

УДК 621. 9. 06

Д. Г. Тигетов, к.т.н., МЭ

14. Модель фрикционного взаимодействия для расчета контакта шероховатых поверхностей.

Рассматривается модель фрикционного взаимодействия поверхностей, описывающая изменения высот выступов поверхностей в процессе трения. В основу модели закладывается вероятностный механизм однократного контактного взаимодействия двух выступов с известными высотами. Результатом взаимодействия считается изменение высот выступов. Механизм взаимодействия учитывает упруго-пластическую деформацию выступов и усталостное разрушение. Реализация модели на ЭВМ позволяет по физическим свойствам материалов, характеристикам исходной шероховатости и величине нагрузки оценивать во времени характеристики трения (площадь контакта, силы трения, износ) и параметры шероховатости. В рамках модели получены уравнения для распределений высот выступов при установившемся режиме трения. Решение уравнений позволяет оценить характеристики трения и параметры шероховатости в установившемся режиме трения.

A model of asperity height change of two rough surfaces during friction is introduced. The basis of model is two asperities contact interaction stochastic principle that prescribes the height change of asperities after contact interaction. Presented stochastic principle takes into account the elastic-plastic deformation and fatigue failure. Implementation of model by means of computer allows one to derive estimations of friction characteristics (actual contact area, friction force, linear wear) and roughness parameters (roughness average) given a load, physical features and initial roughness of surfaces are known. Since model possesses Markov property, equations for distributions of asperity heights of two surfaces during stationary friction process are derived. Solution of equations (i.e. two surface asperity height distributions) is utilized to estimate actual contact area, friction force, wear intensity and roughness average.

В рамках модели фрикционного взаимодействия поверхности представляются выступами со случайной высотой и случайным радиусом кривизны в вершине. Относительное движение поверхностей представляется дискретным циклическим сдвигом выступов одной из поверхностей (рис. 1).

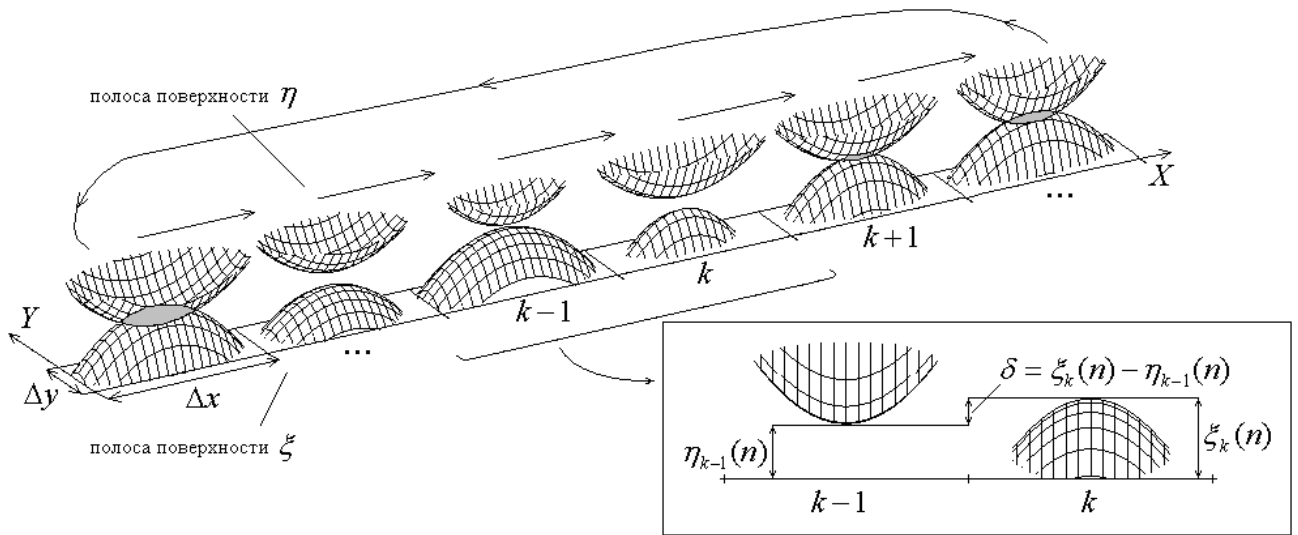


Рис. 1. Модель поверхностей и схема циклического сдвига.

Время в модели является дискретным и измеряется числом сдвигов, в каждый момент времени поверхности характеризуются высотами выступов: $(\xi_1(n), \dots, \xi_M(n))$ – вектор высот поверхности ξ , $(\eta_1(n), \dots, \eta_M(n))$ – вектор высот поверхности η .

Под действием внешней нормальной нагрузки некоторые выступы вступают в контакт. Контактующие элементы деформируются и разрушаются, изменяя свою высоту. Изменения высот элементов, описываются случайными функциями преобразования Ψ и Φ :

$$\xi_k(n+1) = \Psi(\xi_k(n), \eta_{k-1}(n)), \quad 1a),$$

$$\eta_k(n+1) = \Phi(\xi_k(n), \eta_{k-1}(n)), \quad 1b),$$

$$k = \overline{1, N}, \quad \eta_0(n) = \eta_M(n)$$

Детализация функций Ψ и Φ может производиться различным образом. Рассматриваются функции Ψ и Φ , учитывающие остаточные деформации и разрушение.

$$\Psi(\xi, \eta) = \xi + V_\xi \Delta t - D_\xi(\delta_\xi(\xi - \eta)) - W_\xi(\delta_\xi(\xi - \eta)), \quad 2a),$$

$$\Phi(\xi, \eta) = \eta - V_\eta \Delta t + D_\eta(\delta_\eta(\xi - \eta)) + W_\eta(\delta_\eta(\xi - \eta)) \quad 2b),$$

где D_ξ , D_η – остаточные деформации (рисунок 3) и W_ξ , W_η – случайные величины разрушения (рисунки 4).

Проведен модельный эксперимент с количеством выступов $M = 10000$, вычислено $T = 160 \cdot 10^6$ сдвигов, функции остаточной деформации и величины разрушения

представлены на рисунках 2 и 3. В результате модельного эксперимента получены гистограммы высот выступов в установившемся режиме трения (рисунки 4).

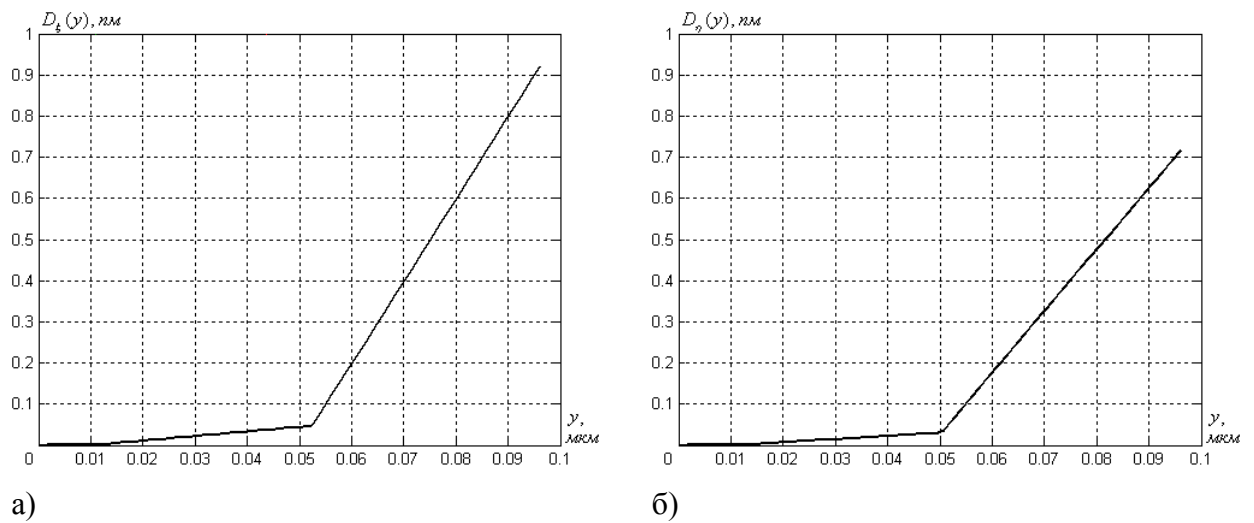


Рис. 2. Функции остаточной деформации: а) $D_{\xi}(\delta)$; б) $D_{\eta}(\delta)$.

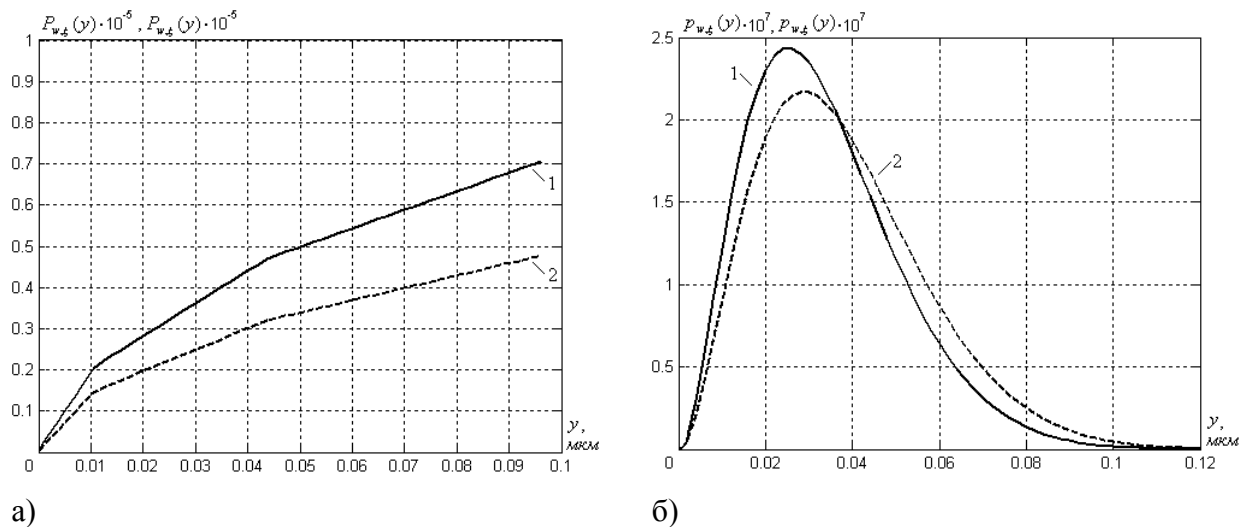


Рис. 3. Параметры величин разрушения: а) зависимости вероятностей разрушения от деформации; б) размеры частиц разрушения.

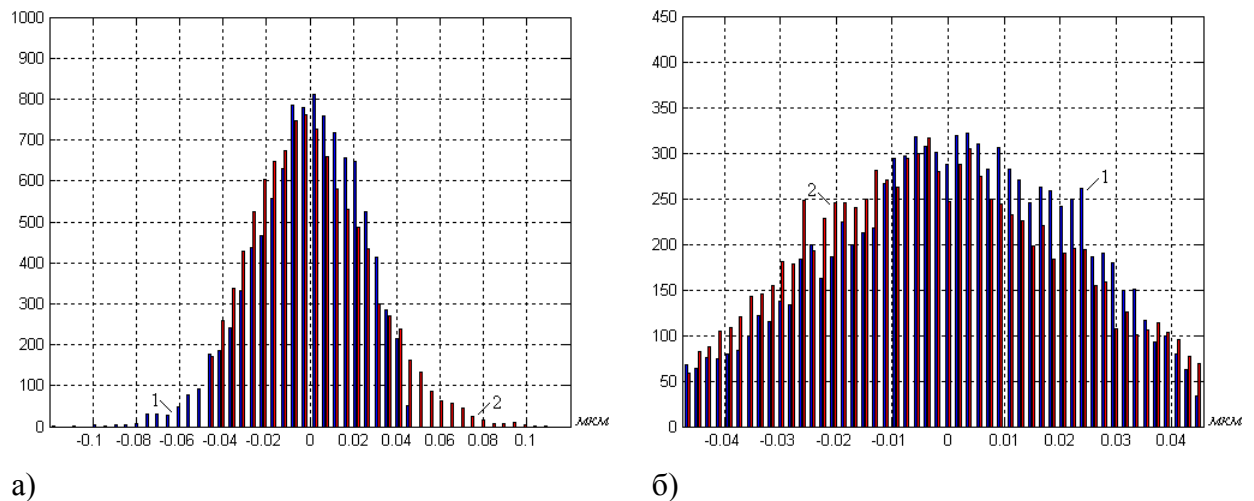


Рисунок 4. Гистограммы высот выступов после $T = 160 \cdot 10^6$ сдвигов:

а) во всем диапазоне высот, б) в области взаимодействия.

Известные высоты выступов поверхностей позволяют рассчитывать характеристики контакта и трения. Известны характеристики контакта двух выступов сферической формы: среднее нормальное напряжение $\sigma(\delta)$, площадь контакта $a_r(\delta)$, сила трения $f_{fr}(\delta)$. Характеристики контакта и трения модельных поверхностей вычисляются суммированием соответствующих величин по всем выступам в контакте. Например, фактическая площадь контакта $A_r(n)$ после n сдвигов:

$$A_r(n) = \sum_{j=1}^M a_r(\xi_j(n) - \eta_j(n))$$

Параметры шероховатости поверхностей оцениваются выборочными моментами:

$$m_\xi(n) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \xi_j(n), \quad \sigma_\xi(n) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M (\xi_j(n) - m_\xi(n))^2}.$$

В проведенном эксперименте вычислялись оценки характеристик трения (рисунки 5).

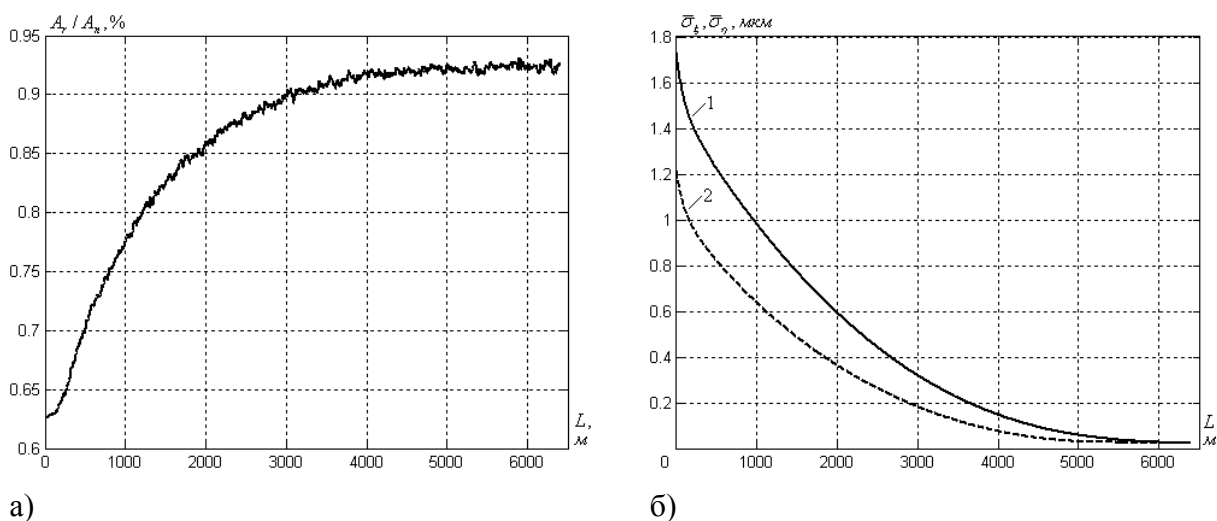


Рис. 5. Зависимости характеристик трения от пути трения: а) относительная площадь контакта; б) среднеквадратичное отклонение высот выступов: 1 – поверхности ξ , 2 – поверхности η .

В каждый момент времени n высоты выступов поверхности ξ подчинены распределению случайной величины $\xi^{(n)}$, а высоты выступов поверхности η – $\eta^{(n)}$. В следующий момент времени $n+1$ высоты выступов поверхности подчинены распределениям случайных величин $\xi^{(n+1)}$ и $\eta^{(n+1)}$:

$$\begin{cases} \xi^{(n+1)} = \Psi(\xi^{(n)}, \eta^{(n)}) \\ \eta^{(n+1)} = \Phi(\xi^{(n)}, \eta^{(n)}) \end{cases} \quad (3),$$

где Ψ и Φ – функции преобразования (2). Последовательность $\{(\xi^{(n)}, \eta^{(n)})\}$ является последовательностью Маркова. В установившемся режиме высоты выступов поверхностей подчиняются распределениям случайных величин ξ^* и η^* , из системы (3) следует:

$$\begin{cases} \xi^* = \Psi(\xi^*, \eta^*) \\ \eta^* = \Phi(\xi^*, \eta^*) \end{cases} \quad (4).$$

Если случайные величины ξ^* и η^* дискретные, тогда системе (4) соответствует система для распределений P_ξ^* и P_η^* :

$$\begin{cases} P_\xi^* = \Pi_\Psi(P_\eta^*) \cdot P_\xi^* \\ P_\eta^* = \Pi_\Phi(P_\xi^*) \cdot P_\eta^* \end{cases} \quad (5),$$

где матрицы Π_Ψ и Π_Φ определяются функциями преобразования Ψ и Φ (2) и внешними условиями трения поверхностей. Решение системы (5) позволяет находить распределения высот выступов поверхностей в установившемся режиме трения при различных параметрах без моделирования. Примеры решений системы (5) приведены на рисунках 6.

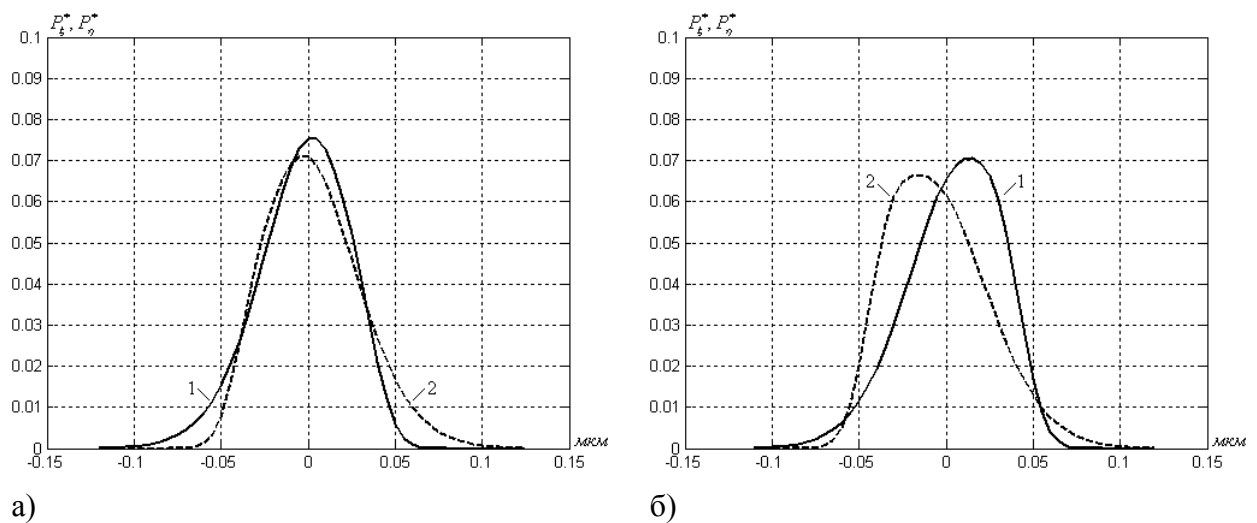


Рис. 6. Решения системы (5) при различной внешней удельной силе q_n , 1 – P_ξ^* , 2 –

$$P_\eta^*:$$

а) $q_n = 6$ МПа; б) $q_n = 12$ МПа.

Распределения P_ξ^* и P_η^* позволяют строить оценки характеристик трения и параметров шероховатости в установившихся режимах трения. Оценки имеют вид

соответствующих математических ожиданий, например, для площади контакта A_r и среднеквадратичного отклонения σ_ξ (M - число выступов поверхности):

$$M[A_r] = M \cdot M[a_r(\xi^* - \eta^*)], \quad \sigma_\xi = \sqrt{M[(\xi^* - M[\xi^*])^2]}.$$

Результаты расчетов оценок характеристик трения и параметров шероховатости в установившемся режиме при различных величинах внешней удельной силы приведены на рисунках 7.

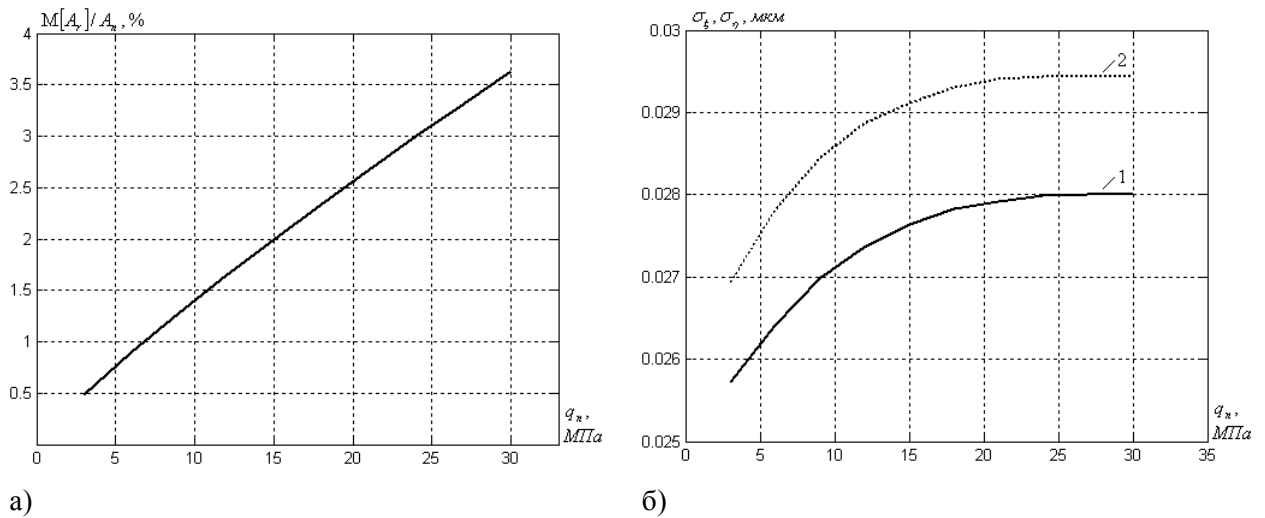


Рис. 7. Зависимости характеристик трения и параметров шероховатости в установившемся режиме трения от внешней удельной силы q_n : а) относительная площадь контакта; б) среднеквадратичные отклонения выступов, 1 –поверхности ξ , 2 – поверхности η .