

М266529

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

МОСКОВСКОЕ
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее
техническое училище имени Н.Э.Баумана

(На правах рукописи)

ДЕДКОВ Алексей Константинович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ
И ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ
(ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УЗЛАМ ТРЕНИЯ ПТМ)

05.02.04 - Трение и износ в машинах

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в МВТУ им.Н.Э.Баумана.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Александров М.П.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Фролов В.В.

доктор технических наук, старший научный сотрудник Дроздов Ю.Н.

Ведущее предприятие – указано в решении Ученого Совета.

Автореферат разослан "___" _____ 1975 г.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1975 г. на
заседании Совета Конструкторско-механического факультета МВТУ
им.Н.Э.Баумана по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская, 5.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные
печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им.
Н.Э.Баумана.

СОВ Л.Н.

Зак. II78.

M 266529.

Актуальность проблемы. В условиях научно-технического прогресса одной из самых актуальных проблем является проблема надежности и долговечности машин. Не последнее место в ней принадлежит вопросам, относящимся к области трения и изнашивания. Острота этой проблемы возрастает по мере увеличения мощности машин, интенсивности их использования, усложнения рабочих условий, связанного с воздействием газовых сред, с уменьшением габаритов конструкций и т.п.

Установлено, что фрикционно-износные характеристики пар трения определяются физико-химическими процессами в контакте трущихся тел, характер и интенсивность которых во многом определяются окружающей газовой средой. Раскрытие механизма этих процессов, их кинетики позволит сознательно подходить к проектированию узлов трения и в той или иной степени управлять процессами трения и изнашивания.

Цель исследования. Целью настоящей работы является выявление механизма и количественных закономерностей взаимодействия газовой среды и поверхностей трения твердых тел; развитие на их основе модельных представлений о процессах трения и изнашивания; экспериментальная проверка теоретических положений и разработка рекомендаций по проведению мероприятий с целью повышения надежности и долговечности пар трения.

Методы исследования. Теоретические положения и количественные закономерности механизма взаимодействия газовой среды и поверхностей трения твердых тел базируются на законах газодинамики и химической кинетики. Методика экспериментальных исследований, кроме получения зависимостей фрикционно-износных характеристик от определяющих факторов, предусматривает проведение рентгенографического и физико-механических методов исследования поверхностей трения и продуктов износа.

Научная новизна. Теоретически получены количественные закономерности процессов взаимодействия газовой среды и поверхностей трения твердых тел. Определены условия внешнего трения и окислительного изнашивания как функция параметров, определяющих процессы. Из выведенных аналитических уравнений получены критерии подобия образования и разрушения поверхностных окисных пленок. Основываясь на положении о динамическом равновесии между образованием и разрушением окисных пленок при окислительном изнашива-

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1266529

Дедков А.К. Исследование

M 266529

нии, получены уравнения скорости изнашивания элементов пары трения, выраженные через скорость образования окисных пленок. Разработана методика определения кинетических параметров процесса окисления поверхностей трения твердых тел, а также методика создания газовых сред с регулируемой концентрацией их компонентов.

Практическая ценность. Разработанные теоретические положения механизма взаимодействия газовой среды и поверхностей трения твердых тел, а также полученные на их основе условия окислительного изнашивания позволяют проектировать узлы трения и вести модельные испытания фрикционных материалов с учетом фактических физико-химических явлений в зоне трения. Расчетные уравнения скорости окислительного изнашивания создают базу для повышения износостойкости узлов трения на стадии проектирования и для проведения мероприятий с целью повышения надежности и долговечности существующих конструкций узлов трения. Разработанные методики и экспериментальные установки могут быть применены как в чисто практических, так и в исследовательских целях.

Апробация работы. По основным разделам диссертации сделано два доклада на научных семинарах кафедры ПТМ МВТУ им. Н.Э.Баумана и доклад на семинаре "Трение и износ в машинах" им. М.М.Хрущева в Государственном научно-исследовательском институте машиноведения, г.Москва, 1975 г.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, основных результатов и выводов работы. Содержит 200 страниц, включая 55 рисунков, 5 таблиц и список литературы из 99 наименований.

В первой главе на основании литературных данных кратко прослежена эволюция взглядов на процессы трения и изнашивания, рассмотрены основные положения молекулярно-механической теории И.В.Крагельского и классификация видов изнашивания, сделанная Б.И.Костецким.

Подчеркнуто, что согласно исследованиям И.В.Крагельского с сотрудниками необходимым условием, обеспечивающим внешнее трение, является положительный градиент механических свойств по глубине твердого тела, который обеспечивается наличием окисных пленок или пленок неокислородного происхождения на трущихся поверхностях. В случае, если регенерация пленки на контакте нарушится, то схватывание может произойти при любой нагрузке. При этом допустимым видом разрушения при изнашивании согласно классификации Б.И.Кос-

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

М В Т У
им. Н. Э. Баумана
Библиотека

тецкого считается разрушение, локализованное в поверхностных пленках; в случае пленок кислородного происхождения - окислительное изнашивание. Для окислительного изнашивания при стационарном режиме трения справедливо динамическое равновесие процессов образования и разрушения поверхностных окисных пленок, т.е.

$$\frac{dM_p}{dt} = \frac{dM_B}{dt},$$

где M_p - масса поверхностных пленок, разрушенная в результате изнашивания;

M_B - масса поверхностных пленок, восстановленная в результате окисления;

t - время.

Отмечено, что наиболее существенным фактором, непосредственно определяющим фрикционно-износные характеристики пары трения, является толщина окисной пленки на трущихся поверхностях, и что скорость ее образования при трении значительно увеличивается вследствие пластических деформаций.

На примере ряда исследований влияния коэффициента взаимного перекрытия, площади номинального контакта, скорости относительного скольжения, нагрузки и состава окружающей среды на фрикционно-износные характеристики пар трения показано, что в ряде случаев наблюдается противоречивость экспериментальных данных, объяснение которой с существующих позиций невозможно.

Анализ исследований по влиянию газовых сред на трение и износ позволил установить их ограниченность в смысле номенклатуры сред, почти полное отсутствие исследований работы фрикционных материалов в средах с регулируемой влажностью и переменной концентрацией тех или иных активных газовых компонентов, некоторую схематичность при подходе к изучению трения с точки зрения количественной оценки массы окислителя, доставляемой в контактный зазор (Е.В.Синозев).

Во второй главе рассмотрены теоретические основы взаимодействия газовой среды с поверхностями трения твердых тел для стационарного режима трения металлических твердых тел.

Исследования по влиянию газовой среды на фрикционно-износные характеристики пар трения до сих пор носят качественный характер. Такой подход к анализу процессов трения и изнашивания не дает возможности определения граничных условий вида изнашивания, а отсутствие количественных связей между параметрами,

определяющими процессы, препятствует прогнозированию фрикционно-износных характеристик узлов трения различных конструкций при различных режимах течения.

Основные положения, развиваемые в диссертации, базируются на следующем рассуждении. Допустим, что имеется два тела бесконечной длины и ширины, скользящих друг относительно друга. Условием, гарантирующим отсутствие схватывания, является наличие окисной пленки в контакте в любой момент времени. Но пленка при трении изнашивается. Для образования окисной пленки в контакте вместо изношенной необходима доставка кислорода. Поскольку кислород транспортируется от края контакта трущихся тел и по пути расходуется на окисление поверхности трения, то наступит такой момент, когда в некоторой точке концентрации его станет равной нулю (точнее, концентрации диссоциации окисла). За этой точкой в направлении транспорта кислорода окисление поверхностей трения окажется невозможным, а следовательно, будут нарушены условия, обеспечивающие режим внешнего трения и окислительного изнашивания. Отсутствие окисной пленки приведет к контакту ювенильных поверхностей и к схватыванию. Координату точки, за которой окисление поверхности трения оказывается невозможным, будем называть критической.

Таким образом, процессы внешнего трения и окислительного изнашивания определяются механизмами доставки кислорода в контакт трущихся тел и его расходования на окисление поверхностей трения; концентрация окислителя в пространстве контактного зазора изменяется при переходе от точки к точке.

Для количественного описания доставки кислорода в контакт и его расходования на окисление поверхностей трения рассмотрены движущие силы и факторы, определяющие их, опираясь на положения газодинамики и химической кинетики; обоснованы ограничения, допущения и граничные условия. Для оценки количества окислителя, поступающего в контакт твердых тел, контактный зазор рассматриваем как плоскую щель эквивалентного объема, высота которой равна высоте "эффективного зазора" по Н.Б.Демкину.

На основании анализа многочисленных исследований по окислению металлов установлено, что для процессов окисления при трении справедлива линейная зависимость массы образующегося окисла во времени. Эффективное уравнение превращения при окислении поверхностей трения будет иметь вид

$$W = A e^{-\frac{E}{RT}} C^m, \quad (1)$$

где W - скорость окисления; A - предэкспоненциальный множитель; E - энергия активации реакции окисления; R - универсальная газовая постоянная; T - абсолютная температура; C - концентрация кислорода; m - показатель степени скорости реакции.

В третьей главе рассмотрено взаимодействие газовой среды и поверхностей трения твердых тел.

Вся совокупность узлов трения с газодинамической точки зрения разделена на два класса: 1) узлы трения с $K_{вз} = 1$, для которых доставка окислителя в контактный зазор возможна только в направлении, перпендикулярном вектору относительной скорости элементов узла и осуществляется молекулярной диффузией; и 2) узлы трения с $K_{вз} < 1$, для которых основная масса окислителя в контактный зазор доставляется конвекцией в направлении вектора относительной скорости элементов узла.

Для контактного зазора получены уравнения материального баланса по окислителю для обоих классов узлов трения:

для узлов трения с $K_{вз} = 1$

$$\frac{d^2 C}{dx^2} = \frac{\kappa_1 + \kappa_{II}}{z_0 D} (1 - \eta) C^m; \quad (2)$$

для узлов трения с $K_{вз} < 1$:

а) для контактного зазора:

$$-z_0 \frac{V}{2} \frac{dC}{dy} = (\kappa_1 + \kappa_{II}) (1 - \eta) C^m; \quad (3)$$

б) для поверхности трения, непосредственно контактирующей с окружающей средой

$$-D \left(\frac{dC}{dz} \right)_{z=0} = \kappa_1 C^m, \quad (4)$$

где x - координата в направлении, перпендикулярном вектору скорости относительного скольжения в плоскости трения; y - координата, совпадающая с вектором скорости относительного скольжения; z - координата в направлении, перпендикулярном плоскости трения; z_0 - высота контактного зазора; κ_1, κ_{II} - константы скорости реакции окисления первого и второго элемента узла трения; D - коэффициент диффузии кислорода; η - относительная площадь контактирования поверхностей трения; V - относительная скорость элементов узла трения

Решение уравнений материального баланса позволило определить вид зависимости изменения концентрации окислителя в пространстве контактного зазора:

1) для узлов трения с $K_{вз} = 1$:

а) при $m = 1$

$$C = C_0 \left[\frac{e^{x\sqrt{2\alpha_1}} + e^{(B-x)\sqrt{2\alpha_1}}}{e^{B\sqrt{2\alpha_1}} + 1} \right]; \quad (5)$$

б) при $m \neq 1$

$$C = \left[C_0^{\frac{1-m}{2}} - \frac{1-m}{2} \sqrt{\frac{2\alpha_1}{m+1}} x \right]^{\frac{2}{1-m}}; \quad (6)$$

где C_0 - концентрация кислорода в окружающей газовой среде;
 X - расстояние от края контактного зазора; B - ширина контак-
 та элементов узла трения;

$$\alpha_1 = \frac{\kappa_1 + \kappa_{II}}{z_0 D} (1 - \eta).$$

2) для узлов трения с $\kappa_{23} < 1$:

а) при $m = 1$

$$C = C_0 e^{-\alpha_2 X}; \quad (7)$$

б) при $m \neq 1$

$$C = [C_0^{1-m} - \alpha_2 Y (1-m)]^{\frac{1}{1-m}}, \quad (8)$$

где

$$\alpha_2 = 2 \frac{\kappa_1 + \kappa_{II}}{z_0 V} (1 - \eta);$$

Y - расстояние от края контактного зазора в направлении векто-
 ра относительной скорости элементов узла трения.

Поскольку термодинамическим условием схватывания является
 неравенство $C < C_A$ (C_A - концентрация кислорода диссоциации
 окисла), то имея в распоряжении уравнения концентрации кислорода
 по направлению его доставки можно получить значения критических
координат:

1) для узлов трения с $\kappa_{23} = 1$;

а) при $m = 1$

$$X_{кр} = \frac{1}{\alpha_1} \ln \frac{C_0}{C_A}; \quad (9)$$

б) при $m \neq 1$

$$X_{кр} = \frac{2}{1-m} \sqrt{\frac{m+1}{2\alpha_1}} C_0^{\frac{1-m}{2}}; \quad (10)$$

2) для узлов трения с $\kappa_{23} < 1$;

а) при $m = 1$

$$Y_{кр} = \frac{1}{\alpha_2} \ln \frac{C_0}{C_A}; \quad (11)$$

б) при

$$Y_{кр} = \frac{1}{\alpha_2 (1-m)} C_0^{1-m}. \quad (12)$$

Условие отсутствия схватывания, т.е. условие окислительного
 изнашивания запишется:

1) для узлов трения с $\kappa_{23} = 1$

$$X_{кр} > \frac{B}{2}, \quad (13)$$

поскольку в узлах трения с $\kappa_{23} = 1$ кислород в контактный зазор
 диффундирует с обеих сторон контакта в направлении, перпендикуляр-
 ном вектору скорости относительного скольжения;

2) для узлов трения с $K_{B3} < I$

$$U_{кр} > L, \quad (I4)$$

где L - длина элемента контртела в направлении вектора скорости относительного скольжения.

Принимая во внимание доказанное Б.И. Костецким и его сотрудниками условие динамического равновесия при окислительном изнашивании между разрушением и образованием поверхностных окисных пленок, величину износа элементов узла трения определяем с точки зрения количественной оценки образования этих пленок.

Тогда износ элементов узла будет равен

$$U = \frac{\alpha}{\beta} M_{O_2},$$

где α - коэффициент, равный отношению молекулярного веса молекулы окисла, вид которой определяется из анализа продуктов износа, к молекулярному весу кислорода в ней; β - коэффициент, равный отношению молекулярного веса молекулы окисла к молекулярному весу металла в ней; M_{O_2} - масса окислителя, связанная в окисел на поверхностях трения.

Для узлов трения с $K_{B3} = I$ величина M_{O_2} равна массе кислорода, пролифундировавшей в контактный зазор за время t через поперечное сечение у его края, т.е. при $X = 0$. Для класса узлов трения с $K_{B3} < I$ M_{O_2} равна сумме масс кислорода, связанных в окисел в контактном зазоре и на поверхности трения, непосредственно контактирующей с окружающей средой.

После определения величины M_{O_2} получены уравнения окислительного износа элементов узлов трения:

1) для узлов трения с $K_{B3} = I$:

$$U = \frac{\alpha}{\beta} C_0^{\frac{m+1}{2}} \mu l_n t \sqrt{\frac{2}{m+1}} (\kappa_1 + \kappa_n)(1-\eta) z_0 D. \quad (I5)$$

2) для узлов трения с $K_{B3} < I$:

а) при $m = I$

$$U = \frac{\alpha}{\beta} \mu l \left\{ \frac{\gamma}{2} z_0 B C_0 \left[1 - e^{-\frac{2(\kappa_1 + \kappa_n)(1-\eta)L}{z_0 V}} \right] + D S_2 \frac{(C_0 - C) \sqrt{\omega}}{1,8 \sqrt{V}} \right\}; \quad (I6)$$

б) при $m \neq I$

$$U = \frac{\alpha}{\beta} \mu l \left\{ \frac{\gamma}{2} z_0 B \left[C_0 - (C_0^{1-m} - \frac{2(\kappa_1 + \kappa_n)(1-\eta)(1-m)L}{z_0 V})^{\frac{1}{1-m}} \right] + D S_2 \frac{(C_0 - C) \sqrt{\omega}}{1,8 \sqrt{V}} \right\}, \quad (I7)$$

где $M = 32 \cdot 10^{-3}$, кг/моль - молекулярная масса кислорода; S_2 - площадь поверхности трения элемента узла трения с $K_{B3} < 1$, непосредственно контактирующая с окружающей газовой средой; ω - угловая скорость вращения элемента узла трения; v - кинематическая вязкость газовой смеси; C - концентрация кислорода у поверхности трения.

Следует отметить, что изменения внешних воздействий на пару трения, проявляющихся в изменении химической активности окружающей среды, нагрузки и т.п., а также изменения физико-механических свойств твердых тел и структурные превращения в них, влияют на шероховатость поверхностей трения. В уравнениях износа эти изменения учитываются через интегральную характеристику - высоту контактного зазора Z_0 .

Учитывая то, что значения таких кинетических параметров процесса окисления поверхностей трения как показатель степени скорости реакции, энергия активации и предэкспоненциальный множитель, отличаются от аналогичных для нетрущихся поверхностей, в диссертации разработан метод определения кинетических параметров, который заключается в аналитическом выражении этих параметров через величины, определяемые из эксперимента.

В четвертой главе рассмотрены вопросы подобия процессов взаимодействия газовой среды и поверхностей трения твердых тел, а также дан анализ теоретических положений и выводов, сделанных во второй и третьей главах.

На основании дифференциальных уравнений материального баланса по окислителю (2-4) аналитическим путем получены критерии подобия процессов образования поверхностных окисных пленок с учетом газотинамических, массообменных и химических явлений, являющиеся, по сути дела, критериями подобия процессов их разрушения при окислительном изнашивании:

1) для узлов трения с $K_{B3} = 1$:

$$\mathcal{K}_1 = \frac{Z_0 D}{B^2 (1-p) K_{1,n}} C_0^{1-m} \quad (18)$$

2) для узлов трения с $K_{B3} < 1$:

a)
$$\mathcal{K}_2 = \frac{Z_0 V}{(1-p) K_{1,n} L} C_0^{1-m}; \quad (19)$$

б)
$$\mathcal{K}_3 = \frac{D}{\delta K_1} C_0^{1-m} \quad (20)$$

Теоретическим путем определены критические значения критериев $\mathcal{K}_1$ и $\mathcal{K}_2$, а также условия внешнего трения и окислительного изнашивания в критериальной форме: для окислительного изнашивания должно выполняться

$$\mathcal{K}_1 > \mathcal{K}_1^{кр}, \quad \mathcal{K}_2 > \mathcal{K}_2^{кр}. \quad (2I)$$

Из сопоставления уравнений (I5-I7) для окислительного износа и условий окислительного изнашивания (9-I2) получены формулы для определения оптимального значения концентрации окислителя для данного узла трения, а также формулы для расчета минимальной скорости окислительного изнашивания. Показано, что оптимальное значение концентрации кислорода и минимальная скорость окислительного изнашивания для данного режима трения соответствуют предкритическому состоянию, т.е. состоянию на грани перехода окислительного изнашивания в изнашивание со схватыванием.

В практике эксплуатации тормозных устройств наиболее частой причиной большого износа элементов узла трения является изнашивание со схватыванием. Так как при этом не выполняется условие (2I), то конструктивные, эксплуатационные и технологические мероприятия с целью уменьшения скорости изнашивания должны быть направлены на создание условий окислительного изнашивания, т.е. на увеличение значений критериев $\mathcal{K}_1$ и $\mathcal{K}_2$. Из выражений (I8 и I9) видно, что для этого необходимо увеличение скорости относительного скольжения, уменьшение ширины и длины элементов контртела (создание промежуточных источников поступления кислорода в контакт трущихся тел путем изготовления проточек, отверстий и т.п.), уменьшение температуры поверхностей трения твердых тел, и их химической активности, а также увеличение концентрации окислителя в окружающей газовой среде.

Из уравнений (9-I2 и I5-I7) вытекает, что одним из определяющих факторов процессов трения и изнашивания является абсолютный размер элемента контртела в направлении доставки окислителя, а не относительная характеристика узла трения - коэффициент взаимного перекрытия (κ_{23}).

В работе показано, что противоречивость результатов экспериментальных исследований разных авторов по влиянию отдельных факторов на трение и изнашивание связана с несоблюдением условий окислительного изнашивания (2I), определяющих вид износа, а следовательно, и присущие ему закономерности.

В пятой главе определены цели и задачи экспериментальных исследований, дан анализ загазованности мест работы узлов трения ПТМ, приведено описание экспериментальных установок и методов исследований.

По результатам натурных обследований загазованности мест работы ПТМ установлено, что наиболее часто встречающимися и наиболее активными в химическом отношении газовыми компонентами являются кислород, сероводород, сернистый газ и пары воды.

Разработана экспериментальная установка для исследования процессов трения и изнашивания в газовых средах с регулируемой концентрацией их компонентов, имеющая герметичную камеру, в которой исследовалась работа двух конструкций узла трения: диск + секторный образец и узел трения, составленный из кольцевых обrazцов машины трения ИМ-58 $\varnothing 28 \times 20$ мм.

Для создания газовой среды с регулируемой концентрацией ее компонентов разработана специальная методика, базирующаяся на уравнениях состояния идеальных газов с применением манометрического метода контроля. Разработанная установка позволяет получать газовые компоненты, создавать газовые смеси с регулируемой концентрацией отдельных компонентов, поддерживать заданную концентрацию их в процессе эксперимента в случае негерметичности рабочей камеры.

В диссертации описана методика экспериментальных исследований работы фрикционных пар, дана характеристика объектов исследования и определена номенклатура и методы измерения контролируемых параметров.

Шестая глава посвящена экспериментальной проверке теоретических положений и выводов, разработанных и сделанных в данной диссертации, а также экспериментальному изучению влияния газовых примесей (пары воды, сероводород и сернистый газ) на фрикционно-износные характеристики шарнирных (трение металла по металлу) и фрикционных (трение металлокерамических и асбофрикционных материалов по металлу) соединений в ПТМ. В качестве экспериментальных выбраны пары трения, представляющие три класса материалов: сталь 45 + сталь 45 (металл), сталь 45 + ФМК-II (металло-керамику), сталь 45 + 6КВ-10 (асбофрикционный материал).

Показано, что характеристикой меры окислительного изнашивания, наиболее полно отражающей физическую сущность процесса, является скорость изнашивания. Это положение является косвенным

подтверждением усталостной природы разрушения при окислительном изнашивании.

Основываясь на теоретически полученных формулах, в работе экспериментально определено значение показателя скорости химической реакции окисления для стали 5 ($m = 0,61 \pm 0,11$); построены зависимости изменения константы скорости реакции и энергии активации от величины обратной абсолютной температуры поверхностей трения. Отмечено, что для химических реакций при трении энергия активации окисления металла значительно уменьшается из-за наличия остаточных напряжений второго рода, чем и объясняется значительная скорость окислительных процессов при трении. На примере изучения зависимости скорости изнашивания стали 45 от скорости относительного скольжения рассмотрены четыре характерные области, имеющие место при изнашивании любых узлов трения: 1) область атермического сдвигания; 2) область окислительного изнашивания; 3) область изнашивания со сдвиганием; 4) область изнашивания сдвиганием. Атермическое сдвигание на малых скоростях скольжения, по-видимому, связано со значительным падением энергии активации окисления при трении. В работе приведен ряд примеров, подтверждающих это положение.

Для области окислительного изнашивания справедливы уравнения (15-17) и выполняется условие (21). Для третьей и четвертой областей критерии Φ_1 и Φ_2 оказываются меньше критических значений. Экспериментально показано, что конструктивные меры, способствующие созданию условий окислительного изнашивания, заключаются в создании дополнительных промежуточных источников поступления кислорода в контакт трущихся тел.

Расчет величины износа по выражению (17) для кольцевых образцов $\phi 28 \times 20$ мм с использованием значений константы скорости реакции, полученных экспериментально для узла трения диск + образец, показал, что расхождение теоретических и экспериментальных результатов окислительного износа не превышает 12 %.

На примере экспериментального исследования работы пары трения сталь 45 + ФМК-II в среде технически чистого азота и сравнения полученных результатов с аналогичными при трении в воздухе показана справедливость теоретических выводов об уменьшении скорости изнашивания с уменьшением концентрации окислителя в газовой смеси при соблюдении условий окислительного изнашивания.

Экспериментальные исследования по влиянию газовых примесей на трение и изнашивание показали, что при температуре поверхно-

стей трения до $120 + 160^{\circ}\text{C}$ увеличение влагосодержания газовой среды ведет к уменьшению скорости изнашивания и коэффициента трения; эффект влияния влагосодержания в этой области проявляется через смазывающее действие сконденсированной воды. При более высоких температурах поверхностей трения влагосодержание среды влияет на величину окислительного потенциала среды, т.е. на величину C_o , уменьшая ее с увеличением температуры.

Сероводород при температурах поверхностей трения до $300-350^{\circ}\text{C}$ влияет на фрикционно-износные характеристики пар трения через понижение окислительного потенциала газовой среды, а скорость окислительного изнашивания подчиняется теоретическим положениям (I5-I7). При более высоких температурах сероводород, наряду со связыванием кислорода и создания, тем самым, условий для изнашивания со схватыванием, по-видимому, наводороживает поверхность металлического образца, охрупчивая ее и увеличивая скорость изнашивания. Скорость изнашивания металлокерамического образца, как более пластичного, при этом уменьшается.

Сернистый газ действует также как восстановитель, уменьшая кислородный потенциал среды и создавая условия для возникновения участков схватывания на более легких режимах, чем в среде воздуха. С увеличением его концентрации область окислительного изнашивания сужается, а в области изнашивания со схватыванием износ металлокерамического и стального элементов возрастает.

На основании результатов экспериментальных исследований для конструкций узлов трения, у которых наиболее слабым является металлокерамический элемент, а контртело изготовлено из стали 45, рекомендовано заполнение рабочей камеры смесью, содержащей сероводород.

Отмечено, что наиболее износо- и теплостойкой из числа исследованных пар трения в экспериментальных газовых средах является пара сталь 45 + ФМК-II, а наименее износо- и теплостойкой - пара сталь 45 + 6KB-IO. При этом показано, что разрушение асбофрикционного элемента быстрее всего происходит в среде, содержащей H_2S из-за увеличения шероховатости поверхности трения стального образца благодаря наводороживанию и охрупчиванию его.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Наиболее активными и часто встречающимися газовыми компонентами в местах работы узлов трения ПТМ являются: кислород, пары воды, сероводород и сернистый газ.

2. Процессы внешнего трения и окислительного изнашивания определяются механизмами доставки окислителя в контакт трущихся тел и его расходовании на окисление поверхностей трения; концентрация окислителя в пространстве контактного зазора изменяется от точки к точке.

3. Скорость окислительного изнашивания и вид изнашивания, кроме прочих факторов, в явном виде определяются абсолютным размером элемента контртела в направлении доставки окислителя, а не относительной характеристикой узла трения — коэффициентом взаимного перекрытия. Скорость окислительного изнашивания падает с уменьшением химической активности материалов пар трения, концентрации окислителя в окружающей среде, а также скорости относительного скольжения, шероховатости поверхностей трения и абсолютного размера элемента контртела в направлении доставки окислителя. Изменение внешних силовых и химических воздействий, а также внутренних свойств твердых тел и структурные превращения в них в уравнениях окислительного износа учитываются через интегральную характеристику — высоту контактного зазора.

4. Условие подобия процессов разрушения и образования поверхностных окисных пленок при окислительном изнашивании выражается равенством для модели и натуры критериев κ_1 , κ_2 и κ_3 .

5. Разработанная методика и изготовленная установка позволяют вести исследования трения и изнашивания в газовых средах с регулируемой концентрацией отдельных компонентов при различных уровнях влагосодержания.

6. Экспериментально установлено, что скорость реакции окисления стали 45 зависит от концентрации кислорода в степени 0,61. Энергия активации окисления твердых тел при трении уменьшается с увеличением удельного давления и увеличивается с возрастанием температуры поверхностей трения. Расхождения экспериментальных и расчетных данных по износу пары трения сталь 45+сталь 45 для экспериментальных конструкций узлов не превышают 12 %.

Увеличение влагосодержания атмосферы при температуре поверхностей трения до $120 \pm 160^\circ\text{C}$ ведет к падению коэффициента трения и скорости изнашивания; эффект влияния влагосодержания проявляется

через смазывающее действие сконденсированной воды. При более высоких температурах влагосодержание влияет на окислительный потенциал газовой среды.

Сероводород и сернистый газ понижают окислительный потенциал среды и способствуют изнашиванию со схватыванием.

7. Для узлов трения, у которых наиболее слабым является металл-керамический элемент, а контртело изготовлено из стали 45, в целях повышения надежности и долговечности рекомендуется работа их в среде, содержащей сероводород до 3,5 %. Наиболее износостойкой во всех исследованных газовых средах является пара трения сталь 45 + ОК-11.

8. Результаты работы найдут применение при проектировании и реконструкции узлов трения, при разработке методики проведения модельных испытаний фрикционных материалов, а также для осуществления конструктивных, эксплуатационных и технологических мероприятий с целью повышения износостойкости узлов трения.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Дедков А.К. О необходимости исследования фрикционных пар тормозных устройств ПТМ в газовых средах. В сб. "Подъемно-транспортные машины", Тула, Из-во ТПИ, 1973, вып.2.

2. Дедков А.К., Браун Э.Д. Установка для исследования фрикционных пар в газовых средах регулируемой концентрации. В сб. "Тепловая динамика и моделирование внешнего трения". Из-во "Наука", 1975.

3. Дедков А.К. Влияние влагосодержания атмосферы на фрикционные характеристики пар трения. Известия высших учебных заведений, "Машиностроение", 1975, № 1.