}{0,14} = 0,7143; \varphi = 35,5^\circ. \quad (11)$$

Взяв производную уравнения (8) найдем:

$$\Pi' = (1 + a)\Psi^a. \quad (12)$$

Из равенства (11) и (12) найдем $\Pi_{\text{ост}} = 0,89$, $\psi_{\text{ост}} = 0,77$.

Коррекция для экспериментов с кручением на $\pm 22,5^\circ$ будет следующая:

$$\Lambda_{\text{пр}} = \frac{16}{0,89} = 18; N_{\text{пр}} = \frac{70}{0,77} = 90,9.$$

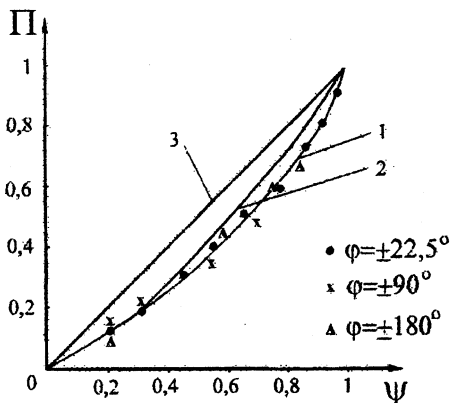


Рис.2

Обработанные экспериментальные данные, с учетом произведенной коррекции, представлены в табл. 2 и на графике в виде кривой 1 (рис. 2). Кривая 2 отображает зависимость (1) при $a=0,497$. Кривая 3 соответствует линейной зависимости, т.е. при $a=0$.

Таблица 2

$$N_{mp}=90,9; \Lambda_i=0,589; \Lambda_{mp}=18; \gamma=0,6682$$

N	ψ	П	$\Pi_{\text{теор}}$	ошибка П	$a_{\text{эксп}}$	ошибка а
0	0	0	0	-	-	-
20,9	0,23	0,11	0,11	0	0,50	2%
30,9	0,34	0,20	0,20	0	0,49	4%
40,9	0,45	0,29	0,30	3%	0,55	7%
50,9	0,56	0,39	0,42	8%	0,62	18%
60,9	0,67	0,49	0,55	12%	0,78	35%
70,9	0,78	0,62	0,69	11%	0,92	45%
80,9	0,89	0,76	0,84	11%	1,36	63%
85,9	0,94	0,83	0,91	10%	2,01	75%
87,9	0,97	0,89	0,96	8%	2,82	82%
90,9	1	1	1	-	-	-

Результаты для знакопеременного кручения с углом закручивания $\pm 90^\circ$ представлены в табл. 3, и для знакопеременного кручения с углом закручивания $\pm 180^\circ$ представлены в табл. 4.

Таблица 3

$$N_{mp}=13; \Lambda_i=2,3562; \Lambda_{mp}=18; \gamma=0,6394$$

N	ψ	П	$\Pi_{\text{теор}}$	ошибка П	$a_{\text{эксп}}$	ошибка а
0	0	0	0	-	-	-
3	0,23	0,11	0,11	0	0,50	2%
8	0,62	0,43	0,49	14%	0,77	34%
10	0,77	0,59	0,67	14%	1,02	50%
11	0,85	0,68	0,78	15%	1,38	63%
13	1	1	1	-	-	-

Таблица 4

$$N_{mp}=3,5; \Lambda_i=4,7124; \Lambda_{mp}=18; \gamma=0,6282$$

N	ψ	П	$\Pi_{\text{теор}}$	ошибка П	$a_{\text{эксп}}$	ошибка а
0	0	0	0	-	-	-
1	0,22	0,11	0,10	9%	0,46	11%
1,5	0,33	0,19	0,19	0	0,50	2%
2,5	0,56	0,37	0,42	14%	0,71	28%
3,0	0,67	0,48	0,55	15%	0,83	39%
3,5	1	1	1	-	-	-

Анализ результатов исследования позволяет сделать следующие выводы:

1. Разработана экспериментальная методика, позволяющая при знакопеременном кручении определять нелинейность накопления повреждаемости.
2. В исходном состоянии металл обладает некоторой, отличной от нуля, повреждаемостью.
3. Известная степенная зависимость (1) нелинейности накопления повреждаемости удовлетворительно подтверждается экспериментально.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шукин В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки. -Минск: Наука и техника, 1986.-223с.
2. Красневский С.М., Макушок Е.М., Шукин В.Я. Разрушение металлов при пластическом деформировании. -Минск: Наука и техника, 1983.-173с.
3. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением -М.: Металлургия, 1984.-144с.
4. Пластичность и разрушение. Под ред. В.Л.Колмогорова. -М.: Металлургия, 1977.-336с.
5. Менсон С. Температурные напряжения и малоцикловая усталость. -М.: Машиностроение, 1974.-344с.
6. Coffin L. Trans. ASME, 1954.- V.76.- P.931.