

УДК 621.81-192

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОЕКТНОЙ ОЦЕНКИ РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН

*Анцупов А.В. (мл.), к.т.н., доцент кафедры проектирования и эксплуатации
металлургических машин и оборудования*

*Анцупов А.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой технологии
машиностроения (antsupov.alexander@gmail.com)*

*Анцупов В.П., д.т.н., профессор кафедры проектирования и эксплуатации
металлургических машин и оборудования*

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Россия, Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

Аннотация. Предложен теоретический метод прогнозирования ресурса деталей металлургических машин по критериям прочности и износостойкости материалов без использования экспериментальных данных. В его основу положена методика постановки и решения краевых задач физической теории надежности элементов механических систем. Общая постановка задачи для описания процесса формирования отказа исследуемого элемента представляет систему базовых уравнений теории параметрической надежности технических объектов и кинетическое уравнение его деградации (старения, повреждаемости) в процессе будущей эксплуатации. Для выбранного параметра состояния исследуемого объекта в качестве базовых уравнений теории надежности формулируются: уравнение его эволюции, уравнение перехода в предельное состояние и уравнение для расчета проектного ресурса. Вид уравнения деградации определяется заданными условиями нагружения изделия и предполагаемым критерием его разрушения. Для деталей машин, статические или циклические условия внешнего нагружения которых предполагают их вероятный отказ по критериям объемного разрушения, в качестве уравнения деградации использовано основополагающее уравнение термодинамической теории прочности В.В. Федорова. На его основе предложена универсальная зависимость для расчета средней скорости повреждаемости структуры материала наиболее нагруженных объемов исследуемого элемента в стационарных условиях нагружения. Определен коэффициент, учитывающий сопротивление структуры материала по принципу Ле-Шателье в процессе всего периода нагружения вплоть до разрушения. Для деталей машин, работающих в условиях граничного трения, в качестве уравнения их деградации использована базовая зависимость энерго-механической концепции изнашивания трибосопряжений. Она выведена на основе совместного решения уравнений структурно-энергетической и молекулярно-механической теорий трения и позволяет оценить скорость изнашивания трибоземленов в стационарных условиях фрикционного взаимодействия без проведения экспериментальных исследований. Предложенный метод аналитической оценки проектного ресурса деталей машин, как метод постановки и решения краевых задач физической теории надежности по критериям прочности и износостойкости материалов, использован на практике для повышения долговечности ряда металлургических агрегатов.

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

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-30-35

Актуальной проблемой физической теории надежности технических объектов (особенно при создании новых, уникальных изделий единичного производства, к которым относятся металлургические агрегаты) является обеспечение требуемого в техническом задании уровня долговечности наиболее нагруженных деталей и узлов еще на стадии проектно-конструкторской разработки. С этой целью для прогнозирования и сравнительного анализа показателей безотказности и долговечности различных вариантов конструкции исследуемых объектов применяют динамические, физико-вероятностные модели [1 – 3]. С их использованием поведение элементов в предполагаемых условиях будущей эксплуатации моделируют на основе описания эволюции параметров их состояния во времени.

Для решения такого рода задач можно использовать метод оценки надежности элементов механических

систем на основе кинетического подхода к описанию физических закономерностей процессов разрушения материалов в известных условиях внешнего нагружения [4, 5]. В основу подхода положена методология построения физико-вероятностных моделей исследуемых объектов, которая с позиции математической физики трактуется как методология постановки и решения краевых задач теории параметрической надежности деталей машин.

Согласно работам [2, 6, 7], на стадии конструирования машины в процессе сравнительного анализа вариантов конструкции основных элементов и контрольной проверки их надежности, физико-вероятностные модели отказов формулируют в квазистационарной постановке. В этом случае краевую задачу для предсказания гамма-процентного ресурса t_γ исследуемого изделия по выбранному параметру состояния X_i в об-

щем виде можно представить незамкнутой системой следующих уравнений [4, 5]:

– уравнения состояний (эволюции) объекта по выбранному параметру:

$$X_t = X_0 \pm \dot{X}t; \quad (1)$$

– уравнения перехода изделия в предельное состояние по параметру X_t :

$$X_t = X_0 \pm \dot{X}t = x_{\text{пр}}; \quad (2)$$

– уравнение для оценки гамма-процентного ресурса:

$$t_\gamma = (\pm \bar{x}) \Delta \bar{x}_{\text{пр}} - \left[(\Delta \bar{x}_{\text{пр}} \bar{x})^2 - ([u_{\text{пр}(\gamma)}]^2 \sigma_{\bar{x}}^2 - \bar{x}^2) \times \right. \\ \left. \times ([u_{\text{пр}(\gamma)}]^2 \sigma_{x0}^2 - \Delta \bar{x}_{\text{пр}}^2) \right]^{1/2} / (\bar{x}^2 - [u_{\text{пр}(\gamma)}]^2 \sigma_{\bar{x}}^2); \quad (3)$$

– кинематическое уравнение повреждаемости (деградации, старения) объекта:

$$\dot{X} = f(d, \Delta, \mu, E, \rho, \Delta H_s, c, \lambda, \sigma_T, \\ \text{HV}, V, F, A, T, \dots), \quad (4)$$

где $\bar{x}_0 = \frac{x_{0\text{max}} + x_{0\text{min}}}{2}$; $\sigma_{x0} = \frac{x_{0\text{max}} - x_{0\text{min}}}{6}$ – числовые ха-

рактеристики (среднее и стандарт) случайного параметра $X_t = X_0$ состояния объекта на начальный момент времени $t = t_0$; $x_{0\text{max}}, x_{0\text{min}}$ – максимальное и минимальное значения параметра X_0 , задаваемые как начальные условия; \bar{x} и $\sigma_{\bar{x}}$ – числовые характеристики случайного параметра \dot{X} (знак «плюс» используется для возрастающего, знак «минус» – для убывающего во времени параметра X_t); $[u_{\text{пр}(\gamma)}]$ – значение квантили, соответствующее заданной допустимой величине вероятности безотказной работы $[P(t)] = \gamma$; $\Delta \bar{x}_{\text{пр}} = x_{\text{пр}} - \bar{x}_0$ – оценка математического ожидания предельного изменения ΔX_t параметра X_t ($x_{\text{пр}}$ – задаваемое предельное значение параметра X_t); d, Δ – геометрические и микрогеометрические характеристики изделия; μ, E, ρ – физические, $\Delta H_s, c, \lambda$ – теплофизические, σ_T, HV – механические свойства материала; V, F, A, T – кинематические, силовые и энергетические эксплуатационные параметры.

При постановке задачи (1) – (4) в качестве допущений принимают:

– нормальное распределение контролируемого параметра X_t как случайной величины;

– стационарные условия внешнего теплового (температура $T = \text{const}$) и силового (максимальное напряжение $\sigma = \text{const}$) нагружения;

– постоянное во времени распределение скорости деградации исследуемого объекта $\dot{X}_t = \dot{X} = \text{const}$ как случайной величины.

Обычно при проектировании задачу (1) – (4) решают относительно среднего ожидаемого ресурса

$t_{\gamma=0.5} = t_{50} = \bar{t}_*$, принимая $[P(t)] = \gamma = 0,5$, $[u_{\text{пр}(\gamma)}] = 0$ и получая уравнение (3) в упрощенном виде:

$$\bar{t}_* = \frac{|x_{\text{пр}} - \bar{x}_0|}{\bar{x}}. \quad (3.1)$$

В зависимости от физического смысла выбранного параметра состояния X_t методика прогнозирования долговечности исследуемого объекта может быть построена по одному (или нескольким) критериям $x_{\text{пр}}$ его работоспособности:

– длительной статической или циклической объемной прочности;

– поверхностной усталостной прочности (износостойкости) при трении;

– жесткости;

– теплостойкости и др.

Для решения задачи в каждом из перечисленных выше случаев необходимо получить в явном виде кинетическое уравнение (4) деградации исследуемого элемента для оценки средней скорости $\bar{x} = \dot{x}$ изменения контролируемого параметра. Эти уравнения обычно формулируют на основе испытаний модельных или натурных образцов, что существенно увеличивает материальные и временные затраты этапов проектно-конструкторской разработки. Для снижения проектных затрат ниже выведены теоретические зависимости (4) для прогнозирования по (3.1) ресурса двух больших классов объектов:

– элементов, которые в стационарных условиях статического или циклического нагружения подвержены возможному объемному разрушению;

– деталей трибосопряжений, изнашиваемых в стационарных условиях поверхностного нагружения при трении.

Аналитическую зависимость (4) для оценки скорости \dot{x} деградации элементов первого класса можно получить, используя базовое положение термодинамической теории прочности твердых тел В.В. Федорова [8]. На основе этого положения, в качестве параметра состояния X_t исследуемых элементов первой группы, можно принять плотность скрытой энергии $u_e(t) = u_{e_t}$ дефектов структуры локальных, наиболее нагруженных объемов материала, в которых действуют максимальные статические или циклические напряжения σ при температуре T . Величина u_{e_t} изменяется от начального значения $\bar{x}_0 = u_{e_0}$ до конечного (критического) $x_{\text{пр}} = u_{e*}$ со скоростью $\dot{x} = \dot{u}_e$.

В этом случае скорость \dot{x} деградации нагруженного элемента определяется скоростью повреждаемости структуры его материала – скоростью накопления плотности скрытой энергии \dot{u}_e дефектов [8, 9]:

$$\dot{u}_e = \frac{2kTU(\sigma_0, T_0)}{h} \exp \left[-\frac{U(\sigma_0, T_0)}{kT} V_{\text{ар}} \right] \times \\ \times sh \left[\frac{v_0 V_{\text{ар}}}{2kT_*} \left(\frac{k_\sigma^2 \sigma_i^2}{6G(T) v_0} - \bar{u}_e \right) \right]. \quad (5)$$

Однако для практического использования автор рекомендовал только два упрощенных варианта зависимости (5): «линеаризованный» – для условий многоциклового и «экспоненциальный» – при малоциклового усталости. Кроме того, уравнение (5) теряет смысл для диапазона напряжений σ , при котором аргумент гиперболического синуса меньше нуля, что противоречит практике и базовому положению кинетической теории.

Для устранения противоречий и учета по принципу Ле-Шателье сопротивления \bar{u}_e упрочняющейся структуры материала во всем возможном диапазоне значений эксплуатационных напряжений σ , на взгляд авторов, корректнее поступить следующим образом. Если в условии (5) принять $\bar{u}_e = 0$, то получим выражение для оценки скорости $\dot{u}_e^{6/c}$ накопления плотности скрытой энергии дефектов структуры без учета ее сопротивления. Тогда на момент разрушения t_* плотность этой энергии составит $\dot{u}_{et*}^{6/c} = u_e^{6/c} t_*$ и превысит истинное критическое значение плотности u_{e*} на величину $\bar{u}_e = \frac{u_{e*} + u_{e0}}{2}$ [8], т. е. будет равна:

$$u_{et*}^{6/c} = u_{e*} + \bar{u}_e = u_{e*} + \frac{u_{e*} + u_{e0}}{2}.$$

Отношение $\frac{u_{e*} - u_{e0}}{u_{et*}^{6/c} - u_{e0}}$ определит величину коэффициента уменьшения скорости $\dot{u}_e^{6/c}$ до величины \dot{u}_e , т. е. коэффициента, учитывающего сопротивление структуры материала:

$$K_c = \frac{\dot{u}_e}{\dot{u}_e^{6/c}} = \frac{u_{e*} - u_{e0}}{u_{et*}^{6/c} - u_{e0}} = \frac{u_{e*} - u_{e0}}{u_{e*} + \bar{u}_e - u_{e0}} = \frac{2(u_{e*} - u_{e0})}{3u_{e*} - u_{e0}}. \quad (6)$$

Таким образом, истинная скорость повреждаемости определяется как $\dot{u}_e = K_c \dot{u}_e^{6/c}$, а уточненное уравнение (5), справедливое во всем возможном диапазоне напряжений, принимает вид:

$$\dot{u}_e = \frac{4(u_{e*} - u_{e0})}{3u_{e*} - u_{e0}} \frac{kTU(\sigma_0, T_0)}{h} \exp \left[-\frac{U(\sigma_0, T_0)}{kT} V_{at} \right] \times \times sh \left[\frac{V_{at}}{2kT_*} \frac{k_\sigma^2 \sigma_i^2}{6G(T)} \right]. \quad (7)$$

Параметры в условии (7) определим по одному из вариантов работ [8, 9]: u_{e*} , u_{e0} – критическое и начальное значение плотности скрытой энергии дефектов u_{et} при $t = t_*$ и $t = t_0$ соответственно:

$$u_{e*} = \Delta H_{TB} - c(T) \rho(T) T; \quad u_{e0} = \frac{[(0,067HV_0)^{1,2} k_\sigma]^2}{6G}, \quad (7.1)$$

где ΔH_{TB} – энтальпия плавления материала в твердом состоянии; $c(T)$, $\rho(T)$ – теплоемкость и плотность материала; HV_0 – твердость по Виккерсу; $k_\sigma = (6,47 \cdot 10^{-6} HV_0 + 0,12 \cdot 10^{-2})^{-1}$ – комплексный структурный параметр;

T – рабочая температура элемента (при статических нагрузках $T = T_0$). При стационарном циклическом нагружении

$$T = T_0 + \frac{T_* - 870v_0}{44v_0}; \quad (7.2)$$

$T_* = \frac{T_0 \sigma_T^2}{\sigma_T^2 - \sigma^2}$ – температура локальных разогревов; σ_T –

предел текучести материала; $v_0 = \frac{\sigma_T}{65 + 0,46HV_0}$ – коэф-

фициент неравномерности распределения скрытой энергии; k , h , V_{at} – постоянная Больцмана, постоянная Планка, атомный объем материала детали; σ_0 и σ_i – шаровая и девиаторная часть тензора напряжений:

$$\sigma_0 = \frac{M_R \sigma}{3} \quad \text{и} \quad \sigma_i = M_R \sigma; \quad (7.3)$$

M_R – коэффициент эквивалентности воздействия статических и циклических напряжений: $M_R = 1$ для статических напряжений; при циклических нагрузках $M_R = \left[\frac{\sigma_T (65 + 0,46HV_0)}{\sigma_R} \right]^{0,5}$; σ_R – предел выносливости материала; $U(\sigma_0, T_0)$ – энергия активации процесса разрушения межатомных связей при $\sigma = \sigma_0$ и $T = T_0$:

$$U(\sigma_0, T_0) = U(p_{T_0}) - \Delta U_{T_0} \pm \Delta U_{\sigma_0}; \quad (7.4)$$

$U(p_{T_0}) = \frac{(0,1215 + 5,8257 \cdot 10^{-3} T_0) \cdot 10^{-19}}{V_{at}}$ – энергия ак-

тивации с учетом теплового давления при $T = T_0$; $\Delta U_{T_0} = \frac{3\alpha_0 K T_0}{2}$ – изменение энергии активации от по-

вышения температуры до T_0 ; α_0 , $K = \frac{E}{3(1-2\mu)}$, E , μ –

коэффициент теплового расширения, модуль объемной и линейной упругости, коэффициент Пуассона; $\Delta U_{\sigma_0} = \beta \sigma_0^2$ – изменение энергии активации от шаровой составляющей; $\beta = \frac{\phi_\sigma^2}{2K(T)}$ – коэффициент работы изменения объема; $\phi_\sigma = k_\sigma v_0^{0,5}$ – коэффициент перенапряжения межатомных связей; $G(T)$ и $K(T)$ – модуль сдвига и объемной упругости материала в функции температуры.

Таким образом, система уравнений (3.1), (7) с учетом (7.1) – (7.4) становится статически определяемой и позволяет на основе сравнительного теоретического анализа ресурса различных вариантов конструкции проектируемого изделия обеспечить требуемый в техническом задании уровень его долговечности по критерию объемного разрушения материалов.

В качестве параметра состояния X_i изделий второй группы (трибосопряжений) обычно принимают линейный размер детали (деталей) [7]. В этом случае средняя

скорость \dot{x} повреждаемости сопряжения определяется скоростью линейного изнашивания \dot{y} одного или обоих трибоэлементов. Теоретическую зависимость (4) для оценки средней скорости $\dot{x} = \dot{y}$ можно вывести на основе совместного решения [10] основополагающих уравнений молекулярно-механической [11, 12] и структурно-энергетической [13] теорий трения.

С молекулярно-механических позиций работа полной силы трения на контакте в стационарных условиях может быть выражена суммой работ ее механической $F_{\text{мех}} = f_{\text{мех}} F_n$ и молекулярной $F_{\text{мол}} = f_{\text{мол}} F_n$ составляющих:

$$A_{\text{тр}}(t) = f_{\text{мех}} F_n V_{\text{ск}} t + f_{\text{мол}} F_n V_{\text{ск}} t, \quad (8)$$

где F_n – нормальная сила в сопряжении; $f_{\text{мех}}$ и $f_{\text{мол}}$ – механическая и молекулярная составляющая коэффициента трения; $V_{\text{ск}}$ – скорость относительного перемещения поверхностей [11].

С энергетической точки зрения поверхностные слои трибоэлементов представляются термодинамической системой. В ней энергия внешнего механического движения деталей $A_{\text{тр}}(t)$, затрачиваемая на упругопластическую деформацию контактных объемов V_{d1} и V_{d2} поверхностных слоев за время $0 \div t$ взаимодействия, преобразуется в изменение их внутренней энергии – генерацию в них избыточной энергии статических и динамических искажений структуры материалов [13].

С учетом коэффициентов v_i преобразования (поглощения) внешней энергии поверхностным слоем первого ($i = 1$) и второго ($i = 2$) трибоэлемента [14] закон сохранения энергии в трибосопряжении [13] на момент времени t можно записать в форме уравнений энергетического баланса:

$$v_i A_{\text{тр}}(t) = \Delta U_{ei}(t) + Q_i(t) = \Delta U_{ei}(t) + \bar{Q}_i(t) + \Delta U_{Ti}(t), \quad (9)$$

где $\Delta U_{ei}(t)$ и $Q_i(t)$ – изменение потенциальной и кинетической составляющих внутренней энергии в деформируемых объемах V_{di} поверхностных слоев трибоэлементов за период $0 \div t$; $\bar{Q}_i(t)$ – доля кинетической составляющей $Q_i(t)$ внутренней энергии, рассеиваемая за время $0 \div t$ в окружающей среде в форме теплоты; $\Delta U_{Ti}(t) = \Delta u_{Ti}(t) V_{di}$ – доля кинетической составляющей $Q_i(t)$ внутренней энергии, накопленная за период $0 \div t$ в деформируемых объемах V_{di} поверхностных слоев трибоэлементов (энергия их «саморазогрева»); $\Delta u_{Ti}(t)$ – изменение плотности кинетической составляющей внутренней энергии.

В стационарных условиях, при $T = \text{const}$, $\Delta U_{Ti}(t) = 0$, $\bar{Q}_i(t) = \text{const}$, закон сохранения энергии (9) с учетом (8) принимает вид:

$$v_i f_{\text{мех}} F_n V_{\text{ск}} t + v_i f_{\text{мол}} F_n V_{\text{ск}} t = \Delta U_{ei}(t) + \bar{Q}_i(t). \quad (10)$$

Согласно работе [13], первые составляющие в правой части уравнения (10) – $\Delta U_{ei}(t)$, отражают истинное

сопротивление движению (трению) и показывают долю «уничтожаемого» внешнего механического движения $A_{\text{тр}}(t)$ вследствие превращения части энергии этого движения в скрытую энергию дефектов и повреждений структуры материалов поверхностных слоев. Величины $\Delta U_{ei}(t) = \Delta u_{ei}(t) V_{di}$ являются параметром структурного состояния деформируемых объемов V_{di} поверхностных слоев трибоэлементов – мерой повреждаемости материалов. Чем ближе изменение плотности накопленной скрытой энергии $\Delta u_{ei}(t)$ в контактных объемах поверхностных слоев к критическому значению – $\Delta u_{e*i}(t)$, тем ближе их состояние в момент времени t к разрушению.

По физическому смыслу эти слагаемые в сумме определяют работу механической (деформационной) составляющей $f_{\text{мех}} F_n V_{\text{ск}} t$ силы трения, так как отражают уровень деформационного упрочнения материалов поверхностных слоев и накопленную к моменту времени t степень необратимой поврежденности их структуры [4, 10]. Поэтому из общего закона сохранения энергии (10) можно выделить закон сохранения этой части внешней энергии в виде:

$$v_i f_{\text{мех}} F_n V_{\text{ск}} t = \Delta u_{ei}(t) V_{di}. \quad (11)$$

Согласно термодинамическому условию прочности [8, 12], те локальные объемы поверхностного слоя каждого трибоэлемента $\Delta V_i(t)$, в которых к моменту времени t величины $\Delta u_{ei}(t)$ достигают критического значения

$$\Delta u_{e*i} = \Delta H_{Si} - u_{e0i} - u_{Ti}, \quad (12)$$

разрушаются, отделяются от основного материала и выносятся из зоны контакта в виде продуктов износа. Здесь ΔH_{Si} – энтальпия плавления материалов трибоэлементов в жидком состоянии; u_{e0i} – плотность потенциальной составляющей внутренней энергии материалов поверхностных слоев в исходном состоянии, определяемая по уравнению (7.1); $u_{Ti}(t) = \rho_i(T_i) c_i(T_i) T_i$ – плотность кинетической составляющей внутренней энергии разрушаемых локальных объемов материалов поверхностных слоев трибоэлементов, нагретых до температур T_i ; $\rho_i(T_i)$, $c_i(T_i)$ – их плотность и теплоемкость.

Подставляя в уравнение (11) $\Delta u_{ei}(t) = \Delta u_{e*i}$, $V_{di} = \Delta V_i(t) = y_i(t) A_{Ti}$ и решая его относительно скорости линейного изнашивания $\dot{y}_i = \frac{y_i(t)}{t_i}$ трибоэлементов, получим уравнение (4) повреждаемости деталей второго класса:

$$\dot{y}_i = \frac{\alpha_i^* v_i f_{\text{мех}} P_a V_{\text{ск}}}{\Delta u_{e*i}}, \quad (13)$$

где $\alpha_i^* = \frac{A_a}{A_{Ti}}$ – коэффициент перекрытия (A_a и A_{Ti} – номинальная площадь контакта и площади трения эле-

ментов); $f_{\text{мех}}$ – механическая составляющая коэффициента трения, определяемая согласно работе [11] для стационарных условий в функции физико-механических характеристик материалов поверхностных слоев при температуре T_i , вычисляемой по методике А.В. Чичинадзе [15]; $p_a = \frac{F_n}{A_a}$ – среднее номинальное давление на контакте.

Таким образом, система уравнений (3.1) и (13) становится статически определимой и также позволяет на основе сравнительного анализа ресурса различных вариантов конструкции проектируемого узла трения обеспечить требуемый в техническом задании уровень его долговечности.

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

- 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 окалина по критериям износостойкости пар трения гидрораспределителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.
2. Надежность в машиностроении: Справочник. / Под общ. ред. В.В. Шашкина, Г.П. Карзова. – СПб.: Политехника, 1992. – 719 с.

3. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
4. Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П. Теория и практика обеспечения надежности деталей машин по критериям кинетической прочности и износостойкости материалов. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2015. – 308 с.
5. Анцупов А.В., Анцупов А.В. (мл.), Губин А.С. и др. Прогнозирование показателей надежности трибосопряжений: Материалы 68-й Межрегион. науч.-технич. конф. «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования». – Магнитогорск: МГТУ, 2010. Т. 1. С. 262 – 264.
6. Надежность машиностроительной продукции: практическое руководство по нормированию, подтверждению и обеспечению. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 328 с.
7. Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З. Надежность машин: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1988. – 235 с.
8. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. – Ташкент: Изд-во «Фан» УзССР, 1985. – 165 с.
9. Федоров В.В. Основы эргодинамики и синергетики деформируемых тел. Ч. III. Основы эргодинамики деформируемых тел / Под ред. С.В. Федорова. – Калининград: Изд-во КГТУ, 2014. – 222 с.
10. Анцупов В.П., Анцупов А.В., Анцупов А.В. (мл.) и др. Структурно-энергетический подход к оценке фрикционной надежности материалов и деталей машин: Материалы 66-й науч.-техн. конф. – Магнитогорск: МГТУ, 2008. Т. 1. С. 258 – 262.
11. Крагельский И.В. Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
12. Крагельский И.В., Фляйшер Г., Комбалов В.С., Тум Г. Расчет трения, износа и долговечности с позиций молекулярно-механической, усталостной и энергетической теорий // Проблемы автоматизации машиностроения. 1986. № 12. С. 13 – 24.
13. Федоров С.В. Основы трибоэргодинамики и физико-химические предпосылки теории совместимости. – Калининград: КГТУ, 2003. – 409 с.
14. Протасов Б.В. Энергетические соотношения в трибосопряжении и прогнозирование его долговечности. – Саратов: Саратовский университет, 1979. – 152 с.
15. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлингер, Э.Д. Браун и др. / Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

Поступила 3 июля 2015 г.

ANALYTICAL METHOD FOR PROJECT RESOURCE ESTIMATION OF METALLURGICAL MACHINERY PARTS

A.V. Antsupov (Jr.), A.V. Antsupov, V.P. Antsupov

Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia

Abstract. A theoretical method is proposed to predict the service life of metallurgical machinery parts according to the safety criterion of materials without the use of experimental data. It is based on the method of setting and solving the boundary value problems of the physical theory of mechanical systems element reliability rate. The main task of the research was to describe the process of formation of an element failure represented as a system of basic equations of the theory of parametric reliability of technical objects with the kinetic equation of its degradation (aging or defectiveness) in the process of future operation. The following equations are formed for the selected state parameter of the studied object as the basic equations of the theory of reliability: the equation of its evolution, the transition equation in limit state and the

equation for calculation of design service life. The type of degradation equation is determined by the given conditions of loading of the product and the conjecturable criterion of its destruction. V.V. Fedorov's fundamental equation of the thermodynamic theory of strength is used as degradation equation for the machinery parts in which static or cyclic loading conditions require their external probability of failure on the criteria of volume destruction. The universal dependence to calculate the average speed of damage to the structure of the most loaded volume of the test element in stationary loading conditions is proposed on its basis. The coefficient was calculated to take into account the resistance of the material structure according to Le Chatelier's principle for the entire period of loading process until the destruction is detected. Energy-dependent basic mechanical concept of friction units is used as the degradation equation for details of machines operating under boundary friction. It is derived on the basis of the joint solution of the equations of energy and structural-molecular-mechanical theory of friction and allows us to evaluate the wear rate of frictional

elements in steady-state conditions of friction engagement without experimental studies. The proposed method of analytical assessment of the predicted life (project life) of machinery parts is used in practice to increase the wearing quality of a number of metallurgical units as a method of formulating and solving boundary value problems of the physical theory of reliability on criteria for strength and total operation time of materials.

Keywords: reliability, durability, resource, prediction, boundary value problem, criterion, strength, wear resistance.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-30-35

REFERENCES

1. Pronikov A.S. *Parametricheskaya nadezhnost' mashin* [Parametric reliability of machines]. Moscow: Izd-vo MG TU im. N.E. Bauma-na, 2002, 560 p. (In Russ.).
2. *Nadezhnost' v mashinostroenii: Spravochnik* [Reliability in engineering: handbook]. Shashkin V.V., Karzova G.P. eds. St. Petersburg: Politekhnik, 1992, 719 p. (In Russ.).
3. Bolotin V.V. *Prognozirovanie resursa mashin i konstruktssii* [Life prediction of machines and structures]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 312 p. (In Russ.).
4. Antsupov A.V. (Jr.), Antsupov A.V., Antsupov V.P. *Teoriya i praktika obespecheniya nadezhnosti detalei mashin po kriteriyam kineticheskoi prochnosti i iznosostoikosti materialov: monografiya* [Theory and practice of assurance of machine parts reliability according to the criteria of kinetic strength and wear resistance of material]. Magnitogorsk: Izd-vo MG TU im. G.I. Nosova, 2015, 308 p. (In Russ.).
5. Antsupov A.V., Antsupov A.V. (Jr.), Gubin A.S. etc. Prediction of reliability indices of tribocoupling. In: *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 68-i mezhr regional'noi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Actual problems of modern science, technology and education: Proceedings of the 68th Inter-regional Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk: MG TU, 2010, vol. 1, pp. 262–264. (In Russ.).
6. *Nadezhnost' mashinostroitel'noi produktsii: prakticheskoe rukovodstvo po normirovaniyu, podverzhdeniyu i obespecheniyu* [Reliability of engineering products: practical guidance on standardization, validation and maintenance]. Moscow: Izdatel'stvo standartov. 1990, 328 p. (In Russ.).
7. Reshetov D.N., Ivanov A.S., Fadeev V.Z. *Nadezhnost' mashin: ucheb. posobie* [Machine reliability: tutorial]. Moscow: Vysshaya shkola, 1988, 235 p. (In Russ.).
8. Fedorov V.V. *Kinetika povrezhdaemosti i razrusheniya tverdykh tel* [Kinetics of damageability and break-down of solids]. Tashkent: Izdatel'stvo "Fan" UzSSR, 1985, 165 p. (In Russ.).
9. Fedorov V.V. *Osnovy ergodinamiki i sinergetiki deformiruemyykh tel. Ch. III. Osnovy ergodinamiki deformiruemyykh tel* [Fundamentals of ergodynamics and synergetics of deformable bodies. Part. 3. Fundamentals of ergodynamics of deformable bodies]. Fedorov S.V. ed. Kaliningrad: Izd-vo KGTU, 2014, 222 p. (In Russ.).
10. Antsupov V.P., Antsupov A.V., Antsupov A.V. (Jr.) etc. Structural and energy approach to estimation of reliability of materials and machinery parts. In: *Materialy 66-i nauch.-tekhn. konf.: sb. dokl.* [Proceedings of the 66th Scientific and Technical Conference: coll. of reports]. Magnitogorsk: MG TU, 2008, vol. 1, pp. 258–262. (In Russ.).
11. Kragel'skii I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Osnovy raschetov na trenie i iznos* [Fundamentals of friction and wear calculations]. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 526 p. (In Russ.).
12. Kragel'skii I.V., Fleisher G., Kombalov V.S., Tum G. Calculation of friction, wear and durability from the standpoint of molecular-mechanical, fatigue and energy theories. *Problemy avtomatizatsii mashinostroeniya*. 1986, no. 12, pp. 13–24. (In Russ.).
13. Fedorov S.V. *Osnovy triboergodinamiki i fiziko-khimicheskie predposylki teorii sovmestimosti* [Basics of triboergodynamics and physico-chemical background of the compatibility theory]. Kaliningrad: KGTU, 2003, 409 p. (In Russ.).
14. Protasov B.V. *Energeticheskie sootnosheniya v tribosopryazhenii i prognozirovaniye ego dolgovechnosti* [Energy ratio in friction units and prediction of its durability]. Saratov: Saratovskii universitet, 1979, 152 p. (In Russ.).
15. Chichinadze A.V., Berlinger E.M., Braun E.D. etc. *Trenie, iznos i smazka (tribologiya i tribotekhnika)* [Friction, wear and grease (tribology and tribotechnics)]. Chichinadze A.V. ed. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 576 p. (In Russ.).

Information about the authors:

A.V. Antsupov (Jr.), Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment
A.V. Antsupov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Engineering Technology" (antsupov.alexander@gmail.com)
V.P. Antsupov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Design and Operation of Metallurgical Machines and Equipment

Received July 3, 2015