



УДК 621.793

**А.В. Анцупов (мл), А.В. Анцупов,
В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский**
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова»
г. Магнитогорск, Россия
E-mail: momz-magtu@yandex.ru
Дата поступления: 05.11.2016

КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Аннотация

На основе кинетической концепции разрушения конструкционных материалов разработаны базовые принципы теории прогнозирования долговечности подшипниковых опор качения в виде общей постановки и решения стационарных краевых задач физической теории надежности. С этой целью минимизирована система определяющих уравнений и сформулирована структура условий однозначности для исследуемых типов подшипников качения. В качестве примера решения таких задач рассмотрен блочный алгоритм оценки проектного ресурса шариковых однорядных подшипников по критерию контактной выносливости материала одного из колец.

Ключевые слова: подшипники качения, долговечность, ресурс, прогнозирование, кинетическая модель отказов, критерий, контактная прочность.

Описание проблемы

В настоящее время подшипники качения (ПК) являются основным видом опор вращающихся деталей, валов и осей разнообразных машин и механизмов металлургического производства. Они стандартизованы в широком диапазоне типоразмеров согласно ГОСТ 3395-89 [1]. Поскольку основным дефектом ПК в нормальных условиях эксплуатации является выкрашивание рабочих поверхностей из-за переменных контактных напряжений, для его предупреждения производят расчет на долговечность по динамической грузоподъемности, ГОСТ 18855-2013 [2].

Однако номинальный 90-процентный ресурс L_{10} в часах рассчитывают не по напряжениям, а по эмпирической зависимости в функции эквивалентной нагрузки $P_{экв}$ на подшипник:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P_{экв}} \right)^p \cdot \left(\frac{10^6}{60 \cdot n} \right), \quad (1)$$

где C - базовая динамическая грузоподъемность, величина которой для каждого подшипника определена на основе статистической обработки результатов многочисленных испытаний и приводится в каталогах с

коэффициентом надежности $P = 0,9$; n - постоянная частота вращения кольца подшипника в об/мин.

Эта формула получена при испытаниях ПК в крайне неоднозначных и неконкретных условиях: "...из широко используемых материалов *хорошего* качества, при *хорошем* качестве исполнения, эксплуатируемых в *нормальных* условиях работы..." [2], и поэтому не учитывает целый ряд параметров, например, изменение свойств материала элементов, рассеяние геометрических и микрогеометрических характеристик, температурные условия, условия смазывания, распределение контактных напряжений, характер их изменения во времени и др.

По сути эмпирический расчет долговечности ПК по выражению (1) выполняется по величине постоянной нагрузки (грузоподъемности), то есть *по критерию несущей способности*, и поэтому не описывает физику процессов повреждаемости и разрушения их материалов, не позволяет оценить изменение их состояния во времени и предсказать остаточный ресурс на требуемый момент времени будущей эксплуатации. При изменении условий эксплуатации, согласно [2], необходимы дополнительные

эксперименты для определения соответствующих эмпирических коэффициентов и введения их в условие (1), что снижает точность предсказания и увеличивает затраты на этапах разработки подшипниковых опор.

Таким образом, методика не является универсальной, не применима в специфических условиях эксплуатации и, на наш взгляд, может быть улучшена на основе современных достижений физической теории надежности и кинетического подхода к описанию процесса повреждаемости и разрушения конструкционных материалов. Поэтому целью исследований в данной работе является разработка нового теоретического подхода к построению математических моделей процесса формирования отказов ПК без проведения экспериментов.

Разработка кинетических моделей отказов ПК (общая постановка краевых задач)

Проектный ресурс ПК при конструировании подшипниковых опор может быть определен на основе общего методологического подхода к прогнозированию надежности технических объектов [3], структурно-энергетической теории прочности и износостойкости твердых тел [4-8], сформулированной в рамках кинетической концепции разрушения материалов [9-11], с использованием известных справочных зависимостей [12-13] для оценки необходимых геометрических, кинематических и силовых параметров ПК.

1. Уравнение для оценки проектного ресурса ПК :

$$t_* = (u_{e*} - u_{e0}) / \dot{u}_e;$$

2. Кинетическое уравнение повреждаемости элементов ПК [10,11]:

$$\dot{u}_e = k_{cmp} \cdot \frac{2 \cdot k \cdot T}{h} \cdot U(\sigma_0, T) \cdot \exp\left(-\frac{U(\sigma_0, T) \cdot V_{am}}{k \cdot T}\right) \cdot sh\left(\frac{A_f^0 \cdot V_{am}}{2 \cdot k \cdot T}\right).$$

Величины скорости повреждаемости \dot{u}_e определяются отдельно для тел и дорожек качения, а минимально возможный ресурс t_* ПК в целом рассчитывается по максимальной из них. Параметры, входящие в

В соответствии с базовыми положениями указанных теорий сформулируем общую постановку краевой задачи (модель отказов) исследуемого типа подшипников качения в заданных условиях стационарного нагружения, принимая следующие допущения:

- для математического описания процесса деградации ПК в качестве параметра его текущего состояния примем плотность энергии u_{et} дефектов структуры материала наиболее нагруженных объемов поверхностных слоев тел и дорожек качения;

- в процессе эксплуатации в стационарных условиях нагружения величина u_{et} в каждом элементе будет возрастать от начального u_{e0} до критического u_{e*} значения с некоторой постоянной скоростью \dot{u}_e по закону: $u_{et} = u_{e0} + \dot{u}_e \cdot t$;

- условием работоспособности ПК в любой момент t будущей эксплуатации будет являться неравенство: $u_{et} = u_{e0} + \dot{u}_e \cdot t < u_{e*}$, а момент появления выкрашивания материала одного из элементов $t = t_*$ определится решением уравнения перехода ПК в предельное состояние: $u_{et} = u_{e0} + \dot{u}_e \cdot t_* = u_{e*}$.

В этом случае для прогнозирования среднего проектного ресурса ПК, из общей системы уравнений краевой задачи [3] в модель отказов достаточно включить две основных зависимости:

базовые уравнения системы (2), определяются по выражениям [10, 11], которые подробно описаны ниже.

Для того, чтобы система (2) оказалась статически определимой, необходимо сформулировать условия однозначности (отличительные признаки, начальные и гра-

нические условия), выделяющие исследуемый тип подшипников из класса ему подобных.

К *отличительным признакам* исследуемого ПК следует отнести тип, номер, конструктивные особенности и расчетную схему нагружения подшипника.

Начальные условия, характеризующие состояние ПК в момент времени $t = 0$, должны включать следующие группы задаваемых и рассчитываемых параметров.

Первая группа. Геометрические, кинематические и силовые характеристики ПК.

Вторая группа. Физико-механические характеристики материалов элементов.

Третья группа. Теплофизические характеристики материалов.

Четвертая группа. Основные физические константы:

Граничные условия, должны включать следующие уравнения:

- зависимости для расчета вспомогательных геометрических и кинематических параметров ПК;

- зависимости для расчета нагрузок во всех j -тых контактах тел качения с кольцами;

- зависимости для расчета основных характеристик напряженного состояния наиболее нагруженных объемов элементов ПК в каждом j -том контакте тел качения с кольцами.

В этом случае совокупность:

- системы основных уравнений (2);

- отличительных признаков и начальных условий;

- зависимостей, включенных в граничные условия,

представляет постановку краевой задачи теории надежности (физико-математическую модель параметрических отказов) исследуемого типа ПК для проектной оценки их ресурса по критериям контактной усталости материалов его элементов в общем виде.

В качестве примера ниже излагается алгоритм решения краевой задачи для краевых условий радиальных однорядных шариковых подшипников качения (ШПК) по критерию выносливости внешнего неподвижного кольца.

Стратегия проектного расчета ресурса радиальных однорядных ШПК

Алгоритм проектного расчета ожидаемого ресурса исследуемого типа ПК по критерию контактной усталости материалов дорожек качения включает следующие блоки. (Для сокращения объема статьи широко известные по учебникам или справочникам зависимости не приводятся, а указаны номерами формул или страниц источника).

Блок 1. Исходные данные.

Отличительные признаки. Подшипник шариковый, однорядный, типа 0000 с вращающимся внутренним кольцом, нагруженный постоянной радиальной силой.

Начальные условия (группы параметров исходного состояния ШПК).

Первая группа. Геометрические, кинематические и силовые характеристики ПК:

d , D , B - внутренний и наружный диаметр и ширина ПК; D_w , α - диаметр тел качения и угол контакта в ШПК; n_e , n_n - частота вращения внутреннего или наружного колец; F_r - радиальная нагрузка.

Вторая группа. Физико-механические характеристики материала элементов ПК:

E - модуль упругости; G - модуль сдвига; μ - коэффициент Пуассона; ρ - плотность материала, V_{am} - атомный объем материала; HV - твердость материала по Виккерсу; HB - твердость материала по Бринеллю; σ_B - предел прочности; σ_T - предел текучести и др.

Третья группа. Теплофизические характеристики материалов:

T_0 - исходная температура; ΔH_{TB} - энтальпия плавления материала в твердом состоянии; c - удельная теплоемкость материала (при температуре $T = 20 - 100^\circ C$); α_0 - коэффициент линейного теплового расширения; $\nu_0 = T_0 / 870$ - коэффициент неравномерности распределения плотности внутренней энергии материала элементов ПК в исходном состоянии [11];

$u_{e0} = \left((0,067 \cdot HV)^{1,2} \cdot k_\sigma \right)^2 / (6 \cdot G)$ - начальное

значение плотности скрытой энергии дефектов; $k_\sigma = (6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV + 0,12 \cdot 10^{-2})^{-1}$ – комплексный структурный параметр [10].

Четвертая группа. Физические константы: постоянная Больцмана - $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; постоянная Планка - $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с.

Блок 2. Расчет вспомогательных геометрических, кинематических и силовых характеристик ШПК (граничные условия):

- среднего диаметра D_0 , диаметров d_g и d_n дорожек качения внутреннего и наружного колец ПК согласно [12, с.310-311];

- угловой ω_g и окружной v_g скорости вращения внутреннего кольца, угловой ω_0 , и окружной v_0 скорости сепаратора, угловой скорости $\omega_{ш}$ шарика вокруг своей оси согласно [12, с.310-311];

- максимальной нагрузки F_0 в наиболее нагруженном нулевом контакте шариков с внешним кольцом согласно [13, п.16.7].

Блок 3. Расчет параметров напряженного состояния деформируемого объема наружного кольца:

- размеров полуосей эллиптической площадки контакта шариков с наружным $a_{н0}$, и $b_{н0}$ кольцом согласно [12, с.314-321];

- изменяющихся по отнулевому циклу максимального σ_{max} , главных $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, среднего гидростатического σ_0 , а также и интенсивности напряжений σ_i в нулевом контакте согласно [12, с.321], [14, с. 69] и [15, с. 116-118].

Блок 4. Расчет температур и физико-механических характеристик материала:

- температура разогрева локальных объемов [11]:

$$T_* = T_0 \cdot (3 \cdot \sigma_T)^2 / ((3 \cdot \sigma_T)^2 - \sigma_{max j}^2);$$

- средняя температура деформируемого объема поверхностного слоя [11]:

$$T_f = T_0 + (T_* - T_0) / (44 \cdot v_0).$$

- если средняя температура $T_f > 100^\circ C$, то значения физико-механических характеристик $\mu(T_f), E(T_f), G(T),$

$K(T_f), \sigma_B(T), HB(T_f), HV(T_f), HRC(T_f), \sigma_r(T_f)$ определяются в функции температуры по известным для различных марок стали зависимостям согласно [16-19].

Блок 5. Расчет составляющих удельной энергии деформации объема материала наружного кольца ШПК при $T = T_f$ [10-11].

Коэффициент перенапряжения на межатомных связях:

$$\varphi_\sigma = k_\sigma \cdot v_0^{0,5}.$$

Удельная энергия изменения объема:

$$A_V(T) = \frac{\varphi_\sigma^2 \cdot \sigma_0^2}{2 \cdot K(T)}.$$

Удельная энергия формоизменения:

$$A_f(T) = \frac{\varphi_\sigma^2 \cdot \sigma_i^2}{6 \cdot G(T)}.$$

Коэффициент эквивалентности циклического и статического напряженного состояния:

$$M_r^2 = \sigma_T(T) \cdot (65 + 0,46 \cdot HV(T)) / \sigma_r^2(T).$$

Удельная энергия изменения объема в условиях эквивалентного статического растяжения при $\sigma = \sigma_p^{эКВ} = \varphi_\sigma \cdot M_r \cdot \sigma_{max}$:

$$A_V^0 = M_r^2 \cdot A_V.$$

Удельная энергия формоизменения в условиях эквивалентного статического растяжения:

$$A_f^0 = M_r^2 \cdot A_f.$$

Блок 6. Расчет энергии активации процесса повреждаемости структуры материала деформируемого объема материала наружного кольца [10-11].

Начальная энергия активации разрушения структуры при T_0 и $\sigma_p^{эКВ} = 0$:

$$U(p_{T_0}) = (-2,415 \cdot 10^{-28} \cdot T_0^3 + 5,955 \cdot 10^{-25} \cdot T_0^2 + 0,0121 \cdot 10^{-20} \cdot T_0 + 12,286 \cdot 10^{-20}) / V_{am}$$

Изменение энергии активации от температуры саморазогрева от $T = 0^\circ C$ до $T = T_f^\circ C$:

$$\Delta U_T = 1,5 \cdot \alpha_0 \cdot K(T) \cdot T.$$

Энергия активации процесса с учетом удельной работы изменения объема:

$$U(\sigma_0, T) = U(p_{T,0}) - \Delta U_T - A_V^0.$$

Блок 7. Расчет скорости процесса повреждаемости материала наружного кольца и ресурса ШПК (решение системы уравнений 2).

Критическая плотность скрытой энергии при $T = T_f$ [11]:

$$u_{e*} = \Delta H_{TB} - c \cdot \rho \cdot T.$$

Средний за время деформирования изделия до разрушения коэффициент сопротивления структуры материала Ле-Шателье [20]:

$$k_{cmp} = \frac{2 \cdot (u_{e*} - u_{e0})}{3 \cdot u_{e*} - u_{e0}}.$$

Средняя удельная скорость процесса повреждаемости материала с учетом сопротивления структуры по Ле-Шателье при $T = T_f$:

$$\dot{u}_e = k_{cmp} \cdot \frac{2 \cdot k \cdot T}{h} \cdot U(\sigma_0, T) \times \exp\left(-\frac{U(\sigma_0, T)}{k \cdot T}\right) \cdot sh\left(\frac{A_f^0}{2 \cdot k \cdot T}\right).$$

Средний проектный ресурс ШПК по критерию контактной прочности наружного кольца:

$$t_* = \frac{u_{e*} - u_{e0}}{\dot{u}_e}.$$

Предложенный алгоритм позволяет исследовать влияние различных параметров, перечисленных в исходных данных, на величину проектного ресурса, исследуемого ПК без проведения дополнительных экспериментов, что выгодно отличает предложенный кинетический подход от однозначной экспериментальной зависимости для оценки ресурса по динамической грузоподъемности.

Заключение

1. На основе современных достижений физики и механики повреждаемости и разрушения твердых тел сформулированы основные теоретические принципы построения физико-математических моделей отказов подшипниковых опор качения на стадии их конструирования по критериям выносливости элементов.

2. В качестве примера решения краевой задачи предложенный подход реализован в виде подробного блочного алгоритма проектного расчета ресурса однорядных шариковых подшипников качения для заданных условий однозначности.

Библиографический список

- ГОСТ 3395-89 Подшипники качения. Типы и конструктивные исполнения.
- ГОСТ 18855-2013 Подшипники качения. Динамическая грузоподъемность и номинальный ресурс.
- Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П. Теория и практика обеспечения надежности деталей машин по критериям кинетической прочности и износостойкости материалов: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 308с.
- Структурно-энергетический подход к оценке фрикционной надежности материалов и деталей машин / В.П. Анцупов, А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.) и др. // Материалы 66-й науч.-техн. конф.: сб. докл. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008.- Т.1.- С. 258-262.
- Структурно-энергетическая интерпретация взаимосвязи процессов трения и изнашивания / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов и др. // Процессы и оборудование металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр./ под ред. Платова С.И. Вып.8.- Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2009.- С. 233-240.
- Модель процесса изнашивания трибосопряжений на основе термодинамического анализа их состояния / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), М.Г. Слободянский и др. // Материалы 68-й науч.-техн. конф.: сб. докл.– Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010.- С. 264-268.
- Прогнозирование показателей надежности трибосопряжений / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов(мл.), А.С. Губин и др. // Материалы 68-й науч.-техн. конф.: сб. докл.- Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010.- С. 262-264.
- Энерго-механическая концепция прогнозирования ресурса узлов трения по

- критерию износостойкости элементов / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, В.А. Русанов // Трение и износ, 2016. т.37. № 5. С.510-516.
9. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1974. 560с.
 10. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. Ташкент: Издательство «Фан» УзССР, 1985. 165с.
 11. Федоров В.В. Основы эргодинамики и синергетики деформируемых тел / В.В. Федоров; под ред. С.В. Федорова. - Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО "КГТУ", 2014.- Ч.III. Основы эргодинамики деформируемых тел.- 222с.
 12. Перель Л.Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор: Справочник.-М.: Машиностроение, 1983.-543с.
 13. Иванов М.Н. Детали машин: Учебник для машиностроительных специальностей вузов / М.Н. Иванов, В.А. Финогенов.- 12-е изд. испр.- М.: Высш. шк., 2008.- 408 с.
 14. Пинегин С.В. Трение качения в машинах и приборах. М.: Машиностроение.1976. 261с.
 15. Соппротивление материалов, Н.М. Беляев, Главная редакция физико-математической литературы изд-ва "Наука", 1976г., стр.608.
 16. Физика. Большой энциклопедический словарь.- М.: Большая Российская энциклопедия, 1999.- 460 с.
 17. Стали и сплавы. Марочник: справ. изд. / Сорокин В.Г., Герасьев М.А., Палеев В.С. и др. – М.: Интернет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
 18. Надежность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надежности и долговечности). Справочник Гребеник В.М., Цапко В.К., "Металлургия",1980.344с.
 19. Курсовое проектирование деталей машин: Учеб. пособие для учащихся машиностроительных специальностей техникумов / С.А Чернавский, К.Н. Бокков, И.М. Чернин и др.- 2-е изд. перераб. и доп.-М.: Машиностроение, 1988.-416с.
 20. Antsupov A.V.,(jr.), Antsupov A.V. and Antsupov V.P. Estimation and Assurance of Machine Component Design. Procedia Engineering 150 (2016) 726-733.



УДК 621.774.38

А.В. Выдрин, В.И. Кузнецов, К.Ю. Яковлева
 ОАО «Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности»,
 г. Челябинск, Россия
 E-mail: secretariat@rosniti
 Дата поступления: 11.10.2016

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ЗА СЧЕТ РАСШИРЕНИЯ ДИАПАЗОНА ПРИМЕНИМОСТИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Аннотация

В статье приведены результаты экспериментального исследования трибологических параметров смазочного материала «Dexlube 498». Изучено влияние скорости волочения на изменение коэффициента трения при использовании смазочного материала «Dexlube 498». Показано, что увеличение скорости волочения до 70 м/мин позволяет уменьшить коэффициент трения в 1,5 раза. Результаты данного исследования использованы для численной оценки эффективности использования ресурса пластичности металла при оправочном волочении котельных труб наружным диаметром от 28 до 80 мм и толщиной стенки от 2 до 10 мм из углеродистой стали марок 10, 20, 12Х1МФ и др. по действующим маршрутам Синарского трубного завода. Показано, что за счет расширения диапазона применимости смазочного материала «Dexlube 498» имеется возможность повышения эффективности действующей технологии изготовления холоднодеформированных труб.