

**Ю. И. Густов, д-р техн. наук, проф.; И. В. Воронина; А. А. Орехов**  
 ФГБОУ ВПО «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
 Москва, Россия

## МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОМЕХАНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Излагается методология исследования трибомеханических показателей на основе деформационно-топографического описания поверхностей трения. Предлагаются зависимости для экспериментально-расчетного определения силовых, температурных, скоростных и физико-механических характеристик элементов трибосистем при абразивном изнашивании.

В развитие трибомеханики строительной техники на кафедре «Технология металлов» университета разработан деформационно-топографический метод исследования контактно-износных показателей рабочих органов и сопряжений машин и оборудования. Применительно к шероховатым поверхностям трения, формирующимся в результате упругопластического деформирования подповерхностных слоев, разработаны гипсоцентридная (рис.1) и склеробатическая (рис.2) модели абразивного изнашивания металлических элементов трибосистем.

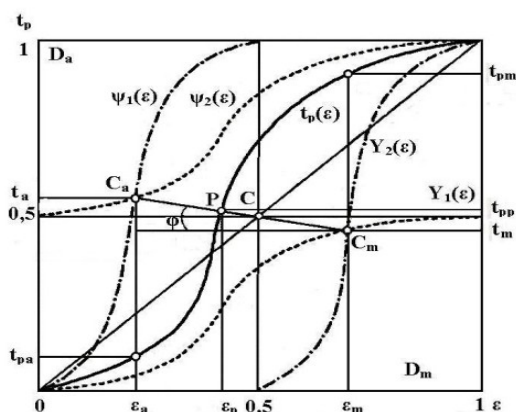


Рис. 1. Гипсоцентридная модель изнашивания

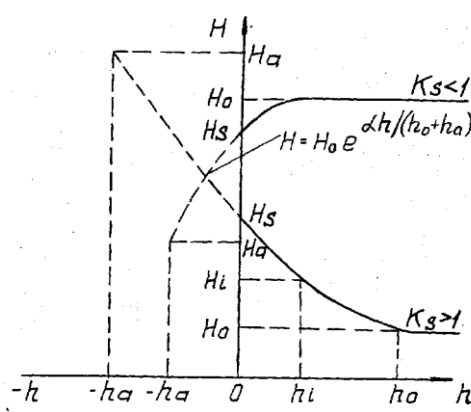


Рис. 2. Склеробатическая модель изнашивания

Гипсоцентридная модель изнашивания характеризует распределение микрометалла по высоте шероховатого слоя поверхности трения в нормализованной системе координат «относительное контурное давление  $t_p$  – относительное сближение  $\varepsilon$ ».

Склеробатическая модель изнашивания отражает трибodeформационные процессы упрочнения (разупрочнения) подповерхностных слоев вследствие фрикционного контакта с абразивными частицами.

Деформационно-топографическим методом установлено, что нормальная нагрузка  $N$  на поверхность трения определяется выражением

$$N = p_s A_c = K_s H_0 \cdot t_{pp} \cdot D_a B R_{\max}, \quad (1)$$

где  $p_s$ ,  $A_c$  – соответственно контурное давление и контурная площадь контакта;  $H_0$  – исходная (технологическая) микротвердость металла;  $K_s$  – кратная степень поверхностного упрочнения (разупрочнения) металла: отношение поверхностной и исходной твердости  $H_s / H_0$  (см. рис.2);  $t_{pp}$  – относительное контурное давление при полюсном сближении  $\varepsilon_p$  (см. рис.1);  $D_a$  – парциальный микроизнос (доля изношенного металла в пределах шероховатого слоя);  $B$  – ширина поверхности трения;  $R_{\max}$  – максимальная высота неровностей шероховатого слоя.

Полный коэффициент трения выражается тангенсом угла наклона бисцентроиды  $S_a S_m$  – линии, соединяющей центры тяжести плоских фигур  $D_a$  и  $D_m$  (см. рис.1)

$$f = \operatorname{tg} \varphi = (t_a - t_m) / (\varepsilon_m - \varepsilon_a), \quad (2)$$

где  $t_a$ ,  $t_m$  – соответственно ординаты центров тяжести  $D_a$  и  $D_m$ .

С учетом (1) и (2) сила трения равна

$$T = (t_a - t_m) K_s H_0 t_{pp} D_a B R_{\max} / (\varepsilon_m - \varepsilon_a). \quad (3)$$

Деформационная ( $f_d$ ) и адгезионная ( $f_a$ ) составляющие коэффициента трения соответственно определяются выражениями

$$f_d = (t_a - t_{pp}) / (\varepsilon_m - \varepsilon_a); \quad f_a = (t_{pp} - t_m) / (\varepsilon_m - \varepsilon_a).$$

Установлены также зависимости  $f_d = D_a \cdot f$ ;  $f_a = D_m \cdot f$ .

Тогда составляющие силы трения будут  $T_d = f_d \cdot N$ ;  $T_a = f_a \cdot N$ .

Равнодействующая  $R$  нормальной составляющей  $N$  и силы трения  $T$  будет равна

$$R = N(1 + f^2)^{0,5}.$$

Учитывая  $N = mg \cos \alpha$  и полученное выражение (1), можно определить массу тела, действующую на поверхность трения

$$m = K_s H_0 t_{pp} D_a B R_{\max} / g \cos \alpha. \quad (4)$$

Ускорение движения нагрузочной массы определяется выражением

$$a = g(\sin \alpha - f \cos \alpha).$$

Кратная степень поверхностного упрочнения (разупрочнения) равна

$$K_s = (D_{my} / D_m)^{D_m / D_a}, \quad (5)$$

где  $D_{my} = 0,618$  – гармоническая величина парциального микрометалла,  $D_m$  – фактическая величина парциального микрометалла (доля металла в пределах шероховатого слоя). Величина  $D_m$  определяется интегрированием

$$D_m = \int_0^1 t_p(\varepsilon) d\varepsilon$$

или отношением

$$D_m = (\varepsilon_m - \varepsilon_p) / (\varepsilon_m - \varepsilon_a), \quad (6)$$

где  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_m$  – соответственно сближения на уровнях центра тяжести микроизноса ( $C_a$ ) и центра тяжести микрометалла ( $C_m$ ). И, следовательно,  $D_a = 1 - D_m$ .

Распределение микротвердости по глубине подповерхностного слоя (см. рис.2) описывается экспонентой

$$H_i = H_0 \exp[\alpha h_i / h_0 + h_a], \quad (7)$$

где  $h_0$  – глубина трибодетформационного упрочнения (разупрочнения);  $h_a$  – мнимая толщина изношенного слоя;  $h_i$  – текущая глубина;  $\alpha$  – показатель трибодетформационного упрочнения (разупрочнения).

При  $h_i = h_0 + h_a$  микротвердость достигает значения предельной микротвердости продуктов износа

$$H_a = H_0 \exp(\alpha) \quad \text{или} \quad K_a = H_a / H_0 = \exp(\alpha). \quad (8)$$

Из (7) следует, что  $\alpha = \ln K_a$ .

Установлено [3], что при  $K_s > 1$  (упрочнение)

$$K_a = K_s [K_s^{0,5} + (K_s - 1)^{0,5}], \quad (9)$$

при  $K_s < 1$  (разупрочнение)

$$K_a = K_s [K_s^2 - (K_s - 1)^2]. \quad (10)$$

Для обоих случаев справедливо  $h_a / h_0 = \ln K_a / \ln K_s - 1$ .

Средний прирост температуры на поверхности трения  $\Delta T_s$  и продуктов износа  $\Delta T_a$ , вызванный трибодетформацией и разрушением подповерхностного слоя, можно оценить по формулам:

$$\Delta T_s = \ln K_s / \lambda, \quad \Delta T_a = \ln K_a / \lambda,$$

где  $\lambda = 2,15 \cdot 10^{-3}$ ,  $1/^\circ\text{C}$  – среднее значение температурного коэффициента для металлов.

Температурные эффекты определяются выражениями

$$t_s = \Delta T_s / T_0, \quad t_a = \Delta T_a / T_0,$$

где  $T_0$  – начальная температура тела.

Величина температурного эффекта при трении и изнашивании определяется условиями теплообразования и теплоотвода, которые зависят от ряда факторов. При малом теплоотводе даже небольшое количество тепла способно значительно поднять температуру деформируемого тела. При благоприятных условиях теплоотвода температура деформируемого тела может оказаться незначительной.

Поскольку повышение температуры приводит, как правило, к увеличению пластичности и уменьшению твердости и прочности, износостойкость металлов снизится. В связи с этим показатели температурного эффекта  $t_s$  и  $t_a$  могут служить характеристиками износостойкости элементов трибосистемы.

Для рассмотрения задачи механики абразивной частицы в зазоре введено вероятностное представление ее скорости как линейной комбинации скоростей поверхностей  $V_1$  и  $V_2$  [2]

$$V = \alpha V_1 + \beta V_2, \quad (11)$$

где  $\alpha = HB_2 / (HB_1 + HB_2)$ ,  $\beta = HB_1 / (HB_2 + HB_1)$ ,  $\alpha + \beta = 1$ .

В случае износоконтактных испытаний модельных элементов шарниров черпаковой цепи драг [3]  $V_1$  – скорость модели пальца твердостью  $HB_1$ ,  $V_2$  – скорость сопряженного элемента твердостью  $HB_2$ .

По условиям испытаний  $V_2 = 0$  и, следовательно, скорость частицы будет

$$V = \alpha V_1 = [HB_2 / (HB_1 + HB_2)] V_1. \quad (12)$$

При отсутствии трения (идеальный случай) абразивная частица пройдет теоретический путь скольжения равный  $L_0 = V_0 \tau$ , при наличии трения –  $L_\tau = \alpha V_0 \tau$ . Этот фактический путь трения означает расстояние, на котором выполняется полезная работа механизма. Следовательно, коэффициентом полезного действия сопряжения в присутствии абразивных частиц между его элементами можно считать

$$\eta = \alpha V_0 \tau / V_0 \tau = HB_2 / (HB_1 + HB_2). \quad (13)$$

С учетом относительной твердости  $K_{Ti} = HB_i / HB_{абр}$ , где  $HB_{абр}$  – твердость абразивных частиц, имеем

$$\eta_1 = K_{T2} / (K_{T1} + K_{T2}). \quad (14)$$

Рассматривая трибосистему как «клиновый привод» [4], представим механический КПД абразивного узла трения выражением

$$\eta_k = \operatorname{tg} \delta / \operatorname{tg}(\delta + 2\varphi), \quad (15)$$

где  $\delta$  – угол клина;  $\varphi$  – угол трения.

Выразим указанные характеристики через показатели микротопографии поверхности трения. Согласно гипсоцентричной модели изнашивания (см. рис.1) имеем  $\operatorname{tg} \delta = t_m / \varepsilon_m = 0,5 t_{pm} / \varepsilon_m$ ;  $\operatorname{tg} \varphi = (t_a - t_m) / (\varepsilon_m - \varepsilon_a)$ .

Представляя КПД трибосистемы отношением фактического ( $L_T$ ) и теоретического ( $L_0$ ) путей скольжения, а также учитывая твердости тел ( $H_1, H_2$ ) и абразива ( $H_a$ ), запишем

$$\eta_L = L_T / L_0 = 1 - [H_1 / (H_1 + H_a) + H_2 / (H_2 + H_a)] \quad (16)$$

или в относительном виде

$$\eta_L = L_T / L_0 = 1 - [1 / (1 + K_{T1}^{-1}) + 1 / (1 + K_{T2}^{-1})]. \quad (17)$$

Экспериментально-расчетное определение триботехнических показателей выполнено на примере модельных шарниров черпаковых цепей [3]. Испытывали наплавленные металлы с различными системами легирования (модели пальцев) в паре со сталью марки 110Г13Л (модель втулки), имеющей начальную твердость  $HB2000$  МПа ( $K_{T2} = 0,2$ ) и после приработки  $HB = 4900$  МПа ( $K_{T2} = 0,49$ ).

Результаты определения основных триботехнических показателей приведены в табл.

Табл. 1. Триботехнические показатели модельных шарниров черпаковых цепей

| Показатели           | Наплавленные металлы |       |       |       |       |       |       |
|----------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                      | ВСН-12               | ОМГ-Н | ВСН-6 | ОЗШ-1 | ОЗИ-1 | НГ-2  | Х-5   |
| $D_a$                | 0,580                | 0,445 | 0,406 | 0,416 | 0,402 | 0,514 | 0,320 |
| $H_0$ , МПа          | 7500                 | 4700  | 6200  | 5600  | 7300  | 6500  | 10400 |
| $(K_S)$ exper.       | 1,333                | 1,255 | 1,306 | 1,214 | 1,164 | 1,215 | 0,817 |
| $(K_S)$ расчет.      | 1,322                | 1,239 | 1,216 | 1,222 | 1,213 | 1,281 | 0,857 |
| $N$ , Н              | 127,3                | 86,2  | 92,0  | 64,4  | 125,8 | 155,0 | 107,5 |
| $f$                  | 0,24                 | 0,22  | 0,21  | 0,21  | 0,24  | 0,28  | 0,31  |
| $f_a$                | 0,10                 | 0,10  | 0,125 | 0,123 | 0,144 | 0,136 | 0,21  |
| $T$ , Н              | 30,5                 | 19,0  | 19,3  | 13,5  | 30,2  | 43,4  | 33,3  |
| $R$ , Н              | 130,9                | 88,3  | 94,0  | 67,2  | 129,4 | 167,2 | 117,3 |
| $m$ , кг             | 13,4                 | 9,0   | 9,6   | 6,7   | 13,2  | 16,4  | 11,5  |
| $\alpha$ , град      | 13,5                 | 12,4  | 11,9  | 11,9  | 13,5  | 15,6  | 17,2  |
| $a \cdot 10^3$ , м/с | 0,3                  | 1,6   | 7,0   | 7,0   | 0,3   | -7,7  | -4,0  |
| $\Delta T_s$ , °C    | 134                  | 105,6 | 124   | 90,2  | 71,0  | 90,6  | 94    |
| $t_s$                | 6,7                  | 5,28  | 6,2   | 4,51  | 3,55  | 4,53  | 4,7   |
| $K_{TI}$             | 0,75                 | 0,47  | 0,62  | 0,56  | 0,73  | 0,65  | 1,04  |
| $\eta_1$             | 39,5                 | 51,0  | 44,1  | 46,7  | 40,2  | 43,0  | 32,0  |
| $\eta_K$             | 37,3                 | 41,0  | 42,6  | 42,6  | 37,6  | 31,6  | 26,0  |
| $\eta_L$             | 40,4                 | 51,4  | 45,0  | 47,4  | 37,8  | 40,6  | 29,0  |

#### Выводы

1. Расчетные значения нагрузки на поверхность трения модельных элементов дражных шарниров удовлетворительно согласуются с экспериментальной нагрузкой (расхождение среднего значения до 1,5 %). Предложенные зависимости могут быть использованы в триботехнических расчетах.

2. Значения КПД шарнирной системы могут определяться предложенным деформационно-топографическим методом с использованием приведенного «микротопографического клина», а также относительной микротвердости контактирующих тел.

3. Расчетные величины КПД (26...51 %) соответствуют верхней границе типичного режима сухого трения скольжения (5...50 %), что отвечает фактическим условиям эксперимента.

4. Ускорение нагрузочной массы при воздействии на поверхность трения составляет  $a = 3 \cdot 10^{-4} \dots 7 \cdot 10^{-3}$  м/с при  $f = 0,21 \dots 0,24$  и  $a = - (4 \dots 7) \cdot 10^{-3}$  м/с при  $f = 0,28 \dots 0,31$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горячева, И. Г.** Контактные задачи в трибологии / И. Г. Горячева, М. Н. Добычин. – М. : Машиностроение, 1988. – 256 с.
2. **Крагельский, И. В.** Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Камбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 525 с.
3. **Густов, Ю. И.** Повышение износостойкости рабочих органов и сопряжений строительных машин: дис. ... д-р техн. наук / Ю. И. Густов. – М. : 1994. – 529 с.
4. **Чихос, Х.** Системный анализ в трибонике / Х. Чихос. – М. : МИР, 1982. – 351 с.