

ГОРНЫЕ МАШИНЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 622.271.0025(075.8)

И.А. Паначев, М.Ю. Насонов, А.А. Черезов

ТОРМОЖЕНИЕ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЯХ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

В настоящее время существует проблема повышения долговечности горных машин, в частности одноковшовых карьерных экскаваторов. Большинство отказов этих машин связано с образованием и развитием трещин в металлоконструкциях. Поэтому повышение их долговечности на этапе эксплуатации можно осуществить, решив проблему управления разрушением металлоконструкций. Управление разрушением реализуется посредством осуществления следующих мероприятий: 1) разработки принципов и способов торможения роста трещин; 2) определение оптимальных параметров регулирования торможения в конкретных условиях эксплуатации; 3) управление траекторией движения трещины; 4) определения срока задержки разрушения с учётом конкретного характера нагружения конструкций; 5) диагностика параметров трещин.

Для снижения скорости роста усталостной трещины (РУТ) необходимо уменьшить размах коэффициента интенсивности напряжений (КИН) ΔK при нагружении, равный:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (1)$$

где K_{\max} , K_{\min} – предельные значения КИН цикла, $\text{Па} \cdot \sqrt{\text{м}}$.

Легче всего это сделать увеличением минимального КИН цикла при неизменном максимальном. Связь между величинами раскрытия трещины в её вершине и КИН [1]:

$$\delta = \frac{K^2}{\sigma_T \cdot E} \quad (2)$$

где δ – раскрытием трещины в вершине, м;

σ_T – предел текучести материала;

E – модуль Юнга (для стали $2 \cdot 10^{11}$ Па), Па.

Согласно (2) увеличить минимальный КИН цикла можно повысив значение минимального раскрытия трещины. Это достигается либо подачей под давлением в трещину самозатвердевающегося заполнителя (циакрин) [2], либо заполнением трещины сыпучим мелкодисперсным твёрдым веществом (тальк) [3], либо установкой тонкого стержня вблизи фронта трещины (желательно параллельно ему), либо вставкой тонкой пластины (вставки) в трещину, недалеко от её вершины. При этом материал ограничителя закрытия

трещины (вставки) не должен химически реагировать с материалом конструкции, чтобы не появились новые неизвестные эффекты взаимодействия среди с вершиной трещины.

Расчёт эффекта от применения способа торможения РУТ рассмотрим на примере. Следует подчеркнуть, что условия задачи сходны с реальными для металлоконструкций карьерных экскаваторов.

Методами неразрушающего контроля в металлической пластине из стали 09Г2С (*широко распространённый материал металлоконструкций экскаваторов*) был обнаружен трещиноподобный дефект. Полоса испытывает регулярное нагружение – растяжение при нормальной температуре. Трещиноподобный дефект можно представить как центральную сквозную трещину с полудлиной $l_h = 100$ мм. Нагружение осуществляется с постоянной частотой, цикл напряжений – отнулевой ($\sigma_{\min}^{\infty} = 0$). Ширина пластины $b = 500$ мм. Свойства стали 09Г2С: циклическая трещиноустойчивость при отнулевом цикле $K_{\max \text{ fc}} = 130$ МПа· $\sqrt{\text{м}}$. После обнаружения дефекта решили, что торможение РУТ будет осуществляться ограничением закрытия берегов трещиноподобного дефекта вставкой (рис. 1). Требуется определить параметр регулирования торможения (толщину вставки) и срок задержки до окончательного раз-

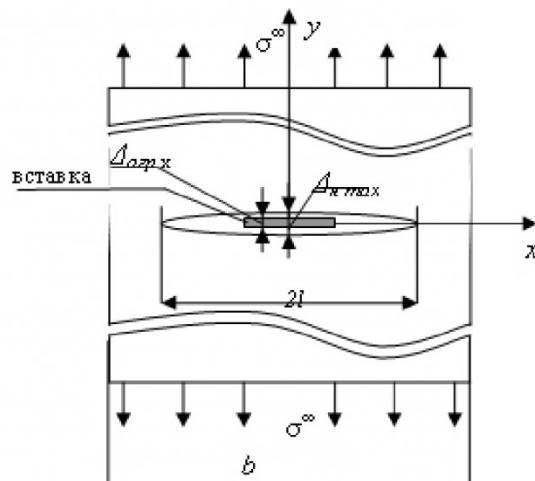


Рис. 1. Пластина с центральной поперечной трещиной при одноосном растяжении

рушения.

КИН в случае пластины с центральной поперечной трещиной при одноосном растяжении [1]:

$$K_I^\infty = \sigma^\infty \cdot \sqrt{\pi l} \cdot \sqrt{\sec\left(\frac{\pi l}{b}\right)}, \quad (3)$$

где K_I^∞ - КИН для трещины типа I при напряжениях на бесконечности;

σ^∞ - напряжение на бесконечности, Па;

l - текущая полудлина трещины, м.

Воспользуемся полученным в работе [4] решением задачи, которое связывает раскрытие берегов в любой точке сквозной центральной трещины нормального отрыва с КИН в теле:

$$\Delta_x = \frac{4 \cdot (1 - \mu^2)}{E} \cdot \sqrt{2 \cdot (l - x)} \cdot K_I. \quad (4)$$

С учётом формул (3), (4) определим раскрытие берегов в середине трещины (при $x = 0$) при максимальном напряжении цикла нагружения:

$$\Delta_{n \max} = \frac{4 \cdot (1 - \mu^2)}{E} \cdot \sqrt{2 \cdot l_n} \times \times \sigma_{\max}^\infty \cdot \sqrt{\pi \cdot l_n} \cdot \sqrt{\sec\left(\frac{\pi \cdot l_n}{b}\right)}, \quad (5)$$

где μ - коэффициент Пуассона (для стали $\mu = 0,3$);

σ_{\max}^∞ - максимальное напряжение на бесконечности цикла нагружения, Па.

Подставляя в формулу (5) известные значения, получаем:

$$\Delta_{n \max} = \frac{4(1 - 0,3^2)}{2 \cdot 10^{11}} \sqrt{2 \cdot 0,100} \cdot 150 \cdot 10^6 \times \times \sqrt{3,14 \cdot 0,100} \cdot \sqrt{\sec\left(\frac{3,14 \cdot 0,100}{0,500}\right)} = 0,001 \text{ мм.}$$

Условие данного способа торможения РУТ:

$$\Delta_{oep} \leq \Delta_{n \max} \quad (6)$$

где Δ_{oep} - толщина вставки, м;

$\Delta_{n \max}$ - максимальное раскрытие берегов в середине трещины, соответствующей начальной длине, м.

Учитывая условие (6) выбираем для использования толщину вставки равную $\Delta_{oep} = 0,0005 \text{ м} = 0,5 \text{ мм}$.

Скорость РУТ описывается модифицированной формулой Формана, которая учитывает асимметрию циклов нагружения [1]:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{C \cdot \Delta K^n}{(1 - R) \cdot (K_{max \ fc} - K_{max})} \quad (7)$$

где C, n - постоянные материала (для консервативной оценки максимальной скорости РУТ принимаем $C = 3,8 \cdot 10^{-38} \text{ м}^{-1} \cdot \text{Па}^{-4}$, $n = 5$ [1]);

R - коэффициент асимметрии цикла.

Коэффициент асимметрии цикла:

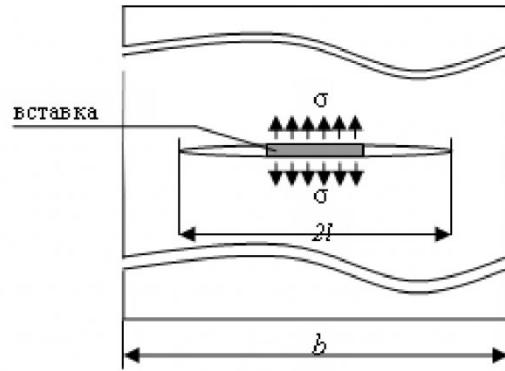


Рис. 2. Пластина с центральной поперечной трещиной при ограничении закрытия берегов вставкой

$$R = \frac{K_{min}}{K_{max}} \quad (8)$$

Формулы (1), (8) подставляем в (7), получаем:

$$\frac{dl}{dN} = \frac{C \cdot (K_{max} - K_{min})^n}{\left(1 - \frac{K_{min}}{K_{max}}\right) \cdot (K_{max \ fc} - K_{max})} \quad (9)$$

Преобразуя формулу (4), получаем зависимость, определяющую минимальный КИН циклов нагружения после установки вставки (рис.2):

$$K_{I min} = \Delta_{oep} E / (4(1 - \mu^2) \cdot \sqrt{2l}) \quad (10)$$

Используя формулы (3), (9), (10), получаем формулу, описывающую скорость РУТ после ограничения закрытия берегов трещины:

$$\begin{aligned} \frac{dl}{dN} &= C \times \\ &\times \left(\sigma_{\max}^\infty \cdot \sqrt{\pi l} \cdot \sqrt{\sec\left(\frac{\pi l}{b}\right)} - \frac{\Delta_{oep} E}{4(1 - \mu^2) \cdot \sqrt{2l}} \right)^n \\ &\times \left(1 - \frac{\frac{\Delta_{oep} \cdot E}{4(1 - \mu^2) \cdot \sqrt{2l}}}{\sigma_{\max}^\infty \cdot \sqrt{\pi l} \cdot \sqrt{\sec\left(\frac{\pi l}{b}\right)}} \right)^{-1} \times \\ &\times \left(K_{max \ fc} - \sigma_{\max}^\infty \cdot \sqrt{\pi l} \cdot \sqrt{\sec\left(\frac{\pi l}{b}\right)} \right)^{-1} \\ &= F_I(l). \end{aligned} \quad (11)$$

Упростим эту формулу для описания скорости РУТ без установки вставки:

$$\begin{aligned} \frac{dl}{dN} &= C \cdot \left(\sigma_{\max}^\infty \cdot \sqrt{\pi l} \cdot \sqrt{\sec\left(\frac{\pi l}{b}\right)} \right)^n / \\ &/ \left(K_{fc} - \sigma_{\max}^\infty \cdot \sqrt{\pi l} \cdot \sqrt{\sec\left(\frac{\pi l}{b}\right)} \right) = F_{II}(l). \end{aligned} \quad (12)$$

Число циклов до конечного разрушения:

$$N_i = \int_{l_0}^{l_{kp}} F_i(l) dl \quad (13)$$

Найдём критическую длину усталостной трещины l_{kp} . Текущая длина трещины будет равна критической, когда действующий размах КИН цикла будет равен циклической трещиностойкости материала при данной асимметрии цикла:

$$\Delta K = \Delta K_{fc} \quad (14)$$

Преобразуя (8), подставляем в (1) и получаем:

$$\Delta K = K_{max} \cdot (1 - R) \quad (15)$$

Циклическая трещиностойкость материала при данной асимметрии цикла:

$$\Delta K_{fc} = K_{max,fc} \cdot (1 - R) \quad (16)$$

Подставляем (15), (16) в (14), получаем:

$$K_{max} = K_{max,fc} \quad (17)$$

Поэтому критическая длина усталостной трещины:

$$\sigma_{max}^{\infty} \cdot \sqrt{\pi l_{kp}} \cdot \sqrt{\sec\left(\frac{\pi l_{kp}}{b}\right)} - K_{max,fc} = 0 \quad (18)$$

откуда

$$150 \cdot 10^6 \sqrt{\pi l_{kp}} \cdot \sqrt{\sec\left(\frac{\pi l_{kp}}{0,5}\right)} - 130 \cdot 10^6 = 0$$

Решив это уравнение, получаем: $l_{kp} = 0,145$ м = 145 мм.

Приступим к расчёту числа циклов до окончательного разрушения.

Подставляя (11)-(12) вышеуказанные значения параметров и интегрируя согласно (13) полученную функцию по l от 0,1 до 0,145, вычисляем число циклов до окончательного разрушения после установки вставки – $N_f = 86072$.

Более наглядно процесс торможения РУТ изображён на рис. 3, из которого видно, что до применения способа скорость РУТ монотонно возрастает с увеличением размера дефекта (штриховая линия совпадает со сплошной).

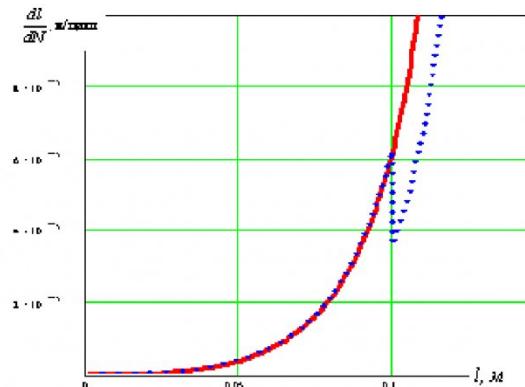


Рис. 3. Зависимость скорости РУТ от длины трещины (пунктирная линия – с применением вставки; сплошная линия – без применения вставки)

но как только установили вставку (при полуудлинне трещиноподобного дефекта равной 0,1 м) интенсивность распространения трещины резко падает (причём более чем в полтора раза). Далее постепенно скорость РУТ сравнивается с той, которая бы была, если не ограничивали закрытия берегов дефекта. Это происходит потому, что для поддержания роста на низком уровне при увеличении размера трещины необходима вставка большей толщины Δ_{opt} (10), но из-за постоянства размера ограничителя в нашем случае происходит ускорение движения.

Подытожив вышеизложенное, следует отметить, что способ торможения роста усталостной трещины ограничением закрытия её берегов является потенциальным конкурентом традиционным методам повышения долговечности карьерных экскаваторов на этапе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пестриков В. М., Морозов Е. М. Механика разрушения твердых тел. – СПб.: Профессия, 2002. – 320 с.: ил.
2. А.с. 1125266 (СССР) Способ обработки изделий / Г.И. Никифорчин, О.Н. Романив, Б.Н. Андрусов, В.Г. Здановский, А.В. Василик, Б.И. Чемеринский. Опубл. в 1984, № 43
3. А.с. 1544821 (СССР). Способ торможения роста усталостных трещин в детали / А.В. Прокопенко, О.Н. Черныш. Опубл. в 1990, № 7
4. Westergaard H.M. – J. Appl. Mech, 1939, № 49

□ Авторы статьи:

Паначев
Иван Андреевич
- докт. техн. наук, проф., зав.
каф. сопротивления материалов

Насонов
Михаил Юрьевич
- канд. техн. наук, доц.
каф. сопротивления материалов

Черезов
Артём Анатольевич
- студент гр. MA-021