

## ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО ИЗНАШИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

А.В. Баранов, В.А. Вагнер

Исследование процессов изнашивания сопряжений со взаимодействующими стальными поверхностями представляет большой практический и научный интерес, обусловленный их широким использованием в узлах трения современных машин. Существующие же на данный момент методы прогнозирования интенсивности поверхностного разрушения при трении являются весьма приближенными и, несмотря на многообразие процессов происходящих во фрикционной зоне, описывают лишь механическую сторону этого явления.

В настоящее время все еще остается спорным вопрос о механизме изнашивания трущихся поверхностей металлов. С нашей точки зрения, в любых непатологических случаях трения стальных трибосопряжений реализуется механохимический механизм изнашивания. Доказательством этому являются результаты многочисленных экспериментов, выполненных нами, по влиянию давления и состава окружающей газовой среды на трибологические показатели смазываемых пар трения [1]. Исследования показали, что износ всегда падает с уменьшением количества кислорода, а при его очень низкой концентрации наступает заедание. Эти данные согласуются с результатами работ [2, 3], где экспериментально доказана неработоспособность химически инертных смазочных сред в отсутствии кислорода.

Доказательством окислительного механизма изнашивания являются также полученные авторами экспериментальные зависимости массового износа смазываемых пар трения типа сталь-сталь в функции поглощения сопряжением кислорода воздуха [1]. Из рисунка 1 видно, что износ пропорционален количеству поглощенного окислителя, и стехиометрический состав продуктов изнашивания не зависит от номинальных контактных давлений ( $P_a$ ). Исследования поверхностей трения с помощью методов оже-электронной спектроскопии (рисунке.2) так же свидетельствует о значительной интенсификации окислительных процессов, причем окислы - нестехиометрического состава. О наличии окисных соединений также свидетельствуют результаты измерений слаботочных переходных электросопротивлений [1].

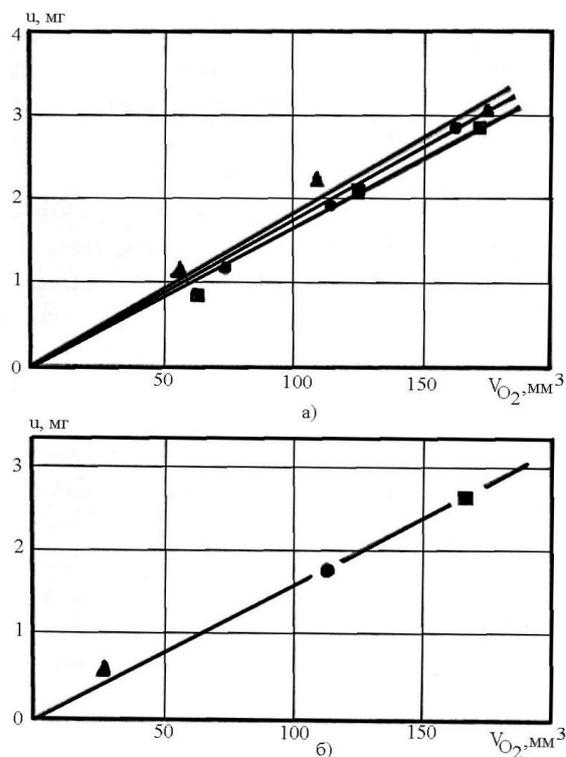


Рисунок 1 – Зависимость массового износа в функции объема поглощенного кислорода: а – в течении эксперимента, б – при различной нагрузке за 3 часа работы:  
■ –  $P_a=5$  МПа ● –  $P_a=2$  МПа, \* –  $P_a=0,5$  МПа,

В настоящей работе оценка скорости окислительного изнашивания рассмотрена с позиций кинетики механохимических процессов. Также рассмотрена возможность управления этими процессами.

В основе механизма окислительного изнашивания лежит трибохимическая реакция между кислородом, растворенным в смазочном материале, и механически активируемыми поверхностями трения металлов. В результате такой реакции на трущихся поверхностях образуются пленки окислов (вторичные структуры), препятствующие адгезионному взаимодействию трущихся элементов и являющиеся одновременно объектом разрушения при изнашивании. По мере расхода окислителя на процесс взаимодействия с трущимся металлом смазочный материал вновь пополняется кислородом за счет контактирования с атмосферой.

## ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО ИЗНАШИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

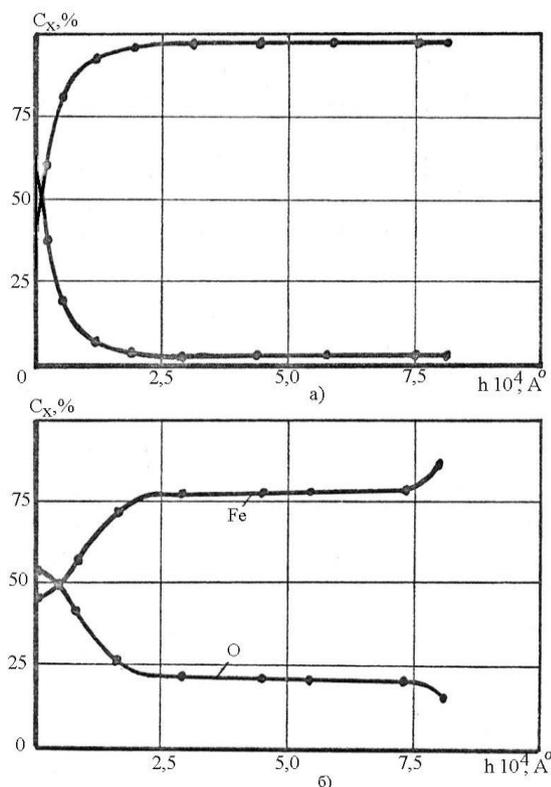


Рисунок 2 – Зависимость атомных концентраций кислорода и железа в функции расстояния от поверхности: а – до приработки, б – после приработки

Поскольку в стационарном режиме изнашивания процессы образования и разрушения вторичных структур находятся в динамическом равновесии [3], скорость изнашивания  $\gamma$  трущегося материала может быть аналитически выражена через значения интенсивности трибоокислительного процесса, по скорости поглощения кислорода поверхностями трения,

$$\gamma = \mu \cdot m \cdot w_p / \rho \quad (1)$$

где  $\mu$  — молярная масса кислорода;  $\rho$  — плотность металла;  $m$  — коэффициент, равный массовому отношению металла и кислорода, содержащихся в продуктах износа;  $w_p$  — скорость реакции окисления (скорость поглощения молекулярного кислорода).

Для определения скорости взаимодействия окислителя с материалом сопряжений может быть использовано основное уравнение химической кинетики.

$$w_p = A \cdot C^n, \quad (2)$$

где  $A$  — постоянная, характеризующая химическую активность материала;  $C$  — концентрация окислителя;  $n$  — кинетический поряд-

док реакции. Как показали исследования [4], интенсивность химического взаимодействия на активированных трением поверхностях, покрытых смазочным материалом, лимитируется исключительно доставкой окислителя к месту реакции. Другие стадии данного гетерогенного процесса (адсорбция, диссоциация, удаление продуктов реакции и т.д.) протекают намного активнее.

При указанных условиях и достаточно низких концентрациях кислорода скорость окисления металлов прямо пропорциональна концентрации окислителя в зоне химического взаимодействия [4], причем при толщине окислов, не превышающих нескольких микрометров, их скорость роста практически не зависит от времени. Принимая во внимание, что равновесная растворимость кислорода в смазочных материалах при атмосферных условиях очень невысока, и критическая толщина вторичных структур при трении не превышает нескольких сот ангстрем [3], можно принять  $n=1$  вне зависимости от времени.

Константа  $A$  скорости окисления в условиях термической активации, как правило, увеличивается с ростом температуры. Однако при механической активации поверхностей, скорости реакций на несколько порядков выше и в широком диапазоне температур, перекрывающем область допустимых термических условий работы большинства смазочных материалов, практически неизменны [4].

Из уравнения (2) видно, что скорость химической реакции пропорциональна концентрации реагента. Однако реализация окислительного процесса возможна не для сколь угодно малых значений  $C$ , а только в том случае, когда величина последней превышает некоторое критическое значение  $C_{кр}$ , соответствующее концентрации диссоциации окислов. В противном случае защитные окисные пленки образовываться не будут, что создаст условия для адгезионного схватывания и повреждаемости поверхностей трения. Таким образом, условие реализации окислительного изнашивания (условие внешнего трения) может быть записано в виде

$$C > C_{кр} \quad (3)$$

Рассмотрим процесс изнашивания, характерный для пары трения (рисунке 3), имеющей однонаправленное движение и смазываемой пластичным смазочным материалом (ПСМ), при условии, что один из элементов пары имеет возможность непосредственно контактировать своей рабочей поверхностью с окружающей средой (поверхность

1), а поверхность трения другого элемента постоянно находится в контакте (поверхность 2). Использование ПСМ обусловлено неизменностью формы слоя без воздействия внешних нагрузок. Следует заметить, что механизм доставки окислителя к трущимся поверхностям в зоне трения и вне ее различен, так как ПСМ в условиях фрикционного контакта способен течь подобно жидкости, а вне зоны трения имеет свойства твердого тела. В первом случае массоперенос является конвективным, а во втором – диффузионным.

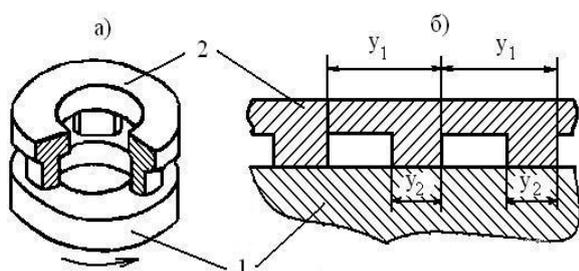


Рисунок 3 – Схема трибоспряжения

В соответствии с первым и вторым законами Фика реакции между кислородом и поверхностью трения вне зоны трения (рис. 4, а) будет соответствовать следующая система уравнений:

$$\begin{cases} C_1^*|_{x=0} = C_0; \\ \partial C_1^* / \partial t = D \partial^2 C_1^* / \partial x^2; \\ dC_1^* / dx|_{x=a} = -w_{p1} / D; \\ C_1^*|_{t=0} = C_2 \end{cases} \quad (4)$$

где  $C_0$  — равновесная растворимость кислорода в смазочной среде;  $D$  — коэффициент диффузии;  $t$  — текущее время нахождения смазочного материала вне зоны трения;  $x$  — координата;  $a$  — толщина смазочного слоя на поверхности трения вне контакта;  $C_1$  — концентрация кислорода в смазочном материале вне фрикционной зоны;  $C_2$  — концентрация кислорода в смазочном материале при выходе его из зоны трения.

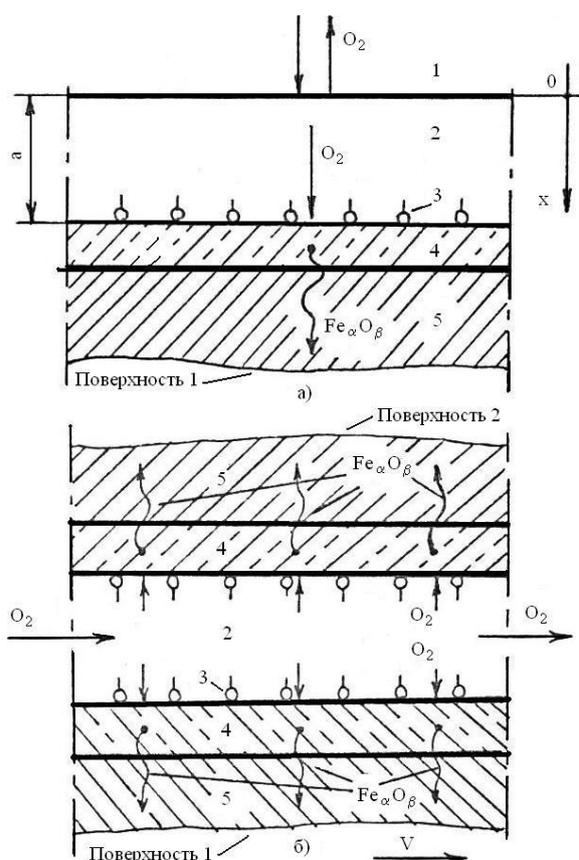


Рисунок 4 – Схема трибоокислительного процесса: а – вне зоны трения, б – в зоне трения: 1 – окружающая среда, 2 – смазочная среда, 3 – адсорбированные слои, 4 – вторичные структуры, 5 – основной материал

Рассматривая баланс окислителя в условиях фрикционного контакта (рис. 4,б), получим систему уравнений, описывающую трибоокислительную реакцию в зоне трения:

$$\begin{cases} (w_{p1} + w_{p2}) \cdot v = dC_2^* / dy; \\ C_2^*|_{y=0} = C_1 \end{cases} \quad (5)$$

где  $w_{p1}$ ,  $w_{p2}$  — скорости реакций окисления поверхностей 1 и 2 соответственно;  $C_1, C_2^*$  — концентрации кислорода в смазочном материале при входе его во фрикционную зону и в самой зоне трения соответственно;  $y$  — координата;  $v$  — скорость скольжения. Решения систем уравнений (4) и (5) относительно концентрации окислителя с учетом (2) соответственно будут иметь вид

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО  
ИЗНАШИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

$$C_{1(x,t)}^* = C_0 - \frac{x \cdot A_1 C_{1(x,t)}^*}{D} - \frac{8a}{\pi^2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(1)^{n+1} \cdot \frac{A_1 C_{1(x,t)}^*}{D} + \frac{\pi(1+2n)}{2a} (C_0 - C_2)}{(1+2n)^2} \times \sin\left[\frac{\pi(1+2n)}{2a} x\right] \exp\left[-\frac{\pi^2(1+2n)^2}{4a^2} Dt\right]$$

где

$$C_1 = a^{-1} \int_0^{a_1} C_{1(x,t)}^* dx; \quad C_2 = C_{2(y_2)}^*$$

$y_2$  – длина дорожки трения поверхности 2;  $t_1$  – максимальное время нахождения смазочного материала вне зоны трения. Тогда средние концентрации кислорода в смазочном материале, находящемся в зоне контактирования и вне ее у поверхности трения, соответственно определяются из выражений

$$\bar{C}_2^* = y_2^{-1} \cdot \int_0^{y_2} C_{2(y)}^* dy = \frac{C_1 va}{(A_1 + A_2) y_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{A_1 + A_2}{va}\right) \right]; \quad (6)$$

$$\bar{C}_1^* = t_1^{-1} \cdot \int_0^{t_1} C_{1(a,t)}^* dt. \quad (7)$$

На основании (1) скорость изнашивания поверхностей 1 и 2 можно найти из уравнений

$$\gamma_1 = \frac{\mu m A_1}{\rho} \cdot \left[ -k_e \bar{C}_1^* + k_e \bar{C}_2^* \right];$$

$$\gamma_2 = \frac{\mu m A_2}{\rho} \cdot \bar{C}_2^*;$$

где  $k_e$  – коэффициент перекрытия поверхностей трения ( $k_e = y_2/y_1$ );  $y_1$  – длина дорожки трения поверхности 1.

Вывод соотношений для определения параметров  $A_1$  и  $A_2$  производился с использованием положений молекулярно-механической теории трения, модельных представлений о контактировании шероховатых тел и на основе, полученной Г.Хайнике " трибохимической энергетической зависимости" [4]. Последняя устанавливает линейную связь между интенсивностью протекания трибохимических процессов на поверхностях металлов и скоростью диссипации механической энергии, расходуемой на деформирование поверхностных слоев. Приведем конечные выражения для определения величин  $A_1$  и  $A_2$ :

$$A_1 = 2,5k_1 \cdot \Theta^{0,3} \cdot p_a^{1,3} \cdot \kappa_B \cdot v;$$

$$A_2 = 2,5k_2 \cdot \Theta^{0,3} \cdot p_a^{1,3} \cdot v,$$

где  $\Theta$  – упругая постоянная;  $p_a$  – номинальное давление в сопряжении;  $k_1, k_2$  – трибохимические коэффициенты соответственно для поверхностей 1 и 2.

На основании условия равенства расходов смазочного материала в зоне трения и вне ее, а также используя соотношения для определения эффективного зазора в сопряжении шероховатых тел, выражение для толщины смазочного слоя можно записать в виде

$$a = 2,5R_a \left[ -10 \left( \frac{\Theta}{p_a} \right)^{28} \right],$$

где  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профилей поверхностей.

Учитывая, что минимальная концентрация кислорода в смазочном материале соответствует месту его выхода из зоны трения, условие внешнего трения представим в виде  $C_2 > C_{кр}$ .

Таким образом, в результате проведенных теоретических исследований получена обобщенная математическая модель процесса окислительного изнашивания трибосистем с неравновеликими контактирующими поверхностями. Сравнение результатов расчетов и экспериментов по определению скоростей изнашивания торцевых сопряжений сталь 45 + сталь 45, смазываемых ПСМ Литол-24, показало, что расхождение между ними не превышает 50%. Это является приемлемым для расчетов на износ. Опытным путем установлено, что для указанной системы материалов пар трения  $k = 2 \cdot 10^{-2} \text{ МПа}^{-1}$ ,  $C_{кр} = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ моль/м}^3$ ,  $C_0 = 0,35 \text{ моль/м}^3$ , а стехиометрический состав вторичных структур соответствует окисному соединению  $\text{FeO}_{0,3}$  с недостатком по кислороду. На рисунке 5 приведена обобщенная теоретическая зависимость скорости изнашивания торцевого сопряжения от нагрузки и длины зоны фрикционного контакта. Видно, что размер контактной зоны, при прочих равных условиях, оказывает значительное влияние на износ и нагрузочную способность трибосопряжений. Однако, в существующих на сегодняшний день методах расчета на износ этот фактор, как правило, не учитывается. В тоже время, понижение нагрузочной способности при одновременном улучшении износостойкости поверхностей трения с увеличением контактной поверхности является экспериментальным фактом [5]. Ответственным за это явление является кислород, концентрация которого

го понижается в "закрытых" парах трения. С данных позиций находит объяснение и факт регулярных периодических колебаний трибологических параметров пар трения в предзадином состоянии, установленный нами и рядом других исследователей.

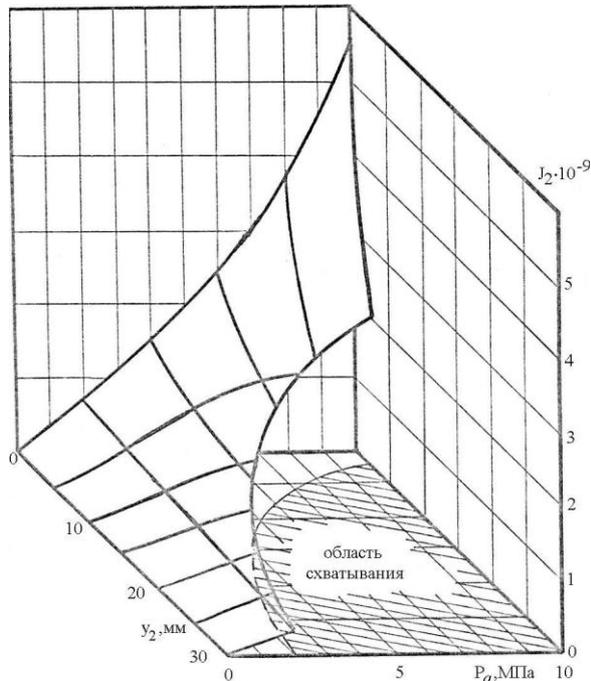


Рисунок 5 – Зависимость скорости изнашивания от длины контактной зоны  $y_2$  и номинального давления  $P_a$

Экспериментально установлено, что максимальная износостойкость при минимальной склонности к заеданию трущихся поверхностей наблюдается в трибосопряжениях, для которых выполняется условие  $C_2 \approx 2C_{кр}$ .

Полученная модель применима для описания процессов изнашивания узлов, смазываемых ПСМ, однако расчетные соотношения могут быть значительно упрощены как в случае применения жидких инактивных смазок, так и в случае отсутствия последних. В качестве примера практического использования данный метод был успешно апробирован [6, 7] для описания процессов изнашивания на-

правляющих однонаправленного движения и прямозубых цилиндрических зубчатых колес.

Полученные в работах [8,9] соотношения показывают возможность управления износостойкостью трибосопряжений путем изменения конструктивных параметров, что позволяет при проектировании узлов трения выбрать оптимальную по износостойкости конструкцию.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов А.В., Барсуков М.В. Исследование механизма изнашивания стальных поверхностей. // Расчет, диагностика и повышение надежности элементов машин. Барнаул.: АГТУ, 2001. Вып. 3. С. 86 –90.
2. Аксенов А.Ф. Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях. М.: Машиностроение, 1977. 152 с.
3. Костецкий Б.И. О роли вторичных структур в формировании смазочного действия и изнашивания // Трение и износ. 1980. N4. С. 622-677.
4. Хайнике Г. Трибохимия М.: Мир, 1987. 584с.
5. Лебедев В.М., Баранов А.В. Работоспособность сопряжений сталь-сталь // Трение и износ. 1988. N6. С. 1040-1046.
6. Вагнер В.А., Баранов А.В., Алексенко С.И. Явления самоорганизации при граничном трении. // Расчет, диагностика и повышение надежности элементов машин. Барнаул.: АГТУ, 2000. Вып. 2. С. 4 –9.
7. Лебедев В.М., Баранов А.В. Расчеты повышения износостойкости узлов трения. //Проблемы трения и изнашивания. 1989. Вып.36. С. 26-33.
8. Лебедев В.М., Баранов А.В. Об использовании в узлах трения пластичных смазочных материалов //Долговечность трущихся деталей машин. 1989. Вып.4. С. 30-36.
9. Вагнер В.А., Баранов А.В. Способы управления изнашиванием зубчатых колес. // Расчет, диагностика и повышение надежности элементов машин. Барнаул.: АГТУ, 2004. Вып. 5. С. 47 – 50.

*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова*