

Погодаев Л. И., Кузьмин В. Н., Сейткаенова К. К.

**Структурно-энергетический подход к оценке влияния
смазочных композиций на износостойкость трибосопряжений.**

Ч. 1. Структурно-энергетическая модель изнашивания

Введение. В различных областях техники для снижения потерь на трение и повышения надежности трибосопряжений широко применяется целый ряд смазочных композиций, содержащих присадки конкретного функционального назначения, в том числе модификаторы трения, кондиционеры металлов, реметаллизанты (восстановители) и т. п. Круг смазочных композиций (СК) непрерывно расширяется за счет разработки новых составов, содержащих металлы, бинарные сплавы и химические соединения, геомодификаторы трения [8, 13].

Присадки вводят в СК в различном виде: ультрадисперсные порошки Sn, Cu, Zn, Al, Ni и др.; порошки благородных металлов Au, Ag [1]; ультрадисперсные порошки сплавов Cu—Sn (РиМЕТ [2, 3]); Sn—Pb, Zn—Sn, Bi—Sn, Cu—Zn и др. [4]; смеси порошков металлов и неметаллов и их соединений (УДПЛЛ, УДПБр-К [5, 6]); соли металлов, а также их органических соединений (КТЦМС, СУРАД, СУРМ и др. [7]).

Представляет определенный научный и практический интерес разработка моделей, позволяющих расчетным путем оценить эффективность СК с различными антиизносными присадками по степени их влияния на триботехнические характеристики и долговечность (износостойкость) узлов трения; например: СК с металлосодержащими присадками [10, 11 и др.]

В первой части данной работы описана упрощенная структурно-энергетическая модель, отражающая влияние на износ трибосопряжений на мезоструктурном уровне продолжительности испытаний, коэффициента трения, энергоемкости трущихся поверхностей, давления, скорости скольжения и температуры в зоне трения. При этом анализ выполнен на основе положений структурно-энергетической теории изнашивания [8].

Суть структурно-энергетической модели изнашивания. Отличительной особенностью структурно-энергетического подхода при решении задач, связанных с

надежностью (долговечностью) различного оборудования, является учет масштабных уровней внешнего нагружения и соответствующих структурных уровней и размеров зон в поверхностных слоях изнашиваемых материалов, где происходят необратимые структурные изменения как на стадиях накопления дефектов (стадиях повреждаемости), так и в процессе последующего образования продуктов изнашивания.

По нашему мнению при трении скольжения основную роль в диссипации внешней (подведенной) энергии в изнашиваемых объектах материалов играют эффекты на мезо- и фрагментарном структурных уровнях, т. е. в пределах от $l_m = 0,1 \dots 3,0$ мкм (мезомасштаб) до $l_\phi = (3 \dots 10) l_m$ (масштаб фрагментарных структур). Под макромасштабным уровнем нагружения подразумевают соответствующую глубину структурных изменений в пределах от 10 до 104 мкм. При изнашивании значительная часть потока внешней энергии подвергается диссипации за счет многомасштабности структур в слое материала толщиной до 20...30 мкм. При этом структура и морфология поверхности трения является результатом самоорганизации материала в соответствии с принципом минимума производства энтропии.

С учетом влияния на среднюю скорость изнашивания материалов различных масштабных уровней нагружения, исходное энергетическое соотношение можно представить в общем виде

$$\bar{J} = \text{const}_1 (w_{\text{нн}} / \bar{W}_{\text{кр}})^{n/3}, \quad (1)$$

Поток энергии деформации $\bar{W}_{\text{кр}}$ распространяется в материалах в виде волн упругих и пластических деформаций. Показатель степени n дискретно изменяется при смене масштабных уровней изнашивания по правилу, близкому к правилу геометрической прогрессии, в соответствии с изменением энергии активации ведущих процессов структурных преобразований в деформируемых объемах материалов. При возрастании масштабов от микро- до макроуровня показатель степени n в соотношении (1) может ступенчато изменяться в пределах одного порядка, от 1,0 до 6...8.

Второй отличительной особенностью структурно-энергетического подхода является представление внешнего воздействия и реакции изнашиваемого материала на это воздействие в виде энергетических потоковых характеристик, учитывающих целый комплекс структурно-чувствительных физико-механических свойств динамически деформируемых материалов, существенно неодинаковых по величине на различных масштабных уровнях нагружения (изнашивания). Критерием износостойкости материалов при этом является критическая плотность потока энергии деформации (плотности мощности деформации), соответствующая предельному насыщению внутренней энергией продуктов изнашивания материалов и состоящая из упругой и пластической составляющих

$$\bar{W}_{кр} = (W_{кр})_{упр} + (W_{кр})_{пл} = (E_{упр} v_{кр}^{упр} + E_{пл} v_{кр}^{пл})/3. \quad (2)$$

Принимая зависимость общего износа ΔG_{Σ} от продолжительности испытаний приработанной пары трения t , близкой к линейной, согласно энергетической модели изнашивания можем записать

$$\Delta G_{\Sigma} = \text{const}_2 \left(\frac{w_{тр}}{w_{вн}} \frac{w_i}{\bar{W}_{кр}} \right)^{n/3} \omega_i t. \quad (3)$$

Обозначив комплекс $\text{const}_1(w_i/w_{вн}) = \Delta G_0$ — износ сопряжения при $N_{кр} = 1$ и $w_{тр} = \bar{W}_{кр}$, исходное соотношение перепишем в виде

$$\Delta G_{\Sigma} = \Delta G_0 \left(\frac{w_{тр}}{\bar{W}_{кр}} \right)^{n/3} \omega_i t. \quad (4)$$

В условиях трения скольжения и поверхностной усталости трибосопряжения мощность трения $w_{тр}$ и $\bar{W}_{кр}$ в первом приближении можно считать пропорциональной произведению нормального давления на скорость скольжения, т. е. $w_{тр} \sim (pv)_i$ и $\bar{W}_{кр} \sim \bar{E}_{уд} (v_{кр}^{упр} + v_{кр}^{пл}) \sim (E_{уд} v)_{кр}$. Вводя в соотношение (4) последние выражения, получим

$$\Delta G_{\Sigma} = \Delta G_0 [(pv)/(E_{уд} v)]^{n/3} \omega_i t. \quad (5)$$

При постоянной скорости скольжения, мезоструктурном уровне внешнего нагружения при изнашивании и наличии степенной зависимости между коэффициентом трения и давлением ($f \sim 1/p^m$, $m \approx 0,5$) отношение $w_{тр} / \bar{W}_{кр}$ в выражении (5) легко представить в виде, удобном для сопоставления с результатами испытаний трибосопряжения на машинах трения и прогнозирования их износостойкости с помощью частных зависимостей износа от коэффициентов трения, давления, температуры и соотношения микротвердостей трущихся поверхностей.

С учетом изложенных выше условий отношение $w_{тр} / \bar{W}_{кр}$ легко преобразовать к виду:

$$(w_{тр}/\bar{W}_{кр})^{n/3} \sim [(f pv)_i / (\bar{f} \bar{p} v)_{кр}]^{n/2} \sim [(f pv)_i / (\bar{f} \bar{p})_{кр}^2]^{n/2} \sim [(f pv) / (\bar{f} H_{\mu})_{кр}^2]^{n/2} \sim [p / (\bar{f} H_{\mu})^2]^{n/2}. \quad (6)$$

Подставив соотношение (6) в (5) при $n = 6$, характерном для мезоструктурного уровня изнашивания, получим уравнение

$$\Delta G_{\Sigma} = \Delta G_0 [(f pv) / (\bar{f} H_{\mu})^2]^2 \omega_i t, \quad (7)$$

из которого вытекает ряд важных для практики частных зависимостей, позволяющих оценить текущий (частный) износ, а также относительную износостойкость

трибосопряжения $k_{\Delta G}$ при изменении условий его нагружения, типа присадки к маслу и свойств изнашиваемых материалов. Ниже приведены зависимости износа от:

- коэффициентов трения

$$\Delta G_{\Sigma} = \text{const}, f_i^3; (k_{\Delta G})_f = (f_0/f_i)^3, \quad (8)$$

характеризующих износостойкость трибосопряжении, различающихся только присадками к базовому маслу и

$$\Delta G_{\Sigma} = \text{const}, (\tilde{f})^4; (k_{\Delta G})_f = (\tilde{f}_i/\tilde{f}_0)^4, \quad (9)$$

характеризующих износостойкость трибосопряжений с различными СК, неодинаковой микротвердостью и морфологией поверхностей трения;

- нормального давления

$$\Delta G_{\Sigma} = \text{const}, p_i^3; (k_{\Delta G})_p = (p_0/p_i)^3; \quad (10)$$

- микротвердости контртела

$$\Delta G_{\Sigma} = \text{const}, H_{\mu}^{-4}; (k_{\Delta G})_{H_{\mu}} = (H_{\mu}/H_{\mu 0})^4; \quad (11)$$

- температуры

$$\Delta G_{\Sigma} = \text{const}, T^4; (k_{\Delta G})_T = (T_0/T_i)^4, \quad (12)$$

в предположении, что p_i и v_i , в соотношении (7) линейно связаны с тепловой энергией в зоне трения.

В формулах (8)—(12) текущие (неизвестные) значения параметров с индексом i сопоставляются с их известными значениями, обозначенными индексом "0".

Соотношения (8)—(12) получены для случая линейной зависимости износа от продолжительности испытаний, т. е. при соотношении

$$\Delta G_{\Sigma} = \text{const}_8 t_i^k, \quad (k \approx 1,0) \quad (13)$$

предполагающим протекание изнашивания на микроскопическом масштабном уровне в пределах глубины упругопластической зоны на поверхностях трения, не превышающей 5...10 мкм. При $k > 1$ имеет место переход от мезо- к макромасштабному уровню внешнего нагружения и к повышенной скорости изнашивания, а при $k < 1$, наоборот, скорость изнашивания сначала достигает максимума, а затем снижается вплоть до второй бифуркационной точки на кривой $\Delta G(t)$ характеризующей переход от мезо- в макромасштабный режим изнашивания.

Вывод. Для оценки износостойкости трибосопряжении при трении скольжения предложена общая структурно-энергетическая модель, учитывающая влияние на процессы изнашивания мощности трения, давления и скорости скольжения, коэффициентов трения, температуры в зоне трения, а также комплекс физико-механических свойств изнашиваемых

материалов, определяющих в совокупности критическую плотность потока энергии (мощности) деформации, контролирующую сопротивление материалов изнашиванию на различных масштабных уровнях внешнего нагружения.

Обозначения

const_{1-10} — опытные константы; $E_{\text{упр}}$ и $E_{\text{пл}}$ — предельная энергоемкость материалов при изнашивании от действия динамических напряжений и деформаций в упругой и упругопластической областях нагружения; $E_{\text{уд}}$ — удельная энергоемкость изнашиваемого материала, включающая упругую и пластическую составляющие; $k_{\Delta G}$ — относительная износостойкость; f — коэффициент трения; H_{μ} — микротвердость; $L_{\text{тр}}$ — путь трения; m — показатель степени; n — параметр, дискретно изменяющийся при смене масштабных уровней изнашивания; p — давление; T — температура; t_i — продолжительность испытаний; $w_{\text{вн}}$ — плотность потока внешней энергии; $w_{\text{тр}}$ — плотность мощности трения; w_i — плотность потока энергии; $\bar{W}_{kr}$ — осреднению в продуктах изнашивания критическая плотность потока энергии деформации; J — скорость изнашивания; ΔV_{Σ}^* — общий объемный износ; $v_{\text{кр}}^{\text{упр}}$ и $v_{\text{кр}}^{\text{пл}}$ соответствующие критические скорости динамического нагружения; v — скорость скольжения; w_i — частота нагружения некоторого циклически деформируемого объема материала на поверхностях трения; ΔG — потеря массы.

Во введении не указана СК «Ресурс М», содержащая тонкодисперсный геомодификатор трения – гидросиликат магния (серпентинит), патент N2247768 от 10.03.2005, превосходящая по эффективности (работоспособности) в трибосопряжениях все СК с перечисленными выше присадками отечественного и зарубежного производства [8, 10]: бронзовая медаль на Всемирном «Конкурсе Лепин» в Париже в 2006 г. Новой СК «Ресурс М» посвящена статья в предыдущем номере журнала «ТИС» (N 74, март 2018 г.).