

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

А.В. Баранов, В.А. Вагнер, С.В. Тарасевич, Д.В. Радченко

*Результаты независимых экспериментальных исследований доказывают механохимический механизм изнашивания металлических фрикционных поверхностей. Это открывает возможность описывать и исследовать этот процесс с позиций кинетики трибохимических реакций.*

*Results of independent experimental researches prove the mechanical-chemical mechanism of wear process of metal frictional surfaces. It opens possibility to describe and investigate this process as tribochemistry reaction view.*

Вопрос исследования механизма изнашивания стальных поверхностей является ключевым в проблеме прогнозирования долговечности трущихся поверхностей, и ему в последнее время уделялось весьма пристальное внимание.

В настоящее время наиболее полно разработаны три теории процессов изнашивания, по-разному трактующие природу этого явления. Таковыми являются: атомно-молекулярная, усталостная и механохимическая концепции поверхностного разрушения при трении.

Согласно первой концепции, процесс изнашивания рассматривается как унос молекул с поверхности трения [1]. Широкого распространения эта теория не получила, так как указанные данные находятся в противоречии с экспериментальными данными о продуктах износа [2].

Концепции второго направления [3,4] основываются на усталостном механизме объемного разрушения поверхностей трения. Объектом разрушения являются микрообъемы основного материала.

На наш взгляд, данный механизм справедлив только для патологических режимов трения с повреждаемостью поверхностей и не свойственен для реально работающих пар трения.

В многочисленных работах (обзор в [5]) экспериментально доказано, что при непатологических режимах трения металлов, как правило, реализуется механохимический, окислительный механизм изнашивания. Сущность процесса заключается в том, что объектом разрушения является не сам материал поверхности, а пленки химических соединений – окислы, образующиеся в результате интенсивной механической активации по-

*ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1-2 2009*

верхностей металла, пассивируемой окислителем из окружающей среды с образованием окисного соединения.

Пленки, кроме как объекта разрушения, также выполняют экранную функцию, защищая основной материал от разрушения. При этом они разрушаются сами, достигнув предельной величины. По мере разрушения они регенерируются вновь под воздействием внешней механической активации и наличия реагентов внешней среды. Динамическое равновесие в образовании и разрушении пленок определяют износные характеристики сопряжений.

Концепция механизма этого явления развита в трудах Б.И. Костецкого [6] и других исследователей, и подтверждается результатами наших экспериментов.

В то же время, многими авторами данный механизм воспринимается как частный случай изнашивания, не имеющий отношение к нормальным условиям эксплуатации пар трения.

Цель данного исследования доказать ведущую роль механохимического процесса в нормальных непатологических условиях работы кинематических пар.

Одним из доказательств явления механохимического изнашивания обычно служит химический анализ продуктов изнашивания.

На наш взгляд, достоверность указанного метода не является абсолютной, поскольку промежуток времени между исследованиями продуктов разрушения и отделением их от трущейся поверхности достаточно велик. За это время могут происходить значительные изменения в химическом составе частиц разрушения, подвергнутых значительной механохимической активации и действию внешней

среды. Хотя, как правило, они являются окислами с различной стехиометрией.

Сложность изучения механизма изнашивания заключается в невозможности использования традиционных средств контроля физико-химического состояния поверхностей во время протекания фрикционных процессов. В связи с этим, выяснение механизмов поверхностного разрушения осуществляется, как правило, на основании косвенных, текущих, методов исследований.

В данной работе исследования проводились с разных позиций, используя альтернативные методы физических исследований.

Исследованию подвергались сопряжения сталь 45 - сталь 45, смазываемые пластичным смазочным материалом Литол-24 испытываемые на машине трения МТТ (рис.1).

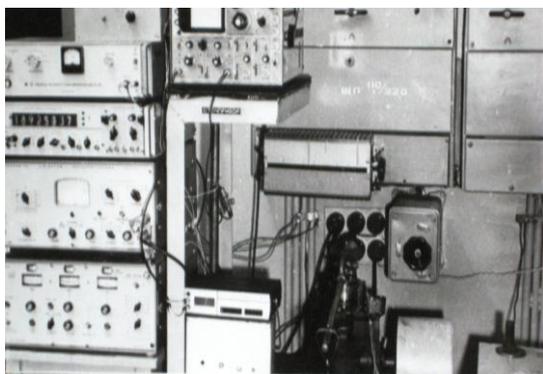


Рисунок 1 – Машина трения

В целях обеспечения режима граничного трения диапазон скоростей скольжения и нагрузок ограничивался значениями скорости скольжения  $V = 0, 1-0,4$  м/с и номинальными давлениями  $p_a = 0,5-5$  МПа.

Все известные виды изнашивания поверхностей при трении имеют ярко выраженные внешние признаки, что позволило автору [7] создать альбом внешних признаков, по которому можно определить вид поверхностного разрушения. Внешние признаки рабочих поверхностей исследуемых нами сопряжений на макро- и микроуровнях (рис.2), согласно [2], соответствуют окислительному изнашиванию вторичных структур, представляющих окислы нестехиометрического состава.

На основании использования термодинамической оценки и общих закономерностей процессов изнашивания Б.И. Костецким была обоснована энергетическая связь между работой сил трения и величиной износа. В результате этого им установлен критерий  $e^*$

оценки процессов поверхностного разрушения

$$e^* = E_{\text{тр}} / u_u,$$

где  $E_{\text{тр}}$  – работа, затрачиваемая на преодоление сил трения, Дж;  $u_u$  – изношенный объем, мм<sup>3</sup>.

Величина  $e^*$  для конкретных механизмов изнашивания и повреждаемости представлена в таблице 1.



а)



б)

Рисунок 2 – Внешний вид поверхности трения: а – на макроуровне (x13), б – микрофотография и интерферрограмма (x600)

Таблица 1 – Удельная работа, затрачиваемая на поверхностное разрушение

Вид повреждения поверхности	$e^*$ , $\frac{\text{Дж}}{\text{мм}^3}$
Окислительное изнашивание	$>10^5$
Абразивное изнашивание с трибохимическим разрыхлением	$10^4 - 10^5$
Адгезионное изнашивание (схватывание II рода)	$10^2 - 10^3$
Адгезионное изнашивание (схватывание I рода)	$10 - 10^2$
Абразивное изнашивание	$1 - 10$

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

Испытания исследуемых нами трибосопряжений показали, что величина  $e$  для указанного выше диапазона нагрузочно-скоростных факторов соответствует интервалу значений  $(0,2 \div 1) \times 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{мм}^3}$ , это свидетельствует о работе испытываемых пар трения в условиях окислительного изнашивания.

Важным следствием окислительного изнашивания (в отличие от других видов) является расход кислорода воздуха на окисление металла, находящегося в условиях фрикционного нагружения. На рисунке 3 приведены результаты определения износа металла по мере работы испытываемого трибосопряжения в зависимости от количества израсходованного воздуха.

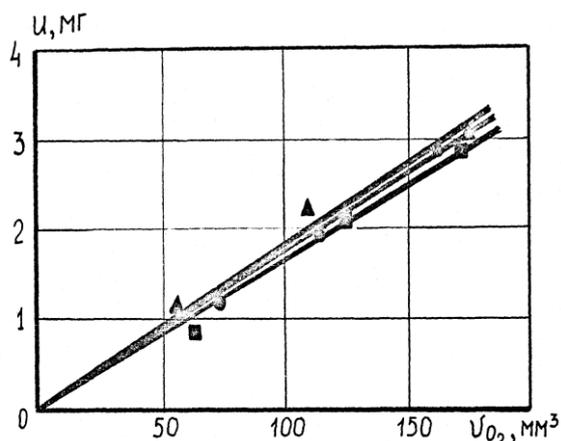


Рисунок 3 – Зависимость массового износа в функции объема поглощенного кислорода в течении эксперимента. Номинальная контактная нагрузка:  $\blacktriangle$  –  $p_a = 0,5$  МПа,  $\bullet$  –  $p_a = 2$  МПа,  $\blacksquare$  –  $p_a = 5$  МПа

Этими исследованиями установлено, что существует прямо пропорциональная зависимость между величиной износа за определенный промежуток времени и количеством поглощенного воздуха. Причем тангенс угла наклона прямых не зависит от внешней нагрузки, т.е. на единицу износа приходится одинаковое количество кислорода как при  $p_a = 0,5$  МПа, так и при  $p_a = 5$  МПа. Анализ полученных зависимостей изменения износа и израсходованного воздуха позволил установить линейную зависимость между износом и количеством израсходованного воздуха при различных нагрузках (рис.4).

Факт прямо пропорциональной зависимости между количеством изношенного металла и израсходованного воздуха дает основание утверждать, что при трении металлов на их поверхностях протекают в основ-

ном окислительные процессы, т.е. имеет место окислительный вид износа.

Исследования расхода кислорода воздуха производились на установке (рис. 5) по скорости движения капли жидкости в расходомерной трубке в условиях установившегося режима трения [5].

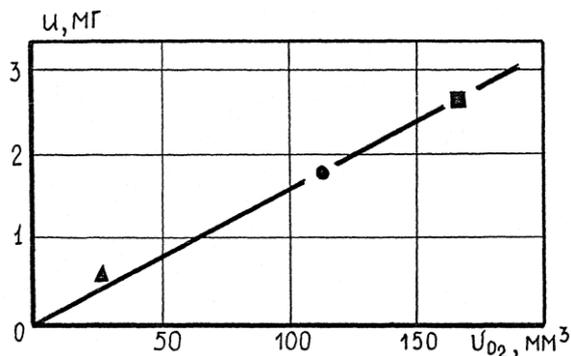


Рисунок 4 – Зависимость массового износа в функции объема поглощенного кислорода при различной контактной нагрузке при времени испытаний 3 часа:  $\blacktriangle$  –  $p_a = 0,5$  МПа,  $\bullet$  –  $p_a = 2$  МПа,  $\blacksquare$  –  $p_a = 5$  МПа

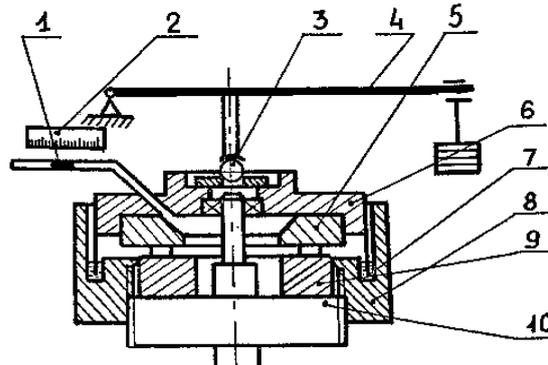


Рисунок 5 – Устройство для измерения расхода воздуха: 1 – капля жидкости; 2 – расходомерная шкала; 3 – шаровая опора; 4 – рычаг; 5 – образцы; 6 – оправка; 7 – гидравлический затвор; 8 – прижимная гайка; 10 – шпindel

Проведенные исследования показывают также независимость стехиометрического состава изнашиваемых вторичных структур от нагрузки и скорости скольжения. Для данного сочетания материалов трибосопряжений массовое отношение железа и кислорода равно 13, что соответствует окисному соединению нестехиометрического состава  $FeO_{0,3}$ .

Независимость состава вторичных структур от номинального контактного давления является вполне очевидным, поскольку

фактические давления на микроконтактах практически не зависят от внешней нагрузки.

В процессе исследований был использован оригинальный метод регистрации переходного электросопротивления контакта [8].

Особенностью применяемого метода исследований переходного электросопротивления является то, что падение напряжения на исследуемом контакте не превышало 25 мкВ. Достигнуто это применением специальных усилительных электрических схем с большим входным сопротивлением на МОП операционных микросхемах.

Известно, что тонкопленочные структуры толщиной менее 1 мкм благодаря туннельному эффекту, при относительно больших падениях напряжения на исследуемом объекте, хорошо проводят электрически ток, независимо от того является материал проводником или диэлектриком. Кроме того, относительно большие токи, применяемые многими исследователями для повышения чувствительности оборудования, резко понижают сопротивление. Также они влияют на процесс трения, разрушая тонкие граничные слои, и сильно изменяют фрикционные характеристики контакта. Тем самым традиционные методы исследований сопротивления не отражают картину реальных фрикционных процессов.

Результаты измерения слаботокового переходного электросопротивления сопряжения, с использованием специального оборудования, в течение периода приработки (рис. 6) являются еще одним подтверждением окислительного механизма изнашивания. В результате этих исследований установлено, что с течением времени электросопротивление контакта растет до очень высоких значений, не свойственных материалам трущихся элементов. Это говорит о наличии в контакте структур с высоким удельным электросопротивлением, которыми при данном сочетании материалов могут являться только окислы. Для сравнения показан процесс изменения приработочного электросопротивления не способных к окислению благородных металлов [9].

Трудность изучения процессов трения и изнашивания заключается в невозможности применения тонких прямых методов исследования в самом процессе фрикционных взаимодействий реальных микроконтактов, закрытых поверхностями.

Как уже говорилось, испытания и последующие исследования, разнесенные по времени, могут не отражать сущности процессов про-

исходимых при трении. Особенно это относится к структурным исследованиям материала. Тем не менее, изменение химического состава подповерхностных слоев имеет некоторую инертность благодаря тому, что процессы диффузии при перестройке структуры материала, как одного из видов процессов пассивации, значительно замедляются. Поэтому исследования элементного состава тонких подповерхностных слоев могут частично раскрыть картину фрикционных процессов.

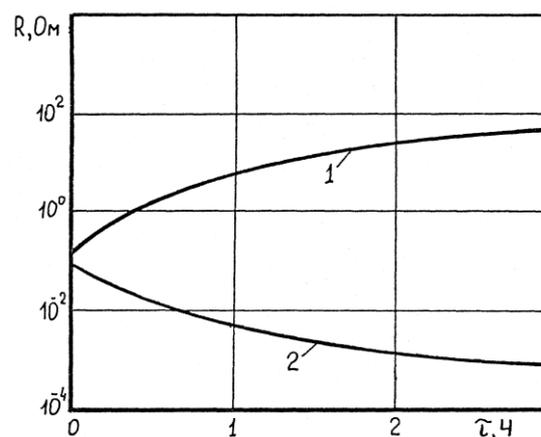


Рисунок 6 – Изменение переходного электросопротивления фрикционного контакта от времени приработки: 1 – сталь 45 + сталь 45, 2 – платина + золото

В качестве метода исследований также был выбран метод послойного Оже-электронного анализа поверхности со снятием материала на глубину с помощью потока  $\alpha$  – частиц. Исследования выполнялись в лаборатории прочности ФТИ им. Иофе А.Ф. на установке LH-10 (LTYBOLD HERATUS).

Сравнительному исследованию подверглись образцы поверхности пары трения сталь 45 + сталь 45 ( $H = 240HV$ ,  $V = 0,2$  м/с,  $p_a = 0,5$  МПа), смазочная среда – инактивный материал Литол 24.

На рис. 7 представлены зависимости атомной концентрации ( $C_x$ ) основных химических элементов исходной поверхности одного из элементов пары, подвергшейся травлению в кислоте, в функции глубины подповерхностного исследования ( $H$ ). На рис. 8 – результаты тех же исследований полностью приработанной поверхности. Интерпретировать эти данные можно следующим образом.

При обычных исходных условиях поверхность металла содержит естественные окислы и хемосорбированные слои, высота

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССА ИЗНАШИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ

которых не превышает 0,1 мкм. Более глубокие слои содержат элементный состав, соответствующий равновесному объемному состоянию материала.

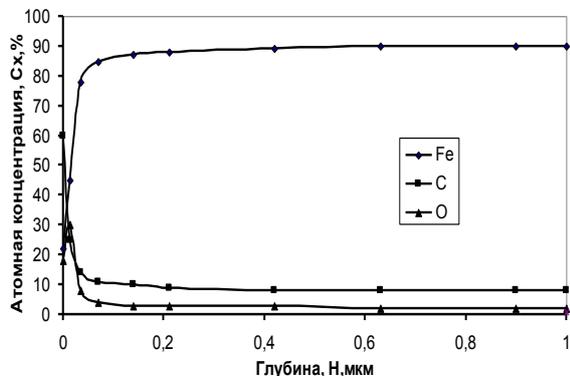


Рисунок 7 – Химический состав исходных поверхностей

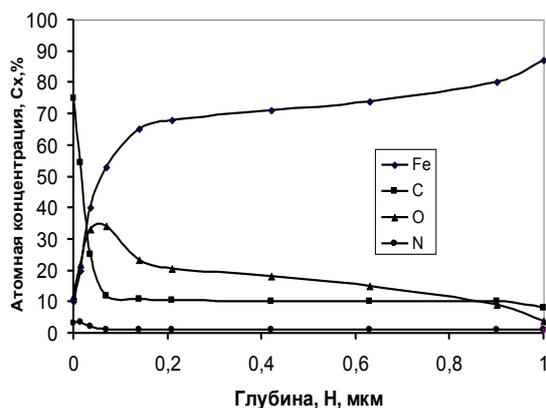


Рисунок 8 – Химический состав поверхностей после приработки

При фрикционном взаимодействии глубина изменения элементного состава доходит до значения 1 мкм в основном за счет значительного проникновения кислорода в глубь. Кислород может находиться в растворенном и в химически связанном состоянии. Однако небольшой градиент концентрации кислорода по глубине при его значительной абсолютной величине говорит о значительной диффузионной активности этого элемента в активированном слое с образованием окисных соединений. Определяемая граница слоя в пределах 1 мкм говорит об уровне проникновения первоначального активирующего пластического деформирования при трении.

Важной особенностью окислительного изнашивания является его зависимость от состава и концентрации активных компонен-

тов окружающей среды. Заметим, что концепция другого механизма явления изнашивания не может объяснить этой зависимости.

Исследования по влиянию концентрации окислителя в смазочной среде проводились на специальной установке в вакуумной камере (рис. 9) [5].

Заметим, что внешнее давление воздуха пропорционально концентрации растворенных в смазочном материале компонентов среды.

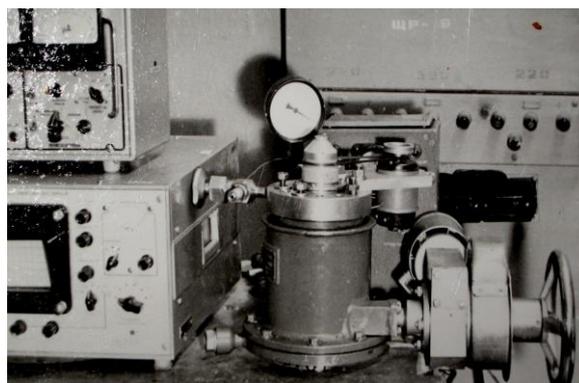


Рисунок 9 – Установка для испытаний пар трения в вакууме

Отмечено, что вакуумирование рабочей камеры значительно влияют на фрикционные показатели испытуемых пар. Подтверждением этому являются результаты экспериментального исследования зависимости коэффициента трения в функции давления окружающей воздушной среды (рис. 10). График свидетельствует, что снижение давления, сопровождаемое уменьшением толщины пленки, снижает коэффициент трения.

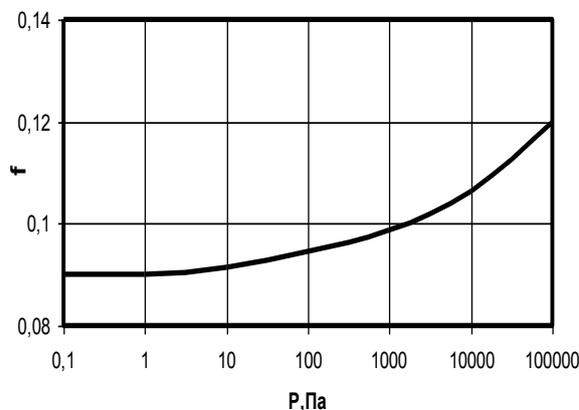


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента трения сопряжения сталь 45 + сталь 45 от давления окружающей среды: нагрузка  $p_a = 2,5$  МПа, скорость скольжения 0,3 м/с, смазочный материал Литол – 24

При других иных, известных концепциях фрикционных процессов, это не должно наблюдаться. Однако более весомым фактором в защиту механохимического изнашивания является факт зависимости давления окружающей среды на износные характеристики сопряжения (рис.11).

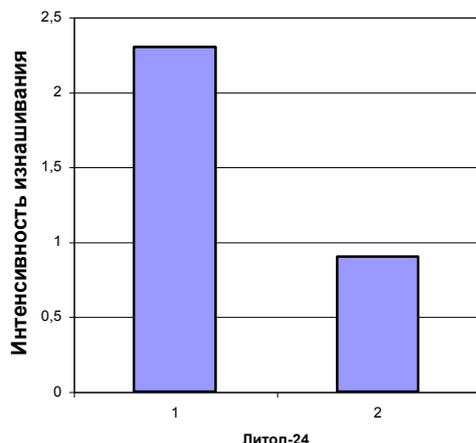


Рисунок 11 – Влияние вакуума на интенсивность изнашивания ( $I \cdot 10^{-10}$ ) смазываемого ПСМ Литол 24 сопряжения сталь 45 + сталь 45 [5]; 1 – атмосферное давление, 2 – вакуум ( $1,33 \cdot 10^{-1}$  Па)

На основании проведенных исследований можно сделать ряд выводов.

- Трение резко повышает физическую и химическую активность поверхностей.
- На относительно большую глубину проникает кислород, модифицируя поверхность окислами железа нестехиометрического состава с недостатком по кислороду типа  $FeO_{0,3}$  с относительно четкой границей раздела слоя основного материала и модифицированного «третьего тела».
- Наличие модифицированного механически ослабленного регенерируемого окисного подслоя предполагает реализацию в данных условиях механохимического окислительного изнашивания с автовосстановлением третьего тела.
- Объектом разрушения при трении разумно считать частицы этого ослабленного слоя, или более верхних, еще менее проч-

ных, что соответствует выполнению условия внешнего трения.

Таким образом, существование нормального механохимического изнашивания при трении смазываемых стальных поверхностей можно считать доказанным.

Кроме того, факт существования динамического равновесия в образовании и разрушении вторичных структур открывает возможность прогнозировать износные характеристики сопряжений по скорости образования окисных пленок, базируясь на принципах трибохимической кинетики. Также показано, что, изменяя внешние условия и влияя тем самым на скорость трибохимических процессов, можно управлять процессом поверхностного разрушения при трении металлов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Holm, R. *Electcal Cotactst.* Stockholm / R. Holm, 1946. – 377с.
2. Костецкий, Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов. – Киев, 1976. – 296 с.
3. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М., 1977. – 526 с.
4. Крагельский, И. В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М., 1968. – 480 с.
5. Баранов, А. В. Метод прогнозирования и способы повышения ресурса изнашивающих подвижных сопряжений деталей машин / А.В. Баранов.: дис. на соиск. ученой степени канд. техн. наук. – Л., 1988.
6. Костецкий, Б. И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания / Б.И. Костецкий // Трение и износ. – 1980. – №4. – С. 622-677.
7. Костецкий, Б.И. Сопротивление изнашиванию деталей машин / Б.И. Костецкий. – М., 1959. – 478 с.
8. Лебедев, В. М. Метод прогнозирования длительности приработки узлов трения / В.М. Лебедев, А.В. Баранов. – Л., 1987. – 15 с. – Деп. в ВНИИТЭМП, №77-мш87.
9. Михайлов, В.В. Влияние вида изнашивания на стабильность электрического скользящего контакта / В.В. Михайлов // Трение и износ. – 1980. – №4. – С. 728-735.