

**А.Г. ПРИЙМАКОВ**, к.т.н., профессор ХГТУСА, г. Харьков  
**А.В. УСТИНЕНКО**, к.т.н., доцент НТУ "ХПИ", г. Харьков  
**В.Н. СТАДНИЧЕНКО**, канд. техн. наук, профессор НАУ, г. Киев

**СТРУКТУРНАЯ ПРИСПОСОБЛИВАЕМОСТЬ  
МАТЕРИАЛОВ ЗУБЧАТЫХ ПАР –  
КЛЮЧ К СОЗДАНИЮ КВАЗИБЕЗИЗНОГО ТРЕНИЯ**

Розглянуто створення фізичної моделі структурної пристосованості, що описує лінійні і нелінійні процеси в зубчастих трибологічних системах для оптимізації процесів тертя, аж до отримання режиму квазібездозноного тертя.

Creation of physical model of structural adaptability, describing linear and nonlinear processes in the toothed tribologies systems for optimization of friction processes is considered, up to the receipt of the kvazi-nonwear friction mode.

**Введение.** Минимальные принципы и устойчивость явления структурной приспособливемости (СП) конструкционных материалов описаны в работах [1...4].

Целью данной статьи служит создание физической модели СП, описывающей линейные и нелинейные процессы в зубчатых трибосистемах (ТС) для оптимизации процессов трения в них, вплоть до получения режима квазибездозноного трения.

**Физическая модель СП.** Описанный ниже механизм явления СП показывает, что при этом явлении минимальные принципы проявляются в форме минимизации эффективного объема всех видов взаимодействия твердых тел и среды при трении (деформационного, химического, электромагнитного и др.), что описывается физической моделью (рисунок 1), полученной в результате анализа теоретических и экспериментальных исследований [5...9].

Этот принцип может быть записан в виде

$$\int_V \frac{\Delta E(V)}{A} dV = \min, \tag{1}$$

и иллюстрируется схемой на рисунке 2, где направление  $z$  является нормалью к поверхности трения, линией 1 показано приращение внутренней энергии при структурной приспособливемости, локализованной в зоне 1 первичных структур; линией 2 ограничена область приращения внутренней энергии при других процессах трения (повреждаемости).

Следствиями принципа являются условия

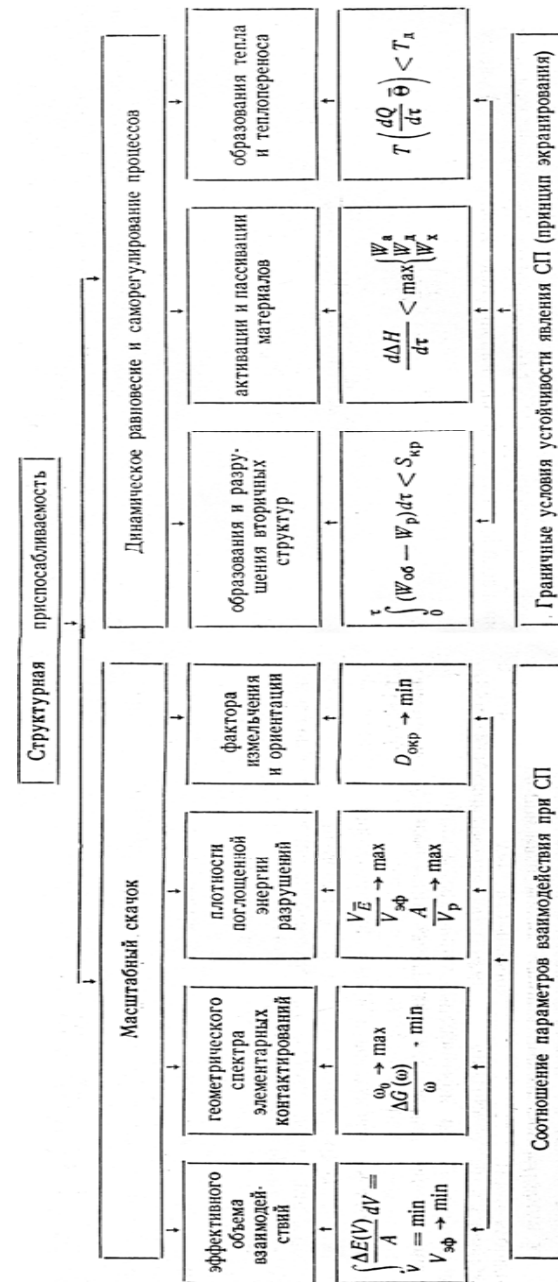


Рисунок 1 – Физическая модель СП при трении в зубчатых парах

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{эф}} &\rightarrow \min; \\ \frac{A}{V_p} &\rightarrow \max; \\ \frac{V_{\bar{E}}}{V_{\text{эф}}} &\rightarrow \max, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $V_{\text{эф}}$  – эффективный объем взаимодействий;  $V_p$  – объем разрушенного материала;  $V_{\bar{E}}$  – объем материала, поглотившего энергию  $\bar{E}$ , близкую к предельной.

Таким образом, при явлении СП происходит масштабный и энергетически скачок, состоящий в локализации эффективного объема  $V_{\text{эф}}$  и достижения в этом объеме предельной энергонасыщенности разрушаемой фазы, что реализуется путем перехода материала к метастабильному состоянию, соответствующему максимальной прочности.

Экспериментально установлено, что удельная работа разрушения при СП на несколько порядков выше, чем при других процессах трения [1...3].

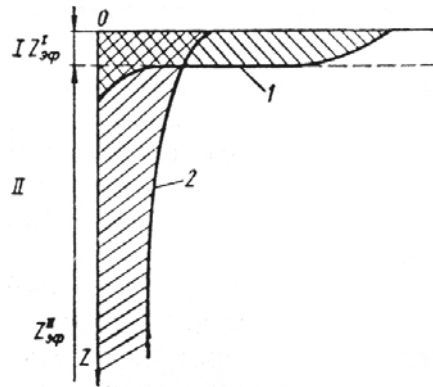


Рисунок 2 – Схема распределения поглощенной энергии при структурной приспособляемости (1) и других процессах трения (2):  
 $z_{\text{эф}}$  – эффективная толщина вторичных структур

Минимальные принципы внешнего трения при явлении СП также проявляются и в соответствующем изменении геометрии поверхности раздела контактирующих тел. При переходе от состояния поверхностей после технологической обработки к состоянию СП происходит масштабный скачок геометрического спектра элементарных контактирований. Если в первом случае дискретность фактического контакта главным образом проявляется на уровне микронеровностей, то при СП дискретность контактирования определяется

размерами субмикронеровностей порядка сотен и тысяч нанометров (того же порядка, что и толщина пленок вторичных структур и протяженность области когерентного рассеивания). Это соответствует смещению частот геометрического спектра в сторону высоких частот, т.е. нижняя частота спектра  $\omega_0 \rightarrow \max$ . При этом уменьшаются и амплитудные значения спектра или его "энергия"  $\Delta G(\omega)$ , соответствующая частоте  $\omega$ , т.е.  $\Delta G(\omega)/\omega \rightarrow \min$ .

Минимизация трения и износа при СП реализуется также посредством резкого уменьшения факторов ориентации. В данном случае в качестве фактора ориентации выбрана дисперсия области когерентного рассеивания  $D_{\text{окр}}$ , которая при СП стремится к минимуму. Направление ориентации совпадает с направлением относительного перемещения.

Граничные условия существования СП представляют принцип экранирования, состоящий в том, что скорости деструктивных и восстановительных процессов в зоне трения должны быть согласованы таким образом, чтобы обеспечивалась достаточная экстенсивность пассивирования поверхностей трения (площадь  $S_{\text{кр}}$ ), а вероятность встречи активных (ювенильных) участков была пренебрежимо мала. Этот принцип позволяет записать следующие граничные условия [8, 10]:

$$\int_0^t (W_{\text{об}} - W_p) d\tau > S_{\text{кр}}; \quad (3)$$

$$\frac{d\Delta H}{d\tau} < \max\{W_a, W_d, W_x\}; \quad (4)$$

$$T\left(\frac{dQ}{d\tau}, \bar{\Theta}\right) < T_d. \quad (5)$$

Условие (3) накладывает ограничения на скорости образования  $W_{\text{об}}$  и разрушения  $W_p$  вторичных структур. Условие (4) состоит в требовании того, чтобы одна из скоростей возможных пассивирующих процессов (адсорбции  $W_a$ , диффузии  $W_d$ , химических реакций  $W_x$  и т.п.) была выше скорости активации – приращения энтальпии  $d\Delta H/d\tau$  трансформируемого объема  $V_{\text{эф}}$ . Условие (5) накладывает ограничения на температуру поверхностей трения  $T$ , зависящую от скорости теплообразования  $dQ/d\tau$  и теплофизических констант  $\bar{\Theta}$  системы; эта температура не должна быть выше критической температуры деструктивных процессов  $T_d$  (десорбции, химического разложения и т.п.).

**Экспериментальное исследование структурной приспособляемости.** Анализ экспериментальных данных [7, 9, 10] по исследованию явления СП позволяет сделать следующие количественные оценки параметров:

$$\left. \begin{aligned} z_{\text{эф}} < 100 \text{ нм}; \\ \int_0^{z_{\text{эф}}} \frac{\Delta E(z)}{A} dz < 0,01; \\ \frac{A}{V_p} > 10^6 \text{ Дж/мм}^3; \\ \frac{V_E}{V_{\text{эф}}} > 0,9. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Например, для металлических материалов интенсивность поверхностного разрушения при СП имеет порядок  $10^{-2} \text{ мм}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{км})$ .

Эти оценки могут быть приняты для расчета интенсивности нормального (допустимого) износа и использованы для оптимизации процессов трения.

С целью экспериментального подтверждения возможности структурной приспособляемости материалов зубчатых колес, а также условий ее возникновения, авторами был проведен комплекс трибологических исследований на компьютеризованном трибологическом комплексе, описанном в [11]. Процесс трения зубчатых пар имитировался на машине трения 2070СМТ в двух характерных для зубчатых передач режимах: трение качения и трение качения с 20% проскальзыванием, а также с варьированием наиболее типичных для зубчатых пар машинных масел: Б-3В, МС-8П, ИПМ-10, ИГМ-10.

На рисунке 3 показана структурная схема программного нагружения образцов пар трения в условиях регулирования теплового потока, т.е.  $S_i \rightarrow \text{var}$ ; отметим, что таким способом варьируется и уровень структурной энтропии  $E_i \approx S_i$ .

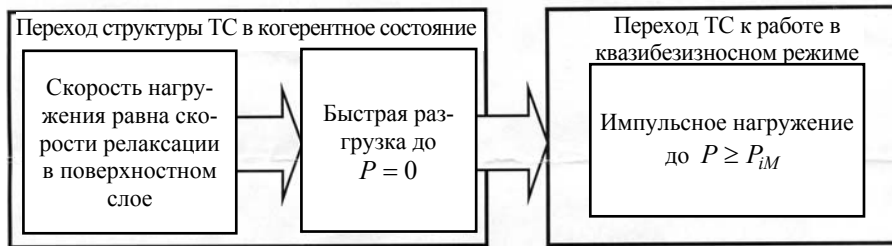


Рисунок 3 – Программное нагружение для моделирования квазибездозносного трения:  $P$  – давление в зоне контакта зубчатой пары

На рисунке 4 показано изменение во времени избыточной энтропии  $\delta^2 S$  в случае асимптотической устойчивости (1), нейтральной устойчивости (2) и неустойчивости (3) для пары из материалов Сталь 30ХНМА/Сталь 40Х при условиях:  $V = \text{const}$ ,  $P = \text{const}$ , масло – Б-3В.

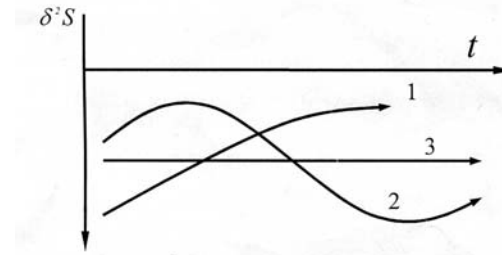


Рисунок 4 – График зависимости  $\delta^2 S = f(t, \lambda)$ :

$\delta_x P < 0$  при  $t \geq t_0$  – стойкое стационарное состояние;  $\delta_x P > 0$  при  $t \geq t_0$  – асимптотически стационарное состояние;  $\delta_x P(\lambda_c) = 0$  при  $t \geq t_0$  – нейтральная стойкость;  $\lambda_c$  – критическое значение  $\lambda$  ( $\lambda$  – мера отдаленности от равновесия)

На рисунке 5 для тех же образцов и тех же условий, но при  $S_e \rightarrow \text{var}$  показано, как регулированием теплового потока обеспечивается переход от самоорганизации ТС к ее СП, причем интенсивность изнашивания  $I = f(t)$  во времени изменяется скачкообразно (ступенчато).

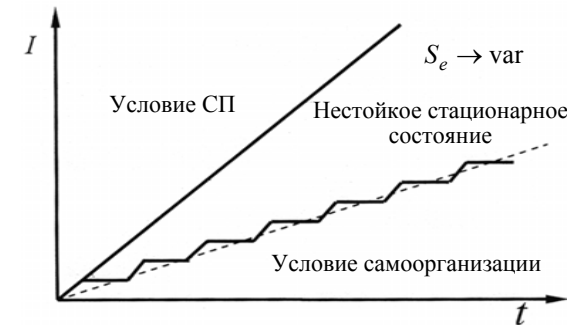


Рисунок 5 – График зависимости  $I = f(t)$

На рисунке 6 а,б показана эволюционная ветвь изменения противоположных свойств трибосопряжения Сталь 30ХГСА/Сталь 45, испытанного в среде масел Б-3В, МС-8П, ИПМ-10, ИГМ-10 при  $V = \text{const}$ ,  $P = \text{const}$ .

На основании теоретических и экспериментальных исследований авторы разработали представленную на рисунке 7 методику исследований процессов эволюции ТС вплоть до саморегулирования  $dS/dt$ ;  $dH/dt$  ( $H$  – энтропия ТС).

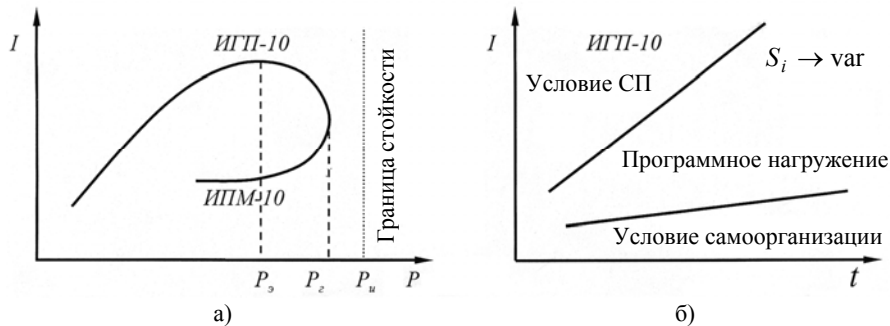


Рисунок 6 – Практическая реализация квазибездозного трения пары Сталь 30ХГСА/Сталь 45:

а) график зависимости  $I = f(t)$ ; б) график зависимости  $I = f(t)$  при  $S_i \rightarrow \text{var}$

**Выводы.**

1. Теория и практика структурной приспособляемости конструкционных материалов зубчатых пар позволяет вплотную подойти к формированию условий квазибездозного трения в трибосистемах зубчатых пар.
2. Создана мотивированная физическая модель СП в зубчатых парах.
3. Впервые сделаны количественные оценки параметров трения в зубчатых парах, в частности, интенсивности допустимого износа, что позволяет управлять процессом структурной приспособляемости материалов зубчатых пар.
4. Разработана методика исследования процессов эволюции ТС вплоть до саморегулирования в них.

**Список литературы:** 1. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. и др. Поверхностная прочность материалов при трении. – Киев: Техника, 1976. – 296с. 2. Расчет износостойкости трущихся поверхностей машин / Под ред. А.А. Благоурава. – М.: ВНИИНМАШ, 1972. – 296с. 3. Иванова В.С. Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов. – М.: Наука, 1992. – 160с. 4. Коллинз Д. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание. Предотвращение: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 615с. 5. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 510с. 6. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 344с. 7. Бершадский Л.И. Основы теории структурной приспособляемости и переходных состояний трибосистем и ее приложение к задачам повышения надежности зубчатых и червячных передач: Автореф. дис... докт. техн. наук: 05.02.02. – Москва, 1982. – 48с. 8. Реология. Теория и приложения / Под ред. Э. Эйпиха: Пер. с англ. – М.: Инстр. лит-ра, 1962. – 822с. 9. Стадниченко В.М. Механизм формирования вторичных структур пар трения на базе методу електронно-акустичної емісії: Автореф. дис... докт. техн. наук: 05.02.04. – К.: НАУ, 2008. – 47с. 10. Приймаков О.Г., Градиський Ю.О. Теорія зносостійкої витривалості та її застосування в машинобудуванні. – Харків: Оберіг, 2009. – 386с. 11. Приймаков А.Г., Стадниченко Н.Г. О механизмах структурной приспособляемости при абразивном изнашивании материалов // Проблемы трибологии: Междунар. научн. журнал. – 2004. – №2. – С.113–121.

Поступила в редколлегию 25.04.09

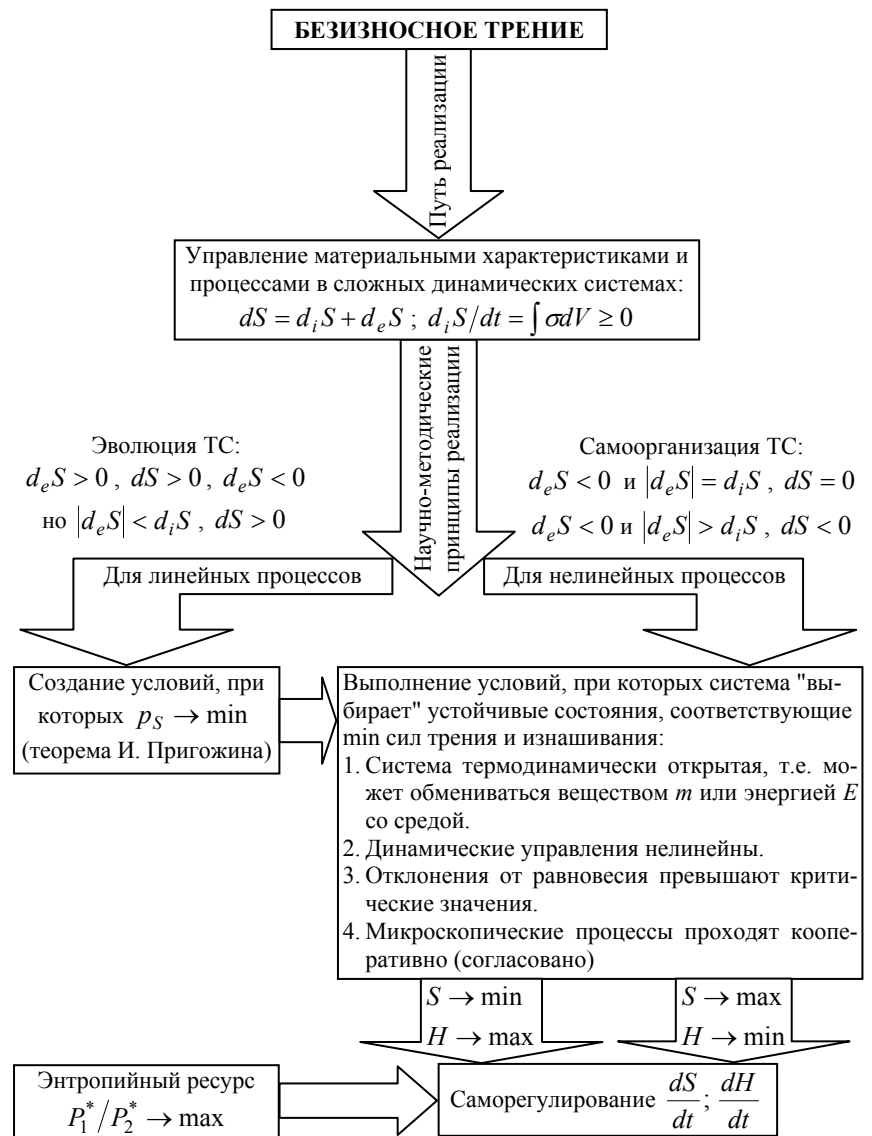


Рисунок 7 – Методика исследований процессов эволюции в трибосистемах