

**Сорокатый Р. В.,
Писаренко В. Г.,
Дыха М.А.**

Хмельницький національний університет,
КНПО "Форт" МВД України

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ИЗНАШИВАНИЯ СОПРЯЖЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ПЕРЕКОСЕ ОСЕЙ

Введение

Одним из наиболее сложных этапов моделирования процессов изнашивания является анализ механизма изнашивания и определение критериев разрушения, соответствующих этому механизму. Критерии разрушения зависят от множества факторов. К числу преобладающих можно отнести абсолютные или амплитудные значения напряжений, температура, механические характеристики материалов. При этом следует учитывать, что сам механизм разрушения во многом определяется напряженно-деформированным состоянием контактного слоя.

Для расчёта кинетики процесса изнашивания на макроуровне используются феноменологические модели, в которых принимаются известными соотношения, устанавливающие связь между характеристиками износа поверхности и параметрами, характеризующими свойства фрикционного контакта и условиями взаимодействия. Выбор типа феноменологической модели для описания износа должен базироваться на знании механизма изнашивания узла трения.

Анализ работоспособности подшипников скольжения должен учитывать конструктивные особенности машиностроительных конструкций. Одной из особенностей, которая может существенно повлиять на долговечность подшипника скольжения – взаимное расположение осей вала и втулки подшипника. Отклонение от параллельности может возникнуть вследствие изгиба вала, который приводит к тому, что оси вала и втулки подшипника скольжения будут расположены под некоторым углом. Такая конструктивная особенность подшипника скольжения существенно влияет на напряженно-деформированное состояние (НДС) и характер его изменения в процессе функционирования конструкции, что в свою очередь оказывает существенное влияние на механизм накопления триборазрушений и изнашивания.

В связи с этим анализу НДС подшипников скольжения посвящено достаточно много работ [1 - 6], в которых рассматриваются НДС элементов пары трения в учете различных схем нагружения и особенностей функционирования.

Однако в этих работах недостаточно уделено внимания анализу механизма изнашивания подшипника скольжения, в условиях, когда оси вала и втулки расположены с перекосом.

Целью данной работы является анализ механизма изнашивания и формирования поверхности контакта путем оценки напряженно-деформированного состояния элементов подшипника скольжения при перекосе осей вала и втулки.

Расчетная схема и модель

Рассматривается контакт жесткого вала радиуса R_1 и цилиндрического упругого антифрикционного слоя толщиной ϵ , сцепленного с жесткой втулкой. Вал наклонен под углом θ к втулке. Ось z направлена вдоль оси подшипника. Износ подшипника и контактные давления зависят от положения точек области контакта. Принимается, что изнашивается только антифрикционный слой.

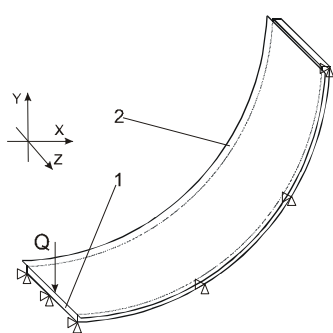


Рис. 1. Расчетная модель:
1 – антифрикционный элемент;
2 – жесткий вал

Для решения задачи об изнашивании подшипника скольжения работающего при взаимном перекосе осей вала и втулки использовался метод трибоэлементов [7].

Исходя из приведенной расчетной модели, в препроцессоре ANSYS построена параметризованная расчетная модель, которая приведена на рис. 1.

При построении модели, учитывая условия задачи, контактное взаимодействие элементов трибосопряжения моделировалось жестко-податливым контактом. Вал 2 (рис. 1), как жесткий, принят в качестве целевой поверхности. Антифрикционный элемент 1 – в качестве контактной поверхности. На контактной поверхности антифрикционного слоя определено геометрическое положение трибоэлементов. Для создания сетки конечно-элементной модели антифрикционного слоя использовались двадцатиузловые пространственные элементы SOLID186. Для создания контактной пары "втулка-антифрикционный элемент" использовались контактные элементы "поверхность-поверхность". Целевая поверхность описана элементами TARGE170, контактная – CONTA174.

В качестве алгоритма для решения контактной задачи выбран модифицированный метод Лагранжа.

Изнашивание, согласно методу трибоэлементов, рассматривалось как случайный процесс марковского типа с дискретным временем и состояниями. В момент времени $t = 1$ вероятности нахождения ТЭ в том или ином состоянии определялись как произведение вектора начальных состояний $[\pi_j]$ на матрицу переходных вероятностей (МПВ) $[\mathbf{W}_{ij}]$:

$$[\pi_j(t=1)] = [\pi_j(t=0)][\mathbf{W}_{ij}], \quad i, j = 1, 2, \dots, K_C, \quad (1)$$

где $[\pi_j(t=0)]$ – вектор начальных состояний;

$[\pi_j(t=1)]$ – вектор безусловных вероятностей нахождения ТЭ в j -х состояниях $i = 1, \dots, K_C$ в момент времени $t = 1$;

$[\mathbf{W}_{ij}]$ – матрица переходных вероятностей.

Компоненты вектора начальных состояний $[\pi_j(t=0)]$ определялись из допущения, что в начальный момент времени ТЭ находился в первом состоянии:

$$[\pi_j(t=0)] = [1, 0, 0, \dots, 0]. \quad (2)$$

Вероятности состояний ТЭ в момент времени $t > 1$ определялись как произведение $[\pi_j(t-1)]$ вектора безусловных вероятностей в момент $t-1$ на МПВ, задающую поведение ТЭ в момент времени t :

$$[\pi_j(t)] = [\pi_j(t-1)][\mathbf{W}_{ij}], \quad i, j = 1, 2, \dots, K_C \quad (3)$$

Для описания поведения ТЭ используются МПВ с единичными скачками вверх и наличием поглощающего состояния:

$$[\mathbf{W}_{ij}] = \begin{bmatrix} w_{11}(t) & w_{12}(t) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_{22}(t) & w_{23}(t) & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Под поглощающим состоянием понимается состояние полного износа антифрикционного слоя.

Компоненты $w_{ij}(t)$, определяются следующим образом:

$$w_{ij}(t) \cong \lambda_i(t) \Delta t, \quad (5)$$

где $\lambda_i(t) = V_i(t)/h$; – интенсивность потока изнашивания;

Δt – временной шаг нагружения;

h – величина, определяемая из условия ординарности потока изнашивания;

$V_i(t)$ – скорость изнашивания в момент времени t .

Значение величины износа определяется через математическое ожидание \bar{m}_t :

$$z_t = (\bar{m}_t - 1)h \quad (6)$$

где $\bar{m}_t = \sum_{i=1}^{K_C} i \pi_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, K_C$;

$\pi_i(t)$ – безусловные вероятности состояний ТЭ;

$h = \varepsilon / (K_C - 1)$ – величина изнашивания, которая определяет состояние трибоэлементов.

В начальный момент времени предполагалось, что все элементы находились в состоянии 1.

В качестве функции скорости изнашивания от контактных давлений и скорости скольжения использовалась степенная зависимость вида:

$$V_i = K_w V p(\varphi, \varphi_0(t))^y, \quad (7)$$

где V_i – скорость изнашивания;

K_w – коэффициент интенсивности изнашивания;

V – скорость скольжения вала по антифрикционному слою;

$p(\varphi, \varphi_0(t))$ – контактные давления;

γ – показатель степени.

Численная реализация и анализ полученных результатов

В качестве материала изнашиваемого образца пары трения, был выбран композиционный материал на основе фторопласта марки Флубон 15. Выбор данного материала обусловлен триботехническими свойствами, которые обеспечивают стабильную работу в условиях без смазки с низким коэффициентом трения и практически отсутствием износа второго элемента пары трения. Численный анализ проведен для следующих значений параметров: $k = 0,9 \cdot 10^{-9}$ м²/Н; $Q = 300$ Н; $\varepsilon = 2,6 \cdot 10^{-3}$ м; $\Delta = 2,0 \cdot 10^{-4}$ м; $R_1 = 1,12 \cdot 10^{-2}$ м; $V_{cp} = 0,95$ м/с; $K_C = 5$; $\gamma = 1$; $\Delta\varphi = 1^\circ$; $K_w = 1 \cdot 10^{-12}$ м²/Н.

Результаты расчетного анализа приведены на рис. 2 - 3.

Для анализа механизма изнашивания в качестве критерия разрушения и накопления трибоповреждений для материала втулки подшипника в соответствии с рекомендациями [8], принята гипотеза удельной энергии формоизменения Губера-Мизеса-Генки, в соответствии с которой, эквивалентные напряжения определялись по выражению:

$$\sigma_e = \left(\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right)^{1/2} \quad (8)$$

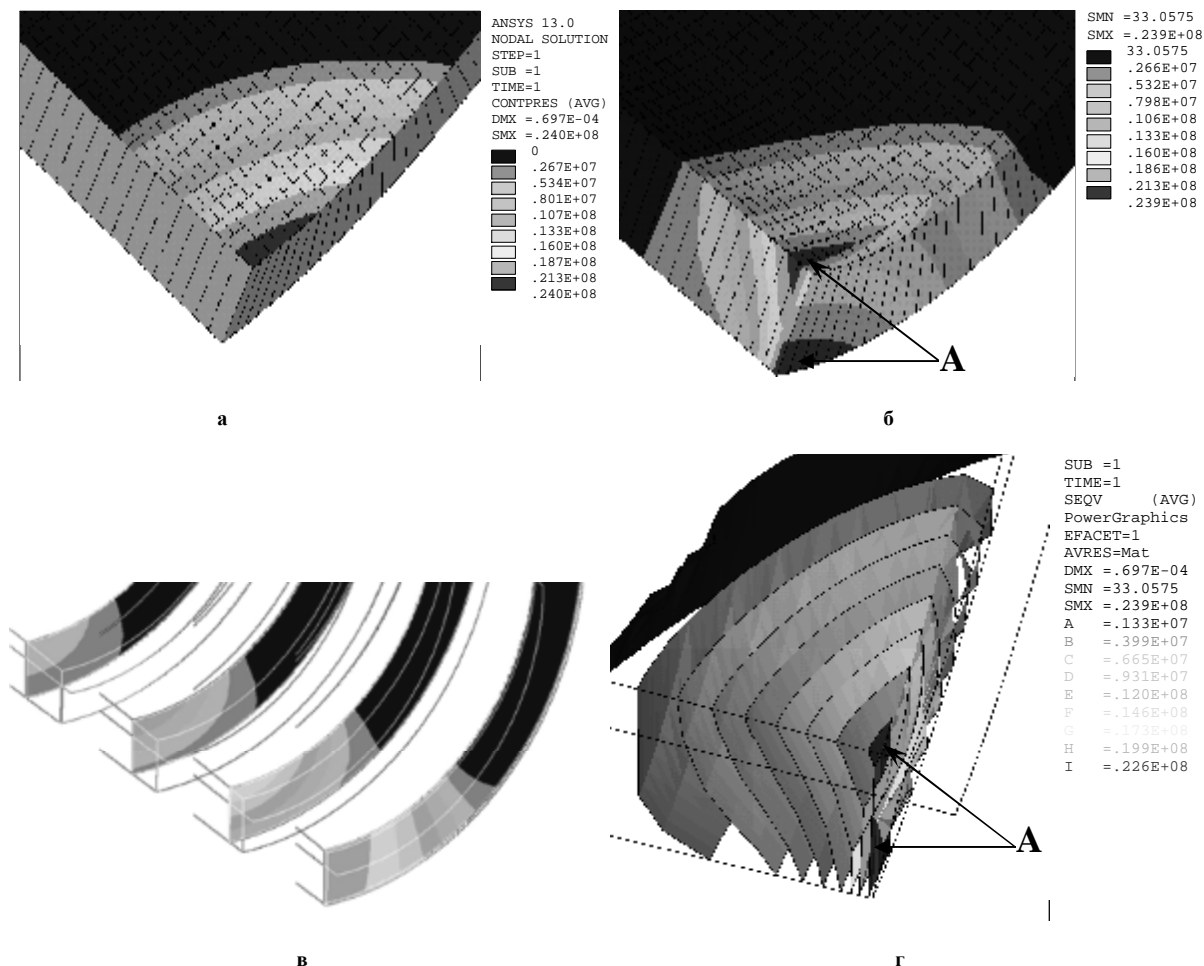


Рис. 2 – Результаты расчетного анализа в начальный момент времени:
 а – контактные давления;
 б – эквивалентные напряжения;
 в – сечения распределений эквивалентных напряжений по глубине втулки;
 г – изоповерхности эквивалентных напряжений

Результаты расчетного анализа (рис. 2) показали, что в начальный момент времени, когда происходит формирование площадки контакта, в окрестностях контактирующего с валом торца втулки возникают существенные эквивалентные напряжения (рис. 2, б, г, зона А). Направление изолиний распределений эквивалентных напряжений по глубине втулки для различных сечений в осевом направлении (рис. 2, в) свидетельствует о том, что в окрестностях зоны А (рис. 2, б, г) линии наиболее вероятных направлений развития микротрещин будут направлены в радиальном направлении между внутренней и внешней цилиндрическими поверхностями втулки. Анализ формы и характера изменения изоповерхностей эквивалентных напряжений (рис. 2, г) с учетом месторасположения зоны максимальных эквивалентных напряжений показывает, что в начальный момент времени в зависимости от соотношения действующих и предельных значений напряжений может возникнуть расслоение (скол) торца втулки, контактирующего с валом. По мере удаления в осевом направлении от контактирующего торца втулки, как свидетельствуют изолинии распределения эквивалентных напряжений по глубине втулки (рис. 2, в) наиболее вероятные направления развития микротрещин будут располагаться концентрично с деформированной внутренней поверхностью втулки, при этом максимальные значения функции накопления повреждений будут находиться на поверхности. Это свидетельствует о том, что процесс изнашивания будет иметь характер поверхностного износа.

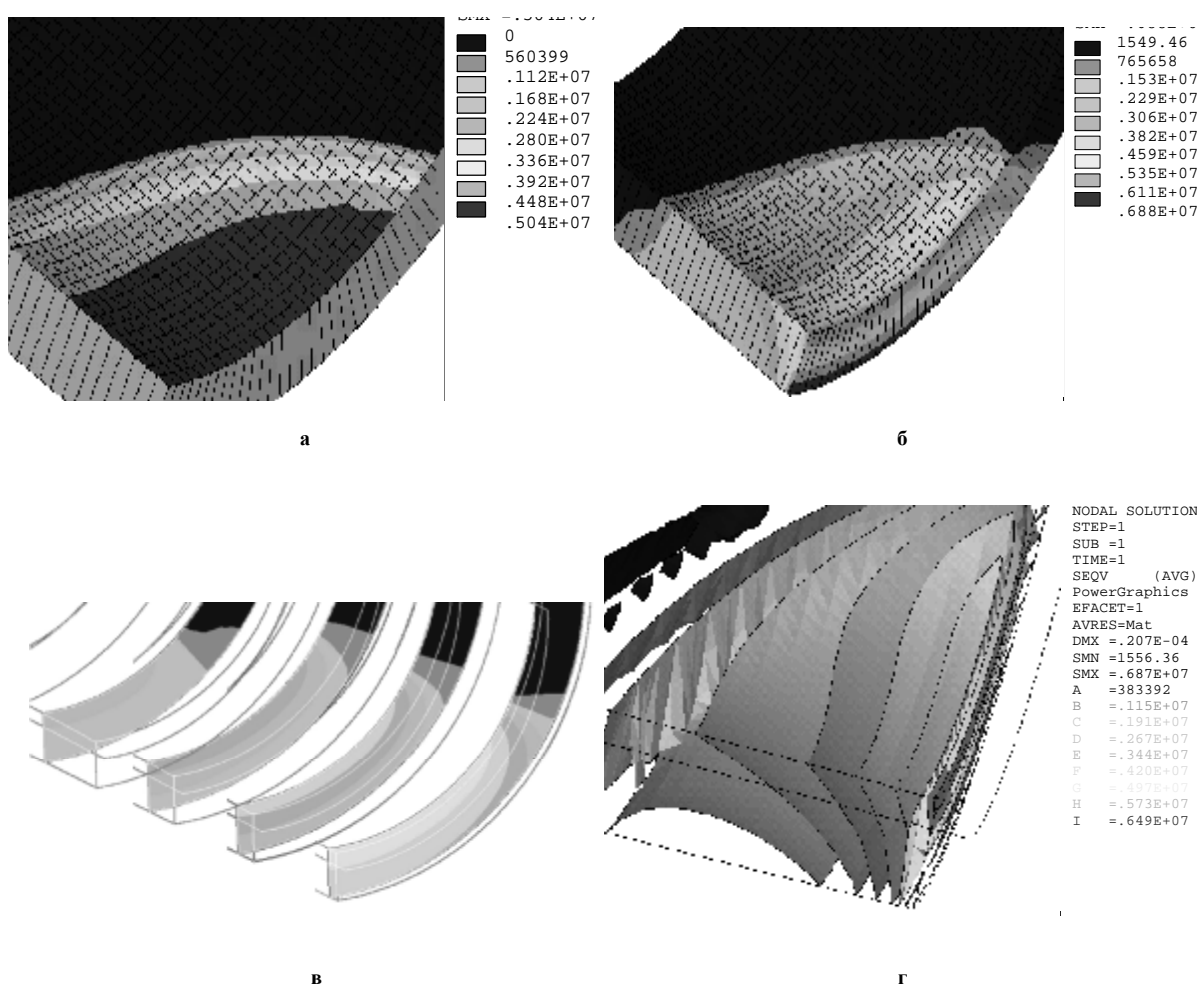


Рис. 3 – Результаты расчетного анализа в момент времени 4,5 Кс:

- а – контактные давления;
б – эквивалентные напряжения;
в – сечения распределений эквивалентных напряжений по глубине втулки;
г – изоповерхности эквивалентных напряжений

В процессе функционирования подшипника скольжения, вследствие износа, происходит увеличения площадки контактного взаимодействия, что приводит к существенному уменьшения абсолютных значений, как контактных давлений, так и эквивалентных напряжений (рис. 3, а, б). Направление изолиний распределений эквивалентных напряжений по глубине втулки в различных сечениях (рис. 3, в) свидетельствует о том, что в осевом направлении вдоль внутренней контактирующей с валом поверхности втулки формируется зона квазиравномерного поверхностного износа. Наиболее вероятные направления

развития микротрещин и накопления триборазрушений будут располагаться концентрично с деформированной внутренней поверхностью втулки, при этом максимальные значения функции накопления трибоповреждений будут находиться на поверхности и определять поверхностный характер изнашивания.

Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работах [9 - 11].

Выводы

В работе, путем оценки напряженно-деформированного состояния элементов подшипника скольжения при перекосе осей вала и втулки, представлены результаты анализа механизма изнашивания. В результате проведенных исследований получено, что в начальный момент времени в зависимости от соотношения действующих и предельных значений напряжений может возникать расслоение (скол) торца втулки, контактирующего с валом. В период установившегося изнашивания наиболее вероятные направления развития микротрещин и накопления триборазрушений будут располагаться концентрично с деформированной внутренней поверхностью втулки. Максимальные значения функции накопления трибоповреждений находятся на поверхности и определяют поверхностный характер изнашивания, что хорошо согласуется с экспериментальными данными для такого вида материалов.

Литература

1. Александров В.М. Контактные задачи в машиностроении / В.М. Александров, Б.Л. Ромалис. – М.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
2. Проников А.С. Контактная задача для сопряженных поверхностей деталей машин. В сб.: Трение и износ в машинах / А.С. Проников. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – С. 375-391.
3. Галахов М.А. Дифференциальные и интегральные уравнения математической теории трения / М.А. Галахов, П.П. Усов. – М.: Наука, 1990. – 280 с.
4. Кузьменко А.Г. Методические рекомендации МР 215-86. Расчет контактных давлений и напряжений при сухом и граничном трении / А.Г. Кузьменко, М.В. Зернин. – М.: ВНИИНМАШ, 1986. – 60 с.
5. Кузьменко А.Г. Контактная задача для РПС с учетом изнашивания при перекосе осей вала и вкладыша / А.Г. Кузьменко, А.Г. Любин, В.А. Кузьменко // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 1997. – №4. – С. 76-80.
6. Сорокатый Р.В. Анализ работоспособности подшипников скольжения при перекосе осей вала и втулки // Трение и износ. – 2006. – Т. 27, № 1. – С. 24-32.
7. Сорокатый Р.В. Метод трибоэлементов. Монография. / Р.В. Сорокатый. – Хмельницкий: ХНУ, 2009. – 242 с.
8. Коллинз Дж. Повреждения материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение / Дж. Коллинз; пер. с англ. — М.: Мир, 1984. – 624 с.
9. Воронков Б.Д. Подшипники сухого трения / Воронков Б.Д. —Л.: Машиностроение, 1979. – 224 с.
10. Чернавский С.А. Подшипники скольжения / Чернавский С.А. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 243 с.
11. Сиренко Г.А. Антифрикционные карбопластики / Сиренко Г.А. – К.: Техніка, 1985. – 195 с.

Надійшла 06.06.2011