УДК 669.02/.09:621.81

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А.Н. Савельев, Р.С. Федотов

E-mail: Savelyev2000@mail.ru

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. Одной из причин выхода технологического оборудования из строя является усталостное разрушение его элементов. Происходит это из-за накопления внутренних повреждений в материалах. В настоящее время контролируется этот процесс оценочными способами по количеству циклов нагружения материала и вероятностной оценке формирования в материале повреждений. В настоящей работе вероятностный подход сохраняется, но в основе оценки долговечности элементов машин используются энергетические показатели. Предлагается оценивать сроки службы элементов машин, которые теряют свою работоспособность из-за накопления усталостных повреждений, через поток механической энергии, пропущенной через эти элементы. В основе такого подхода теория работоспособности, в которой рассмотрена передача энергии от элемента к элементу материала деталей машины по кинематической цепи машины. Показана взаимосвязь интенсивности накопления повреждений в материале деталей при передаче через него механической энергии.

Ключевые слова: механическая энергия, передача энергии, механопровод, накопление повреждений, работа мятия материала, мощность мятия материала.

ENERGY ASESSMENT APPROACH FOR EVALUATION OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT ELEMENTS DURABILITY

A.N. Savel'ev, R.S. Fedotov

E-mail: Savelyev2000@mail.ru

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. One of the reasons of technological equipment failure is fatigue failure of its elements. This is due to accumulation of internal damage in the materials. This process is controlled today by evaluation methods, based on the number of loading cycles of material and probabilistic assessment of the damage generation in material. In this paper, the probabilistic approach is preserved, but energy indicators are used as the basis for assessing durability of machine elements. It is proposed to evaluate the service life of machine elements that lose their performance due to the accumulation of fatigue damage through the flow of mechanical energy that passed through these elements. Basis of this approach is theory of performance in which energy transfer from an element to an element of the machine parts material along the kinematic chain of the machine is considered. As a result, interrelation of the intensity of damage accumulation in material of parts during transmission of mechanical energy through it is shown.

Keywords: mechanical energy, transferring energy, mechanical conductor, accumulation of damage, material crushing operation, power of material crushing.

Технологическое оборудование металлургической промышленности выходит из строя по трем причинам: из-за износа рабочих поверхностей пар трения качения или скольжения, из-за накопления в теле элементов машин усталостных повреждений, из-за нагружения материала выше предела его прочности. Процессы износа контактируемых поверхностей трибосистем в настоящее время успешно контролируются и приборными способами, и органолептическими методами.

Аналогичная ситуация сложилась и с прочностными характеристиками работы деталей

машин. Что касается процесса накопления внутренних повреждений в материалах, то эти процессы контролируются в настоящее время оценочными способами по количеству циклов нагружения материала и вероятностной оценке формирования в материале повреждений. В настоящей работе вероятностный подход сохраняется, но в основе оценки долговечности элементов машин используются энергетические показатели [1 – 3].

Цель настоящей работы – показать возможность аналитической оценки сроков службы элементов машин, теряющих свою работоспособность из-за накопления усталостных повреждений, через поток механической энергии, переданной (пропущенной) через эти элементы.

В основе данного подхода – теория работоспособности [1 – 3], в которой рассмотрена передача движения от элемента к элементу материала деталей по кинематической цепи машины (рис. 1). За период времени *dt* работа, совершенная над элементом *dx* этой цепи, в сечении *i* возрастет на величину dA_i. Соответственно, на величину dA_j возрастет и работа, совершенная элементом *dx* над правой частью механопровода в сечении *j*. Тогда изменение работы *dA* на участке $i-j$ величиной *dx* определится как

$$dA = dA_i - dA_j, \qquad (1)$$

где *dA* – работа, совершенная над участком системы при его движении за период *dt*.

Уравнение энергетического баланса элементарного участка $i-j$ величиной *dx* привода машины, исходя из первого начала термодинамики, записывается следующим образом [4, 5]:

$$dA + dQ + dZ = dE, \qquad (2)$$

где *dQ* – количество тепла, приобретенного участком системы; *dZ* – энергия переноса массы в систему из окружающей среды; *dE* – изменение энергии системы.

Величина *dQ* может быть представлена в виде суммы количества тепла *dQ′*, получаемого участком $i-j$ извне, и тепловой энергии *dQ″*, возникающей в результате релаксации напряжений в материале участка $i-j$. В рассматриваемом случае внешние тепловые источники отсутствуют, то есть $dQ' = 0$. Но часть величины *dA*, составляющая внутренние потери энергии dA_n в материале на участке $i-j$, превратится в тепловую энергию *dQ″* [6], тогда $dQ = -dA_n$.

У энергопроводов механической энергии обмен веществом с внешней средой отсутствует. В этом случае $dZ = 0$. Величина внутренней энергии *E* рассматриваемого участка энергопровода в уравнении (2) может быть представлена выражением [5]

$$E = V_{ij} + P_{ij} + U_{ij},$$

где V_{ij} – так называемая "нулевая" энергия; P_{ij} – потенциальная энергия участка $i-j$; U_{ij} – кинетическая энергия участка $i-j$.

Величина V_{ij} на временном участке t_{ij} постоянна, то есть $V_{ij} = \text{const}$, тогда $dV_{ij} = 0$. Подставляя эти величины в уравнение (2), получим

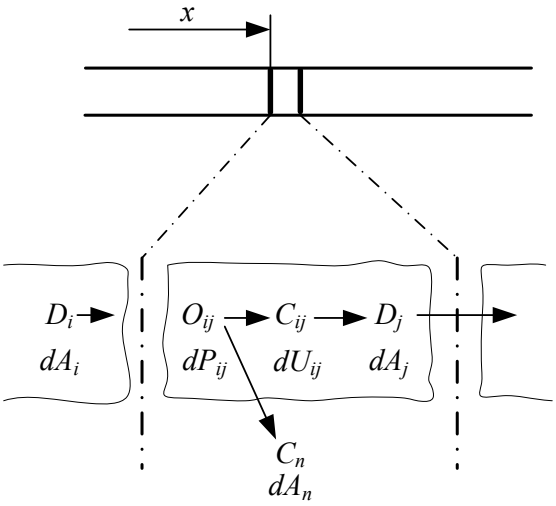

Рис. 1. Соответствие элементов процесса движения в материале энергетическим затратам на этот процесс:
D_i и dA_i – действие и работа действия на границе *i*; O_{ij} и dP_{ij} – отражение и потенциальная энергия участка $i-j$; C_{ij} и dU_{ij} – самодвижение и кинетическая энергия участка $i-j$; D_j и dA_j – действие и работа действия на границе *j*; C_n и dA_n – самодвижение внутренних структур участка и работа потерь на участке $i-j$ (в структуре участка $i-j$)

$$dA_i - dA_j - dA_n = dP_{ij} + dU_{ij}. \qquad (3)$$

Далее, как показано в работах [1, 2], выполняется сравнение выше полученного уравнения с уравнением движения элементов на рассматриваемом участке $i - j$. Данное сопоставление позволяет определить, на какие виды движения тратится тот или иной вид энергии (работы). Движение элементов участка $i - j$ (рис. 1) за промежуток времени dt представляется следующим образом. Действие D_i на границе i передает процесс движения звену $i - j$, совершая тем самым работу dA_i. Действие «отражается» участком в виде O_{ij}. Физически процесс отражения действия заключается в деформировании участка $i - j$ и изменении в нем потенциальной энергии на величину dP_{ij}. После этапа отражения начинается каскад разветвленных этапов самодвижения, прежде всего самодвижения $C_{ij,}$ соответствующего приращению кинетической энергии dU_{ij}. Кроме этого, возникает самодвижение C_n, связанное с релаксацией напряжений в материале, в уравнении (3) соответствует работе потерь dA_n. Далее наступает последний момент движения участка $i - j$, связанный с действием D_j этого участка на соседний: реализуется работа по передаче движения соседнему участку, которая соответствует величине dA_j. Таким образом, уравнение энергетического баланса для участка $i - j$ можно записать так:

$$dAD_i - dAD_j - dAC_n = dPO_{ij} + dUC_{ij}, \qquad (4)$$

где dAD_i – работа действия на участок $i - j$; dAD_j – работа действия участка $i - j$ на следующий за ним участок; dAC_n – работа внутренних изменений материала участка $i - j$; dPO_{ij} – потенциальная энергия отражения действия на участок $i - j$; dUC_{ij} – кинетическая энергия самодвижения участка $i - j$.

Движение, связанное с работой внутренних изменений материала или работой повреждений материала за промежуток времени dt, определяется самодвижением разных по масштабу элементов материала C_n, приводящим к повреждению. Это движение определяется двумя предшествующими этапами движения: этапом действия на участок $i - j$, выраженным величиной D_i, этапом отражения воздействия рассматриваемым участком O_{ij}. Причем каждый из предшествующих моментов процесса движения участка $i - j$ однозначно определяет этап самодвижения структур материала C_n, а, значит, и величину накопления в промежуток времени dt повреждений. В таком случае можно записать $C_n(dt) = f(O_{ij}, dt)$, или, выражая движение отражения через энергию отражения, можно записать так:

$$C_n(dt) = f(dPO_{ij}). \qquad (5)$$

При замене в уравнении (5) величины самодвижения структур материала C_n на величину накопленных в материале повреждений $\xi(dt)$ можно записать

$$\xi(dt) = f(dPO_{ij}). \qquad (6)$$

Из формулы (6) следует, что накопление повреждений происходит в процессе отражения действия или деформирования материала и определяется изменением его потенциальной энергии. Если записать формулу (6), выразив значение потенциальной энергии через создаваемое в материале напряжение S, то получим $\xi(dt) = f(S|dS/E|) = f(S|d\varepsilon|)$ (где $d\varepsilon = dS/E$ – относительная деформация металла; E – модуль упругости первого рода). Запишем величину $d\varepsilon$ через dt как $d\varepsilon =$ $(t)dt$ и затем полученное выражение проинтегрируем по времени; получим среднее значение повреждаемости материала

$$\langle \xi(t) \rangle = f(\int_t S(t)| \qquad (7)$$

Подынтегральное выражение $S(t)|$ представляет собой мощность деформации материала. Интеграл этой мощности по времени определит работу формоизменения в области упругих деформаций материала. Эта работа называется работой мятия материала [1]. Выразив в подынтегральной функции значение через , получим значение работы мятия материала в следующем виде: $A_{\text{М}}(t) = 1/E \int_t S(t)|$ В общем случае для определения этого интеграла используется зависимость $S = f(t)$. По этой зависимости путем дифференцирования определяется скорость изменения напряжения . Далее находится зависимость работы мятия, которая определяется произведением $S(t) \cdot$, деленным на модуль упругости первого рода, и интегрированием этой величины по времени. Тогда величина повреждения в материале, выраженная формулой (7), запишется так:

$$\langle \xi(t) \rangle = f(A_{\text{М}}(t)). \qquad (8)$$

От абсолютной величины повреждения материала можно перейти к относительной. Для этого математическое ожидание максимального срока службы детали обозначим через $\langle t^* \rangle$, предельную величину повреждения материала, при которой он разрушается, обозначим $\langle \xi(t^*) \rangle$, работу мятия до разрушения материала обозначим $A_M(t^*)$, что дает возможность записать формулу (8) в следующем виде:

$$\frac{\langle \xi(t) \rangle}{\langle \xi(t^*) \rangle} = V(t) = \frac{1}{A_{\text{М}}(t^*)} f(A_{\text{М}}(t)). \qquad (9)$$

Таким образом, вводится показатель качества, представляющий собой меру повреждения материала $V_i(t)$, которая изменяется в пределах 0 – 1 и в относительной числовой форме характеризует степень повреждения материала детали машины в точке x в момент времени t. По своей сути эта мера является отражением физической картины разрушения материала, которая складывается из роста плотности дислокаций, образования микротрещин, роста магистральной трещины и т.д.

Случайный процесс повреждения в точке x системы возникает как часть процесса деформации материала в этой точке $u(x,t)$ под воздействием на систему силы $q_i(x,t)$ и зависит от работы мятия материала в результате этой деформации $A_{\text{М}}(t)$. Скорость процесса возрастания повреждений в материале традиционно описывается кинетическим уравнением, для получения которого продифференцируем зависимость (9) по времени и умножим на равное единице отношение $d(A_{\text{М}}(t))/d(A_{\text{М}}(t))$. Тогда для точки x скорость повреждения запишется следующим образом:

$$\frac{dV(x,t)}{dt} = \frac{1}{A_{\text{М}}(t^*)} \frac{d(f(A_{\text{М}}(t)))}{d(A_{\text{М}}(t))} \frac{d(A_{\text{М}}(t))}{dt}. \qquad (10)$$

В этом уравнении скорость приращения работы мятия $d(A_{\text{М}}(t))/dt$ в точке накопления повреждений x может быть охарактеризована как мощность $N_{\text{М}}(x, t)$ мятия в этой точке. Величина $d(f(A_{\text{М}}(t)))/d(A_{\text{М}}(t))$ представляет собой некоторую невозрастающую во времени функцию $K(A_{\text{М}}(t))$, которая характеризует степень линейности накопления повреждений в материале элемента машины. Величина $A_{\text{М}}(t^*)$ является характеристикой выносливости материала и соответствует предельному значению работы мятия материала нагрузкой с частотой ω и напряжением S_ω. Величина $A_{\text{М}}(t^*)$ может быть выражена через физические характеристики материала и условия работы деталей машины [1]:

$$A_{\text{М}}(t^*) = \beta W_0 N_{\text{М}}(x,t)^b / N_0^m, \qquad (11)$$

где $\beta = S_\omega/S_{-1}$; S_ω – предел выносливости материала нагрузки с частотой ω, отличной от 50 Гц; S_{-1} – предел выносливости материала при частоте нагрузки 50 Гц; W_0 – работа мятия материала синусоидальной симметричной нагрузкой с частотой 50 Гц, соответствующая пределу выносливости S_{-1}; N_0 – мощность мятия материала нагрузкой синусоидального типа с частотой 50 Гц, соответствующая пределу выносливости S_{-1}; b, m – параметры энергетической кривой усталости материала в координатах работа мятия материала – мощность мятия материала.

Выражение (10) с учетом соотношения (11) можно записать следующим образом:

$$\frac{dV(x,t)}{dt} = \frac{K(A_{\text{М}}(t)) N_{\text{М}}(x,\ t) N_{\text{М}}(x,\ t)^b}{\beta W_0 N_0{}^m} = \frac{K_3 N_M\,(x,t)^d}{\beta W_0 N_0{}^m}, \qquad (12)$$

где $d = b + 1$.

Обозначив постоянную часть выше полученного уравнения (12) как $K_3/(\beta W_0 N_0^m) = \chi$, запишем

$$\frac{dV(x,t)}{dt} = \chi N_{\text{М}}\,(x,t)^d.$$

Из полученного уравнения следует, что скорость накопления повреждений связана с мощностью мятия материала.

При определении величины повреждения материала элементов технологического оборудования тяжелой промышленности необходимо определить работу мятия этого материала. В процессе эксплуатации технологического оборудования в непрерывном режиме элементы машин и механизмов испытывают гамму разнообразных и достаточно устойчивых колебаний. Результатом этих колебаний является неуклонно возрастающее накопление в элементах машин повреждений, и в конечном итоге их разрушение. Частотная составляющая нагрузки влияет на мощность мятия и поэтому решение задачи определения срока службы материала требует разделения нагрузки на ее частотные составляющие. При этом начальное распределение дефектов в деталях машин, условия их эксплуата-

ции, технологические воздействия на детали, носят случайный характер, поэтому отказы оборудования необходимо рассматривать как случайные события, а процесс накопления повреждений - как случайным образом протекающую реакцию на внешнее, в свою очередь, тоже случайное воздействие на систему. Для технологического оборудования мощность источника воздействия на систему является значительной по сравнению с мощностью возбуждаемого в результате изменения ее параметрических характеристик колебательного процесса. Такая особенность работы оборудования позволяет считать, что нагрузка в звеньях машины пренебрежимо мало зависит от поведения звеньев и воздействие на элементы системы стохастически задано. В этом случае нагрузку на некотором временном отрезке $t = (t, t^*)$ можно представить в виде совокупности m стохастически связанных функций времени $(q_1(t), q_2(t), ..., q_m(t)) = q(t)$. При этом все вероятностные характеристики (совместные плотности вероятности, моментные и корреляционные функции) не зависят от выбора начального момента времени, то есть процесс является стационарным и стационарно связанным. Кроме того, для рассматриваемого класса оборудования можно принять гипотезу о том, что процесс его нагружения является эргодическим, то есть результат осреднения любых функций процесса по времени совпадает с результатом осреднения соответствующих функций по множеству реализаций. Таким образом, нагрузка на технологические машины представляется в виде стационарного случайного эргодического процесса. Описать такую нагрузку можно в виде канонического уравнения ее разложения вида [7, 8]:

$$q(x,t) = m_x + \sum_{i=1}^{k} q_i(t).$$

При воздействии такой нагрузки на механическую систему, в точке x данной системы возникает случайная деформация $u(x,t)$, создающая суммарное напряжение $S(x, t)$, и мощность мятия $N_M(x, t)$, в результате выполняется работа мятия материала $A_M(x, t)$ в этой точке. Напряжение, деформация, мощность мятия и работа мятия материала в этой точке обладают всеми свойствами, присущими нагрузке $q(t)$. Воздействие нагрузки на систему связано с реакцией системы на эту нагрузку в точке x операторным уравнением, позволяющим получать статистические характеристики деформационного процесса в этой части машины. Помимо процессов нагружения и деформации стохастический элемент учитывается в расчетах через механические свойства материала, которые характеризуются пределом выносливости материала S_{-1}, дисперсией его разброса σ_s и распределением предела выносливости, близким нормальному закону распределения. Внутренние изменения материала мало зависят от последовательности нагружения [9], поэтому в большинстве случаев, связанных со случайными нагружениями, можно считать, что механические свойства материала во времени не изменяются. Тогда предел выносливости S_{-1} и кривая энергетической усталостной прочности [3] могут быть представлены как набор числовых случайных векторов с нормальным распределением $p(S)$, не зависящим от процесса $S(x, t)$. В этом случае механическую систему с точки зрения накопления в ней повреждений можно выразить в виде модели с двумя нелинейными элементами (рис. 2), на входе первого из которых действует случайный стационарный процесс $q_i(t)$. Этот процесс является возбудителем случайного стационарного процесса деформации системы в точке x с мощностью мятия материала $N_M(x, t)$. Деформации в свою очередь действуют на второй элемент модели системы, описывающий внутренний процесс возникновения повреждений в материале детали в точке x $V_i(x, t)$. Суммирование повреждений дает представление о состоянии элемента машины в точке x и определяет его безотказность и работоспособность M в этой точке. Работоспособность в данном случае понимается как способность элемента машины выполнить возложенный на него объем работы (передать объем энергии) с вполне определенной вероятностью [1 – 3].

Выводы

Энергия, проходящая через механической энергопровод, вызывает повреждения в элементах этого механопровода. Величина повреждений определяется объемом работы мятия материала элементов, совершаемой при передаче энергии через механопровод привода. Интенсивность повреждений, возникающих при передаче механической энергии, зависит от мощности мятия материала элементов машины. Срок службы элемента машины может оцениваться работой мятия материала при определенной ее мощности. По величине работы мятия материала и ее мощности можно определить продолжительность выполнения своих функций элементами машины.

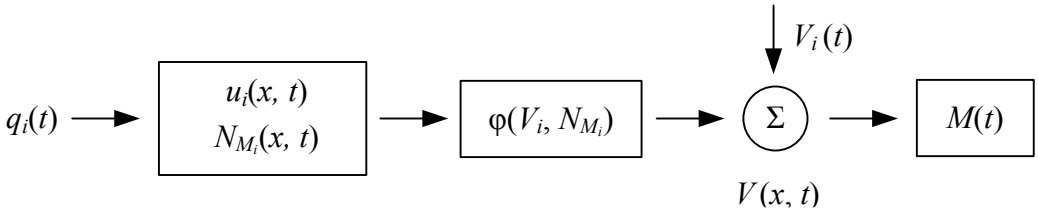

Рис. 2. Модель процесса накопления повреждения

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Савельев А.Н. Теория работоспособности технологических машин. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2008. – 225 с.
2. Савельев А.Н. Процесс передачи движения и интенсивность накопления повреждений в деталях технологических машин // Изв. вуз. Черная металлургия. 1997. № 2. С. 63 – 66.
3. Савельев А.Н. Виды движений в материалах и невелеровские кривые усталостной их оценки // Изв. вуз. Черная металлургия. 1992. № 2. С. 78 – 81.
4. Кубо Р. Термодинамика. – М.: Металлургия, 1970. – 304 с.
5. Новиков И.И. Термодинамика. – М.: Металлургия, 1984. – 592 с.
6. Гребенник В.М. Усталостная прочность и долговечность металлургического оборудования. – М.: Машиностроение, 1969. – 256 с.
7. Светлицкий В.А. Статистическая механика и теория надежности. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 504 с.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1964. – 574 с.
9. Савельев А.Н. Оценка работоспособности электромеханических систем прокатного комплекса блюминг – непрерывно-заготовочный стан // Изв. вуз. Черная металлургия. 1991. № 9. С. 106 – 108.
10. Савельев А.Н., Громов В.Е. Влияние частоты нагружения на характер распределения движений в материалах // Изв. вуз. Черная металлургия. 1999. № 6. С. 62 – 66.

© 2020 г. *А.Н. Савельев, Р.С. Федотов*
Поступила 29 января 2020 г.