

УДК 621-891

Вольченко Д.А., д.т.н.; Андрейчиков Е.Ю., ст. препод.;  
Витвицкий В.С., аспирант

*Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа*

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ФРИКЦИОННОГО УЗЛА НА ЭЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

**Аннотация.** В материалах статьи проиллюстрированы различные классификации пар трения в зависимости от характера изменения интенсивности их изнашивания и показано влияние особенностей конструкции фрикционного узла на его эксплуатационные параметры и величину изнашивания. Показано и проанализировано влияние продуктов износа на электротермомеханическое трение и изнашивание в парах трения.

**Анотація.** У матеріалах статті проілюстровані різні класифікації пар тертя в залежності від характеру зміни інтенсивності їх зношування і показано вплив особливостей конструкції фрикційного вузла на його експлуатаційні параметри і величину зношування. Показано та проаналізовано вплив продуктів зносу на електротермомеханічне тертя і зношування в парах тертя.

**Abstract.** We've illustrated various classifications of friction pairs depending on the nature of changes of the intensity of its wear and we've shown influence of the design features of friction units on its unit operating parameters and amount of wear. We've shown and analyzed the influence of wear products in electric thermal mechanical friction and wear in friction pairs.

**Введение.** В настоящее время получили распространение два подхода при оценке долговечности материалов трибосопряжений. Во-первых, это использование предполагаемого молекулярно-механической теорией трения математического описания модели усталостного разрушения поверхности вследствие изнашивания. В этом случае интенсивность изнашивания

$$I = \frac{h^*}{(\nu + 1)N_f dA_k} \frac{A_\phi}{A_k}. \quad (1)$$

Фактическая площадь касания  $A_\phi$  и максимальная глубина внедрения  $h^*$  зависят от упруго-пластических свойств материалов формы и распределения микронеровностей, параметров кривой опорной поверхности  $\nu$ . В формулу входят также число циклов до

разрушения  $N_f$ , диаметр пятна касания  $d$  и контурная площадь поверхности контакта  $A_k$ .

Определение значений  $A_{\phi}$ ,  $h^*$  и др. и подстановка их в выражение (1) даст громоздкие и малопригодные для инженерных расчетов выражения, однако позволяет качественно определить влияние различных параметров на интенсивность изнашивания материалов [1, 2].

Во-вторых, это базирующихся на работах Г. Фляйшера, Г. Бекманна, И. Клейса и др. энергетический подход. Износ, согласно Г. Фляйшеру, предлагается рассматривать в качестве результата превышения в процессе контактного взаимодействия критической плотности энергии при деформации и трении  $\omega^* = W_T / \Delta V^*$ , которая является характеристикой материала при определенных условиях такого взаимодействия.

**Состояние проблемы.** Остановимся на процессах и эффектах имеющих место на микроуровнях, характеризующиеся типовым микропрофилем с радиусом микровыступа  $r$ , на котором происходят механические, электрические и тепловые взаимодействия, связанные с возникновением и воздействием динамических, электрических и тепловых токов, взаимодействующих с омывающими и выделяющимися с поверхностных слоев накладок токами сред, способствующих окислительно-восстановительным процессам на поверхностях микровыступов элементов трения.

Рассмотрим процессы и эффекты происходящие на макроуровнях к которым относятся, имеющие импульсную и волновую природу, эксплуатационные параметры: прижимные нормальные усилия, скорости скольжения, удельные нагрузки, динамические коэффициенты трения, работа трения, температуры: вспышки, поверхностные и объемные; две последних способствуют развитию поверхностных и объемных температурных градиентов, и как следствие, - термонапряжений; тормозные моменты, механические напряжения, механические свойства материалов, имеющими положительный градиент (модуль упругости  $E$  или твердость НВ, прочность  $\sigma_0$  и относительное удлинение  $\varepsilon_0$  при разрыве) [3]. При этом возможно ослабление положительного градиента механических свойств материалов пары трения при высоких поверхностных температурах, а также при инверсии тепловых потоков между рабочими поверхностями пар трения.

Большой частью износ рабочих поверхностей фрикционных накладок происходит в результате усталостного механизма разрушения. В первую очередь, такой механизм обусловлен дискретным характером фрикционного контакта микровыступов металлополимерных пар. В результате наличия различных энергетических уровней поверхностных и приповерхностных слоев

металлополимерных пар трения на стадиях явления электротермомеханического трения зарождаются, развиваются и совершаются в определенной последовательности и с особыми переходными процессами, принципами суперпозиции и возникновением побочных эффектов, и при этом происходят изменения линий токов динамического, электрического, магнитного, теплового и химического полей, прошивающих микровыступы пар трения и воздействующих на пятна контакта и способствующих их усталостному разрушению и последующему отделению материалов фрикционной накладки. Последний акт относится к абразивному износу в связи с внедрением микровыступов металлического фрикционного элемента в сопряженную рабочую поверхность полимерной накладки [3].

**Цель работы.** Обосновать влияние особенностей конструкций элементов пар трения фрикционных узлов тормозных устройств на их износо-фрикционные свойства с учетом продуктов износа.

**Классификация пар трения в зависимости от характера изменения интенсивности их изнашивания.** Функционирование подавляющего числа трибосопряжений во времени происходит таким образом (описывается таким уравнением износа), что интенсивность изнашивания изменяется во времени, как в период приработки, так и в период нормального изнашивания, т.е. трибосопряжение является развивающееся во времени. В работах [1, 2, 3 и др.] показано ряд возможных вариантов управления износом. С некоторым упрощением назначаем периоды нормального изнашивания элементов трибосопряжения: с возрастающей (первый); с постоянной (второй) и убывающей (третий) интенсивностью изнашивания (рис. 1). Кроме того, встречаются сопряжения трех типов, у которых закономерности изменения интенсивности изнашивания представляют собой комбинации кривых.

Изнашивание первого и второго типа обычно включает все три периода – приработки, нормального и катастрофического изнашивания.

Количественно износ материалов определяется объемом изношенного материала  $V_M$  (в  $\text{мм}^3$ ), весом изношенного материала  $q$  (в г), толщиной (высотой) изношенного слоя  $h$  (в мм) и характеризуется следующими эксплуатационными параметрами: весовой интенсивностью износа  $I_q = q/AL$  (в  $\text{г/мм}^3$ ), линейной интенсивностью износа  $i_h = h/L$ , энергетической интенсивностью износа  $I_W = \Sigma W/AL$  (в  $\text{Дж/мм}^3$ ). В приведенных зависимостях использованы следующие обозначения:  $A$  - площадь разрушения (обычно номинальная площадь контакта);  $L$  - путь трения;  $\Sigma W$  - суммарная составляющая энергетического баланса. В дальнейшем, при оценке рабочей

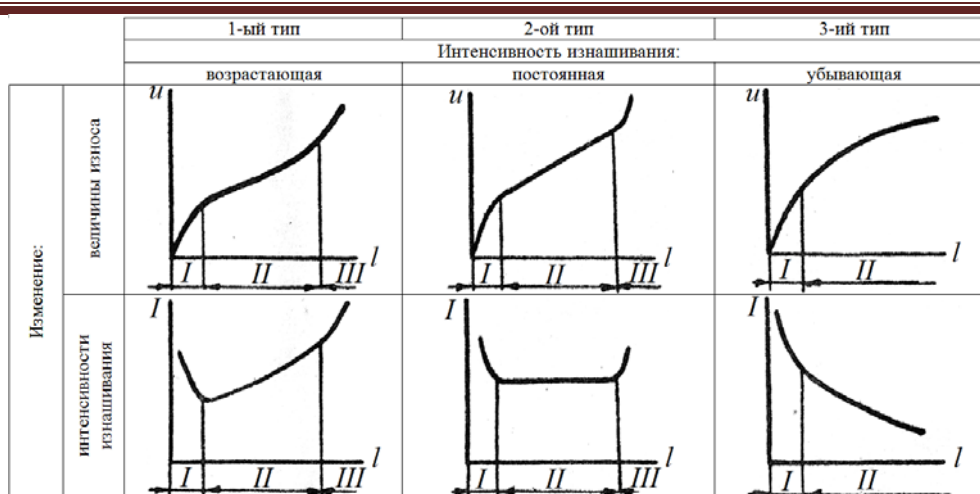


Рисунок 1 – Классификация пар трения в зависимости от характера изменения интенсивности изнашивания на его периодах: I – приработки; II, III – изнашивания: нормального, катастрофического  
поверхности накладки использована ее энергетическая интенсивность износа.

**Взаимосвязь эксплуатационных параметров пар трения с конструктивными параметрами фрикционного узла.** Характеристика износа определяет долговечность и многие другие эксплуатационные параметры пар трения тормозных устройств. Если работа пар трения происходит при температурах ниже допустимой для материалов фрикционной накладке, то можно утверждать, что износ их рабочих поверхностей и металлических фрикционных элементов является суммой механического (усталостного)  $I_M$  и электрического (эрозионного)  $I_E$  износов:

Оценка вклада  $I_M$  в общий износ даст от 1/2 до 3/4 в зависимости от полярности рабочих поверхностей фрикционных накладок. Механический износ рабочей поверхности обода металлического фрикционного элемента составляет 5 – 10% от износа рабочей поверхности фрикционных накладок.

Расчет электрической компоненты износа  $I_E$  зависит от совокупности факторов (направления тока, режима разряда между элементами контакта). Количество переносимого вещества с рабочих поверхностей обода металлического фрикционного элемента, а, следовательно, и износ зависят от направления тока [4, 5], его величины [6, 7]. Зависимость количества переносимого вещества с различно поляризованных участков поверхностей фрикционных накладок на рабочую поверхность обода металлического фрикционного элемента, полученная методом радиоактивных изотопов, показана на рис. 2. Видно, что перенос с анодно-поляризованных участков поверхностей фрикционных накладок является более интенсивным.

Схема зависимости, позволяющая оценить влияние режима разрядов при работе участков рабочих поверхностей накладок с искрообразованием на износ, показана на рис. 3. Любая форма самостоятельного разряда в ионизированных газах, находящихся между парами трения при их взаимодействии, сопровождается эрозией микроучастков. При тлеющем разряде преобладает износ рабочей поверхности обода металлического фрикционного элемента, а искровой разряд приводит к изнашиванию рабочих поверхностей фрикционных накладок. Переход разряда из одной формы в другую всегда сопровождается инверсией электрической составляющей износа взаимодействующих микроучастков поверхностей трения.

Скорость скольжения по-разному влияет на износ поверхностей трения фрикционных узлов тормозных устройств. Однако этот фактор нельзя отождествлять с частотой вращения металлического фрикционного элемента (тормозного барабана или шкива). Установлено, что при малых скоростях скольжения при резком



Рисунок 2 – Массоперенос материала между фрикционными накладками и рабочей поверхностью обода тормозного барабана при поляризации накладок: 1 – анодной; 2 - катодной

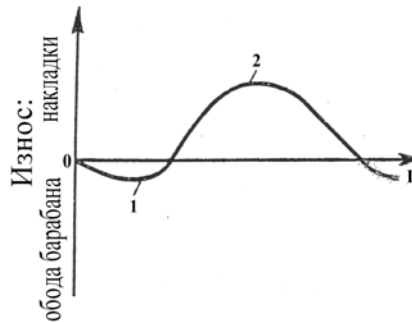


Рисунок 3 – Связь между режимами разряда и износом пары трения «полимер – металл»: 1 – тлеющий разряд; 2 – искровой

увеличении частоты вращения металлического фрикционного элемента имеет место увеличение износа рабочей поверхности фрикционных накладок. Биение ободов металлических фрикционных элементов, вызванное эксцентриситетом и неравномерностью износа рабочих

поверхностей их ободов, оказывает существенное влияние на скорость изнашивания, особенно в высокооборотных тормозных устройствах. Такое же влияние оказывает вибрация, вызванная низкочастотными колебаниями пар трения.

Таким образом, воздействие скорости скольжения, шероховатостей металлического фрикционного элемента, частоты вращения, биений и вибраций характерно тем, что они вызывают монотонное возрастание скорости изнашивания рабочих поверхностей накладок в узле трения.

По-иному проявляется действие удельных нагрузок на износ рабочих поверхностей фрикционных накладок задних колодок транспортного средства семейства ЗИЛ грузоподъемностью 11.0 тонн, относящегося согласно норм ЭЕК ООН к подкатегории N<sub>3</sub>, для испытаний типа I. Для последнего режим торможения являются следующие параметры: начальная и конечная скорости торможения составляют, соответственно, 60.0 и 30.0 км/ч; длительность цикла торможения 60.0 с, а число торможений равно 20. На рис. 5а обозначено, что  $n_1=400$  циклов торможений. Для фрикционных накладок, поляризованных за счет работы их поверхностей ниже и выше допустимой температуры, вид зависимости изнашивания  $I_v=f(p)$  оказывается различным (рис. 4 а). Наличие минимума на линии  $I_v(p)$  объясняется соотношением между долями электрического и механического износа и износом за счет искрообразования. По мере возрастания удельных нагрузок  $I_m$  уменьшается практически до нуля, что объясняется наличием минимума на кривой. Дальнейший рост  $p$  увеличивает доли механического изнашивания  $I_m$ .

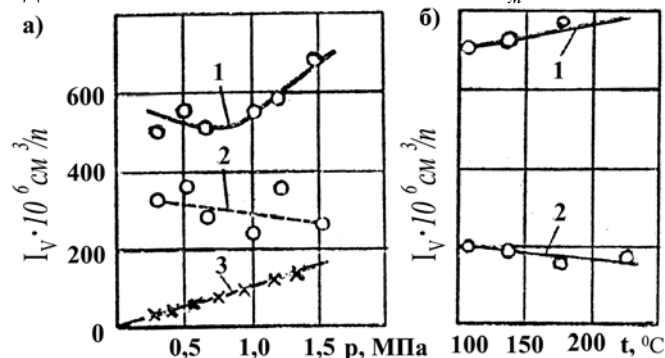


Рисунок 4 а, б – Влияние удельных нагрузок (а) и поверхностной температуры (б) в паре трения «полимер – металл» на интенсивность изнашивания рабочих поверхностей накладок при их поляризации: 1 – анодной; 2 – катодной; 3 – без тока

Влияние окружающей среды на изнашивание зависит от формирования тонкой пленки, образующейся на рабочих поверхностях пар трения тормозов перед очередным торможением в результате окислительных процессов. Зависимость изнашивания от содержания водяного пара между парами трения при достижении материалами

накладок выше допустимой температуры при десорбции влаги из их приповерхностных слоев, а также наличия водорода в омывающем воздухе показаны на рис. 5 а (кривые 1 и 2). На рис. 6 б (кривые 3 и 4) приведены зависимости скорости изнашивания рабочих поверхностей накладок при работе в воздухе при различных парциальных давлениях водяного пара и кислорода. Кривые, представленные на рис 6 а, б, полученные на машине трения СМУ – 2 при нахождении пары трения «диск – колодка» в специальной камере.

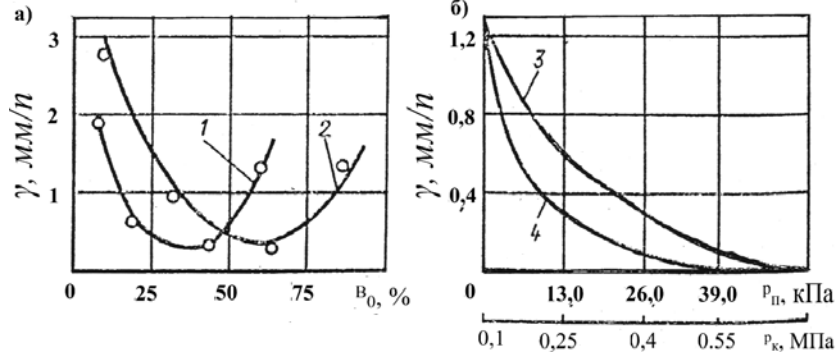


Рисунок 5 а, б – Зависимость интенсивности изнашивания пары трения «полимер – металл», выполненной в виде «диска – колодки» от среды: а – воздушной (кривая 1); при его оптимальной влажности ( $B_0$ ) и водородного (кривая 2); б – кислородной (кривая 3) и водяного пара (кривая 4) при парциальных давлениях  $p_k$  и  $p_n$

Из всего вышеизложенного следует, что для улучшения стабилизации износо-фрикционных свойств пар трения тормозных устройств необходимо обеспечивать терморегулирование их металлических фрикционных элементов.

**Влияние продуктов износа на электротермомеханическое трение и изнашивание.** Влияние продуктов износа на трение и изнашивание установлено давно. В работах И. В. Крагельского и А.В. Чичинадзе отмечается, что наличие частиц износа способствует некоторому повышению динамического коэффициента трения, в отдельных случаях он почти не зависит от наличия или отсутствия таких частиц, а иногда они, действуя подобно шарикам, снижают электротермомеханическое трения. Факторами, влияющими на сохранение частиц износа в зоне трения, могут являться размер площади микровыступов трения, наличие канавок или пазов на поверхности, коэффициент взаимного перекрытия.

Остановимся на энергетической сущности данной проблемы.

На формирование электрических схем трибосистем существенную роль оказывают материалы фрикционной пары, а именно: химические элементы, входящие в состав материалов, их валентность, а также преобладающий тип собственной проводимости

(табл. 1), а также знак заряда электричества элементов пары трения, определяющий закономерности трибоэлектричества.

В табл. 2 представлены некоторые закономерности трибоэлектричества генерируемого на микровыступах пар трения.

Первостепенную роль в трибосопряжении играют площади пятен контактов микровыступов в реальном масштабе времени поскольку электротермическое сопротивление дискретных контактов с

Таблица 1 –  
Характеристики сплавов

Химические элементы, содержащиеся в сплаве	Валентность	Преобладающий тип собственной проводимости
C	2, 4	диэлектрик
Al	3	<i>n</i>
St	4	полу-проводник
Ti	2, 3, 4	<i>n</i>
V	5	<i>n</i>
Cr	3, 6	<i>p</i>
Mn	2,3, 4, 6,7	<i>n</i>
Fe	2, 3	<i>n</i>
Nt	2	<i>n</i>
Cu	1, 2	<i>n</i>
Mo	6	<i>p</i>
W	6	<i>p</i>

Таблица 2 – Некоторые закономерности трибоэлектричества

Фрикционная пара	Знак заряда	
	+	-
Два химически одинаковых тела	плотность тела:	
	большая	меньшая
Диэлектрик – мелкие частицы (пыль) из этого же диэлектрика	диэлектрик	мелкие частицы
Диэлектрик-диэлектрик	Диэлектрик с диэлектрической проницаемостью:	
	большой	меньшей
	Диэлектрик с твердостью:	
Металл-металл	большой	меньшей
	металл с твердостью:	
Металл-диэлектрик	меньшей	большой
	диэлектрик	металл

различной энергетической активностью микро-конденсаторов и – термобатарей с мгновенным их переключением при изменении площадей пятен контакта микровыступов при соблюдении условий на первой стадии фрикционного взаимодействия ( $A_{\phi} < A_n$ ), что фактическая площадь контактирования ( $A_{\phi}$ ) мала по сравнению с номинальной ( $A_n$ ) производится суммирование составляющих генерируемых токов, а при  $A_n - A_{\phi}$  фиксируется трибоЭДС в сопряжении с переменным градиентов механических свойств его материалов и при этом темп проникновения взаимодействующих между собой импульсов электрического и теплового токов влияет на интенсивность износа микровыступов при реполяризации.

Известно, что с увеличением площади контактирующих микровыступов зарядные свойства их поверхностей увеличиваются. Помехой им будут служить частицы продуктов износа микровыступов со знаком минус. Все зависит от весового количества частиц продуктов. Если количество последних в канавках и пазах рабочей поверхности фрикционной накладки большое, то в этом случае в паре «металл (-) – полимер (-)» будет иметь место минимальный динамический коэффициент трения. При наличии в паре трения



минимального весового количества частиц продуктов износа имеем в паре «минус – плюс».

Экспериментальные исследования пар трения «металл-полимер» при наличии продуктов износа в зоне трения и при их искусственном удалении показали, что при удалении частиц износа динамический коэффициент трения повышался на 10-15%, а износ увеличивался в несколько раз рабочей поверхности фрикционной накладки.

**Выводы.** Таким образом, проиллюстрировано влияние элементов конструкции фрикционного узла тормозного устройства на износо-фрикционные свойства его пар трения с учетом воздействия продуктов износа на их энергонагруженность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ленточно-колодочные тормозные устройства. Монография (научное издание) в 2 т. Т.2 / [Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко, С.И. Криштопа, Д.Ю. Журавлев, А.В. Возный]. - Кубанск. государств. технолог. ун-т. - Краснодар - Ивано-Франковск, 2013.-441 с.
2. Трибология. Электротермомеханические основы, анализ и синтез на нано-, микро- и миллиуровнях и технические приложения: учебник для вузов / А.И. Вольченко. М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко [и др.]. – Киев; Краснодар, 2015. – 371 с.
3. Проектный и проверочный расчет фрикционных узлов ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок / А.Х. Джанахмедов, Д.А. Вольченко, Д.Ю. Журавлев, [и др.]; под общей редакцией академика А.Х. Джанахмедова. Стандарт. - Баку: «Апострофф», 2016. - 312 с.
4. Влияние влаги на триботехнические параметры фрикционных узлов тормозных устройств и ее удаление с их поверхностей трения (часть 1)/ М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко, Я.Б. Сторож и др.// Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2010. –Вип. 54. – С. 95–105.
5. Вольченко А. И. Новый подход к тепловой динамике трения фрикционных узлов тормозных устройств (часть 2)/ А.И. Вольченко, М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко и др. // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 55. – С.27–46.
6. Вольченко А. И. Новый подход к тепловой динамике трения фрикционных узлов тормозных устройств (часть 3)/ А.И. Вольченко, М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко и др. // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 55.–С.47–64.
7. Вольченко А. И. Новый подход к тепловой динамике трения фрикционных узлов тормозных устройств (часть 4) / А.И. Вольченко, М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко и др. // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 55.– С.47–64.