Изв. АН Армянской ССР, Физика, 13, 484—488 (1978)

ПОВРЕЖДАЮЩАЯ ЭНЕРГИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ПРОГРАММНОМ НАГРУЖЕНИИ

З. Ф. ЗАЗЯН, И. С. МЕЗЕНЦЕВ, А. А. ХАНОНКИН

Показано, что на основе предложенного экспериментального закона накопления повреждающей энергии при циклическом программном нагружении удовлетворительно объясняются полученные экспериментально закономерности накопления усталостных повреждений в материале при таком нагружении.

Для развития теории усталостного разрушения и решения практических задач по прогнозированию долговечности материалов необходимо обосновывать аналитические законы усталости, устанавливаемые на основе экспериментальных данных, на базе структурно-энергетических признаков повреждаемости. Исследование энергетических превращений в циклически деформированном материале необходимо для выяснения природы потери устойчивости поверхностного слоя материала [1, 2], приводящей к возникновению трещин и разрушению.

До нагружения в эксплуатационных условиях материал характеризуется двумя константами: начальной энергией искажения кристаллической решетки $A_н$, определяемой его предысторией, и предельной энергией разрушения $A_р$ [3]. В процессе циклического нагружения происходит поглощение материалом «опасной» повреждающей энергии или энергии искажения кристаллической решетки $A_п$, которая связана с пластической деформацией [4]. По достижении этой энергией своей предельной величины, определяемой силами межатомных связей, происходит нарушение последних и разрушение материала. Это свидетельствует о глубокой связи между поглощаемой энергией и накоплением повреждений.

В работе [5] на основании факта существования предела выносливости у большинства материалов предложен экспоненциальный закон для описания изменения энергии искажения кристаллической решетки материала в процессе его циклического нагружения. С учетом положений о затухающем характере неупругой деформации за цикл с увеличением числа циклов нагружения [4] и термодинамическими представлениями о процессе усталостного разрушения материала [6] процесс накопления энергии искажения кристаллической решетки при нагружении имеет вид, изображенный на рис. 1, и выражается уравнением

$$A_п(N) = A_\sigma (1 - e^{-bN}), \tag{1}$$

где A_σ — энергетический уровень нагружения, N — число циклов до разрушения на уровне A_σ, b — параметр экспоненты.

На рис. 1 экспонента 1 описывает накопление энергии искажения на некотором уровне нагружения, когда начальная энергия равна нулю, а экспонента 2 — для реального случая нагружения $A_н > 0$ ($A_п$ показан как результат нагружения материала условным числом циклов $N_н$). Экспо-

нента 3 описывает тот же процесс на уровне предела выносливости, когда на ранних стадиях циклического нагружения имеет место уменьшение начальной энергии, изображаемое экспонентой 4 и известное как упрочнение материала при программном нагружении.

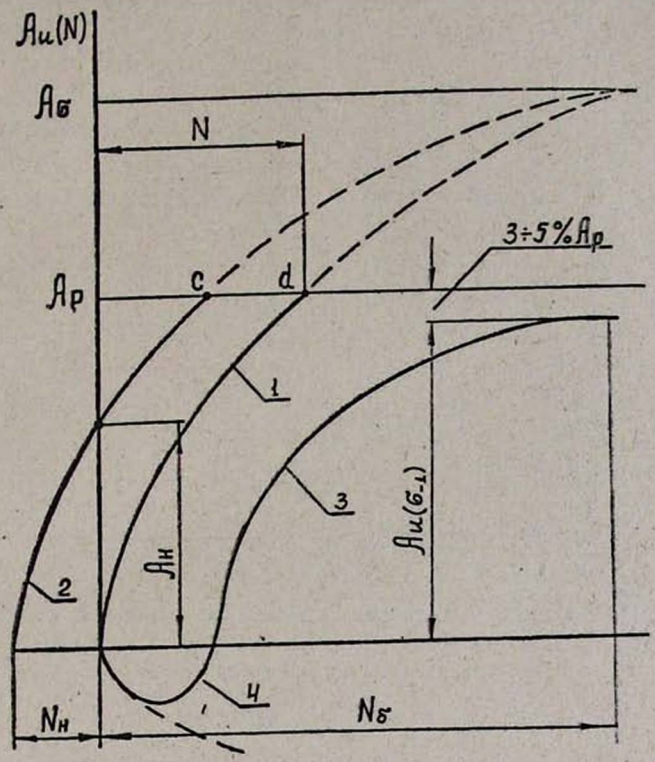

Рис. 1. Экспоненциальный закон накопления повреждающей энергии кристаллической решетки материала при усталости; c и d — точки разрушения.

Процесс накопления энергии искажения при многократном одноступенчатом изменении напряжений между двумя уровнями σ_1 и σ_2, действующими в блоке нагружения ($n_\Sigma = n_1 + n_2$) в течение n_1 и n_2 циклов соответственно, показан на рис. 2. Уменьшение начальной энергии искажения, имеющее место в этом случае нагружения, трудно изобразить графически. Известно, что при несущественной разнице между ступенями напряжений в блоке нагружения процесс накопления повреждений следует линейному закону [7]. Описание изменения энергии при таком виде нагружения приведено в работе [5].

Оценка процесса накопления энергии искажения кристаллической решетки для случая широкого диапазона изменения параметров режима нагружения между двумя уровнями A_{σ_1} и A_{σ_2} определяется суммой отношений энергий, поглощенных на ступенях нагружения (Aun_1 и Aun_2), к величинам энергий AuN_1 и AuN_2, непрерывно поглощенных на этих ступенях вплоть до разрушения или пересечения экспонентами 1 и 2 энергетического уровня A_p (рис. 2), и рассчитывается по формуле

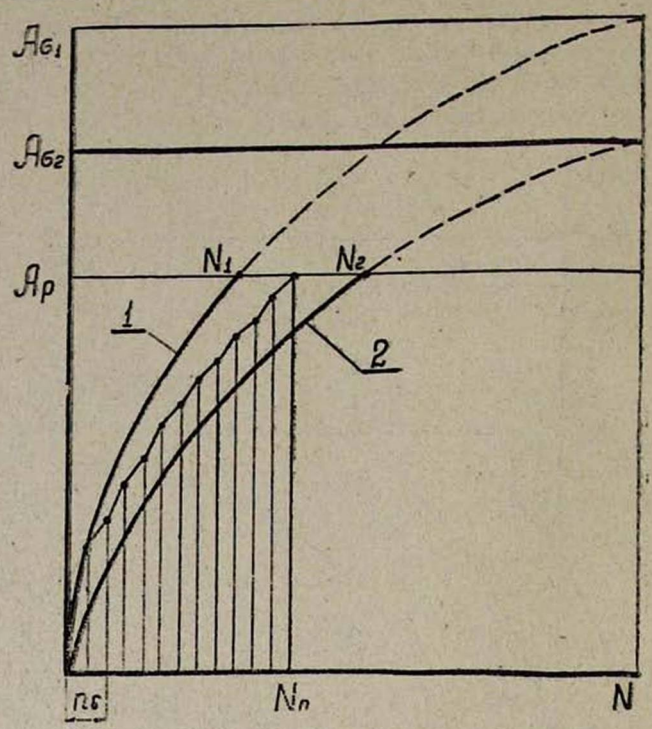

Рис. 2. Накопление повреждающей энергии кристаллической решетки материала при программном нагружении: 1 — на уровне A_{σ_1}; 2 — на уровне A_{σ_2}; $N_б$ — базовое число циклов нагружения.

$$a_э = \frac{Aun_1}{AuN_1} + \frac{Aun_2}{AuN_2}. \tag{2}$$

Из выражения (1) следует, что

$$Aun_1 = A_{\sigma_1}(1 - e^{-b_1 n_1}), \quad Aun_2 = A_{\sigma_2}(1 - e^{-b_2 n_2}),$$
$$AuN_1 = A_{\sigma_1}(1 - e^{-b_1 N_1}), \quad AuN_2 = A_{\sigma_2}(1 - e^{-b_2 N_2}).$$

Тогда выражение (2) перепишется в виде

$$a_э = \frac{1 - e^{-b_1 n_1}}{1 - e^{-b_1 N_1}} + \frac{1 - e^{-b_2 n_2}}{1 - e^{-b_2 N_2}}. \tag{3}$$

Исходя из того (см. рис. 1), что

$$A_p = A_\sigma (1 - e^{-bN}),$$

находим

$$b = -\frac{\ln\left(1 - \frac{A_p}{A_\sigma}\right)}{N}.$$

Расчет $a_э$ производился при следующих допущениях:

1) начальная энергия искажения кристаллической решетки бралась равной нулю;

2) энергия разрушения материала принималась равной единице;

3) используемые в расчетах энергетические уровни считались эквивалентными уровням нагружения и выражались через A_p в соответствии с параметрами режима программного нагружения.

Так как $n_1 = \beta N_n$ и $n_2 = (1-\beta)N_n$, мы вычисляем их для соответствующих уровней нагружения, беря N_n из результатов эксперимента, а $\beta = n_1/n_2$ — из условий нагружения [8, 9].

Результаты вычислений $a_э$ по формуле (2) для сравнения с результатами вычислений сумм относительных долговечностей (a), взятых из работ [8, 9], при одинаковых параметрах режима программного нагружения приведены в таблице. Данные таблицы показывают, что различие

Таблица

Режим нагружения			гладкие		с отверстием		с выточкой	
$n_б$	β	$\Delta\sigma/\sigma-1$	a	$a_э$	a	$a_э$	a	$a_э$
5700 (циклов)	0,25	0,14	2,096	1,940	1,442	1,291	1,684	1,943
		0,28	3,609	2,904	1,939	1,464	1,872	2,004
		0,42	5,433	4,887	2,410	1,899	3,458	1,982
	1,0	0,14	1,610	1,839	1,410	0,929	1,260	1,100
		0,28	2,400	2,102	1,700	1,410	1,450	1,230
		0,42	5,530	2,815	2,320	1,585	1,950	2,144
		0,60	2,070	2,823	1,417	1,444	1,860	2,002
		0,75	2,470	2,713	0,989	1,118	2,270	1,830
	4,0	0,14	1,350	0,817	1,282	1,067	1,240	0,913
		0,28	1,768	1,107	1,545	1,035	1,330	1,112
		0,42	2,375	1,780	1,745	1,843	1,488	1,276

между обеими характеристиками процесса усталости материала при программном нагружении незначительно.

Из изложенного следует, что энергетическое описание процесса накопления усталостных повреждений при программном нагружении свидетельствует о невыполнении для этого процесса гипотезы линейного суммирования повреждений, справедливой для стационарного нагружения.

Ереванский политехнический институт
НИИФ Одесского государственного университета

Поступила 1.XII.1977

ЛИТЕРАТУРА

1. *В. Г. Диневич, А. А. Ханонкин, Л. Б. Эрлих.* Сб. Детали машин, Изд. Техніка, 1973, вып. 17, стр. 66.
2. *М. А. Барт* и др. Геометрические методы исследования деформаций и напряжения, Тезисы докладов, Челябинск, 1975, стр. 91.
3. *В. С. Иванова.* Усталостное разрушение металлов, Металлургиздат, 1963.
4. *В. Т. Трощенко.* Усталость и неупругость металлов, Изд. Наукова думка, 1971.

5. *Н. В. Олейник, И. С. Мезенцев.* Сб. Детали машин, Изд. Техніка, 1974, вып. 18, стр. 105.
6. *В. В. Федоров.* Сб. Вопросы прочности, износостойкости и динамики деталей машин, Ташкент, 1971, вып. 48, стр. 3.
7. *С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович.* Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность, Изд. Машиностроение, 1975.
8. *Н. В. Олейник, И. С. Мезенцев.* Сб. Прочность металлов при переменных нагрузках, Изд. АН СССР, 1963, стр. 127.
9. *Н. В. Олейник, И. С. Мезенцев.* Изв. вузов, сер. машиностр., 1966, вып. 7, стр. 49.

ՎՆԱՍՎԱԾՔԱՅԻՆ ԷՆԵՐԳԻԱՆ ՑԻԿԼԻԿ ԾՐԱԳՐԱՅԻՆ ԲԵՌՆԱՎՈՐՄԱՆ ԺԱՄԱՆԱԿ

Զ. Ֆ. ԶԱԶՅԱՆ, Ի. Ս. ՄԵԶԵՆՑԵՎ, Ա. Ա. ԽԱՆՈՆԿԻՆ

Քանի որ ցիկլիկ ծրագրային բեռնավորման ժամանակ վնասվածքային էներգիան կուտակվում է էքսպոնենցիալ օրենքով, ապա ցույց է տրված, որ այն բավարար չափով բացատրում է փորձնական եղանակով ստացված օրինաչափությունը՝ հոգնածության վնասվածքի կուտակումը նյութում այդպիսի բեռնավորման դեպքում։

DAMAGING ENERGY DURING CYCLIC PROGRAMMED LOADING

Z. F. ZAZYAN, I. S. MEZENTSEV, A. A. KHANONKIN

It has been shown that on the basis of the proposed experimental law, the accumulation of damaging energy during the cyclic programmed of loading satisfactorily explains the gained experimental regulammed of accumulated fatique damage in materials upon such a loading.