

УДК 510.67.004.624:034.14

## МОДЕЛЬ ИЗНАШИВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К.К.Сейтказенова  
ЮКГУ им.М.Ауезова, г.Шымкент

Для анализа процессов эрозии материалов и соответствующих моделей изнашивания могут быть использованы уравнения механики многокомпонентных сплошных сред и некоторые положения термодинамики необратимых процессов.

Энергетический баланс при деформировании объема  $V_{деф}$  материала определяется суммой

$$E_{\Sigma} = A_{мех} + Q_{\Sigma} = \Delta U_e + \Delta U_{фе} + \Delta U_{фQ} + \Delta U_T + \bar{Q}, \quad (1)$$

где  $E_{\Sigma}$ ,  $A_{мех}$ ,  $Q_{\Sigma}$  - общая, механическая и тепловая энергия, соответственно;  
 $\Delta U_e, \Delta U_T$  - потенциальная и тепловая (кинетическая) составляющие внутренней энергии;  
 $\Delta U_{фе}, \Delta U_{фQ}$  - потенциальная и тепловая составляющие энергии фазовых превращений;  
 $\bar{Q}$  - энергия, рассеянная в виде тепла.

Уравнение сохранения энергии для гетерогенного материала имеет вид:

$$\begin{aligned} (\rho\theta)^{(k)} \left( \frac{\partial}{\partial t} + g_j \frac{\partial}{\partial x_j} \right) \left( U_e + \frac{g_i^2}{2} \right)^{(k)} = \rho\theta^{(3)} \left[ \left( U_e + \frac{g_i^2}{2} \right)^{(1)} - \left( U_e + \frac{g_i^2}{2} \right)^{(2)} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \kappa\theta \frac{\partial T}{\partial x_j} + \mu\theta g_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^{(k)} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\lambda + \mu)\theta g_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right]^{(j)} \delta_{ij} + Q_*^{(k)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\theta^{(k)}$  - содержание компонент;  
 $t$  - время;  
 $x_j$  - координата;  
 $\rho = \rho(x, t)$  - массовая плотность;  
 $g_j$  - компонента вектора скорости;  
 $\kappa$  - коэффициент теплопроводности;  
 $T$  - температура;  
 $\lambda, \mu$  - упругие постоянные;  
 $u_j$  - компоненты вектора перемещения;  
индексы  $i, j, k$  означают суммирование;  
 $k=1, 2, 3$  - относится к материалу матрицы, к выделениям второй фазы и к частицам фазовых превращений соответственно;  
 $\delta_{ij}$  - символ Кронекера;  
 $Q_*^{(k)}$  - интенсивность внутренних источников (стоков) теплоты.

После сопоставления уравнения баланса энергии с уравнением тепловой энергии имеем:

$$Q_{\Sigma} = \Delta U_T + \Delta U_{фQ} + \bar{Q} = \left( \rho\theta c_p \Delta T + \int_{t_1}^{t_2} \Delta Q_{ф}(t) dt + Q_k + Q_m \right) V_{деф} \quad (3)$$

и

$$A_{\text{мех}} = \Delta U_e + \Delta U_{\text{фе}} = \left\{ \theta \left[ (\lambda + \mu) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 + \mu \sum_{i,j=1}^3 \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 \right] + \Delta U_{\text{фе}} \right\} V_{\text{деф}}, \quad (4)$$

где  $c_p$  - изобарная теплоемкость;

$Q_k, Q_m$  - интенсивность конвективного переноса теплоты в  $V_{\text{деф}}$  и теплоты, изменяющей упругие свойства материала при повышении температуры на  $\Delta T = T - T_0$ ;

$\Delta Q_{\text{ф}}(t)$  - кинетическая функция интенсивности тепловых эффектов фазовых превращений.

Уравнения (3) и (4) легко преобразуются в формулы, удобные для оценки эрозионной стойкости гетерогенных материалов. При этом в качестве критериев износостойкости в соответствии с (3) можно использовать предельные теплофизические характеристики, например, скрытую теплоту плавления, а в соответствии с (4) внутреннюю потенциальную (скрытую) энергию, накопленную материалов к моменту его разрушения, в виде критической плотности мощности деформации. Уравнения эрозии при этом примут соответственно следующий вид:

$$V_{\text{изн}} = \frac{\left[ Q_{\Sigma} - \left( Q_k + \int_{t_2}^{t_1} \Delta Q_{\text{ф}}(t) dt \right) V_{\text{деф}} \right] \vartheta_i}{(\rho \theta c_p \Delta T)_{\text{кр}} \vartheta_{\text{кр}}} \quad (5)$$

и

$$V_{\text{изн}} = \frac{A_{\text{мех}} \vartheta_i f(t)}{\left[ \theta (E_{\text{сж}} + E_{\text{сд}}) + \Delta U_{\text{фе}} - Q_m \right]_{\text{кр}} \vartheta_{\text{кр}}} = \frac{A_{\text{мех}} \vartheta_i}{k_{U_{\text{ф}}} k_{Q_m} k_{\eta} k_{\text{кор}} E_{\text{уд}} \vartheta_{\text{кр}}} f(t), \quad (6)$$

где  $f(t)$  - функция, характеризующая развитие эрозии во времени;

$E_{\text{сж}}, E_{\text{сд}}$  - внутренняя энергия сжатия и сдвига;

$k_{U_{\text{ф}}}, k_{Q_m}, k_{\eta}, k_{\text{кор}}$  - коэффициенты, учитывающие влияние на энергоемкость материала фазовых превращений, температуры, жесткости напряженного состояния и коррозии соответственно.

Сравнительные испытания чистых металлов на МСВ и последующие сопоставления показатели, что акустическое сопротивление  $(\rho c)_{\text{м}}$ , абсолютное значение термодинамического потенциала  $q$  при нагреве от нуля градусов К до температуры плавления и энергетический критерий  $W_{\text{кр}}^*$  взаимосвязаны, так как  $V_{\text{изн}}^{-1} \sim (\rho c)^3 \sim q^{\frac{3}{2}} \sim W_{\text{кр}}^*$ . Последнее соотношение указывает на аналогию термодинамических и физико-механических характеристик металлов, т.е. знаменателей формул (5) и (6) при  $q \sim E_{\text{уд}}$ .

Функция  $f(x)$  раскрывается после аппроксимации зависимости  $J_{\text{эп}}(N)$  экспонентой и последующего интегрирования по времени с получением в итоге кинетической кривой эрозии в виде интеграла вероятностей

$$V_{\text{изн}} = \text{const}_8 \int_0^t e^{-\frac{1}{2} \text{const}_9 \tau^2} d\tau = \text{const}_{10} \text{erf}(\text{const}_9 t). \quad (7)$$

Результат (7) имеет многочисленные экспериментальные подтверждения при эрозии широкого круга материалов как при лабораторных испытаниях образцов, так и в натуральных условиях при эксплуатации судовых гребных винтов, гидротурбин, цилиндрических втулок двигателей, подшипников скольжения, влажно-паровых турбин атомных энергоустановок.

высших кинематических пар и других технических устройств. Формулу (7) можно получить теоретически, рассматривая случайный характер энергообмена между турбулентным потоком и ламинарным подслоем жидкости в виде пульсаций давления.

#### **Қорытынды**

Физикалық және механикалық шегінен тұратын гетерогенді материалдардың төзу моделі ұсынылды. Төзудың энергетикалық балансына кіретін жылулық эффектер мен фазалық ауысулардың болуы бағаланды.

#### **Summary**

The model of wear of heterogeneity materials, including limited heat physical and mechanical characteristics was presented. The investment thermal effects and phases change in power balance of wear are estimated.