

УДК 621.336.7

Ступаков С.А., Филиппов В.М., Калинина Е.С.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНАШИВАНИЯ
КОНТАКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТОКОПРИЕМНИКОВ**

Омский государственный университет путей сообщения,

Россия, Омск, пр. Маркса, 35, 644046

УДК 621.336.7

Stupakov S.A., Philippov V.M., Kalinina E.S.

**MATHEMATICAL MODEL OF MECHANICAL WEAR OF CONTACT
ELEMENTS PANTOGRAPH**

Omsk State Transport University,

Russia, Omsk, av. Marx, 35, 644046

В данной статье рассматривается математическая модель для исследования механического изнашивания контактных элементов токоприемников с учетом влияния внешних факторов.

Ключевые слова: математическая модель, контактный элемент, изнашивание, влажность, запыленность, температура элементов контактной пары.

In this article we describe the mathematical model to study the mechanical wear of contact elements of current collectors with the influence of external factors.

Key words: mathematical model, the contact element, wear, moisture, dust, temperature items contact pair.

Одним из основных факторов, влияющих на изнашивание контактных элементов (КЭ) токоприемников электрического транспорта, является нажатие в контакте. Уравнение для решения задачи об оптимальных условиях механического изнашивания при поиске области оптимума рассмотрено в работе [1] Э. Д. Брауна, Ю. А. Евдокимова, А. В. Чичинадзе. В этом уравнении

в соответствии с положениями теории подобия в комплексы и симплексы были объединены следующие факторы:

- 1) нажатие в контакте, удельная теплоемкость, теплопроводность;
- 2) скорость скольжения, время испытания;
- 3) твердости элементов пары трения.

Кроме этого, уравнение, приведенное в работе [1], содержит симплекс, учитывающий процентное содержание в элементе контактной пары основного материала. Например, для случая исследования контактных пар устройств токосъема таким материалом может быть медь или графит. В качестве параметра оптимизации принята интенсивность изнашивания I_M .

Функциональная зависимость между I_M и факторами модели имеет вид:

$$I_M = \psi_2(P, v, t, r, Cu, H_1/H_2, \lambda_1, \lambda_2, c_1, c_2), \quad (1)$$

где P – нажатие в контакте; v – скорость скольжения; t – время испытаний; r – характерный линейный размер; Cu – содержание меди в КЭ; H_1/H_2 – безразмерный симплекс (отношение твердости материала КЭ к твердости материала токопровода); λ_1, λ_2 – теплопроводности материалов КЭ и токопровода соответственно; c_1, c_2 – удельные теплоемкости КЭ и токопровода соответственно.

Анализ результатов расчета и экспериментальных данных об интенсивности изнашивания различных материалов контактных пар показывает, что расхождение расчетных и экспериментальных данных составляет 9%. Сравнение данных расчета интенсивности механического изнашивания с результатами эксперимента, полученными при различных параметрах окружающей среды (относительной влажности окружающей среды 98%; запыленности 200 мг/м³), показывает, что значение относительной погрешности повышается до 20%.

Для повышения точности расчета износа КЭ в модель были внесены критерии, позволяющие учитывать изменение влажности и запыленности окружающей среды. Кроме этого, многие авторы в своих работах [2 – 4] доказали влияние температуры элементов контактной пары на их твердость и,

как следствие, на фактическую площадь контакта. В связи с этим в модель добавлен критерий, позволяющий учитывать влияние силы трения в скользящем контакте на износ элементов контактной пары, количество комплексов и симплексов в уравнении составит $k = \Phi - n = 11 - 4 = 7$.

В соответствии с вышесказанным запишем уравнение:

$$I_M(P) = a_0 \left(\frac{Ptc_2}{r^2\lambda_1} \right)^{\alpha_m} \left(\frac{vt}{r} \right)^{\beta_m} (Cu)^{\gamma_m} \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\varepsilon_m} \left(\frac{T_1\lambda_1}{rf_T P v} \right)^{\delta_m} \left(\frac{\Phi_0}{\Phi} \right)^{\lambda_m} \left(\frac{\kappa_0}{\kappa} \right)^{\omega_m}, \quad (2)$$

где $Me \equiv \frac{T_1\lambda_1}{rf_T P v}$ – критерий Мейера; Pv – мощность трения, f_T – коэффициент трения; Φ_0/Φ – отношение среднего значения относительной влажности окружающей среды за пять лет к значению относительной влажности на момент исследований, κ_0/κ – отношение среднего значения запыленности окружающей среды за пять лет к значению ее запыленности на момент исследований.

Анализ результатов эксперимента показал, что значение износа элементов контактной пары в значительной мере определяется их температурой. Поэтому дальнейшее усовершенствование модели обусловлено необходимостью учитывать в модели влияние температуры элементов контактной пары на их твердость и на фактическую площадь контакта. Таким образом, уравнение (2) с учетом температуры элементов контактной пары можно записать в виде:

$$I_M(P) = a_0 \left(\frac{Ptc_2}{(r(T_{I_h}))^2\lambda_1} \right)^{\alpha_m} \left(Bi \frac{vt}{r(T_{I_h})} \right)^{\beta_m} (Cu)^{\gamma_m} \left(\frac{H_1(T_{I_h})}{H_2(T_{I_h})} \right)^{\varepsilon_m} \times \\ \times \left(\frac{T_1\lambda_1}{r(T_{I_h})f_T(T_{I_h})Pv} \right)^{\delta_m} \left(\frac{\Phi_0}{\Phi} \right)^{\lambda_m} \left(\frac{\kappa_0}{\kappa} \right)^{\omega_m}, \quad (3)$$

где $T_{I_h} = aT_n^{\alpha_T} + b \left(\frac{\partial T_n}{\partial z} \right)^{\beta_T}$ – коэффициент влияния температурного градиента на интенсивность изнашивания (a, b – коэффициенты, характеризующие тепловые свойства материалов; α_T, β_T – коэффициенты, характеризующие тепловые

процессы при взаимодействии элементов контактной пары; определяются экспериментально);

T_n – температура исследуемого n -го тела;

$\partial T_n / \partial z$ – градиент температуры элемента контактной пары по нормали z к его поверхности.

Представим теплопроводность материала КЭ в виде:

$$\lambda_1 = \rho_1 c_1 \chi, \quad (4)$$

где ρ_1 , χ – плотность и температуропроводность материала соответственно.

Тогда

$$I_M(P) = a_0 \left(\frac{Ptc_2}{r(T_{I_h})^2 \rho_1 c_1 \chi} \right)^{\alpha_m} \left[Bi \cdot \left(\frac{vt}{r(T_{I_h})} \right) \right]^{\beta_m} (Cu)^{\gamma_m} \left(\frac{H_1(T_{I_h})}{H_2(T_{I_h})} \right)^{\varepsilon_m} \times \left(\frac{T_1 \lambda_1}{r(T_{I_h}) f_T(T_{I_h}) Pv} \right)^{\delta_m} \left(\frac{\Phi_0}{\Phi} \right)^{\lambda_m} \left(\frac{\kappa_0}{\kappa} \right)^{\omega_m}, \quad (5)$$

где $H_i(T_{I_h}) = H_{0i} \left\{ m_1 + \frac{m_2}{[m_3 (T_{I_h} - T'_m)]^2 + 1} \right\}$ – твердость материала элемента контактной пары в зависимости от его температуры;

H_{0i} – то же при нормальной температуре;

m_1, m_2, m_3 – константы материала;

T'_m – температура, при которой $H_i(T_{I_h})$ принимает максимальное значение;

$Bi = \frac{r \nabla T_1}{\Delta T_{1в}}$ – критерий Био, устанавливающий соответствие между

интенсивностью теплообмена и распределением температуры в твердом теле;

$r \nabla T_1$ – перепад температуры по объему КЭ;

$\Delta T_{1в} = T_1 - T_в$ – температурный напор (разность температур материала КЭ и окружающей среды).

После обработки экспериментальных данных изнашивания различных материалов с учетом особенностей исследования получены значения

коэффициентов уравнения (6) для контактных пар монорельсового и магистрального электрического транспорта.

На рис. 1 – 4 приведены номограммы для определения коэффициентов модели a_0 и α_m : на рис. 1 и 2 – для контактных элементов токоприемника монорельсового транспорта, на рис. 3 и 4 – то же для магистрального транспорта. Коэффициенты β_m , γ_m и ε_m модели от давления не зависят, их значения почти постоянны и определяются физико-механическими свойствами материалов и условиями проведения эксперимента [5]. Для исследуемых материалов и условий эксперимента, описанных в главе 6, диапазон изменения коэффициентов:

$$\beta_m \in [-0,8; -0,75], \quad \gamma_m \in [0,25; 0,35], \quad \varepsilon_m \in [0,75; 0,85].$$

Значения коэффициента λ_m определяются диапазоном изменения относительной влажности:

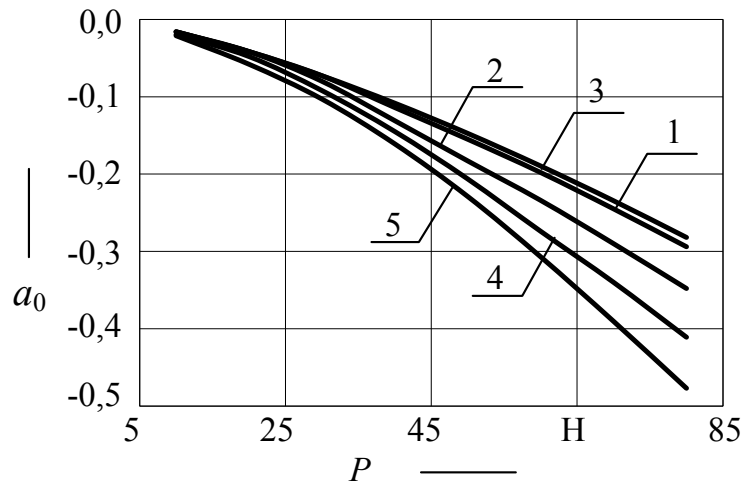
$$5 \leq \varphi \leq 15\% \rightarrow \lambda_m \in \left[-1, -\frac{1}{2}\right];$$

$$15 < \varphi \leq 40\% \rightarrow \lambda_m \in \left[-\frac{1}{2}, 1\right];$$

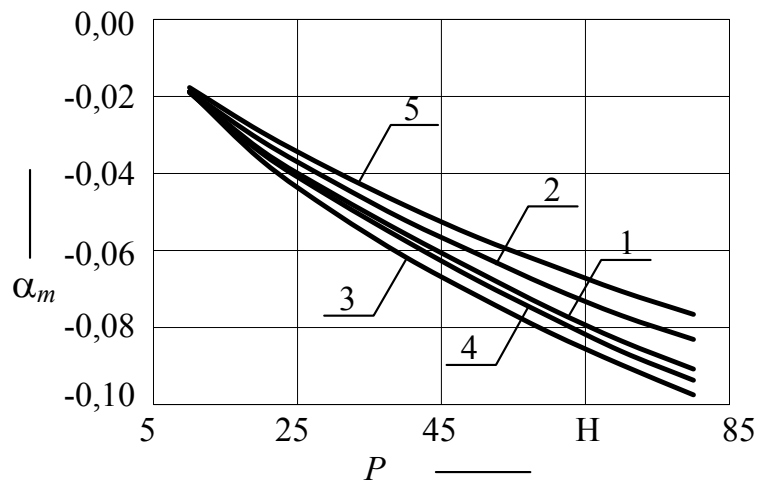
$$40 < \varphi \leq 98\% \rightarrow \lambda_m \in [1; 2]$$

Коэффициент ω_m в симплексе $\left(\frac{\kappa_0}{\kappa}\right)$ изменяется в диапазоне $[-1; 1]$.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: 1 – металлокерамика на железной основе (МК-Ж); 2 – графит; 3 – бронза; 4 – меднографитовый композит; 5 – сталь. На рис. 2 – МК-Ж; 2 – графит.



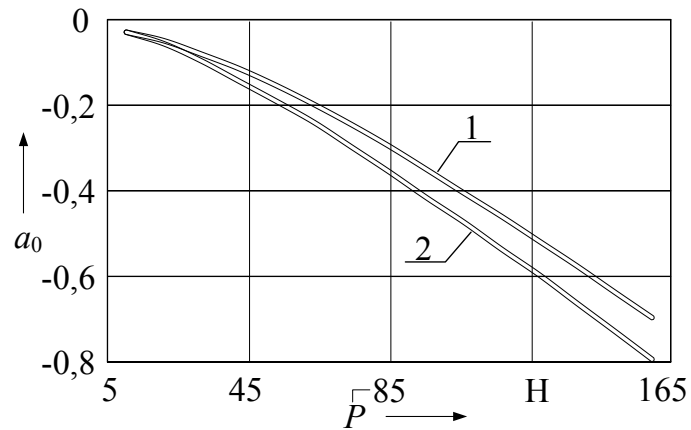
а



б

Рис. 1. Номограммы для определения функционалов модели механического изнашивания КЭ монорельсового транспорта

а – функционал a_0 ; б – функционал α_m



а

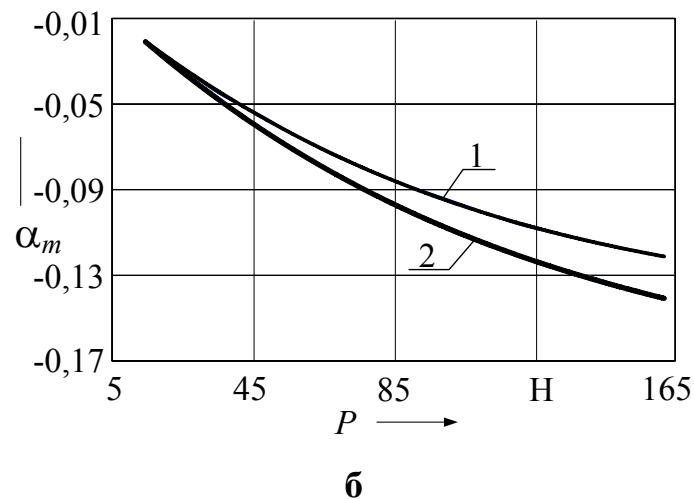


Рис. 2. Номограммы для определения функционалов модели механического изнашивания КЭ магистрального транспорта

а – функционал a_0 ; б – функционал α_m

На основании анализа уравнения (5) можно сделать вывод о том, что для всех исследуемых материалов наиболее значительное влияние на параметр оптимизации оказывают механические свойства пары трения, а наименее значительный вклад в процесс изнашивания вносит параметр, учитывающий изменение нажатия в контакте. Скорость трения и отношение твердостей также вносят весомый вклад в процесс изнашивания. Особая роль отводится симплексу Cu , так как он представлен в чистом виде и не входит в комплекс в виде составляющей – это указывает на ведущее влияние данного фактора на процесс изнашивания материалов, в состав которых входит медь.

Литература:

1. Браун Э. Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1982. 191 с.
2. Крагельский И. В. Молекулярно-механическая теория трения / И. В. Крагельский. – В кн.: Трение и износ в машинах, т. III. М.: Изд-во АН СССР, 1949. С. 178 – 183.
3. Чичинадзе А. В. Расчет, испытание и подбор фрикционных пар / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, А. Г. Гинзбург, З. В. Игнатьева. М.: Наука, 1979. 267 с.

4. Мышкин Н. К. Электрические контакты / Н. К. Мышкин, В. В. Кончиц, М. Браунович. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2008. 560 с.

5. Ступаков С. А. Моделирование электромеханического изнашивания контактных пар устройств токосъема электрического транспорта / С. А. Ступаков, О. А. Сидоров, В. М. Филиппов // Трение и смазка в машинах и механизмах. М.: Машиностроение, 2012. Вып. 4. С. 23 – 30.

References:

1. Brown E. D. Modeling of friction and wear in machines / E. D. Brown, Yu. A. Evdokimov, A. V. Chichinadze. M.: Mashinostroyenie, 1982. 191 p.

2. Kragelsky I. V. Molecular-mechanical theory of friction / I. V. Kragelsky. – In book: Friction and wear in machines, vol. III. M.: Publishing AS USSR, 1949. P. 178 – 183.

3. Chichinadze A. V. Calculation, testing and selection of friction pairs / A. V. Chichinadze, E. D. Brown, A. G. Ginsburg, Z. V. Ignatyeva. M.: Nauka, 1979. 267 p.

4. Myshkin N. K. Electrical contacts / N. K. Myshkin, V. V. Konchits, M. Brownovich. Dolgoprudny: Publishing Dom «Intellect», 2008. 560 p.

5. Stupakov S. A. Modeling electromechanical wear contact pairs current collection devices electric vehicles / S. A. Stupakov, O. A. Sidorov, V. M. Philippov // Friction and lubrication in machinery. M.: Mashinostroyenie, 2012. # 4. P. 23 – 30.