

ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕОРІЇ ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ
УДК 621.891

¹Р. В. Сорокатый, д-р техн. наук, доц.,

²В. Г. Писаренко, канд. техн. наук,

¹М. А. Дыха, асп.

**ПОСТРОЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ НАКОПЛЕНИЯ
ТРИБОПОВРЕЖДЕНИЙ**

¹Хмельницький національний університет, RSorokaty@gmail.com

²КНПО "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].

Многократное 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; τ^* , γ – 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 Δt_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.

Сорокати́й Р.В., Писаренко В.Г., Дыха М.О. **Побудова чисельної моделі накопичення трибопошкоджень** // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 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.

Sorokatyi R.V., Pysarenko V.G., Dykha M.O. **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