



ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСУРСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Аннотация

Предложен метод теоретического анализа и обеспечения долговечности наиболее нагруженных деталей машин на стадии их конструирования на основе моделирования процессов их деградации в предполагаемых условиях эксплуатации. В его основу положена методика постановки и решения краевых задач физической теории надежности элементов механических систем по критериям кинетической прочности и износостойкости материалов.

Ключевые слова: надежность, долговечность, краевая задача, критерий, прочность, износостойкость ресурс, срок службы.

На стадии конструирования новых машин при их компоновке в процессе сравнительного анализа различных вариантов конструкции основных, наиболее нагруженных элементов, выполняют контрольную проверку их надежности [1]. С этой целью применяют статистические модели отказов, построенные на основе многочисленных испытаний модельных или натуральных образцов, что существенно увеличивает материальные и временные затраты этапов проектно-конструкторской разработки. Поэтому для решения актуальной проблемы физической теории надежности (особенно при создании новых, уникальных изделий единичного производства) - обеспечения требуемого в техническом задании уровня надежности наиболее нагруженных деталей и узлов без проведения модельных и натуральных экспериментов, в данной работе представлен метод теоретической оценки их ресурсных характеристик [2 - 4].

В его основу положена кинетическая концепция моделирования физики процессов разрушения материалов в известных условиях внешнего нагружения и методология построения моделей параметрических отказов исследуемых объектов, которая с позиции математической физики трактуется как методология постановки и

решения краевых задач теории параметрической надежности деталей машин [5 - 9].

В этом случае краевая задача для предсказания ресурсных параметров исследуемого элемента формулируется на основе следующих допущений и условий [7, 9]:

- нормального распределения выбранного для анализа контролируемого параметра X_t состояния изделия, как случайной величины;
- постоянного во времени распределения случайной величины скорости деградации исследуемого объекта - $dX_t / dt = \dot{X} = const$;
- стационарных условий внешнего теплового (температура $T = const$) и силового (максимальное напряжение $\sigma = const$) нагружения;
- задачу решают относительно среднего ожидаемого ресурса $t_{50} = \bar{t}$ и срока службы $\bar{t}_{сл}$, принимая допустимое значение вероятности безотказной работы $[P(t)] = \gamma = 0,5$ и квантили $[u_{np(\gamma)}] = 0$.

В результате формулируется незамкнутая система уравнений в общем виде [7, 8, 10]:

$$\left. \begin{array}{l}
- \text{уравнения эволюции изделия по выбранному параметру:} \\
\bar{x}_t = \bar{x}_0 \pm \bar{\dot{x}} \cdot t; \quad (1) \\
- \text{уравнения перехода изделия в предельное состояние:} \\
\bar{x}_t = \bar{x}_0 \pm \bar{\dot{x}} \cdot t = x_{np}; \quad (2) \\
- \text{уравнения для оценки ресурса и срока службы:} \\
\bar{t} = \pm(x_{np} - \bar{x}_0)/\bar{\dot{x}}; \quad \bar{t}_{cr} = \bar{t} \cdot (1 + \Pi), \quad (3)
\end{array} \right\}$$

где $\bar{x}_0 = (x_{0\max} + x_{0\min})/2$ среднее значение случайного параметра $X_t = X_0$ состояния изделия на начальный момент времени t_0 ; $x_{0\max}, x_{0\min}$ - его максимальное и минимальные значения, задаваемые как начальные условия; (знак "плюс" используется для возрастающего, знак "минус" - для убывающего во времени параметра X_t);

x_{np} - задаваемое предельное значение параметра X_t ;

Π - доля плановых простоев исследуемого объекта.

При аналитическом решении задачи (1)-(3) необходимо сформулировать в явном виде кинетическое уравнение деградации исследуемого изделия для оценки средней скорости изменения контролируемого параметра $\bar{\dot{x}}$ в функции условий его внешнего нагружения, геометрических и микрогеометрических характеристик, а также свойств материала.

Если рассматриваемые элементы проектируемой машины подвержены возможному объемному разрушению в условиях статического или циклического стационарного нагружения, то в качестве параметра \bar{x}_t их технического состояния принимают плотность скрытой энергии $u_e(t) = u_{e_t}$ дефектов структуры локальных, наиболее нагруженных объемов материала, в которых действуют максимальные статические или циклические напряжения $\sigma = \sigma_{\max}$ при температуре T .

В этом случае скорость $\bar{\dot{x}}$ деградации нагруженного элемента определяется скоростью повреждаемости его материала - скоростью накопления плотности скрытой энергии \dot{u}_e , для оценки которой мож-

но использовать кинетическое уравнение повреждаемости твердых тел под нагрузкой, выведенное в рамках термодинамической теории прочности В.В. Федорова, в общем виде [10, 11]:

$$\bar{\dot{x}} = \dot{u}_e = A \cdot sh \left[\frac{\nu}{2 \cdot R \cdot T} \left(\frac{k_\sigma^2 \cdot M_R^2 \cdot \sigma_i^2}{6 \cdot G(T)} - \bar{u}_e \right) \right] \quad (4)$$

$$\text{где } A = \frac{2 \cdot R \cdot T \cdot U(\sigma_0, T)}{h \cdot N_0} \exp \left[- \frac{U(\sigma_0, T)}{R \cdot T} \right];$$

R - универсальная газовая постоянная; h - постоянная Планка; N_0 - число Авогадро; σ_0 и σ_i - шаровая и девиаторная часть тензора напряжений:

$$\sigma_0 = M_R \cdot \sigma_{\max} / 3 \quad \text{и} \quad \sigma_i = M_R \cdot \sigma_{\max} \quad (4a)$$

$M_R^2 = ((1+r)^2 + (1-r)^2)/4$ - коэффициент эквивалентности нестационарных напряжений; $r = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ - коэффициент асимметрии; σ_{\max} и σ_{\min} - максимальное минимальное напряжение цикла; k_σ - коэффициент перенапряжения межатомных связей:

$$k_\sigma = 1 / \left(6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV + 0,12 \cdot 10^{-2} \right)^2; \quad (4б)$$

HV - среднее значение твердости по Виккерсу;

$U(\sigma_0, T)$ - энергия активации процесса разрушения межатомных связей при данном напряжении σ_{\max} и стационарной температуре T :

$$U(\sigma_0, T) = U_0 - \Delta U(T) - \left(\frac{M_R^2 \cdot k_\sigma^2}{18 \cdot \nu \cdot K(T)} \right) \cdot \sigma_0^2; \quad (4в)$$

U_0 и ν - свободная энергия активации процесса при $T=0$, $\sigma=0$, и коэффициент неравномерности распределения внутренней энергии по объему нагруженной детали, значения которых выбираются по рекомендациям [11];

$\Delta U(T)$ - доля энергии активации, определяемая температурой:

$$\Delta U(T) = 3 \cdot \alpha_0(T) \cdot K(T) \cdot T / 2; \quad (4.г)$$

$K(T)$ - модуль объемной упругости материала при температуре T :

$$K(T) = E(T) / (3 \cdot (1 - 2 \cdot \mu(T))); \quad (4.д)$$

$\alpha_0(T)$, $E(T)$, $\mu(T)$ и $G(T)$ - коэффициент линейного теплового расширения, модуль упругости, коэффициент Пуассона и модуль сдвига материала при температуре T , которую можно оценить по методике [11];

\bar{u}_e - среднее значение плотности скрытой энергии дефектов структуры материала элемента для заданных условий нагружения (σ_{\max}, T):

$$\bar{u}_e = (u_{e*} + u_{e0}) / 2; \quad (4.е)$$

u_{e*} и u_{e0} - ее критическое и начальное значение:

$$u_{e*} = \Delta H_S - u_T; \quad (4.ж)$$

$$u_{e0} = (0,071 \cdot HV)^{2,4} \cdot k_\sigma / (6 \cdot G);$$

ΔH_S - энтальпия материала в жидком состоянии при температуре плавления T_S ;

$u_T = \rho(T) \cdot c(T) \cdot T$ - тепловая составляющая плотности внутренней энергии материала при температуре T ; ρ , c - его плотность и теплоемкость.

Таким образом, система уравнений (3), (4)-(4.ж) становится статически определимой и позволяет на основе сравнительного теоретического анализа ресурса различных вариантов конструкции проектируемого изделия обеспечить требуемый в техническом задании уровень его долговечности по критерию объемной прочности материалов.

Если рассматриваемые элементы проектируемой машины являются деталями узлов трения и подвержены возможному процессу изнашивания в стационарных условиях поверхностного нагружения, то в качестве параметра \bar{x}_i их технического состояния обычно принимают изменяющийся при изнашивании линейный размер детали, средняя скорость скоростью \bar{x} искажения которого равна средней скорости \dot{y} его линейного изнашивания [12, 13].

Для ее определения можно использовать теоретическую зависимость, выведенную на основе энерго-механического подхода при совместном решении базовых уравнений молекулярно-механической и структурно-энергетической теории трения [12, 13]:

$$\bar{x} = \dot{y} = \alpha^* \cdot v \cdot f_{\text{мех}} \cdot p_a \cdot V_{\text{ск}} / \Delta u_{e*}, \quad (5)$$

где $\alpha^* = A_a / A_T$ - коэффициенты перекрытия (A_a и A_T - номинальная площадь контакта и площадь трения элемента);

v_i - коэффициент поглощения внешней энергии поверхностным слоем трибоэлемента, определяемый по методике Б.В. Протасова [14]

$f_{\text{мех}}$ - механическая составляющая коэффициента трения, определяемая для стационарных условий по методике И.В. Крагельского в функции физико-механических характеристик материалов поверхностных слоев при температуре T , вычисляемой по методике А.В. Чичинадзе [14];

$p_a = F_n / A_a$ - среднее номинальное давление на контакте (F_n - нормальная сила в сопряжении); $V_{\text{ск}}$ - скорость скольжения в трибоконтакте;

$\Delta u_{e*} = \Delta H_S - u_{e0} - u_T$ - критическое приращение плотности скрытой энергии дефектов в поверхностном слое трибоэлемента. Здесь ΔH_{S_i} - энтальпия плавления материалов трибоэлементов в жидком состоянии; u_{e0} - плотность потенциальной составляющей внутренней энергии материалов поверхностных слоев в исходном состоянии, определяемая по (4.ж); $u_T = \rho(T) \cdot c(T) \cdot T$ - плотность кинетической составляющей внутренней энергии разрушаемых локальных объемов материалов поверхностного слоя трибоэлементов, нагретого до температуры T ; $\rho(T)$, $c(T)$ - их плотность и теплоемкость.

Таким образом, система уравнений (3) и (5) становится статически определимой и также позволяет на стадии конструирования обеспечить требуемый в техническом задании уровень долговечности исследуемых деталей узлов трения.

Предложенный метод исследования проектного ресурса деталей машин по критериям прочности и износостойкости материалов без проведения модельных или натуральных экспериментов практически реализован на ряде металлургических предприятий, в частности [3, 4, 14, 15]:

- при проектной оценке реконструкции привода вращения обжиговой печи по критерию прочности фундаментных болтов;
- для повышения долговечности системы уравнивания прокатных валков по критериям износостойкости уплотняющих элементов исполнительных гидродвигателей;
- для продления ресурса системы очистки горячекатаных полос от окалины по критериям износостойкости пар трения гидрораспределителей;
- для прогнозирования и повышения долговечности опорных валков листовых станов.

Библиографический список

1. Надежность в машиностроении: Справочник 1/Н17 Под общ. ред. В.В. Шашкина, Г. П. Карзова.- СПб.: Политехника, 1992.- 719 с.
2. Antsupov A.V. Designed assessment of machine element reliability due to efficiency criteria / A.V. Antsupov, A.V. Antsupov (jun), V.P. Antsupov // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013. №5 (45). P. 62-66.
3. Основы физической теории надежности деталей машин по критериям кинетической прочности материалов / В.П. Анцупов, Л.Т. Дворников, Д.Г. Громаковский, А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2014. №1. С. 141-146.
4. Анцупов А.В. (мл.). Развитие теории прогнозирования надежности деталей машин / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №2. С.26-32.
5. Оценка долговечности нагруженных деталей по кинетическому критерию прочности А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 70-й научно-технической конференции. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2012. Т.1. С. 137-141.
6. Научные и методологические основы прогнозирования надежности трибосопряжений на стадии их проектирования / А.В. Анцупов, М.В. Чукин, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2011. №4. С. 56-61.
7. Методология вероятностной оценки элементов машин по различным критериям / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, А.М. Овсов // Механическое оборудование металлургических заводов: Межрегион. сб. науч. тр. / Под ред. Корчунова А.Г. - Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та, 2012. С. 28-34.
8. Методология аналитической оценки надежности технических объектов / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 70-й научно-технической конференции. - Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2012. Т.1. С. 141-144.
9. Анцупов А.В. Методология прогнозирования надежности элементов машин по различным критериям / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов // Надежность, 2013. – №3 (46).– С. 5-14.
10. Особенности проектной оценки долговечности деталей машин в условиях много- и малоциклового усталости / А.В. Анцупов (мл.), А.В. Анцупов, В.П. Анцупов, М.Г. Слободянский, В.А. Русанов // Механическое оборудование металлургических заводов: Междунар. сб. науч. тр. / под ред. Корчунова А.Г. Вып.3 - Магнито-

горск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. С. 40-47.

11. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. Ташкент: Издательство «Фан» УзССР, 1985. 165с.
12. Прогнозирование показателей надежности трибосопряжений / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), А.С. Губин и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 68-й межрегиональной научно-технической конференции. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. т.1. С.262-264.
13. Модель процесса изнашивания трибосопряжений на основе термодинамического анализа их состояния / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), М.Г. Слободянский и др. // Актуаль-

ные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 68-й межрегиональной научно-технической конференции. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. Т.1. С.264-268.

14. Анцупов А.В. Обеспечение надежности узлов трения машин на стадии проектирования: Монография / А.В. Анцупов, А.В. Анцупов (мл.), В.П. Анцупов // Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013.- 293с.
15. Анцупов А.В. (мл.), Слободянский М.Г. Прогнозирование долговечности опорных валков и оценка эффективности способов продления их ресурса // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова, 2011. №3. С. 74-79.



УДК 621.793

А.А. Герасимова, А.Г. Радюк
ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»
г. Москва, Россия
E-mail: allochka@rambler.ru
Дата поступления 27.02.2015

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ УЗКИХ СТЕНОК КРИСТАЛЛИЗАТОРОВ МНЛЗ

Аннотация

Для повышения срока службы кристаллизаторов МНЛЗ в работе на их отработанных узких стенках из меди М1 и медного сплава МН2,5CoKpX создавали диффузионные слои напылением алюминия с последующей термической обработкой. В качестве основных показателей работоспособности диффузионного слоя использовали его толщину и микротвердость.

Рекомендовано нанесение на рабочие узкие стенки кристаллизатора алюминиевого газотермического покрытия с последующей термической обработкой в защитной среде по скорректированным режимам и испытание кристаллизатора на МНЛЗ с оценкой состояния стенок в процессе эксплуатации и изменения качества разливаемого металла.

Ключевые слова: узкая стенка, кристаллизатор МНЛЗ, газотермическое покрытие, термообработка, диффузионный слой.

Введение

Из литературных источников известно, что многие детали оборудования металлургического производства (кристаллизаторы, конвертерные и доменные фурмы и т.д.) изготавливают из меди и ее сплавов,

которые имеют высокие электро- и теплопроводность [1]. В то же время медь имеет низкие показатели жаростойкости и износостойкости [2]. Опыты показали, что оксиды меди не сопротивляются тепловым ударам и разрушаются после первой же