

УДК 621.891

В. С. ВИТВИЦКИЙ

*Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа***ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ФРИКЦИОННОГО УЗЛА  
НА ЭЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЕ ТРЕНИЕ**

*В материалах статьи показано влияние элементов конструкции фрикционного узла различных видов тормозных устройств на основные определяющие факторы электротермомеханического трения в трибосопряжении.*

**Ключевые слова:** *фрикционный узел, электротермомеханическое трение, статический и динамический коэффициент взаимного перекрытия пар трения, переполяризация, прямой и обратный ток.*

**Введение.** Роль особенностей конструкции фрикционного узла (трибосистемы) на электротермомеханическое трение и изнашивание настолько велика, что конструктивные параметры узла трения (площадь трения, взаимное перекрытие, форма и размеры фрикционно взаимодействующих элементов и их податливость, энергетические уровни поверхностных и приповерхностных слоев контактирующих элементов, генерируемые электрические токи и аккумулируемые тепловые токи, омывающие пары трения токи различных сред и др.) выделяются в число основных факторов, наряду с параметрами режима трения и свойствами фрикционно взаимодействующими материалами.

**Состояние проблемы.** Влияние конструктивных параметров узла трения на фрикционные характеристики опосредовано и проявляется главным образом через изменение площади фактического контакта, ведущие к изменению импульсных удельных нагрузок и динамических коэффициентов трения. При этом немаловажная роль отводится статическому и динамическому коэффициенту взаимного перекрытия пар трения (одно- и многопарных), введенных А.И. Вольченко и А.В. Чичинадзе. Кроме того, существенная роль отводится структуре материалов с их энергетическими уровнями, формирующие контакты различного типа в процессе электротермомеханического трения и износа. При этом играет роль образование и содержание продуктов изнашивания между трущимися поверхностями; динамический, электрический и тепловой режимы; циркулирующие токи опивающей среды и выделившихся продуктов с помощью крекинга с поверхностных слоев фрикционных накладок, ведущие к охлаждению узла трения [1–7].

**Цель работы.** Обосновать влияние конструктивных элементов фрикционного узла различных видов тормозных устройств на электротермомеханическое трение их пар трения.

**Влияние статического и динамического коэффициента перекрытия пар трения.** Согласно классификации А.В. Чичинадзе, тормозные и передаточные устройства разделяют на пять групп (колодочные, камерные, ленточные, дисковые и коньковые пары трения), которые, в свою очередь, делятся по типу микроконтактирования и коэффициенту взаимного перекрытия ( $K_{вз}$ ). Макроконтактирование бывает внешнее ( $0,1 \leq K_{вз} \leq 1,0$ ) и внутреннее ( $0,1 \leq K_{вз} \approx 1,0$ ) по образующей цилиндра; по поверхностям: призмы и цилиндров ( $0,1 \leq K_{вз} \approx 1,0$ ); призмы цилиндра и его торца ( $0,1 \leq K_{вз} < 1,0$ ); призмы цилиндра по плоскости бес-

конечной длины ( $K_{вз} \rightarrow 0$ ). В последнее время в тормозостроении у разработчиков проявился интерес к многопарным типам фрикционных узлов.

Важной конструктивной характеристикой узла трения является коэффициент взаимного перекрытия  $K_{вз}$ . Этот коэффициент представляет собой отношение прогнозируемых площадей трения трущихся элементов. Большое влияние этого параметра на трение объясняется тем, что его переменное значение, когда в процессе фрикционного взаимодействия пар трения происходит изменение их площадей по схеме: номинальная – фактическая – контурная. При этом необходимо учитывать тот факт, что статический коэффициент не всегда равен динамическому коэффициенту и наоборот. От значения динамического коэффициента взаимного перекрытия пар трения существенно зависят работа трения, тепловой режим, напряженно-деформируемое состояние их поверхностей и возможность попадания скоростных токов окружающей среды на поверхности трения. Неполное взаимное перекрытие обеспечивает возможность принудительной теплоотдачи (конвективной и радиационной) с открытых полированных участков металлического фрикционного элемента, а большая часть теплоты кондуктивным теплообменом отводится в его тело; при полном перекрытии вся теплота кондуктивным теплообменом распространяется в глубь полимерного и металлического фрикционных элементов. Поэтому с уменьшением динамического коэффициента взаимного перекрытия имеется тенденция к снижению поверхностной температуры  $t_n$  из-за уменьшения работы трения и увеличения динамического коэффициента трения, в то же время росту поверхностного градиента температуры  $dt_n/dl$  и уменьшению глубинного градиента температуры  $dt_r/d\delta$  для металлического фрикционного элемента. По существующим понятиям, меньшее взаимное перекрытие обеспечивает более легкий тепловой режим трения (температуру и ее градиенты) с учетом металлоемкости одного из фрикционных элементов. Практика подтверждает, что для многих теплонагруженных фрикционных узлов тормозных устройств уменьшение  $K_{вз}$  приводит к повышению динамического коэффициента трения и большей его стабильности при изменении поверхностной температуры до допустимой полимерного фрикционного элемента. Изменение динамического коэффициента взаимного перекрытия существенно влияет на температурные напряжения металлического элемента трения и способствует возникновению на его полированной поверхности оксидных пленок [3; 4].

**Влияние площади фактического контакта пар трения на их энергонагруженность.** По данным И.В. Крагельского, с увеличением номинальной площади трения для некоторых материалов наблюдается тенденция к росту динамического коэффициента трения. Л.М. Пыжевич указывает на некоторое увеличение фактической площади контакта и динамического коэффициента трения с уменьшением номинальной площади чугунной железнодорожной колодки, трущейся по рабочей поверхности стального колеса. Исследования трения фрикционных полимерных материалов в паре с металлами (серый чугун, сталь, латунь) указывает на увеличение динамического коэффициента трения с уменьшением номинальной площадью трения. Этот эффект наиболее значимо проявляется в области сравнительно малых площадей трения. Например, изменение номинальной площади трения от 1,0 до 100,0 см<sup>2</sup> в отдельных случаях приводит к снижению динамического коэффициента трения в 1,5–2,0 раза.

Изучение во времени закономерностей изменения динамического коэффициента трения фрикционных узлов тормозных устройств (рис. 1) позволяет констатировать о динамической картине общего баланса подведенной и отведенной к трибосистеме энергии.

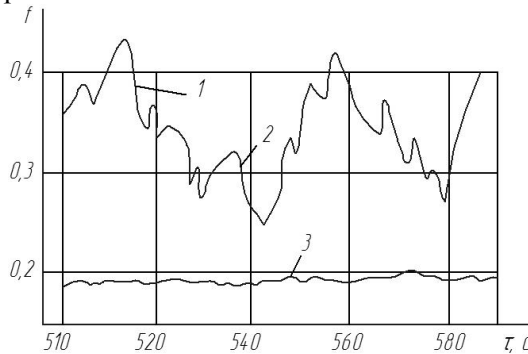


Рис. 1. Закономерности изменения во времени ( $\tau$ ) динамического коэффициента трения ( $f$ ) для пары «металл – полимер» (при  $p = 0,3$  МПа,  $v = 0,6$  м/с);  
1, 2 – высокочастотная и низкочастотная составляющие «сухого» трения;  
3 – кривая при мокром трении

Внешняя работа, подводимая к трибосистеме, затрачивается на упругое и пластическое деформирования поверхностных слоев и на образование микротермобатарей, которые работают в режимах микротермоэлектрогенераторов и холодильников, и как следствие, прямого нагрева и охлаждения поверхностных и приповерхностных слоев пар трения тормозных устройств. Другие виды трансформаций механической энергии при низких скоростях скольжения пар трения тормозов являются несущественными (например, излучение). Работа трения зависит от площади фактического контакта микроимпульсов и от физико-механических и химических свойств поверхностных и приповерхностных слоев материалов пар трения тормозных устройств [2], которые упрочняются и разупрочняются в процессе трения сравнительно медленно. Поэтому часть кривой 2 (рис. 1) динамического коэффициента трения, которая описывается низкочастотной составляющей, связанная с поступающей в трибосистему механической энергией. Последняя затрачивается на ее перераспределение и обеспечение работы микротермобатарей, которые генерируют электрическую энергию с последующим ее превращением в тепловую в приповерхностных слоях элементов фрикционных узлов тормозных устройств.

Природа высокочастотной составляющей (кривая 1 на рис. 1), по нашему мнению, связана с дискретностью контакта, а высокочастотные пики динамического коэффициента трения отвечают мгновенно происходящим энергетическим процессам в контактируемых поверхностных слоях, которые являются источником теплоты и холода, за счет генерирования в них прямых и обратных токов. Кривые 1, 2 и 3 (рис. 1) содержат информацию о влиянии направления тока, генерируемого в парах трения «полимер – металл», на величину динамического коэффициента трения. При прохождении прямых микротоков от контактирующих поверхностей обода тормозного барабана к рабочим поверхностям фрикционных накладок (анодно-поляризованные поверхности накладок)  $f$  оказывается всегда больше (см. рис. 1 интервалы времени (510–520)с и (550–570)с для кривых 1 и 2), чем у катодно-поляризованных участках поверхностей накладок колодок, материал которых находится при температурах выше допустимой тем-

пературы, и при этом возникают обратные микротоки (см. рис. 1 интервал времени (510 – 580)с для кривой 3). Причем во всех случаях  $f$  снижается с увеличением плотности тока  $j_n$  на контакте пар трения тормозных устройств. Динамический коэффициент трения катодно-поляризованных участков фрикционных накладок всегда меньше динамического коэффициента трения их анодно-поляризованных участков, т.е. ( $f_a > f_k$ ), при возрастании  $j_n$  изменяется для разных материалов по-разному [7].

Таким образом, переполаризация участков фрикционных накладок в парах трения тормозных устройств вызывает инверсию микротоков и скачки их величин, и как следствие, изменение динамического коэффициента трения, характеризующего энергетические процессы в их поверхностных и приповерхностных слоях пар трения.

**Влияние теплового режима.** Последний напрямую зависит от тормозного режима различных типов фрикционных узлов тормозных устройств.

В отношении процессов нагревания и вынужденного охлаждения пар трения тормозных устройств, влияющими на их поляризационные процессы, установлено три режима их работы.

Кратковременный режим. Во фрикционных узлах тормозов, работающих в этом режиме, температура поверхностей их трения не успевает достигнуть величины температуры допустимой для данного фрикционного материала, а пауза между торможениями настолько велика, что температура успевает снизиться до температуры окружающей среды, и каждое последующее торможение начинается при температуре поверхности трения, равной температуре окружающей среды. В этом случае существует квазibalанс между поляризационными и деполяризационными процессами, происходящими на поверхностях пар трения тормозов. К этому режиму относятся фрикционные узлы тормозов строительных лебедок, редко работающих грузоподъемных и транспортирующих машин и некоторых типов станков и т.п.

Длительный режим. Во фрикционных узлах тормозов, работающих в этом режиме, период торможения настолько велик, что температура поверхности трения достигает:

– некоторого значения установившейся температуры, когда выдерживается баланс между поляризационными и деполяризационными процессами, происходящими на поверхностях пар трения;

– допустимую температуру для материалов фрикционной накладки, вызывающей крекинг процессы в ее поверхностных слоях, способствуя тем самым нарушению деполяризационных процессов; при этом существенно повышается энергетический уровень поверхностных слоев фрикционной накладки, а металлического фрикционного элемента он становится квазистабильным из-за малого градиента температуры по его толщине.

В таком режиме работают некоторые спускные тормоза грузоподъемных машин, буровых и гидрологических лебедок, транспортных средств на длительных спусках и т.п.

Повторно-кратковременный (циклический) режим. Этот режим характеризуется наличием, периодически повторяемых процессов торможения и пауз в работе фрикционных узлов тормоза. Период охлаждения (пауза) относительно невелик, и температура поверхности трения не успевает снизиться до температуры окружающей среды, поэтому каждое последующее торможение начинает-

ся, при температуре более высокой чем начальная температура предыдущего торможений. По мере увеличения температурного перепада между температурой наружной и внутренней поверхностью металлического фрикционного элемента тормоза, а также температурой окружающей среды увеличивается количество теплоты, отдаваемой в окружающую среду, и рост температуры поверхности трения замедляется. Это вызвано тем, что темп нагревания превышает темп принудительного охлаждения, и следовательно поляризационные процессы играют основную роль. После некоторого числа торможений количество теплоты отводимой в окружающую среду, становится равным количеству теплоты, образующейся при фрикционном взаимодействии пар трения тормоза, и создается некоторое условное тепловое равновесие, при котором температура, возникающая на поверхности трения, к концу каждого торможения будет иметь одно и то же значение (условная установившаяся температура). Равенство поляризационных процессов продолжается непродолжительное время. В дальнейшем все процессы происходят так как при длительном режиме. В циклическом аperiодическом режиме работают фрикционные узлы тормозов подъемно-транспортных машин, транспортных средств при движении в городских условиях и т.п.

Из анализа выше приведенных режимов теплового нагружения различных типов фрикционных узлов тормозных устройств убеждаемся, что в условиях электротермомеханического трения, когда возможно существенное повышение температур (вспышки, поверхностной и объемной), решающее влияние конструкции фрикционного соединения на трение проявляется через тепловой режим.

Конструктивные макро- и миллигеометрические параметры фрикционного соединения оказывают влияние на все основные характеристики теплового режима электротермомеханического трения; закономерности распределения тепловых потоков, поверхностную температуру, температурные градиенты и объемное распределение температур в телах фрикционного взаимодействия. Конструкция влияет на общие закономерности генерирования и аккумуляирования электрических и тепловых токов через динамический коэффициент трения, а через податливость элементов трения – на равномерность распределения аккумуляруемой теплоты в поверхностных слоях пар трения в пределах номинальной площади контакта.

Масса элементов трения, в особенности, металлического элемента, формирующего теплоотводящий объем, размеры полированной поверхности трения и матовой поверхности, являющейся теплоотводящими, выступают в качестве факторов, определяющими не только закономерности распространения теплоты в телах трения, но и формируют энергетические уровни их поверхностных слоев, характеризующиеся температурным полем.

**Влияние окружающей среды и газовых смесей при электротермомеханическом трении.** Токи окружающей среды и газовых смесей рассматриваются как факторы влияющие на развитие физико-химических процессов и явлений на пятнах контактов микровыступов и в связи с этим влияющими на электротермомеханическое трение.

Многочисленными исследованиями проиллюстрировано, что воздух является неотемлемым элементом среды, в которой обычно работают узлы трения, – являясь окислителем при повышенных температурах, способствует процессу термоокислительной деструкции связующих, входящих в состав полимерных материалов. Продукты разложения связующего, находясь на поверхности тре-

ния, образуют смазочный материал, приводящий к снижению динамического коэффициента трения.

Установлено, что форма и конструктивные размеры узла трения, коэффициент взаимного перекрытия являются факторами, влияющими на действие подаваемой принудительной газовой среды на фрикционный контакт.

На основании вышеизложенного представляется возможным проиллюстрировать влияние особенностей конструкции узла трения тормозного устройства на процессы электротермомеханического трения (см. рис. 2).

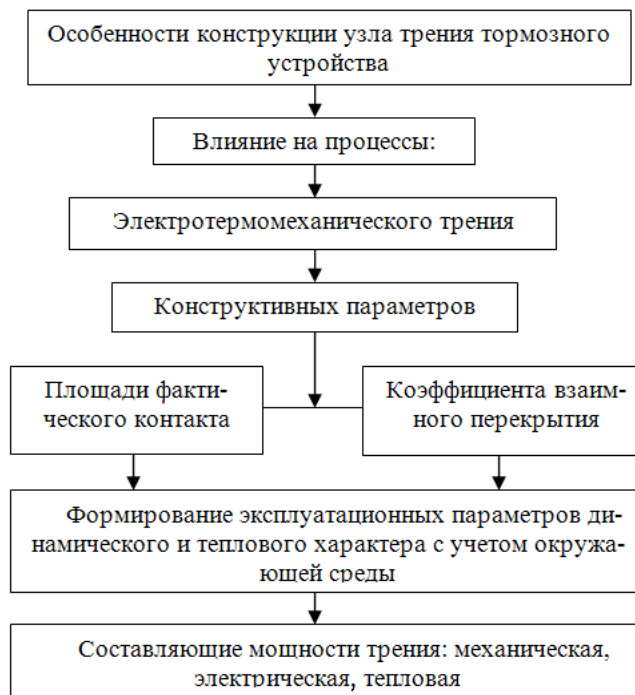


Рис. 2. Особенности конструкции узла трения тормозного устройства и его влияние на процессы электротермомеханического трения

Механическая, электрическая и тепловая составляющие мощности трения фрикционных узлов в дальнейшем будут использоваться при оценке ресурса полимерных накладок различных типов фрикционных узлов тормозных устройств.

**Выводы.** Таким образом показано, что изменение динамической и тепловой нагруженности пар трения различных типов фрикционных узлов тормозных устройств решающее влияние оказывают особенности конструкции их элементов.

#### Список литературы

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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. 56. – С. 55–71.

5. Новый подход к тепловой динамике трения фрикционных узлов тормозных устройств (часть 5) / А.И. Вольченко, М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко [и др.] // Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2012. – Вип. 57. – С.34–47.

6. Хайнике Г. Трибохимия / Г. Хайнике. – М.: Мир, 1987. – 584 с.

7. Трибология / А.И. Вольченко, М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко [и др.] // Киев-Краснодар, 2015. – 371 с.

Стаття надійшла до редакції 30.09.2016

*В. С. ВИТВИЦЬКИЙ*

### ВПЛИВ КОНСТРУКЦІЇ ФРИКЦІЙНОГО ВУЗЛА НА ЕЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНІЧНЕ ТЕРТЯ

У матеріалах статті показано вплив елементів конструкції фрикційного вузла різних видів гальмівних пристроїв на основні визначальні чинники електротермомеханічного тертя в трибоспряженні.

**Ключові слова:** фрикційний вузол, електротермомеханічне тертя, статичний і динамічний коефіцієнт взаємного перекриття пар тертя, переполаризація, прямий і зворотний струм

*V. S. VYTVYTSKYI*

### INFLUENCE OF CONSTRUCTION OF FRICTION UNITS ON ELECTRIC THERMAL MECHANICAL FRICTION

The role of the design features of the friction unit (tribosystems) on electric thermal mechanical friction and wear is so great that the constructive parameters of friction unit (friction area, the mutual re-coating, shape and size of frictional engagement elements and its suppleness, energy levels of surface and subsurface layers of contacting elements, generated electric currents and accumulated thermal currents and others) stand out among the main factors, along with the friction mode parameters and properties of the frictional materials.

We've illustrated next questions: effect of static and dynamic friction coefficient of mutual overlap of friction pairs; the impact of area of actual contact of friction pairs on their energy-loading; influence of thermal regime; influence of environment and gas mixtures on electric thermal mechanical friction.

The materials of the article show the influence of the structural elements of the friction unit of different types of braking devices for major determinants electric thermal mechanical friction in friction units.

**Keywords:** friction unit, electric thermal mechanical friction, static and dynamic coefficient of mutual overlap of friction pairs, repolarization, direct and reverse current.

**Витвицкий Василий Степанович** – аспирант кафедры механики машин, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019, тел.: +38 0342 72 71 47, E-mail: vytvvtskyi.v.s@gmail.com.