

# ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕОРІЇ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ

УДК 621.891

<sup>1</sup>Р. В. Сорокатый, д-р техн. наук, доц.,

<sup>2</sup>В. Г. Писаренко, канд. техн. наук,

<sup>1</sup>М. А. Дыха, асп.

## ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ НАКОПЛЕНИЯ ТРИБОПОВРЕЖДЕНИЙ

<sup>1</sup>Хмельницький національний університет, RSorokaty@gmail.com

<sup>2</sup>КНПО «Форт» МВД України, г. Вінниця, evgenbokt@voliacable.com

*На основе термокинетической теории разрушения построена численная модель накопления трибоповреждений, адаптированная к использованию совместно с методами компьютерного моделирования*

**Введение.** Управление показателями надежности машины на стадии проектирования неразрывно связано с разработкой и совершенствованием расчетных методов их определения.

Трудности в разработке расчетных методов прогнозирования ресурса и износа узлов трения обусловлены наличием различных по своей природе процессов, протекающих на поверхностях трения, и влиянием на эти процессы большого числа взаимосвязанных факторов. Недостаточная изученность сложных физико-химических процессов, протекающих на поверхностях контакта при трении, вероятностный характер процессов трения и изнашивания, случайный характер параметров внешнего воздействия, свойств материалов и исходной геометрии сопряженных деталей осложняет разработку методов расчета износа и прогнозирования ресурса узлов трения.

**Моделирование процессов изнашивания.** При разработке методов прогнозирования ресурса узлов трения, необходимо учитывать особенности изнашивания, как специфического вида разрушения. Многократность элементарных актов разрушения является основной особенностью изнашивания, отличающего этот процесс от разрушения материала в объеме. Разрабатываемые методы прогнозирования ресурса узлов должны ответить на вопрос, как долго будет происходить процесс изнашивания до достижения предельной величины износа.

Моделирование изнашивания необходимо рассматривать на двух масштабных уровнях: макроуровень, определяющий кинетику изменения макроформы тел при изнашивании, и микроуровень, описывающий каждый элементарный акт отделения частицы от поверхности.

Моделирование процесса изнашивания на микроуровне должно включать в себя решения задач механики контактного взаимодействия, при постановке которых принимается во внимание макро- и микрогеометрия взаимодействующих тел, неоднородность механических свойств поверхностных слоев, а также неоднородность температурного поля, и задач механики разрушения, используемых для описания отделения от поверхности частиц материала [1].

Многочисленное повторение расчётов на микроуровне позволяет оценить изменение характеристик сопряжения на макроуровне и рассчитать долговечность сопряжения по критериям износостойкости. Анализ процессов, протекающих на микроуровне, позволяет разработать феноменологическую модель изнашивания пары трения на макроуровне, в которой скорость изнашивания задается как функция макрохарактеристик сопряжения.

При построении модели изнашивания на микроуровне, необходимо определить физический механизм элементарного акта разрушения и выбрать критерий разрушения, соответствующий этому механизму; рассчитать напряжённо-деформированное состояние, температуру поверхностного слоя и другие функции, входящие в критерий разрушения; построить модель отделения частицы; определить новые характеристики поверхностного слоя после отделения частицы в следующий момент разрушения.

Одним из наиболее сложных этапов моделирования процессов изнашивания является анализ механизма изнашивания и определение критерия разрушения, соответствующего этому механизму. Критерий разрушения зависит 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 уровнем напряжений и температур в контактном слое. Для определения начала разрушения и моделирования отделения частицы с поверхности применяются методы механики разрушения, позволяющие на основе выбора критерия разрушения и анализа состояния контактного слоя рассчитать раз-

меры и форму отделяющихся частиц. Тип износа зависит от материалов пары трения, условий нагружения, кинематики пары трения, наличия и природы смазки и других условий.

Однако, применение таких алгоритмов к расчёту реальных сопряжений сложной конфигурации является чрезвычайно сложным, а в большинстве случаев, учитывая сложность происходящих процессов в зоне трения и их не достаточный уровень изученности на физическом уровне, практически не реализуемым. В связи с этим, в трибологии обычно используются наиболее простые модели, учитывающие только основные факторы, влияющие на процесс разрушения поверхности.

Если при построении моделей перейти от дискретного характера изнашивания на микроуровне к контакту макротел, изнашивание можно рассматривать как непрерывный во времени процесс, приводящий к необратимому изменению макроформы взаимодействующих тел.

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 данного трибосопряжения.

Наиболее сложным и трудоемким процессом в моделировании процессов изнашивания является анализ механизма изнашивания, который базируется на изучении процессов накопления повреждений в зоне трибоконтактного взаимодействия.

Циклическое нагружение поверхности, имеющее место при относительных перемещениях элементов узлов трения, порождает в контактном слое неоднородное поле внутренних напряжений, что является причиной накопления в этом слое повреждений.

При построении феноменологических расчетных моделей процесса накопления повреждений и как следствие разрушения, обычно ограничиваются рассмотрением двух основных укрупненных стадий: стадии развития рассеянных (диссеминированных) повреждений (микротрещины, вакансии и т.д.) по множеству микроскопических объемов и стадии роста магистральных трещин, приводящих к разрушению. В зависимости от материалов, условий ме-

ханических и температурных нагрузок, характера циклического напряженного состояния и типа нагружения, относительная длительность этих стадий и их границы являются достаточно размытыми и условными [2].

В большинстве случаев, при рассмотрении стационарного процесса изнашивания, принимают, что преобладает стадия диссеминированных повреждений, а развитие магистральных трещин, приводящих к отделению частиц износа, протекает практически мгновенно.

Феноменологическое описание стадии диссеминированных повреждений основывается на представлении о поврежденности, как особом механическом состоянии элемента сплошной среды, подобном деформированному состоянию элемента. Аналитические зависимости для описания рассеянных повреждений строятся на основе физических соображений или механических моделей процессов длительного разрушения. В общем случае такие модели, условно можно разделить на три типа: силовые, деформационные и энергетические [3].

Силовые модели основаны на допущении, что повреждения возникают в результате пребывания элемента материала под напряжением, независимо от величины и характера деформаций. Деформационные модели предполагают, что процесс накопления повреждений обусловлен развитием деформаций, а разрушение наступает при достижении предельных значений деформаций. В основе энергетических моделей лежит предположение о том, что разрушение наступает по достижению предельного уровня накопленной внутренней энергии.

**Построение модели.** Построение модели накопления трибо-разрушений состоит в построении положительной неубывающей во времени функции  $P(x, y, z, t)$ , характеризующей текущую степень повреждения материала в точке с координатами  $x, y, z$  и зависящей от значений напряжений в данной точке. Разрушение наступает в момент времени  $t^*$ , когда функция достигнет заданного порогового значения  $P^*$ . Для анализа удобно ввести относительную величину  $M(t)$ , характеризующую меру накопленных повреждений, как отношение текущего значения функции  $P(x, y, z, t)$  к ее

пороговому значению  $P^*$ . Очевидно, что  $0 \leq M(t) \leq 1$ . Условие  $M(t) = 1$  является условием разрушения. Для нахождения текущего значения  $M(t)$  нужно располагать кинетическим уравнением поврежденности, устанавливающим зависимость искомой величины от режима нагружения. Форма данного уравнения устанавливается исходя из физических или механических соображений, а постоянные и функциональные параметры уравнения определяются из результатов экспериментальных исследований.

В большинстве физических подходов к моделированию поврежденности, скорость накопления поврежденности  $P(x, y, z, t) / dt$  рассматривается как функция напряжений в данной точке, температуры и других параметров, в зависимости от механизма разрушения, вида материала и т. д. [3].

Используем для описания процесса накопления поврежденности термокинетическую теорию разрушения тел [4], которая делает возможным исследование совместного влияния напряженного состояния и температурных эффектов на разрушение в явном виде.

Согласно термокинетической теории, скорость накопления повреждений задается соотношением [1]:

$$\frac{dP(x, y, z, t)}{dt} = \frac{1}{\tau^*} \exp\left(-\frac{U - \gamma \cdot \sigma(x, y, z, t)}{k \cdot T(x, y, z, t)}\right), \quad (1)$$

где  $U$  – энергия активации;  $\tau^*$ ,  $\gamma$  – характеристики материала;  $k$  – постоянная Больцмана;  $\sigma(x, y, z, t)$  – характеристика поля напряжений в точке с координатами  $(x, y, z)$  в момент времени  $t$ ;  $T(x, y, z, t)$  – абсолютная температура в точке с координатами  $(x, y, z)$  в момент времени  $t$ .

Используя различные характеристики поля напряжений или их комбинации в качестве  $\sigma(x, y, z, t)$ , в рамках данной модели можно воспроизвести различные типы разрушения.

Построение адекватных аналитических моделей и решение сопряженных задач для определения характеристик полей напряжений и температур в реальных узлах трения, является весьма сложной задачей и в большинстве случаев не представляется возможным. Поэтому,

при определении  $\sigma(x, y, z, t)$  и  $T(x, y, z, t)$ , прибегают к численным методам компьютерного моделирования. В свою очередь, методы компьютерного моделирования, предполагают пространственно-временную дискретизацию расчетных моделей.

Используя модель удара [5], представим процесс накопления трибоповреждений в некоторой точке  $j$  пространства в дискретной форме. Для этого введем следующие допущения:

1. Процесс эксплуатации изделия состоит из повторяющихся циклов нагружения (ЦН). Цикл нагружения — это повторяющийся период функционирования изделия, в течение которого функция повреждений  $P_j(x, y, z, t)$  может достигать порогового значения  $P^*$ , т.е. могут накапливаться повреждения. Циклами нагружения измеряется время, которое в данном случае дискретно.

2. Состояния поврежденности дискретны, что подтверждается экспериментальными данными о прерывистом характере развития диссеминированных повреждений в микрообъемах.

3. Накопление повреждений в ЦН зависит только от этого цикла и от состояния повреждения в его начале, а характеристики, определяющие жесткость ЦН, остаются неизменными в пределах данного цикла.

Модель удара позволяет с помощью допущения, что возникновение повреждений возможно только в период цикла нагружения, представить процесс накопления трибоповреждений в дискретном времени. Это ограничение не приводит к потерям в физике процесса и дает существенные преимущества при построении вычислительных алгоритмов.

С учетом вышесказанного представим уравнение (1) в дискретной форме для  $i$ -го цикла нагружения:

$$P_j(x, y, z, \Delta t_i) = \frac{1}{\tau^*} \exp\left(-\frac{U - \gamma \cdot \sigma_j(x, y, z, \Delta t_i)}{k \cdot T_j(x, y, z, \Delta t_i)}\right) \cdot \Delta t_i \quad (2)$$

где  $\Delta t_i$  – время цикла нагружения.

Для определения значений функции  $P_j(x, y, z, t)$  в интервале времени  $0 \dots t$  просуммируем выражение (2) по циклам нагружения данного интервала:

$$P_j(x, y, z, t) = \sum_{\Delta t_i} \left[ \left( \frac{1}{\tau^*} \exp \left( - \frac{U - \gamma \cdot \sigma_j(x, y, z, \Delta t_i)}{k \cdot T_j(x, y, z, \Delta t_i)} \right) \right) \cdot \Delta t_i \right] \quad (3)$$

Из уравнения (3) определим величину  $M(t)$ , характеризующую меру накопленных повреждений, как отношение текущего значения функции  $P_j(x, y, z, t)$  к ее пороговому значению  $P^*$ :

$$M_j(x, y, z, t) = \frac{\sum_{\Delta t_i} \left[ \left( \frac{1}{\tau^*} \exp \left( - \frac{U - \gamma \cdot \sigma_j(x, y, z, \Delta t_i)}{k \cdot T_j(x, y, z, \Delta t_i)} \right) \right) \cdot \Delta t_i \right]}{P^*} \quad (4)$$

Переход к построению модели накопления повреждений в дискретном времени и состояниях дает возможность описания процесса накопления поврежденности при совместном влиянии напряженного состояния и температурных эффектов на данный процесс, без наложения ограничения на вид зависимостей  $\sigma(x, y, z, t)$  и  $T(x, y, z, t)$  для реальных узлов трения. Преимущества данного подхода обусловлены не только возможностью численной реализации, но и тем, что эволюция процессов накопления трибоповреждений наилучшим образом описывается как функция числа циклов нагружения, которым подверглась система.

Выражение (4) позволяет, используя характеристики полей напряжений  $\sigma(x, y, z, t)$  и температур  $T(x, y, z, t)$ , расчетным путем смоделировать различные типы накопления трибоповреждений в узлах трения для разных значений порогового значения  $P^*$ .

Сравнительный анализ экспериментальных данных с данными полученными расчетным путем позволит построить замкнутую модель процесса и идентифицировать тип и характер накопления повреждений в узлах трения, что даст возможность прогнозирования ресурса узла по критерию износостойкости для различных условий функционирования.

**Выводы.** На основе термокинетической теории разрушения тел, построена модель накопления трибоповреждений в дискретной форме. Модель адаптирована к совместному использованию с методами численного анализа полей напряжений и температур элементов узлов трения.

## Список литературы

1. *Горячева И.Г.* Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 478 с.

2. *Павлов П.А.* Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность / П. А. Павлов. – Л.: Машиностроение, 1978. – 252 с.

3. *Колинз Дж.* Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение / Дж. Колинз; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 624 с.

4. *Регель Р.В.* Кинетическая природа прочности твёрдых тел / Р. В. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.

5. *Esary J.D.* Shock models and wear processes / J. D. Esary, A.W. Marshall, F. Prochan // Applied Probability. – 1973. – Vol. 4. – P. 627–650.

*Сорокатиий Р.В., Писаренко В.Г., Духа М.О.* Побудова чисельної моделі накопичення трибопошкоджень // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 55. – С.5–12.

На основі термокінетичної теорії руйнування, побудовано чисельну модель накопичення трибопошкоджень, яка адаптована до використання разом з методами комп'ютерного моделювання.

Список літ.: 5 найм.

### **Construction of numerical model of accumulation of tribodamages**

On the basis of the therm-kinetic theory of destruction the numerical model of accumulation of the tribodamages, adapted for use together with methods of computer modeling is constructed.

Стаття надійшла до редакції 10.03.2011