

УДК 669:539.67

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОГО ИСТОЧНИКА В ОЧАГЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Г.А. Куриленко

Новосибирский государственный технический университет  
E-mail: teormech@ngs.ru

Показано, как по тепловому полю образца при его поэтапном ступенчатом циклическом нагружении с возрастающей амплитудой напряжений можно определять мощность теплового источника, который как бы функционирует в очаге развития усталостной повреждаемости. По кинетике этой мощности оказалось возможным неразрушающим образом прогнозировать некоторые характеристики усталостного процесса, в частности индивидуальный предел выносливости испытываемого объекта.

### Ключевые слова:

Температурное поле, амплитудное напряжение, мощность теплового источника, предел выносливости.

### Key words:

Temperature field, peak stress, capacity of thermal source, endurance limit.

### 1. Методика эксперимента

В рамках развития термографического подхода при исследовании усталостной повреждаемости были проведены испытания трубчатого образца при его продольных циклических колебаниях. Посередине рабочей части образца на его наружной поверхности делалась риска (концентратор напряжений) глубиной 0,05 мм.

Схема испытания приведена на рис. 1, а. Образец 1 верхним концом жестко крепится к неподвижной массе 2. К нижнему концу прикрепленна масса 3, на внешнем торце которой закреплены плотно стянутые листы из трансформаторной стали. Обмотки электромагнита 4 запитаны от шкафа управления. При подаче питания на обмотки в образце возбуждаются продольные колебания. Регулируя частоту питающего напряжения, колебательную систему вводят в резонансный режим. Регулировкой силы тока устанавливают необходимую амплитуду колебаний.

Осуществляется поэтапная циклическая наработка образца со ступенчато возрастающей от этапа к этапу амплитудой колебаний. Продолжительность наработки на каждом этапе незначительна и составляет 3 % от базового числа циклов при напряжениях ниже предполагаемого предела выносливости или от расчетной долговечности образца при напряжениях выше предела выносливости.

Эксперимент показал, что через некоторый момент времени  $t_0$  температурное поле образца практически стабилизируется. Это поле фиксировалось с помощью тепловизора «Рубин», имеющего чувствительность 0,01 °С при выключенном механизме сканирования. На полученных температурных кривых выделяется зона повышенного тепловыделения в районе риски – очаг зарождения и развития усталостных повреждений (см. рис. 1, б, в).

### 2. Расчетные формулы

Поставим задачу: по температурному полю  $T=T(t,x)$  при колебаниях образца со стационарной амплитудой напряжений  $\sigma_a$  определить мощность  $q_1^*=q_1^*(t,\sigma_a)$ , выделяющуюся в районе концентратора напряжений, и удельную мощность  $q_2=q_2(t,\sigma_a)$ , выделяющуюся в остальной части образца (рис. 1, б).

Для элемента образца составим уравнение теплопроводности с учетом отдачи тепла конвекцией с его поверхности (излучением из-за его малости пренебрегаем) [1]:

$$\rho C_v \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q_2 - r(T - T_0). \quad (1)$$

Здесь  $\rho$ ,  $C_v$ ,  $\lambda$  – плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала образца;  $T_0$  – температура окружающего воздуха;  $r = \alpha \pi D/A$ , где  $\alpha$  – местный коэффициент теплоотдачи конвекцией;  $D$ ,  $A$  – наружный диаметр и площадь сечения образца. В выражении (1) предполагается постоянство температуры по толщине трубки вследствие ее тонкостенности.

Поскольку при  $t \geq t_0$  процесс является квазистационарным, то можно принять  $\partial T / \partial t \approx 0$ . В этом случае уравнение (1) упрощается:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - r \frac{T}{\lambda} = -r \frac{T_0}{\lambda} - \frac{q_2}{\lambda}. \quad (2)$$

Общее решение неоднородного уравнения (2):

$$T = C_1 \exp\left(x \sqrt{\frac{r}{\lambda}}\right) + C_2 \exp\left(-x \sqrt{\frac{r}{\lambda}}\right) + T_0 + \frac{q_2}{r}.$$

После нахождения констант интегрирования из граничных условий:

- при  $x=0$ ,  $\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{q_1}{(\lambda A)}$ , (здесь  $q_1 = \frac{q_1^*}{2}$ );

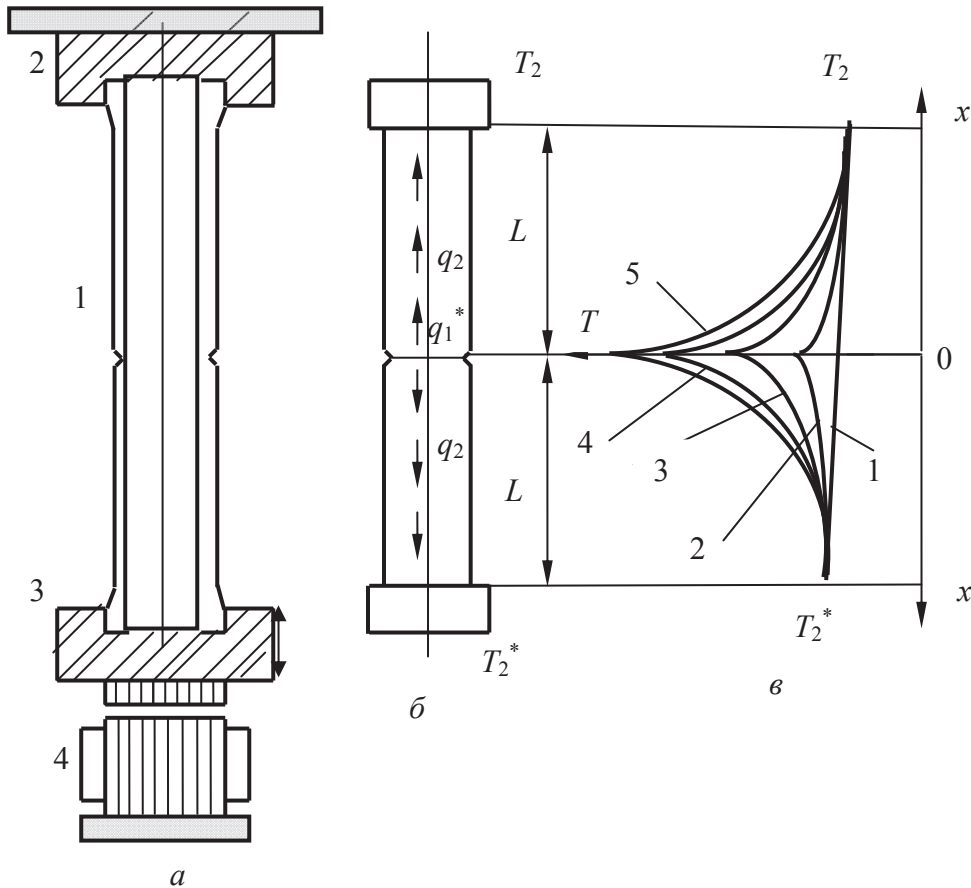


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

- при  $x=L$ ,  $T=T_{2m}$  ( $T_{2m}$  – средняя температура на концах образца) получаем закон распределения температуры вдоль оси образца:

$$T = T_{2m}X + \left(T_0 + \frac{q_2}{r}\right)(1-X) + \frac{q_1}{A\sqrt{r\lambda}} \left[ X \exp\left(L\sqrt{\frac{r}{\lambda}}\right) - \exp\left(x\sqrt{\frac{r}{\lambda}}\right) \right]. \quad (3)$$

Здесь  $X = \frac{\operatorname{ch}\left(x\sqrt{\frac{r}{\lambda}}\right)}{\operatorname{ch}\left(L\sqrt{\frac{r}{\lambda}}\right)}$ .

### 3. Результаты эксперимента

На рис. 1, б, представлены пять экспериментальных кривых по результатам испытаний одного образца. Для определения величин  $q_1^*$  и  $q_2$  следует обработать эти кривые с учетом распределения температуры по выражению (3). Каждая температурная кривая соответствует определенному уровню  $\sigma_c$ . Чем выше  $\sigma_c$ , тем резче возрастает температура в районе концентратора напряжений ( $x=0$ ).

Расчет ведем по шести точкам на левой и правой ветвях температурных кривых. Их координаты:

$x_1=0$ ;  $x_2=7,8$ ;  $x_3=15,8$ ;  $x_4=23,7$ ;  $x_5=31,6$ ;  $x_6=40$  мм. Асимметрия левых и правых ветвей температурных кривых объясняется тем обстоятельством, что нижняя масса 3 имеет более высокую температуру, чем верхняя, т. к. она, несмотря на ее охлаждение, нагревается от электромагнита:  $T_2^* - T_2 = 1$  °С. Поэтому возникает небольшой дополнительный тепловой поток от нижней массы к верхней, который, используя принцип суперпозиции, можно исключить из расчетов. Для этого температуры симметричных расчетных точек усредняются и в уравнении (3)

$$T_{2m} = \frac{T_2 + T_2^*}{2}.$$

Обработка температурных кривых проводилась по методу наименьших квадратов [2]. В таблице представлены исходные данные для обработки, взятые по кривой 5 из рис. 1, в.

После определения коэффициентов нормальных уравнений последние принимают вид:

$$6q_1 + 7,64 \cdot 10^{-6}q_2 = 0,402;$$

$$7,64 \cdot 10^{-6}q_1 + 10,8 \cdot 10^{-12}q_2 = 0,513 \cdot 10^{-6}.$$

Из решения этой системы находились  $q_1$  и  $q_2$ . Затем определялись веса этих величин и средние квадратические ошибки на единицу веса при определенной доверительной вероятности  $p$ . Оказалось, что  $q_1^*$  практически не зависит от того, в какой мо-

**Таблица.** Обработка результатов эксперимента

Номер точки	$x, \text{ м}$	$T, \text{ К}$	Условные уравнения (на основе фор.(3))	Канонический вид условных ур.	Канонич. вид нормальных ур.
1	0	295,98	$q_1+0,68 \cdot 10^{-6} q_2=0,067$	$a q_1+b q_2=l_k$ ( $i=j=k=6$ )	$[aa]q_1+[ab]q_2=[a];$ $[ba]q_1+[bb]q_2=[b]$
2	0,0079	295,60	$q_1+0,88 \cdot 10^{-6} q_2=0,066$		
3	0,0158	295,30	$q_1+1,11 \cdot 10^{-6} q_2=0,065$		
4	0,0237	295,11	$q_1+1,34 \cdot 10^{-6} q_2=0,069$		
5	0,0316	294,89	$q_1+1,53 \cdot 10^{-6} q_2=0,066$		
6	0,0400	294,66	$q_1+2,10 \cdot 10^{-6} q_2=0,069$		

мент времени (при  $t \geq t_0$ ) на соответствующем этапе нагружения велся расчет, а зависит только от  $\sigma_a$ , т. е.  $q_1^* = q_1(\sigma_a)$ .

В результате получилось:

при  $p=0,68$   $q_1^*=0,06170,002$  (Вт),  $q_2=8501500$  (Вт/м<sup>3</sup>);  
при  $p=0,95$   $q_1^*=0,06170,004$  (Вт),  $q_2=8503000$  (Вт/м<sup>3</sup>).

Низкая точность расчета  $q_2$  вполне закономерна и вызвана двумя обстоятельствами. Во-первых, эта величина очень маленькая по сравнению с  $q_1$  (если их привести к одной размерности, то с учетом объема всей регулярной части образца  $V=2AL=1,58 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ,  $q_2^*=q_2 \cdot V=0,001$  Вт, т. е.  $q_1^* \gg q_2^*$ ). Во-вторых,  $q_2$  при обработке кривых по методу наименьших квадратов определяется как разность двух очень близких по значению величин, поэтому даже небольшие погрешности, связанные с их расчетом, многократно возрастают при расчете  $q_2$ .

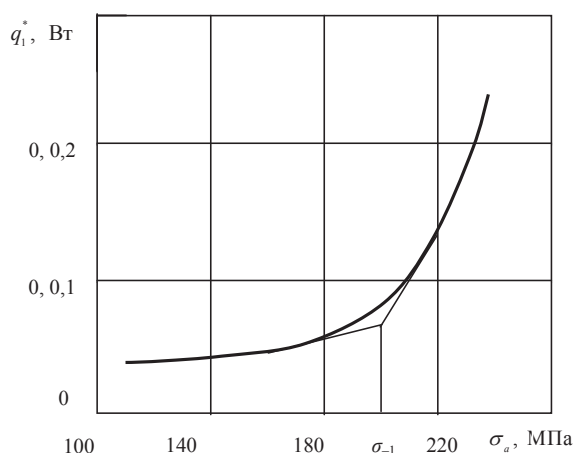
Но практический интерес представляет только мощность  $q_1^*$ , выделяющаяся в зоне концентратора напряжений, т. к. именно эта мощность ответственна за процесс накопления усталостной повреждаемости. Величина  $q_1^*$  подсчитана с удовлетворительной точностью.

Расчет выполнен при:  $\rho=7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $\alpha=23,2$  Вт/(м<sup>2</sup>К),  $c_v=662$  Дж/(кг·К),  $\lambda=38$  Вт/(м·К),  $D=18,3$  мм,  $A=33,4$  мм<sup>2</sup>,  $L=47,5$  мм.

**4. Выводы**

1. Результаты работы показали практическую возможность использования теплового метода для исследования процесса накопления и развития

усталостной повреждаемости (по мощности теплового источника  $q_1^*$  в очаге повреждаемости) [3].



**Рис. 2.** Кривая  $q_1^*=q_1^*(\sigma_a)$ , полученная по результатам испытания образца из стали Ст. 45 на шести уровнях амплитудных напряжений  $\sigma_a$

2. По кинетике  $q_1^*$  в зависимости от уровня амплитудных напряжений  $\sigma_a$  оказалось возможным неразрушающим образом определять индивидуальные пределы выносливости  $\sigma_{-1}$  испытанных образцов.

Из рис. 2 видно, что кривая  $q_1^*=q_1^*(\sigma_a)$  в районе предела выносливости  $\sigma_{-1}$  имеет характерный излом.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Справочник машиностроителя / под ред. Н.С. Ачеркана. – М.: Машиностроение, 1960. – Т. 2. – 740 с.  
2. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – М.: Физматгиз, 1962. – 349 с.

3. Kurilenko G.A. Predicting crack resistance by infrared thermography // Proceedings of Quantitative Infrared Thermography Conference QIRT 96. – Stuttgart, 1997. – P. 91–95.

Поступила 13.12.2012 г.