

## ВЫВОД

Изложенная выше методика проверочного расчета позволяет со значительной степенью точности проводить проверочный расчет барабанов среднего и большого диаметров обычной конструкции.

Однако рассмотрение барабана как набора отдельных элементов приводит к ряду допущений (например, замене упругих связей между элементами на абсолютно жесткие), которые сказываются на точности расчетов. К тому же данная методика позволяет рассчитывать барабаны только традиционной конструкции. Необходимо разработка методики расчета барабанов ленточных конвейеров, учитывающей взаимное влияние элементов барабана друг на друга. Для этой цели используются различные численные методы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Калихман, Г. Л. Исследования напряженного состояния барабанов ленточного конвейера и разработка методов их расчета: автореф. ... дис. канд. техн. наук / Г. Л. Калихман. – Киев, 1970. – 22 с.
2. Калихман, Г. Л. О влиянии подкрепляющего кольца на напряженное состояние барабанов ленточного конвейера / Г. Л. Калихман, Э. О. Уманский // Проблемы прочности. – Киев: Наук. думка, 1969. – № 4. – С. 35–41.
3. Баландин, Н. Г. К расчету сочлененных оболочек с помощью четырехугольного конечного элемента с матрицей жесткости  $36 \times 36$  / Н. Г. Баландин, А. П. Николаев // Расчеты на прочность. – М.: Машиностроение, 1980. – Вып. 21. – С. 225–236.
4. Диллон, Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
5. Транспортирующие машины / А. О. Спиваковский [и др.]. – М.: Машиностроение, 1968. – 109 с.
6. Андреев, В. А. Транспортные машины и комплексы подземных разработок / В. А. Андреев, В. А. Дьяков, Е. Е. Шешко. – М.: Недра, 1975. – 464 с.

Поступила 25.01.2006

УДК 621.793

## ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

*Асп. СОКОРОВ И. О., докт. техн. наук, проф. СПИРИДОНОВ Н. В.*

*Белорусский национальный технический университет*

На повреждения от фреттинг-коррозии влияют такие факторы, как нормальная нагрузка, амплитуда проскальзывания, атмосфера и т. д. Математическое описание этого явления представляет определенные трудности из-за многообразия физико-химических процессов, сопровождающих процесс. Кроме того, сегодня нет единого мнения по поводу механизма фреттинга и относительной важности конкурирующих процессов.

Из всех механических характеристик лучше всего износостойкость металлов коррелирует с

усталостной прочностью, при этом необходимо учитывать химическую активность материала и его способность рассеивать механическую энергию. Авторы [1] предложили для оценки сопротивляемости металлов действию резонансного нагружения пользоваться критерием вибропрочности

$$R = \frac{\sigma_{-1}}{k} \delta, \quad (1)$$

где  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости материала;  $k$  – коэффициент, учитывающий снижение  $\sigma_{-1}$  в ре-

альных условиях;  $\delta$  – декремент колебаний при максимальной амплитуде.

Однако исследование [2] износостойкости материалов в условиях фреттинг-коррозии с учетом критерия вибропрочности не дало положительных результатов. Важной характеристикой для оценки поведения материалов в условиях фреттинг-коррозии может явиться скорость, с которой поверхностные слои поддаются передеформированию. Износостойкость материалов в этих условиях тесно связана с пластическими и упруго-пластическими свойствами, приобретаемыми поверхностными слоями металла в процессе вибронегрузки.

Важный параметр при определении степени повреждаемости металла в условиях фреттинг-коррозии – градиент скорости деформации в поверхностных слоях. Критический градиент скорости деформации твердого тела может служить характеристикой пластичности материала [3]. В зависимости от скорости деформации в поверхностном слое тело либо разрушается (скорость деформации превышает критическую величину), либо происходит течение твердого тела (деформирование со скоростью, меньшей критической).

Используя представления [3] об упругости деформирования твердых тел в качестве критерия износостойкости, можно принять зависимость

$$W = \frac{\sigma_s}{G} \delta_\tau, \quad (2)$$

где  $\sigma_s$  – предел текучести материала;  $G$  – модуль сдвига;  $\delta_\tau$  – декремент колебаний при действии тангенциальных нагрузок.

Предложенная зависимость (2) позволяет с достаточной степенью точности оценить износостойкость различных материалов. Недостатком данной зависимости является то, что она не учитывает в полной мере проявление коррозионного фактора.

Любая теория фреттинга должна принимать в расчет следующие установленные факты [4]:

- повреждение от фреттинга уменьшается в вакууме или инертной атмосфере;
- продукты разрушения, образующиеся при фреттинге железа, состоят главным образом из  $Fe_2O_3$ ;

- за данное число циклов более серьезное повреждение происходит при низких частотах по сравнению с высокими частотами;

- потери металла увеличиваются с ростом нагрузки и относительного проскальзывания;

- более серьезное повреждение происходит при температуре ниже комнатной, по сравнению с температурами выше комнатной;

- повреждение больше в сухом воздухе, чем во влажном.

Автор [4] объединяет два механизма.

1. Механическое действие разрушает окисные пленки на поверхности, вскрывая чистый и, возможно, деформированный металл, который будет очень активным и в присутствии воздушной атмосферы начнет окисляться очень быстро в течение половины цикла после вскрытия, с тем чтобы быть разрушенным при возвратной половине цикла.

2. Удаление металлических частиц с поверхности в тонко размельченной форме путем либо механического шлифования, либо образования точек сварки в местах контакта, которые затем разрушаются по иной поверхности, чем первоначальная поверхность соприкосновения, либо срезания, либо в результате локального развития усталостных процессов. Состав атмосферы не имеет значения при этих процессах, за исключением случая усталостных явлений, когда может добавиться элемент коррозионной усталости. Созданная Улигом модель показана на рис. 1.

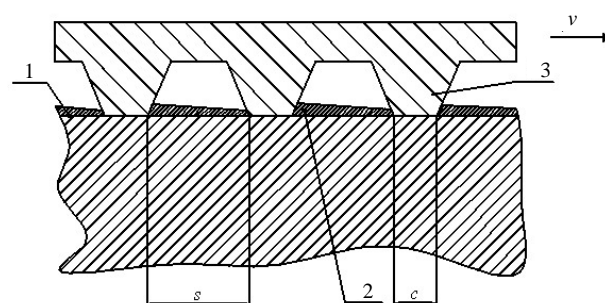


Рис. 1. Предложенная Улигом модель фреттинга на поверхности металла, покрытого окислом [4]: 1 – граница раздела; 2 – окисел; 3 – неровность

Предполагается, что повреждение вызывается регулярным рядом неровностей, стирающих окисную пленку, которая сразу же начинает формироваться вновь, чтобы снова быть стёртой в следующем цикле. Вклад этого дей-

ствия в общий объем повреждения рассчитывается в предположении, что рост окисной пленки происходит по логарифмическому закону. Кроме того, допускают, что неровности врезаются в металлическую поверхность и непосредственно удаляют металл. Это эквивалентно механизму 2. Потеря массы материала за цикл, вызванная соскабливанием окисной пленки, описывается уравнением

$$W_{\text{кор}} = 2nlck \ln\left(\frac{s}{2lf\tau} + 1\right), \quad (3)$$

где  $n$  – число круговых неровностей на единицу площади;  $l$  – расстояние, проходимое неровностью за полупериод цикла, т. е. амплитуда проскальзывания;  $c$  – диаметр неровности;  $s$  – среднее расстояние между неровностями;  $f$  – частота циклов;  $\tau$ ,  $k$  – постоянные.

Потеря массы за цикл вследствие пропахивающего действия составляет

$$W_{\text{мех}} = \frac{2k'IP}{p_0} = k_2IP, \quad (4)$$

где  $P$  – нормальная нагрузка;  $p_0$  – давление текучести;  $k'$  и  $k_2$  – постоянные.

Улиг, раскладывая в ряд логарифмический член в уравнении (3), пренебрегает всеми членами ряда, кроме первого. Таким образом, он фактически предполагает линейную скорость окисления. Тогда уравнение (3) принимает упрощенный вид

$$W_{\text{кор}} = \frac{ncks}{f\tau}. \quad (5)$$

Расстояние между неровностями  $s$  равняется  $n^{1/2}$ . Общая действительная площадь контакта составляет  $n\pi\left(\frac{c}{2}\right)^2$ , из чего следует:

$$W_{\text{кор}} = \frac{k_0P^{1/2} - k_1P}{f}, \quad (6)$$

где  $k_0 = \frac{2}{\sqrt{p_0\pi}} \frac{k}{\tau}$  и  $k_1 = \frac{4}{p_0\pi} \frac{k}{\tau}$ .

$$a_2 = \frac{v_0c_{11}\Delta\sigma_m(c_5A_t - c_6\Delta\sigma_0 - c_7\Delta\sigma_m) + c_5A_t^2 + c_8\Delta\sigma_0 - 2c_6\Delta\sigma_0A_t - c_7\Delta\sigma_mA_t + c_9\Delta\sigma_0\Delta\sigma_m}{c_{11}\Delta\sigma_m}; \quad (10)$$

Объединив уравнения (4) и (6), получим

$$W_{\text{общ}} = (k_0P^{1/2} - k_1P)\frac{N}{f} + k_2IPN, \quad (7)$$

где  $N$  – общее число циклов.

Это выражение вполне удовлетворительно соответствует экспериментальным данным Улига, так как является линейным по числу циклов, параболическим – по нагрузке и гиперболическим – по частоте [5]. Кроме того, члены формулы, описывающие коррозионные процессы, учитывают различное поведение металла при различных температуре и условиях окружающей среды (например, влияние влажности). Недостатки анализа заключаются в том, что не принимается во внимание особый характер возвратно-поступательного движения, не учитывается влияние амплитуды проскальзывания. Формула учитывает только общее пройденное расстояние. Частота  $f$  вводится как член, учитывающий скорость.

Известно, что процессы пластического деформирования сопровождаются рассеянием в металле части затраченной внешней работы в результате структурных изменений [6, 7]. При фреттинг-коррозии величина рассеянной энергии определяется не только пластической деформацией, но и интенсивностью окислительных процессов, а также величиной изменения площади свободных поверхностей. Используя принципы неравновесной термодинамики необратимых процессов, описываемых с помощью диссипативной функции, авторы [2] предложили модель изнашивания материала при фреттинг-коррозии

$$I = a_1pAN + (a_2 + a_3p + a_4p^2)\frac{N}{f}, \quad (8)$$

где  $p$  – удельная нагрузка;  $A$  – амплитуда скольжения;  $N$  – число циклов нагружения;  $f$  – частота колебаний;  $a_1$ – $a_4$  – коэффициенты, равные:

$$a_1 = -\frac{2k\mu}{c_{11}\Delta\sigma_m}; \quad c_{11} = \frac{6}{d\phi_m}; \quad (9)$$

$$a_3 = \frac{(v_0 c_2 c_{11} \Delta \sigma_m + 2 c_2 A_c - 2 c_3 \Delta \sigma_0 - c_4 \Delta \sigma_m) b k_5}{c_{11} \Delta \sigma_m \beta}; \quad (11)$$

$$a_4 = \frac{c_1 k_5^2 (\eta_{11} + \frac{1}{2} \eta_3 F_{\text{тр}}^2)}{c_{11} \Delta \sigma_m \beta^2}; \quad (12)$$

$$b = \frac{1}{12} \left( \sqrt{\eta_{11} + \eta_2 F_{\text{тр}} + \eta_3 F_{\text{тр}}^2} + \right. \\ \left. + 4 \sqrt{\eta_{11} + \frac{1}{\sqrt{2}} F_{\text{тр}} \eta_2 + \frac{1}{2} \eta_3 F_{\text{тр}}^2} + \right. \\ \left. + \sqrt{\eta_{11} - \eta_2 F_{\text{тр}} + \eta_3 F_{\text{тр}}^2} + \right. \\ \left. + 4 \sqrt{\eta_{11} - \frac{1}{\sqrt{2}} F_{\text{тр}} \eta_2 + \frac{1}{2} \eta_3 F_{\text{тр}}^2} + 2 \sqrt{\eta_{11}} \right),$$

где  $\eta_1$ – $\eta_3$ ,  $c_1$ – $c_9$  – постоянные;  $k$  – постоянная, характеризующая долю поверхностной энергии;  $k_5$  – коэффициент пропорциональности;  $\mu$  – коэффициент трения скольжения;  $d$  – размер частиц износа;  $\rho_m$  – плотность материала;  $v_0$  – стехиометрический коэффициент окисла в уравнении реакции;  $\Delta \sigma_m$  – изменение удельной поверхностной энергии металла;  $\Delta \sigma_0$  – то же окисла;  $A_c$  – сродство химической реакции;  $F_{\text{тр}}$  – коэффициент трения покоя.

Анализируя формулы (8)–(12), можно сделать вывод о том, что износ материала при фреттинг-коррозии имеет параболическую зависимость от удельной нагрузки  $p$ , гиперболическую – от частоты колебаний  $f$ , линейную – от амплитуды скольжения  $A$  и количества циклов  $N$ . Из (9) и (12) видно, что коэффициенты  $a_1$  и  $a_4$  не зависят от химических характеристик материала и среды, в которой протекает фреттинг-коррозия, а являются функциями физических свойств материала (поверхностной энергии, плотности и склонности к пластическому деформированию), а также условий трения, т. е. эти члены уравнения (8) определяются физико-механическими факторами фреттинг-коррозии. Рассматривая (10) и (11), можно сделать вывод, что коэффициенты  $a_2$  и  $a_3$  отражают физико-механические и химические свойства материала. Причем коэффициент  $a_2$  больше зависит от химических факторов, чем коэффициент  $a_3$ , так как химическое сродство  $A_c$  представлено вто-

рой степенью, а коэффициент  $a_3$  также зависит и от условий трения (коэффициента трения покоя).

Чтобы рассмотреть более подробно зависимость коэффициентов  $a_2$  и  $a_3$  от химической активности газовой среды, в которой протекает фреттинг-коррозия, запишем уравнение для определения сродства химической реакции [8]

$$A_c = - \sum_k \varphi_k \nu_k,$$

где  $\varphi_k$  – химический потенциал  $k$ -го компонента реакции;  $\nu_k$  – стехиометрический коэффициент  $k$ -го компонента реакции.

Так как при фреттинг-коррозии в химической реакции участвуют три компонента (материал, газовая среда и окислы), можно записать

$$A_c = \nu_m \varphi_m + \nu_g \varphi_g - \nu_o \varphi_o, \quad (13)$$

где  $\varphi_m$ ,  $\varphi_g$ ,  $\varphi_o$  – химические потенциалы соответственно материала, газового компонента и окисла;  $\nu_m$ ,  $\nu_g$ ,  $\nu_o$  – стехиометрические коэффициенты соответственно материала, газового компонента и окисла.

Известно [9], что величина химического потенциала активного газового компонента в реакции зависит от его парциального давления

$$\varphi_g = \varphi_g^0 + RT \ln \frac{P_g}{P_g^0}, \quad (14)$$

где  $\varphi_g^0$  – химический потенциал компонента в его стандартном состоянии;  $P_g^0$  – стандартное давление;  $P_g$  – парциальное давление активного компонента газа.

Сравнивая протекание фреттинг-коррозии, например кислорода и воздуха при одинаковом давлении, согласно (14) химический потенциал кислорода будет меньше химического потенциала воздуха, так как парциальное давление кислорода в воздухе ниже. Соответственно падение химического потенциала, согласно (10), (11) и (13), приведет к уменьшению коэффициентов  $a_2$  и  $a_3$ , т. е. при фреттинг-коррозии в среде воздуха износ будет ниже, чем в среде кислорода.

Для упрощения обработки результатов исследований коэффициенты  $a_1$ – $a_4$  можно рас-

считать, применив способ наименьших квадратов. Чтобы определить удельную нагрузку, амплитуду и частоту колебаний, необходимо рассмотреть условия работы конкретной детали.

Данную физико-математическую модель можно применить, например, при выборе материала газотермического покрытия для восстановления-упрочнения крупногабаритных деталей, работающих в условиях фреттинг-коррозии, в частности прессовых валов бумагоделательных машин.

### ВЫВОД

Разрушаемость при фреттинг-коррозии можно снизить, уменьшив химическую активность среды или подобрав материал покрытия, который будет обладать высокими прочностными свойствами, износо- и коррозионной стойкостью, низким коэффициентом трения.

Представленная физико-математическая модель позволяет учесть влияние физико-механических свойств и триботехнических характеристик газотермических покрытий на их изнашивание в условиях фреттинг-коррозии.

Таким образом, зная условия работы упрочненных деталей и используя выбранную физико-математическую модель, можно определить

интенсивность изнашивания газотермических покрытий, т. е. прогнозировать работоспособность деталей с покрытиями, работающих в условиях фреттинг-коррозии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Сопrotивляемость** резонансным колебаниям сталей титановых и алюминиевых сплавов лопаток компрессора / Г. С. Кривоногов [и др.] // Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. – Киев: Наук. думка, 1970. – С. 394–422.
2. **Голего, Н. Л.** Фреттинг-коррозия металлов / Н. Л. Голего, А. Я. Алябьев, В. В. Шевеля. – Киев: Техника, 1974. – 272 с.
3. **Кузнецов, В. Д.** Физика твердого тела / В. Д. Кузнецов. – Томск: Полиграфист, 1947. – 544 с.
4. **Ulig, H. H. J.** Appl. Mech / H. H. Ulig. – 1954. – Vol. 21. – P. 401.
5. **Уотерхауз, Р. Б.** Фреттинг-коррозия / Р. Б. Уотерхауз; пер. с англ.; под ред. канд. техн. наук Г. Н. Филимонова. – Л.: Машиностроение, 1976. – 272 с.
6. **Усталость** и хрупкость металлических материалов / В. С. Иванова [и др.]. – М.: Наука, 1968. – 452 с.
7. **Титченер, Э. Л.** Скрытая энергия при наклепе / Э. Л. Титченер, М. Б. Бевер // Успехи физики металлов. – М.: Металлургиздат, 1961. – Т. 4. – С. 34–39.
8. **Хаазе, Р.** Термодинамика необратимых процессов / Р. Хаазе. – М., 1967. – 544 с.
9. **Сверлин, Р. А.** Термодинамика твердого состояния / Р. А. Сверлин. – М.: Металлургиздат, 1963. – 520 с.

Поступила 16.05.2006

УДК 539.374

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ПРОКОЛОТЫМ ОТВЕРСТИЕМ

*Докт. физ.-мат. наук, проф. ВАСИЛЕВИЧ Ю. В.,  
инж. САХОНЕНКО Н. П., асп. САХОНЕНКО С. В.*

*Белорусский национальный технический университет*

Альтернативой просверленным отверстиям в элементах конструкционного назначения является формирование их методом прокалывания в еще неотвержденном полимерно-волокну-

стом материале – препреге. В процессе формирования отверстия с помощью заостренного стержня-индентора происходят раздвигание нитей и нарушение регулярной структуры ма-