

УДК 539.3

Р. С. Геворкян, Д. П. Петросян, М. Г. Асратян

**Применение асимптотических решений краевых задач
цилиндрических оболочек к теоретическому обоснованию
уменьшения износа посадочных отверстий
корпусных деталей машин с помощью колец-вкладышей**

(Представлено академиком НАН Армении Л. А. Агаловяном 4/II 1998)

Износы посадочных отверстий корпусных деталей машин снижают или полностью нарушают работоспособность агрегатов. Зачастую это вызывает серьезные неисправности и аварии машин (¹).

Посадочные отверстия, как правило, изнашиваются с одной стороны, приобретая овальную форму. При этом смещаются центры отверстий, нарушается пространственная геометрия деталей (параллельность и перпендикулярность осей, межцентровые расстояния между осями валов). Несмотря на большое количество исследований в области восстановления посадочных поверхностей корпусных деталей, до настоящего времени нет единой общепринятой теории износа, одной из важнейших задач которой является четкое понимание закономерностей процесса изнашивания и выявление основных причин износа. Износ посадочных отверстий деталей машин является следствием проворачивания наружного кольца подшипника качения и вкладыша подшипника скольжения в гнезде. Процесс проворачивания объясняется различного рода толчками и вибрациями, возникающими при работе. Основной причиной износа посадочных поверхностей деталей является фреттинг-коррозия, которая возникает при трении скольжения с очень малыми возвратно-поступательными перемещениями. В основе фреттинг-коррозии лежит динамический характер нагружения в виде периодической или случайной вибрации, а также ударных импульсов регулярной или беспорядочной последовательности. Вибрационные перемещения контактирующих поверхностей возникают вследствие внешних возмущающих сил и автоколебаний. Для решения практических задач по обеспечению работоспособности подшипник-отверстия полное устранение фреттинга невозможно и не является обязатель-

ным. Достаточно частично предотвратить этот процесс путем снижения микроперемещений или контактных давлений. Одним из способов достижения этой цели является установка в разъем тонкостенных промежуточных деталей, позволяющих разделить имеющийся уровень микроперемещений между двумя поверхностями. Этот способ теоретически обосновывается ниже, с использованием асимптотических решений смешанных краевых задач анизотропных оболочек (2), что позволит путем оптимального сочетания физико-механических свойств материалов контактирующих деталей и промежуточных колец-вкладышей уменьшить явление фреттинг-коррозии и тем самым продлить срок безопасной эксплуатации машин и механизмов.

1. Имеем двухслойную цилиндрическую оболочку, внешняя поверхность которой жестко закреплена, а внутренней поверхности сообщены постоянные перемещения Δ_α – в направлении оси цилиндра и Δ – в направлении фиксированного диаметра (на рис.1 оно направлено вертикально вниз). Требуется определить компоненты полей напряжений и перемещений в двухслойной оболочке, когда на поверхности контакта слоев касательные напряжения пропорциональны нормальным напряжениям по модели кулоновского сухого трения.

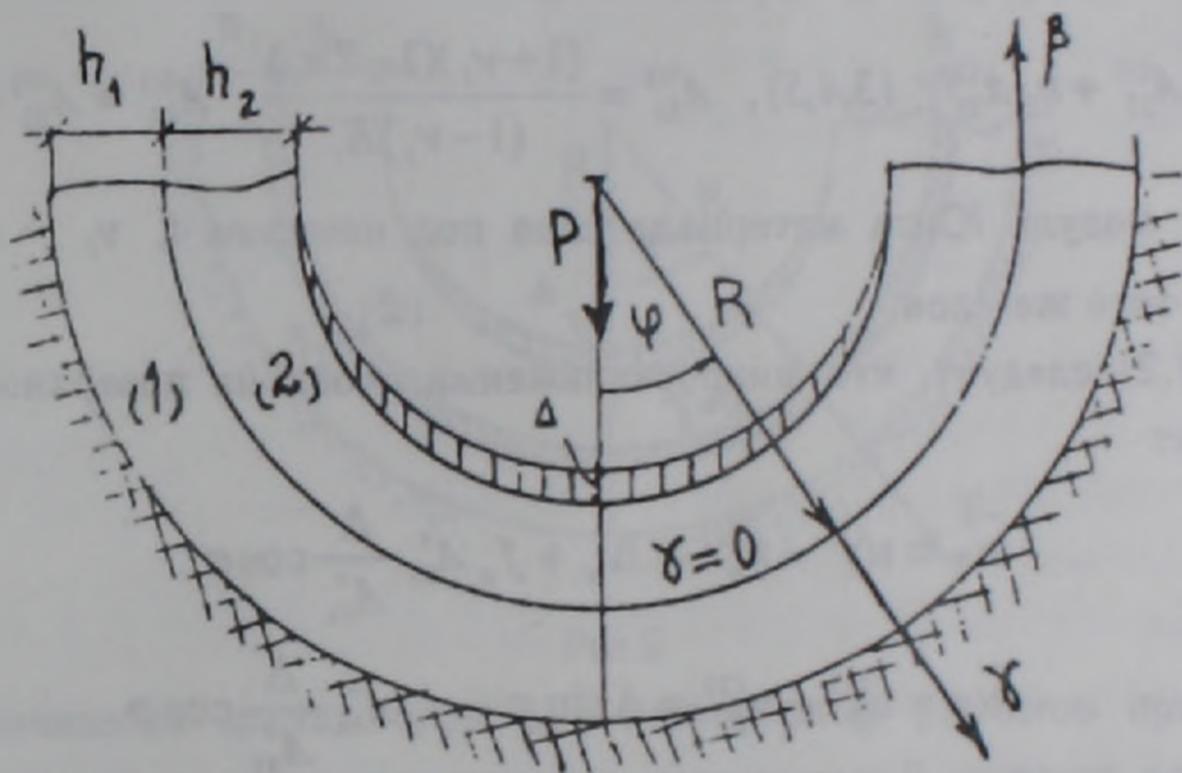


Рис.1.

За координатную поверхность примем цилиндр радиуса R , который разделяет слои. Пусть α – длина образующей, β – длина направляющей дуги, γ – длина внешней нормали в точке (α, β) координатной поверхности. Толщину внешнего слоя обозначим h_1 , а внутреннего – h_2 . Граничные условия и условия контакта слоев запишутся в виде

$$\begin{aligned}
 u_j(\gamma = h_1) &= 0, \quad j = \alpha, \beta, \gamma, \quad \varphi = \beta / R, \\
 u_\alpha(\gamma = -h_2) &= \Delta_\alpha, \quad u_\beta(\gamma = -h_2) = \Delta \sin \varphi, \quad u_\gamma(\gamma = -h_2) = \Delta \cos \varphi, \\
 u_\gamma^{(1)}(\gamma = 0) &= u_\gamma^{(2)}(\gamma = 0), \quad \sigma_{\gamma\gamma}^{(1)}(\gamma = 0) = \sigma_{\gamma\gamma}^{(2)}(\gamma = 0) = \sigma_{\gamma\gamma}, \\
 \sigma_{\alpha\gamma}^{(1)}(\gamma = 0) &= \sigma_{\alpha\gamma}^{(2)}(\gamma = 0) = f_\alpha \sigma_{\gamma\gamma} \quad (\alpha, \beta)
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

где f_α, f_β – коэффициенты трения по соответствующим направлениям.

Компоненты полей напряжений и перемещений оболочки с условиями (1.1) с любой асимптотической точностью можно вычислить по рекуррентным формулам, выведенным в (2). Ограничиваясь достаточным для инженерных расчетов исходным приближением, получим

$$\begin{aligned} \sigma_{\gamma\gamma}^{(i)} &= -\frac{R}{R+\gamma} \sigma_1, \quad \sigma_{\alpha\gamma}^{(i)} = -\frac{R}{R+\gamma} f_\alpha \sigma_1, \quad \sigma_{\beta\gamma}^{(i)} = -f_\alpha \sigma_1, \\ \sigma_{\alpha\alpha}^{(i)} &= -\frac{R}{R+\gamma} A_{13}^{(i)} \sigma_1, \quad \sigma_{\beta\beta}^{(i)} = -A_{23}^{(i)} \sigma_1, \quad \sigma_{\alpha\beta}^{(i)} = 0, \\ u_\alpha^{(i)} &= (1-i)\Delta_\alpha - (\gamma + (-1)^i h_i) f_\alpha A_{55}^{(i)} \sigma_1, \quad \sigma_1 = \frac{\Delta}{A_{33}^*} \cos \varphi, \\ u_\beta^{(i)} &= (1-i)\Delta \sin \varphi - (\gamma + (-1)^i h_i) f_\beta A_{44}^{(i)} \sigma_1, \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$u_\gamma^{(i)} = \Delta \cos \varphi - (\gamma A_{33}^{(i)} + h_2 A_{33}^{(i)}) \sigma_1, \quad i = 1, 2,$$

$$A_{33}^* = h_1 A_{33}^{(1)} + h_2 A_{33}^{(2)} \quad (3, 4, 5), \quad A_{33}^{(i)} = \frac{(1+\nu_i)(1-2\nu_i)}{(1-\nu_i)E_i}, \quad A_{44}^{(i)} = A_{55}^{(i)} = \frac{2(1+\nu_i)}{E_i},$$

где E_i – модуль Юнга материала слоя под номером i , ν_i – коэффициент Пуассона того же слоя.

Из (1.2) следует, что микроскользящие слоев на поверхности контакта составляют

$$\begin{aligned} \bar{u}_\alpha &= u_\alpha^{(1)} - u_\alpha^{(2)} = \Delta_\alpha + f_\alpha A_{55}^* \frac{\Delta}{A_{33}^*} \cos \varphi, \\ \bar{u}_\beta &= u_\beta^{(1)} - u_\beta^{(2)} = \Delta \sin \varphi + f_\beta A_{44}^* \frac{\Delta}{A_{33}^*} \cos \varphi. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Если перемещение Δ вызвано вертикальной внешней нагрузкой P , то в формулах (1.2), (1.3) следует принять

$$\Delta = \frac{2P}{\pi R \lambda} A_{33}^*, \quad (1.4)$$

где λ – длина контактируемого участка вдоль оси α .

Основными величинами, вызывающими износ посадочных отверстий корпусных деталей машин, являются напряжения $\sigma_{\gamma\gamma}^{(i)}, \sigma_{\alpha\gamma}^{(i)}, \sigma_{\beta\gamma}^{(i)}$ и микросмещения слоев на поверхности контакта $\bar{u}_\alpha, \bar{u}_\beta$. Все эти величины определяются по формулам (1.2) – (1.4).

2. Изменим рассмотренную выше задачу, не изменяя граничные условия.

Пусть толщина первого слоя оболочки, рассмотренной в первой задаче, уменьшена на h . В результате толщина этого слоя стала $h_1 - h$ и вместо

уменьшенной части, в качестве среднего слоя, одето кольцо толщины h . Получим трехслойную цилиндрическую оболочку, где средним слоем является кольцо-вкладыш (рис.2). Не придавая индекс величинам среднего слоя, граничные условия и условия контакта слоев запишем в виде

$$\begin{aligned}
 u_j(\gamma = h_1) &= 0, \quad j = \alpha, \beta, \gamma, \quad \varphi = \beta / R, \\
 u_\alpha(\gamma = -h_2) &= \Delta_\alpha, \quad u_\beta(\gamma = -h_2) = \Delta \sin \varphi, \quad u_\gamma(\gamma = -h_2) = \Delta \cos \varphi, \\
 u_\gamma(\gamma = 0) &= u_\gamma^{(2)}(\gamma = 0), \quad \sigma_\pi(\gamma = 0) = \sigma_\pi^{(2)}(\gamma = 0) = \sigma_\pi, \\
 \sigma_{\alpha\gamma}(\gamma = 0) &= \sigma_{\alpha\gamma}^{(2)}(\gamma = 0) = f_\alpha^* \sigma_\pi \quad (\alpha, \beta) \\
 u_\gamma(\gamma = h) &= u_\gamma^{(1)}(\gamma = h), \quad \sigma_\pi(\gamma = h) = \sigma_\pi^{(1)}(\gamma = h) = \sigma_\pi, \\
 \sigma_{\alpha\gamma}(\gamma = h) &= \sigma_{\alpha\gamma}^{(1)}(\gamma = h) = f_\alpha^* \sigma_\pi \quad (\alpha, \beta),
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

где f_α^*, f_β^* — коэффициенты сухого трения между материалами слоев по направлениям осей α, β .

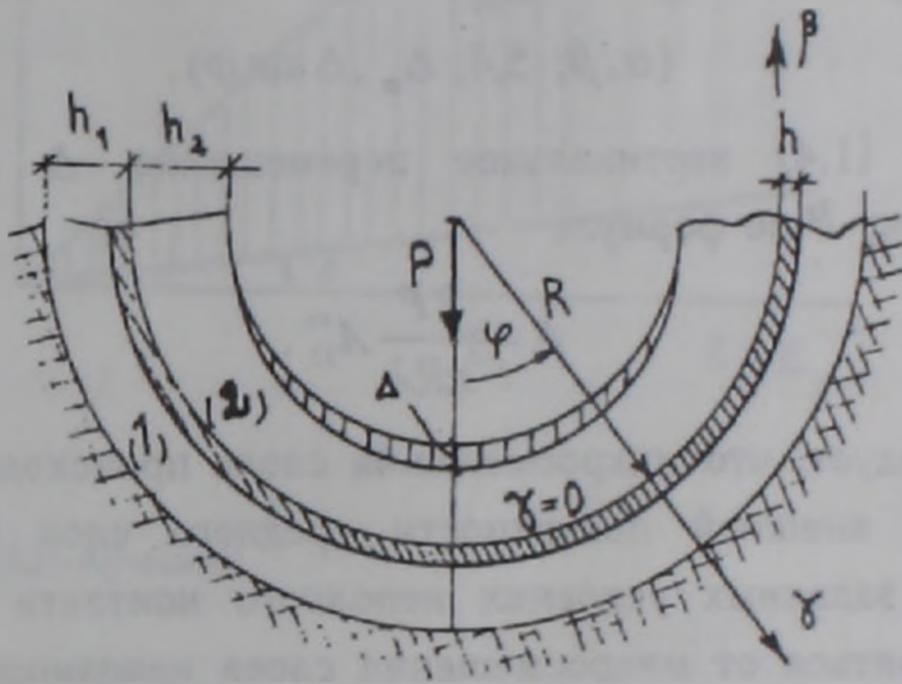


Рис.2.

Ограничиваясь достаточным для инженерных расчетов приближением, для компонентов полей напряжений и перемещений каждого слоя оболочки получим

а) для первого слоя $h_1 - h \leq \gamma \leq h_1$

$$\begin{aligned}
 u_\gamma^{(1)} &= (h_1 - \gamma) A_{33}^{(1)} \sigma_2, \quad u_\beta^{(1)} = (h_1 - \gamma) f_\beta^* A_{44}^{(1)} \sigma_2 \\
 u_\alpha^{(1)} &= (h_1 - \gamma) f_\alpha^* A_{33}^{(1)} \sigma_2, \quad \sigma_2 = \frac{\Delta \cos \varphi}{A_{33}^{**}};
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

б) для второго слоя $-h_2 \leq \gamma \leq 0$

$$\begin{aligned}
 u_\gamma^{(2)} &= (h_1 A_{33}^{(1)} + h(A_{33} - A_{33}^{(1)}) - \gamma A_{33}^{(2)}) \sigma_2, \\
 u_\beta^{(2)} &= -\Delta \sin \varphi - (\gamma + h_2) A_{44}^{(2)} f_\beta^* \sigma_2, \\
 &(\alpha, \beta; 5, 4; \Delta_\alpha, \Delta \sin \varphi), \\
 A_{33}^{**} &= h_1 A_{33}^{(1)} + h_2 A_{33}^{(2)} + h(A_{33} - A_{33}^{(1)}) \quad (3, 4, 5);
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

в) для среднего слоя $0 \leq \gamma \leq h$

$$u_\gamma = \left((h_1 - h) A_{33}^{(1)} + (h - \gamma) A_{33} \right) \sigma_2,$$

$$u_\beta = -\frac{1}{2} \Delta \sin \varphi + \frac{1}{2} f_\beta^* \left((h_1 - h) A_{44}^{(1)} + (h - 2\gamma) A_{44} - h_2 A_{44}^{(2)} \right) \sigma_2 \quad (2.4)$$

$(\alpha, \beta; 5, 4; \Delta_\alpha, \Delta \sin \varphi).$

И для всех слоев оболочки $-h_2 \leq \gamma \leq h_1$

$$\sigma_{rr} = -\frac{R}{R + \gamma} \sigma_2, \quad \sigma_{\beta\gamma} = -f_\beta^* \sigma_2, \quad \sigma_{\alpha\gamma} = -f_\alpha^* \frac{R}{R + \gamma} \sigma_2. \quad (2.5)$$

Из полученных формул (2.2) – (2.4) следует, что скольжения слоев на поверхностях контактов $\gamma = 0$ и $\gamma = h$ составляют соответственно

$$\bar{u}_\beta^* = u_\beta^{(1)}(h) - u_\beta(h) = u_\beta(0) - u_\beta^{(2)}(0),$$

$$\bar{u}_\beta = \frac{1}{2} \Delta \sin \varphi + \frac{1}{2} f_\beta^* \frac{\Delta \cos \varphi}{A_{33}^*} \left(h_2 A_{44}^{(2)} + (h_1 - h) A_{44}^{(1)} + h A_{44} \right) \quad (2.6)$$

$(\alpha, \beta; 5, 4; \Delta_\alpha, \Delta \sin \varphi).$

Аналогично (1.4) вертикальное перемещение Δ выражается через внешнюю нагрузку P по формуле

$$\Delta = \frac{2P}{\pi R \lambda} A_{33}^*. \quad (2.7)$$

Из (2.6) следует, что микросмещения слоев происходят как на внутренней, так и на внешней поверхности среднего слоя (кольца-вкладыша). Поскольку при заданных условиях неполного контакта слоев (1.1), (2.1) полностью избавиться от микросмещения слоев невозможно, следовательно, целесообразно требовать, чтобы возникшее при заданной нагрузке P микросмещение слоев \bar{u}_β (1.3) было разделено кольцом-вкладышем между его внутренней и внешней поверхностями, в лучшем случае, поровну. Математически это можно представить в виде неравенств

$$\frac{1}{2} \bar{u}_\beta \leq \bar{u}_\beta^* < \bar{u}_\beta. \quad (2.8)$$

Подставив значения $\bar{u}_\beta, \bar{u}_\beta^*$ из (1.3), (1.4), (2.6), (2.7), получим условия, откуда могут быть определены физико-механические постоянные материала кольца-вкладыша

$$h(\mu A_{33}^{(1)} + f_\beta^* A_{44}^{(1)}) \leq A_{44}^* (f_\beta^* - f_\beta) + h(\mu A_{33} + f_\beta^* A_{44}) < \mu A_{33}^* + f_\beta^* A_{44}^*, \quad (2.9)$$

$\mu = \operatorname{tg} \varphi.$

В частном случае, когда физико-механические свойства материалов первого и второго слоев совпадают $E_1 = E_2, \nu_1 = \nu_2, f_\beta^* = f_\beta$, для модуля Юнга

материала кольца-вкладыша из (2.9) получаем

$$\frac{E_1 h}{h_1 + h_2 + h} < E \leq E_1. \quad (2.10)$$

Из (2.8) – (2.10) следует, что точки приведенного графика, соответствующие значениям модуля Юнга материала кольца-вкладыша, должны лежать между

лучами $E = E_1 \operatorname{tg} \theta$ ($\operatorname{tg} \theta = \frac{h}{h_1 + h_2 + h}$) и биссектрисой $E = E_1$ координатно-

го угла. Причем, чем ближе E к E_1 , тем меньше будет смещение слоев и, следовательно, явление фреттинг-коррозии уменьшится почти вдвое.

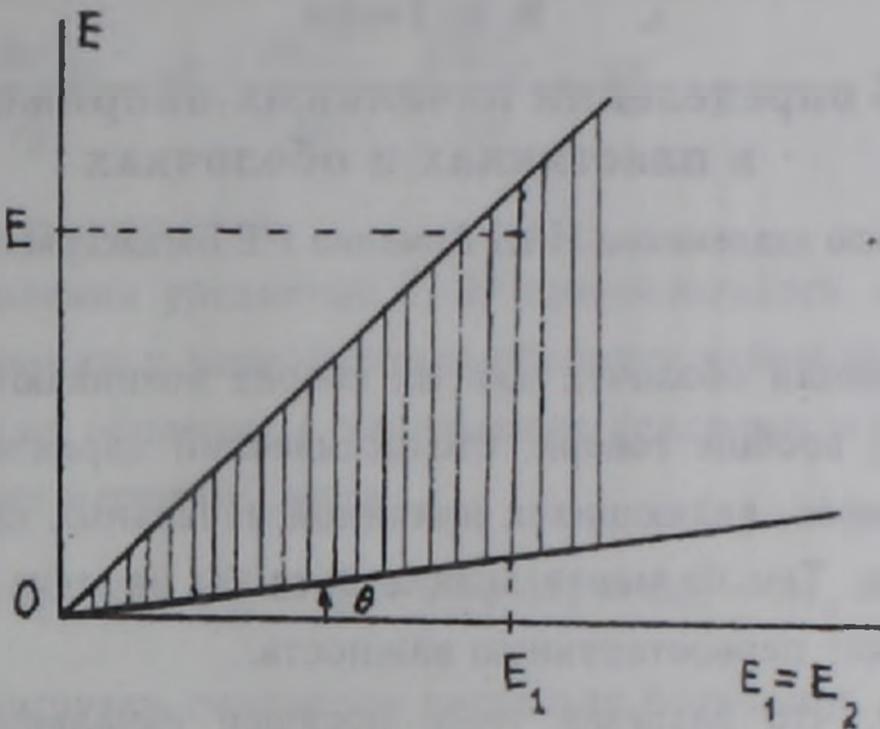


Рис.3.

Институт механики НАН Армении

Ռ. Ս. ԳԵՎՈՐԳՅԱՆ, Դ. Պ. ՊԵՏՐՈՍՅԱՆ, Մ. Գ. ՀԱՍՐԱԹՅԱՆ

Գլանային թաղանթների եզրային խնդիրների ասիմպտոտիկ լուծումների կիրառությունը մեքենամասերի նստեցման բների մաշվածքի ներդրային եղանակով նվազեցման տեսական հիմնավորման մեջ

Օգտագործելով երկչերտ և եռաչերտ գլանային թաղանթների եզրային խնդիրների ասիմպտոտիկ լուծումները, ցույց է տրվում, որ արտաքին ազդեցությունների հետևանքով մեքենամասերի բների մակերևույթներում առաջանում են ֆրետինգ-կոռոզիա ծնող միկրոտեղաշարժեր: Օղակ-ներդիրի օգնությամբ միկրոտեղաշարժերը բաժանվում են նրա ներքին և արտաքին մակերևույթների միջև: Ցույց է տրվում, որ մեքենամասերի և օղակ-ներդիրի նյութերի օպտիմալ ընտրությամբ կարելի է նվազեցնել առաջացած միկրոտեղաշարժերը և հետևաբար նրանից առաջացած ֆրետինգ-կոռոզիայի երևույթը:

ЛИТЕРАТУРА – ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ Д.П.Петросян, Сб. науч. трудов Арм. СХИ, 1990. ² Л.А.Агаловян, Р.С.Геворкян, Изв. АН АрмССР. Механика, т.42, №3 (1989).