УДК 621.793

Сокоров И.О., Спиридонов Н.В., Пилецкая Л.И.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗНАШИВАНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОПОРНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПРЕССОВЫХ ВАЛОВ В УСЛОВИЯХ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Развитие процессов фреттинг-коррозии характеризуется тремя стадиями разрушения поверхностного слоя. Если предположить, что преобладающими являются усталостные и коррозионные процессы, то этот вид поверхностного разрушения должен вызываться знакопеременными пластическими деформациями областей, не участвующих в непосредственном контакте (зоны повреждаемости). В таких зонах происходит разрыхление металла, что является своеобразной подготовкой материала к последующему разрушению с образованием свободных поверхностей, которые активно окисляются. Прогрессируя, этот процесс сопровождается выделением продуктов разрушения в виде окислов и металлических частиц. Математическое описание такого явления представляет определенные трудности в связи с многообразием физико-химических процессов, сопровождающих фреттинг-коррозию [1, 2, 3].

Известно, что процессы пластического деформирования сопровождаются рассеянием в металле части затраченной внешней работы в результате структурных изменений [4, 5]. При фреттинг-коррозии величина рассеянной энергии будет определятся не только пластической деформацией, но и интенсивностью окислительных процессов, и величиной изменения площади свободных поверхностей. Используя принципы неравновесной термодинамики необратимых процессов, описываемых с помощью диссипативной функции, авторы [6] предложили модель изнашивания материала при фреттинг-коррозии:

$$I = a_1 pAN + (a_2 + a_3 p + a_4 p^2)\frac{N}{f}, \tag{1}$$

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

$$a_1 = -\frac{2k\mu}{c_{11}\Delta\sigma_m}, \quad c_{11} = \frac{6}{d\rho_m}, \tag{2}$$

$$a_2 = \frac{v_0 c_{11}\Delta\sigma_m (c_5 A_c - c_6\Delta\sigma_0 - c_7\Delta\sigma_m) + c_5 A_c^2 + c_8\Delta\sigma_0 - 2c_6\Delta\sigma_0 A_c -}{c_{11}\Delta\sigma_m}$$

$$\frac{-c_7\Delta\sigma_m A_c + c_9\Delta\sigma_0\Delta\sigma_m}{c_{11}\Delta\sigma_m}, \tag{3}$$

$$a_3 = \frac{(v_0 c_2 c_{11}\Delta\sigma_m + 2c_2 A_c - 2c_3\Delta\sigma_0 - c_4\Delta\sigma_m) b k_5}{c_{11}\Delta\sigma_m \beta}, \tag{4}$$

$$a_4 = \frac{c_1 k_5^2 (\eta_1 + \frac{1}{2}\eta_3 F_{TP}^2)}{c_{11}\Delta\sigma_m \beta^2}, \tag{5}$$

$$b = \frac{1}{12}\left(\sqrt{\eta_1 + \eta_2 F_{TP} + \eta_3 F_{TP}^2} + 4\sqrt{\eta_1 + \frac{1}{\sqrt{2}}F_{TP}\eta_2 + \frac{1}{2}\eta_3 F_{TP}^2} + \sqrt{\eta_1 - \eta_2 F_{TP} + \eta_3 F_{TP}^2} +\right.$$

$$\left. + 4\sqrt{\eta_1 - \frac{1}{\sqrt{2}}F_{TP}\eta_2 + \frac{1}{2}\eta_3 F_{TP}^2} + 2\sqrt{\eta_1}\right),$$

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

Анализируя формулы (1) – (5) можно сделать вывод, 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 уравнений (2) и (5) 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 (1) определяются физико-механическими факторами фреттинг-коррозии. Рассматривая уравнения (3) и (4), 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, т.к. химическое сродство A_c представлено второй 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[7]:

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

где φ_k - химический потенциал k-компонента реакции;

v_k – стехиометрический коэффициент k-компонента реакции.

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

$$A_c = v_m \varphi_m + v_g \varphi_g - v_0 \varphi_0, \tag{6}$$

где φ_m, φ_g, φ_0 - химические потенциалы соответственно материала, газового компонента и окисла;

v_m, v_g, v_0 - стехиометрические коэффициенты соответственно материала, газового компонента и окисла.

Известно[8], что величина химического потенциала активного газового компонента в реакции φ_g зависит от его парциального давления:

$$\varphi_g = \varphi_g^0 + RT\ln\frac{P_g}{P_g^0}, \tag{7}$$

где φ_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, в среде кислорода и в среде воздуха при одинаковом давлении, согласно формуле (7) химический потенциал кислорода будет меньше химического потенциала воздуха, т.к. парциальное давление кислорода в воздухе ниже. Соответственно падение химического потенциала, согласно (3), (4) и (6), приведет к уменьшению коэффициентов a_2 и a_3, т.е. при фреттинг-коррозии в среде воздуха износ будет ниже, чем в среде кислорода.

Из анализа зависимостей для коэффициентов $a_1 - a_4$ можно сделать вывод о том, что разрушаемость при фреттинг-коррозии можно снизить, если уменьшить химическую активность среды. Но так как в нашем случае это невозможно, то необходимо подобрать такой материал покрытия, который будет обладать высокими прочностными свойствами, высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью, низким коэффициентом трения.

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

Для упрощения обработки результатов исследований коэффициенты $a_1 - a_4$ можно рассчитать, применив способ наименьших квадратов.

Что бы определить удельную нагрузку, амплитуду и частоту колебаний в месте контакта «опорная поверхность вала - буксовая втулка» необходимо рассмотреть условия работы прессовых валов.

Определим, исходя из условий эксплуатации прессовых валов удельную нагрузку в месте контакта «опорная поверхность вала - буксовая втулка». Рассмотрим вначале случай, когда продольные оси валов расположены в одной вертикальной плоскости (см. рисунок 1 а). Если бомбировка валов соответствует их прогибу, а усилия дополнительного прижима с лицевой и приводной сторон равны между собой, то линейное давление q будет равномерным по всей длине рабочей части вала[9]:

$$q = \frac{G_B + P}{b} \quad \text{Н/мм},$$

где G_B - вес верхнего вала (с подшипниками); P - суммарное усилие дополнительного прижима с лицевой и приводной сторон, Н; b - длина рабочей части вала, мм

Нагрузка на оба подшипника нижнего вала:

$$Q_{H_0} = G_H + G_B + P = G_H + qb \quad \text{Н},$$

где G_H - вес нижнего вала, Н.

Нагрузка на оба подшипника верхнего вала, опирающегося на нижний, равна усилию дополнительного прижима:

$$Q_{B_0} = P = qb - G_B.$$

Реакция каждой из опор нижнего вала:

$$R = \frac{Q_{Ho}}{2}.$$

Обычно валы прессов расположены в двух вертикальных плоскостях (см. рисунок 1 б). С достаточной для расчета точностью можно принять, что рычаги, на которых закреплен верхний вал, расположены горизонтально. Тогда результирующую веса G_B верхнего вала и усилия P дополнительного прижима модно разложить на две составляющие: $Q_Ц$ - давление между валами, направленное по линии соединения центров нижнего и верхнего валов, и $Q_{ГОР}$ - нагрузку в горизонтальной плоскости вдоль рычагов:

$$Q_{ГОР} = (G_B + P) \cdot tg\gamma = Q_Ц \cdot \sin\gamma,$$

где γ - угол между вертикальной и линией, соединяющей центры валов.

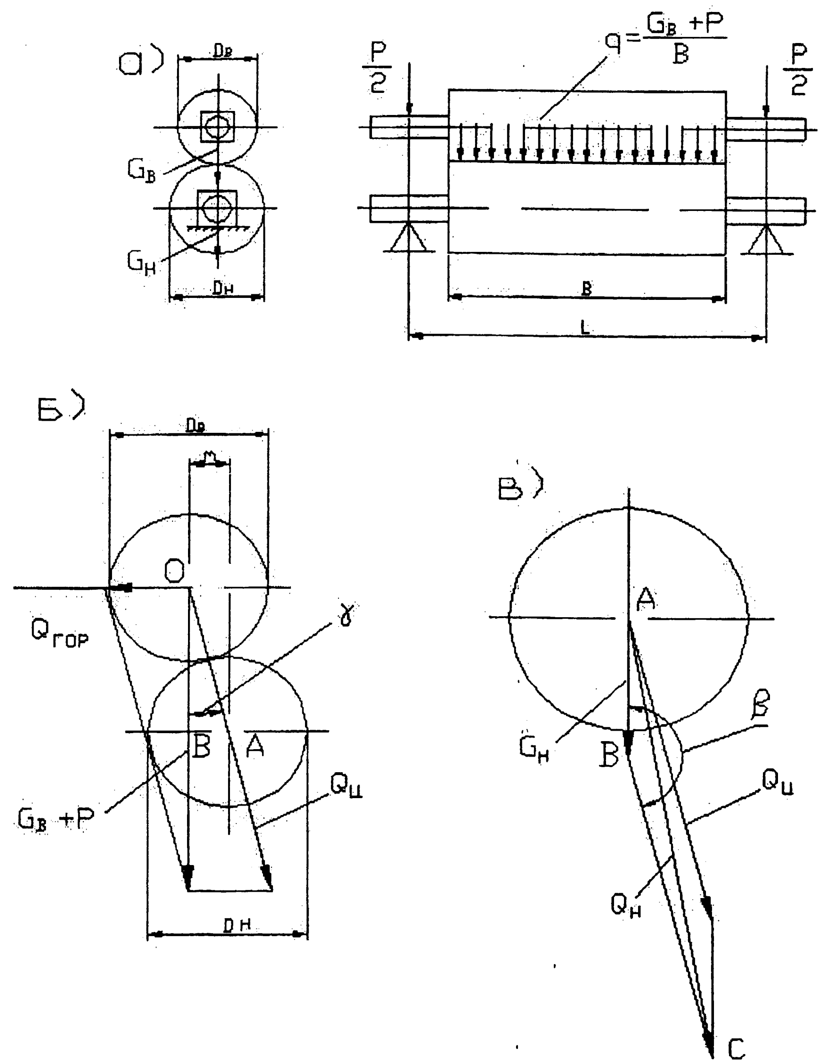
Из треугольника АОВ (см. рисунок 1 б) $\sin\gamma = \dfrac{2m}{D_H + D_B}$,

где m - величина смещения между валами по горизонтали, мм;

D_H и D_B - диаметры верхнего и нижнего валов, мм.

Тогда давление между валами по линии центров: $Q_Ц = qb = \dfrac{G_B + P}{\cos\gamma}$.

Нагрузка на оба подшипника нижнего вала (рисунок 1 в) равна:



а – валы расположены в одной плоскости; б – в двух вертикальных плоскостях
в – общая нагрузка на подшипники нижнего вала
Рисунок 1 - Схема нагружения валов пресса

$$Q_{H_0} = \sqrt{G_H^2 + G_Ц^2 - 2G_H \cdot Q_Ц \cdot \cos\beta} = \sqrt{G_H^2 + Q_Ц^2 + 2G_H \cdot Q_Ц \cdot \cos\gamma}.$$

Нагрузка на оба подшипника верхнего вала составляет:

$$Q_{B_0} = \sqrt{P^2 + Q_{ГОР}^2}.$$

В сопряженной паре опорная поверхность вала - буксовая втулка имеет место переменный контакт двух цилиндрических поверхностей - напыленного покрытия и втулки подшипника (рисунок 2).

Площадью контакта является цилиндрическая поверхность, которая по мере износа уменьшается и стремится к узкому сектору, а в критическом случае (по недосмотру оператора, не своевременному техническому обслуживанию), стремится к линейному контакту.

Площадь контакта упрочненного вала и втулки ограничена сектором:

$$S = \pi \cdot r \frac{n^\circ}{180^\circ} \cdot L,$$

где L – длина площадки контакта (опорной поверхности);
r – радиус вала в месте контакта.

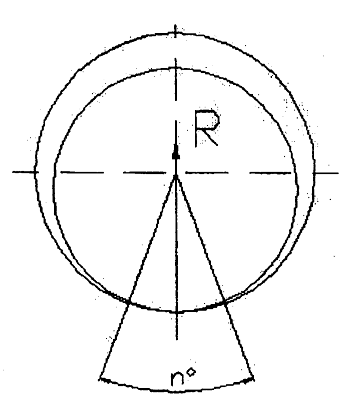


Рисунок 2 – Схема контакта опорная поверхность вала - буксовая втулка

Удельная нагрузка будет равна:

$$p = \frac{R}{S} \quad \text{МПа}.$$

Таким образом, зная конструктивные и геометрические параметры прессовых валов и используя представленную физико-математическую модель можно определить изнашивание опорной поверхности вала. Кроме того, определив удельную нагрузку в месте контакта «опорная поверхность вала - буксовая втулка», можно прогнозировать работоспособность полученного покрытия в зависимости от его прочности сцепления с основой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алябьев,А.Я. Фреттинг-коррозия и ее структурно-энергетическое описание. – В сб.: «Надежность и долговечность авиационных газотурбинных двигателей». Киев, изд-во КИИТА, вып. 1, 1971. 2. Алябьев,А.Я. и др. Структурные изменения при фреттинг-коррозии. – ФХММ, 1969, №6. 3. Алябьев,А.Я. и др. Энергетический анализ фреттинг-коррозии. – ФХММ, 1970, №5. 4. Иванова,В.С. и др. Усталость и хрупкость металлических материалов. – М.: Наука, 1968. -452с. 5. Титченер,Э.Л., Бевер М.Б. Скрытая энергия при наклепе. – В сб.: «Успехи физики металлов». М.: Металлургиздат, Т.4, 1961. 6. Голего,Н.Л., Алябьев,А.Я.. Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. – Киев: «Техніка», 1974 – 272с. 7. Хаазе, Р. Термодинамика необратимых процессов. – М., 1967. – 532с. 8. Сверлин,Р.А. Термодинамика твердого состояния. – М.: Металлургиздат, 1963. – 520с. 9. Эйдлин,И.Я. Бумагоделательные и отделочные машины, 2 изд. – М., 1962. – 564с.

УДК 539.3

Чигарев А.В., Беляцкая Л.Н.

КВАЗИСТАТИЧЕСКАЯ ПЕНЕТРАЦИЯ ИНДЕНТОРА В НЕОДНОРОДНОЕ ЖЕСТКОПЛАСТИЧЕСКОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО ПРИ УСЛОВИИ ПОЛНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Рассмотрим вдавливание осесимметричного идентора в неоднородное жесткопластическое полупространство. Выберем цилиндрическую систему координат (рисунок 1) так что предел текучести $k = k(\rho, \theta, z)$б тогда относительные к пределу текучести компоненты напряжений σ_{ij} являются функциями двух координат ρ, z.

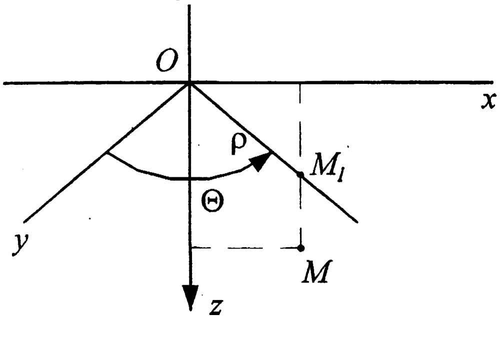


Рисунок 1

Рассмотрим условия полной пластичности:

$$\sigma_{1,2} = \sigma_{3,4}, \quad \sigma_3 = \sigma_1 + 2k, \qquad (1)$$

где σ_i – компоненты главных напряжений, k – предел текучести.

Рассматривается пластическая неоднородность произвольного вида $k(\rho, \theta, z)$. Предел текучести полагается функцией трех координат точек пространства $k(\rho, \theta, z) = k_0 G(\rho, \theta, z)$, где $G = (\rho, \theta, z)$ – непрерывная дифференцируемая произвольная функция $k_0 = \text{const}$. За единицу напряжения принимается $2k_0 = 1$.