

УДК 620.179.13

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ С МАКРОТРЕЩИНАМИ ТЕРМОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Г.А. Куриленко

Новосибирский государственный технический университет

E-mail: teormech@ngs.ru

Разработан метод прогнозирования циклической долговечности деталей с макротрещинами, основанный на термографическом проявлении процесса накопления повреждаемости – приращении удельной энтропии в вершине развивающейся трещины. Метод позволяет повысить точность прогнозирования по сравнению с методом, использующим формулу Пэриса. Повышение точности достигается за счет использования не вероятностных, а истинных характеристик развития повреждаемости, получаемых из наблюдения за исследуемым объектом. Расширяется диапазон деталей для прогнозирования, т. к. подсчет энтропии производится по изменению температуры на поверхности детали вблизи вершины трещины и нет необходимости следить за развитием трещины.

Ключевые слова:

Изменение температуры, приращение удельной энтропии, долговечность, скорость роста трещины.

Key words:

Change of temperature, increment of specific entropy, longevity, velocity of crack growth.

При циклическом деформировании детали с макротрещиной при определенных условиях в вершине трещины образуется более или менее развитая пластическая зона, за счет которой трещина начинает развиваться. Как известно, при пластическом деформировании металла большая часть механической энергии преобразуется в тепловую, поэтому в кончике растущей трещины возникает источник тепловой энергии. Вследствие высокой теплопроводности металлов тепловые процессы проявляются на поверхности детали в виде пассивного теплового поля, по динамике которого можно судить о развитии трещины. На этом явлении основан разработанный новый термографический метод исследования развития повреждаемости, который, как будет показано ниже, позволил повысить точность прогнозирования этого процесса по сравнению с известными методами [1, 2].

Ключевым вопросом при применении термографического метода является корректный выбор параметра повреждаемости. Таким естественным параметром является температура. Но здесь есть существенный момент. Нужно учитывать не саму температуру очага повреждаемости, а ее изменение за достаточно малый промежуток времени, скажем, за один цикл колебаний. При этом удается практически исключить влияние фоновой температуры.

В качестве непосредственного параметра повреждаемости использовали значение ΔS^{lu} – приращение удельной энтропии в очаге за один цикл колебаний. Энтропия – это функция состояния, наиболее полным образом отражающая все необратимые процессы, происходящие в очаге повреждаемости. Кроме того, ΔS^{lu} подсчитывается через изменение температуры поверхности детали с помощью стандартной, довольно совершенной инфракрасной аппаратуры, позволяющей неконтактным образом измерять тепловые поля с достаточно высокой точностью и достоверностью. Поэтому тер-

мографический метод позволил существенно повысить точность прогнозирования циклического ресурса.

Традиционно этот вопрос решается на основе формулы Пэриса

$$\frac{dl}{dn} = B \Delta K^{m_1} \quad (1)$$

или ее разновидности

$$\frac{dl}{dn} = v^* \left(\frac{K_{\max}}{K^*} \right)^{m_2} \quad (2)$$

Эти формулы связывают скорость роста трещины $\frac{dl}{dn}$ или с максимальным коэффициентом интенсивности напряжений (КИН) за цикл нагружения, или с $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ – перепадом КИН за цикл. В формулах (1) и (2) B , m_1 , m_2 , K^* – параметры материала, $v^* = 10^{-7}$ м/цикл – заданная скорость роста трещины (ей соответствует K^*).

Кинетические диаграммы усталости, построенные путем испытаний нескольких образцов при различных нагрузках по формулам (1) или (2), являются характеристиками материалов.

Интегрирование уравнения (2)

$$n - n_0 = \int_{l_0}^{l_c} K_*^{m_2} \frac{dl}{v^* K_{\max}^{m_2}(l)} \quad (3)$$

дает зависимость $n(l)$, позволяющую подсчитать число циклов нагружения при подрастании трещины до заданной критической длины l_c – формула (3).

Следует отметить, что использование КИН в качестве критерия скорости роста трещины в последние годы подвергается все большей критике. КИН является атрибутом линейно-упругого континуума и использование его в качестве параметра разрушения приводит к неучету многих факторов, влияющих на события у фронта трещины. Это приводит к существенным, зачастую непредсказуемым погрешностям при прогнозировании ресурса.

Кроме того, необходимо отметить ограничения при прогнозировании долговечности по формуле (3). Это связано с необходимостью получения функциональной зависимости $K_{\max}(l)$. Здесь на практике приходится ограничиваться типовыми деталями, для которых функция $K_{\max}(l)$ известна. Если же требуется определить ресурс нестандартной детали, то эту зависимость можно получить экспериментально. Однако при этом надо преодолеть существенные трудности, связанные с замерами длины подрастающей трещины, особенно если трещина развивается вглубь детали.

Эти трудности в значительной степени смягчаются и преодолеваются при использовании в качестве параметра повреждаемости ΔS^{1u} – той части производимой в очаге повреждаемости за цикл колебаний удельной энтропии, которая обусловлена непосредственным нагревом очага повреждаемости [1, 2]:

$$\Delta S^{1u} = c_v \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right). \quad (4)$$

Здесь c_v – удельная теплоемкость материала, T_1 и T_2 – температуры очага соответственно в начале и конце рассматриваемого цикла.

Проведенные исследования показали, что при использовании термографического метода целесообразно сохранить структуру выражения (2). Соответствующая формула примет вид:

$$\frac{dl}{dn} = v^* \left[\frac{\Delta S^{1u}(n)}{\Delta S_*^{1u}} \right]^m. \quad (5)$$

Для прогнозирования ресурса надо проинтегрировать формулу (5) и определить критическое подрастание трещины Δl_c , соответствующее числу циклов до разрушения n_c :

$$\Delta l_c = \int_0^{n_c} \frac{v^*}{(\Delta S_*^{1u})^m} [\Delta S^{1u}(n)]^m dn. \quad (6)$$

По формуле (5) путем испытания нескольких образцов при различных нагрузках строятся кинетические диаграммы усталости, которые являются характеристиками материала. Эти диаграммы, как оказалось, имеют качественно такой же вид, как соответствующие диаграммы, построенные по формуле Пэриса (2).

По регламентированной методике [3] были проведены испытания образцов с исходными боковыми надрезами при их изгибных колебаниях (рис. 1) с различными уровнями амплитудной нагрузки F .

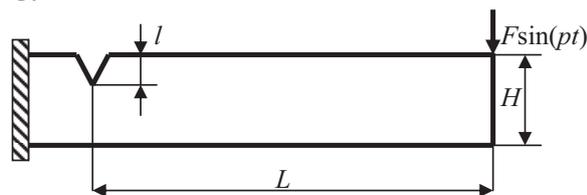


Рис. 1. Образец для испытаний. $H=15$ мм, $b=10$ мм (толщина образца), $L=260$ мм, $l=0,75$ мм, угол между поверхностями надреза равен 30°

Подрастание трещины Δl за определенное число циклов нагружения n фиксировалось с помощью микроскопа МБС-11 с сеткой, нанесенной на объективе. Температура в кончике подрастающей трещины фиксировалась с помощью тепловизора «Рубин МТ», чувствительность которого при отключенном механизме сканирования составляет $0,01$ °С, и записывалась на самопишущем потенциометре «Endim-621.02», ΔS^{1u} подсчитывалось по формуле (4).

На рис. 2 построена термографическая кинетическая диаграмма усталости (в логарифмических координатах) по результатам испытания 10 образцов. Средний участок таких диаграмм практически определяет долговечность образцов.

По этой диаграмме рассчитаны параметры материала. При $p=0,5$ и $m=5,6$: $v^*=10^{-8}$ м/цикл, $\Delta S_*^{1u}=1,4$ Дж/(м³·К). Эти значения берутся по средней точке на прямолинейном среднем участке диаграммы.

Зависимость $\Delta S^{1u}(n)$ представляет собой монотонно возрастающую функцию (рис. 3) и ее удобно представить в виде

$$\Delta S^{1u} = \beta n^\alpha, \quad (7)$$

где β и α – экспериментально определяемые коэффициенты.

$\frac{dl}{dn}$, мм/цикл

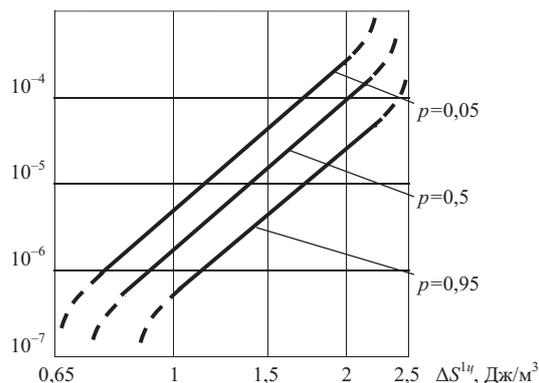


Рис. 2. Графики $\frac{dl}{dn} = f(\Delta S^{1u})$ для стали 20 при различных вероятностях p

ΔS^{1u} , Дж/м³

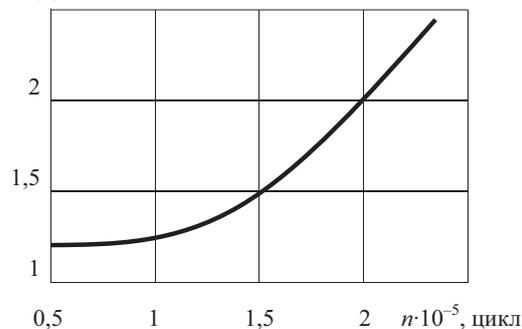


Рис. 3. График зависимости $\Delta S^{1u} = f(n)$, построенный по результатам испытаний образца № 6 при амплитуде колебаний свободного конца $f=3$ мм

Зависимость (7) при фиксированной амплитуде колебаний можно получить:

- непосредственно из диаграммы (рис. 2); в этом случае эту функцию следует рассматривать как характеристику материала и прогнозирование циклического ресурса будет носить вероятностный характер;
- путем испытаний данной конкретной детали при небольшом числе циклов нагружения (для сохранения ресурса), или ведя наблюдение за деталью непосредственно в условиях ее эксплуатации; в этом случае $\Delta S^u(n)$ будет являться характеристикой данной детали и прогнозирование носит индивидуальный характер.

Все испытанные образцы были доведены до разрушения, тем самым определялась их фактическая долговечность n_{ϕ} . Расчетная долговечность определялась по первому (n_p^1) и второму (n_p) способам, затем подсчитывалось ее расхождение δ с фактической долговечностью.

Результаты расчета и эксперимента для образца № 1 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные и фактическая долговечности для образца № 1 ($f=2$ мм)

Способ расчета	α	β	$\Delta l_{кр}$, мм	n_{ϕ} , цикл.	n_p^1 , цикл.	n_p , цикл.	δ , %
Вероятностный	0,44	0,0046	6,61	$6,21 \cdot 10^5$	$7,76 \cdot 10^5$	–	24,9
Индивидуальный	0,495	0,00223	6,61	$6,21 \cdot 10^5$	–	$7,4 \cdot 10^5$	19,2

Для всех испытанных образцов при одноступенчатом нагружении погрешность прогнозирования ресурса по второму (индивидуальному) способу уменьшалась на 20...25 % и это вполне естественно, т. к. в этом случае сам образец поставлял информацию о своем ресурсе.

Термографический подход позволяет прогнозировать циклический ресурс детали и при ступенчатом нагружении. В этом случае формула (6) принимает вид:

$$\sum \int_{n_{i-1}}^{n_i} \frac{v^*}{(\Delta S^u)^m} [\Delta S^u(n)]^m dn = \Sigma \Delta l_i. \quad (8)$$

При ступенчатом нагружении можно рассматривать различные задачи прогнозирования ресурса. В частности, задачу можно поставить так: известно число циклов нагружения и подрастание трещины Δl_i на предшествующих ступенях; надо рассчитать число циклов до разрушения n_p на последней ступени.

Особенность расчета по формуле (8) состоит в том, что при переходе на каждую последующую ступень фактическое число циклов нагружения на предшествующей ступени надо пересчитать на число циклов, эквивалентное последующему уровню нагружения, которое рассчитывается, исходя из подрастания трещины на ту же величину, но на новом уровне нагружения.

Поясним эту особенность на примере расчета долговечности на второй ступени нагружения образца № 6 (см. табл. 2).

Первая ступень: $f=2$ мм, $n_{\phi 1}=2,82 \cdot 10^5$ циклов, $\Delta l_1=0,65$ мм.

Вторая ступень: $f=3$ мм, $n_{\phi 2}=1,10 \cdot 10^5$ циклов (разрушение), $\Delta l_2=2,31$ мм.

Определим расчетное число циклов на второй ступени n_{p2} и сравним его с $n_{\phi 2}$.

Из зависимости $\Delta S^u=f(n)$ при $f=3$ мм (рис. 3) по методу наименьших квадратов получаем: $\alpha=0,43$; $\beta=0,0092$. Рассчитаем эквивалентное число циклов \bar{n}_1 , соответствующее подрастанию трещины до $\Delta l_1=0,65$ мм при $f=3$ мм по формуле (6):

$$\int_0^{\bar{n}_1} \frac{10^{-8}}{1,4^{5,6}} (0,0092 n^{0,43})^{5,6} dn = 0,65 \cdot 10^{-3},$$

откуда находим $\bar{n}_1=1,45 \cdot 10^5$ циклов.

Теперь найдем число циклов \bar{n}_2 при $f=3$ мм, соответствующее подрастанию трещины на $\Delta l=\Delta l_1+\Delta l_2=2,86$ мм:

$$\int_0^{\bar{n}_2} \frac{10^{-8}}{5,6} (0,0092 n^{0,43})^{5,6} = 2,86 \cdot 10^{-3},$$

откуда $\bar{n}_2=2,24 \cdot 10^5$ цикла.

Расчетное число циклов на второй ступени $n_{p2}=\bar{n}_2-\bar{n}_1=0,79 \cdot 10^5$ циклов.

Погрешность прогнозирования:

$$\delta = \frac{n_{\phi 2} - n_{p2}}{n_{\phi 2}} 100 \% = \frac{(1,1 - 0,79) \cdot 10^5}{1,1 \cdot 10^5} 100 \% = 28,2 \%$$

Подобный расчет при двухступенчатом нагружении выполнен для образцов № 6–9, а для образцов № 1–5, 10 – при одноступенчатом нагружении (табл. 2).

Как видно из таблицы, погрешность прогнозирования циклического ресурса при увеличении числа ступеней нагружения практически не изменяется.

Таблица 2. Результаты прогнозирования ресурса для десяти образцов из стали 20

№ обр.	1-я ступень нагружения				2-я ступень нагружения			
	f , мм	n_{ϕ} , 10^5 , цикл.	n_p , 10^5 , цикл.	δ , %	f , мм	n_{ϕ} , цикл.	n_p , цикл.	δ , %
1	2	6,21	7,40	19,2	–	–	–	–
2	2	6,00	7,13	18,8	–	–	–	–
3	2,5	3,20	2,92	8,8	–	–	–	–
4	3	2,31	2,61	13,1	–	–	–	–
5	3,5	3,47	0,43	29,6	–	–	–	–
6	2	2,82	–	–	3	$1,1 \cdot 10^5$	$0,79 \cdot 10^5$	28,2
7	2,5	2,03	–	–	–	10^4	$1,54 \cdot 10^4$	23
8	2,5	2,65	–	–	3,5	10^4	$1,31 \cdot 10^4$	31
9	2	3,11	–	–	2,5	$2 \cdot 10^4$	$1,73 \cdot 10^4$	13,5
10	3	2,25	2,70	20	–	–	–	–

Выводы

Разработан термографический метод прогнозирования циклического ресурса деталей с макротрещинами, позволяющий:

- 1) контролировать развитие трещины по кинетике температуры на поверхности детали вблизи вершины трещины;

- 2) уменьшить погрешность прогнозирования в несколько раз, поскольку при использовании метода Пэриса погрешность прогнозирования может превышать 100 %;
- 3) использовать метод для деталей, у которых затруднено наблюдение за развитием трещины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куриленко Г.А. Исследование трещиностойкости металлов термографическим методом // *Обработка металлов*. – 2010. – № 3 (48). – С. 41–44.
2. Куриленко Г.А. Контроль усталостной прочности деталей по изменению энтропии очага усталостной трещины // *Дефектоскопия*. – 1989. – № 7. – С. 53–57.
3. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность, методы механических испытаний материалов. Определение

характеристик сопротивления развитию трещин (трещиностойкость) при циклическом нагружении. РД 50-345-82. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 96 с.

4. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие. Т. 4 / под ред. В.В. Панасюка. – Киев: Наукова думка, 1990. – 679 с.

Поступила 22.03.2012 г.

УДК 535.36

ВЛИЯНИЕ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА РАДИАЦИОННЫЙ БАЛАНС ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ

Б.В. Горячев, С.Б. Могильницкий

Томский политехнический университет
E-mail: msb@tpu.ru

Рассмотрен перенос излучения в дисперсной среде, ограниченной отражающими поверхностями. Показано, что отражающая и поглощательная способности системы дисперсная среда-отражающая поверхность не зависят от коэффициента отражения поверхности при достижении определенной величины оптической плотности среды. Изучено влияние положения отражающей поверхности на поглощательную способность подобной системы.

Ключевые слова:

Радиация, баланс, дисперсная среда, отражающая поверхность.

Key words:

Radiation, balance, dispersion media, reflective surface.

Распространение излучения в дисперсной среде обычно происходит при наличии поверхностей, ограничивающих среду, и влияющих на радиационный баланс. Наибольшее влияние на этот процесс оказывают поверхности, расположенные по направлению распространения потока излучения, т. е. на входе и выходе дисперсной среды. Оптические исследования дисперсных сред должны учитывать наличие отражающих поверхностей, а при определении радиационного баланса атмосферы [1] отражающей поверхностью для солнечного излучения является поверхность планеты (отражающая поверхность за средой), и для уходящего теплового излучения (отражающая поверхность перед средой). При этом не рассматриваются процессы взаимодействия излучения с отражающей поверхностью [2], а также статистический характер пространственного распределения коэффициентов отражения подстилающей поверхности [3].

Целью данной работы является определение закономерностей переноса излучения на основе представления дисперсной среды в виде прямоугольного параллелепипеда, где отражающими являются поверхности на передней и задней гранях (по направлению распространения излучения), при нормальном падении потока излучения на поверхность. Характеристики радиационного баланса дисперсной среды определялись с использованием метода многократных отражений [4, 5]. Появление исследований, улучшающих стандартные методы решения уравнения переноса излучения [6], показывает, что проблема корректного учета влияния отражающих поверхностей на радиационный баланс существует.

Определялись следующие характеристики радиационного баланса: отражательная способность $B(\tau, a, \Lambda)$ и коэффициент пропускания $A(\tau, a, \Lambda)$ системы дисперсная среда-отражающая поверхность, поглощательная способность $C(\tau, a, \Lambda)$ дисперсной