

УДК 621.891

Д. А. ВОЛЬЧЕНКО

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина

К ПРОБЛЕМЕ ЭЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ В НАГРУЖЕННЫХ МНОГОПАРНЫХ ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗАХ (часть первая)

Рассмотренные материалы посвящены: особенностям конструкций многопарных фрикционных узлов; элементам теории механохимического взаимодействия их пар трения; трению, изнашиванию и генерированию электрических и тепловых токов при взаимодействии микровыступов.

Ключевые слова: *ленточно-колодочный тормоз, многопарные фрикционные узлы, пары трения, микровыступы с пятнами контакта, диффузия, адсорбция, механохимическое взаимодействие.*

Введение. Закономерности процессов трения скольжения в металлополимерных фрикционных парах ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок при спуске колонны бурильных труб в скважину, а также явлений и эффектов, возникающих при этом на сопряженных поверхностях, определяются динамикой развития на них механических, электрических, тепловых и химических полей.

Анализ литературных источников и постановка проблемы. Тормозное устройство буровой лебедки является одним из наиболее важных и ответственных узлов бурового оборудования, предназначенных, главным образом, для спускоподъемных операций. От его технического состояния в значительной степени зависит успех бурения. При спуске в скважину бурильного инструмента на поверхности трения тормозного шкива возникают большие перепады температур и высокие температурные градиенты, которые являются основной причиной преждевременного выхода из строя металлополимерных пар трения.

Учитывая, что процесс торможения при спуске бурильного инструмента является кратковременным и носит циклический характер, состоящий из последовательно повторяющихся операций спуска бурильной колонны на длину одной свечи, рабочие поверхности тормозных шкивов под воздействием больших перепадов температуры подвергаются либо хрупкому разрушению с последующим трещинообразованием, либо пластической деформации [1].

При контактно-импульсном взаимодействии микровыступов поверхностей трения металлополимерных пар тормозных устройств элементы трения испытывают электротермомеханическое напряженно-деформируемое состояние. При этом происходит распределение электрических и тепловых полей возле зоны контактного взаимодействия. На макроуровне (внешние параметры) – это эксплуатационные параметры (скорость скольжения; податливость элементов пары трения и ее контактного стыка; коэффициенты статического и динамического взаимного перекрытия; удельные нагрузки; динамические коэффициенты трения; тормозной момент; температуры: вспышки, поверхностные, объемные и др.), которые определяются с учетом известных условий взаимодействия [2] и микроформы трущихся поверхностей. На микроуровне (внутренние параметры) – это фактически импульсно действующие: нормальные силы, удельные нагрузки, деформации и внутренние напряжения, электрические и тепловые токи и порождаемые ими поля, температуры в приповерхностных слоях и др., которые определяются на основании теории единого поля взаимодействия [3]. На наноуровне

рассматривают: условия равновесия на энергетических уровнях при работе полимерной накладки (ее рабочего поверхностного слоя) в зоне температур, ниже и выше допустимой для ее материала; потенциальные барьеры в условиях равновесия при контактно-импульсном взаимодействии термоэлементов микротермобатарей в парах трения; контакты между микровыступами металлического элемента трения и полупроводниковыми пленками полимерной накладки; переходы типа $p-n$ в микротермобатареях металлического элемента трения и полупроводниковых пленок полимерных накладок; взаимодействия электрических и тепловых полей и др.

Взаимодействие пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения включает в себя напряженно-деформированное состояние и генерируемые электрические и тепловые токи на их поверхностях. На макроуровне – это номинальные характеристики, определяемые с учетом известных условий взаимодействия в макроформе поверхностей. На микроуровне – это фактические импульсные удельные нагрузки, фактические механические, электрические, тепловые и химические поля в поверхностных и приповерхностных слоях, омываемые скоростными токами компонентов сред, возникшие на поверхностях пятен контактов микровыступов при их взаимодействии.

Дискретный контакт в металлополимерных парах трения тормозных устройств обусловлен постоянным изменением положения его элементарных участков. Последние представляют собой очаги электрических и термических неровностей с различными энергетическими уровнями. Микроконденсаторы, образованные на рабочих поверхностях пары трения «металл-полимер», являются источником энергии электрического поля. Кроме того, электрические очаги способствуют генерированию электрических токов с помощью сформированных микротермоэлектробатарей из материалов пары трения с различными механическими и физико-химическими свойствами. Это обуславливает их работу в режиме микротермоэлектрогенераторов и микротермоэлектрохолодильников. В связи с этим, одни участки поверхности трения нагреваются, а другие – охлаждаются. Трибоэффект при трении микровыступов рабочих поверхностей вызывает возникновение термических очагов. Они обладают более высоким энергетическим уровнем. В результате этого более разогретые локальные участки полимерной поверхности трения, благодаря термическому расширению и податливости, приподнимаются над остальной поверхностью и начинают воспринимать всю прикладываемую к фрикционному узлу нагрузку. Так продолжается до тех пор, пока износ этого участка поверхности не обусловит снижение его геометрического уровня. После чего снова происходит перераспределение нагрузки, которая оказывается приложенной уже к другим, менее изношенным участкам поверхности. Износ микровыступов поверхности трения сопровождается не только перераспределением нагрузки, но и переполаризацией вследствие изменения направления микротермотоков. Все это влияет на интенсивность процессов нагрева и вынужденного охлаждения элементов трения фрикционного узла.

Разрушение материала при трении обусловлено контактно-импульсным взаимодействием, сопровождающимся совместным действием механической, электрической и тепловой нагрузки. Это вызывает рост поверхностных температур и температурных градиентов, что приводит к значительным термическим напряжениям в металлическом элементе трения [4].

Тепловые напряжения, возникающие в элементах пары трения тормозов, являются следствием теплового удара, вызванного быстрым нарастанием температуры. Это сопровождается структурными изменениями в материалах пары трения [5].

Закономерности трения скольжения и процессов, явлений и эффектов, возникающих на пятнах контактов микровыступов и в зазорах между ними, зависят от интенсивности их нагревания (импульсного или длительного), характера формирования токов температурного поля и его развития. С другой стороны, наблюдаемые при трении процессы, явления и эффекты настолько взаимосвязаны, что тепловая задача не может быть рассмотрена в чистом (классическом) виде. Ее нужно решать с учетом формирования токов теплового поля и распределения теплоты в парах трения «металл-полимер» при заданных начальных и граничных условиях. Сложный комплекс разнородных, но взаимосвязанных механических, электрических, тепловых, химических и электромагнитных воздействий происходит в пространстве начальные-граничные условия. В связи с этим, тепловая задача трения должна рассматриваться с учетом термодинамического и механического состояния поверхностей трения и процессов, явлений и эффектов на поверхностях и приповерхностных слоях пары трения «металл-полимер».

Электротермомеханическое трение в высоконагруженных металлополимерных парах ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки осуществляется при переменных скоростях скольжения и удельных нагрузках, в условиях генерируемых электрических токов и аккумулируемой теплоты с неравномерностью нагревания приповерхностных слоев пар трения «металл-полимер». При этом процессы, явления и эффекты, протекающие в приповерхностных слоях элементов трения, отличаются большой скоростью. Для поверхности каждого из тел в паре характерен высокий уровень неоднородности материалов и дефектов структур, масштабы которых соизмеримы с размерами пятен касания, что оказывает влияние на эффективность электротермомеханического трения. Оценка уровня энергонагруженности поверхностей трения и учет ее влияния на основные процессы, явления и эффекты необходимы при решении задач обеспечения надежности фрикционных узлов [5; 6].

Цель настоящей работы – установить влияние механических, электрических, тепловых и химических полей на величину и количество пятен контактов микровыступов многопарных ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок.

Термокинетические модели взаимодействия металлических элементов трения в многопарных узлах. Особенно удачной конструкцией является ленточно-колодочный тормоз с новыми фрикционными узлами, в которых полимерные накладки установлены на рабочую поверхность тормозного шкива. На последнем накладки могут быть как независимыми, так и соединенными между собой в бандаж [4].

Установлено, что применение ленточно-колодочного тормоза с подвижными фрикционными накладками по сравнению с серийными узлами трения позволяет:

- использовать два узла трения с металлическими элементами трения различной жесткости [«внутренняя поверхность тормозной ленты – внешние поверхности фрикционных накладок (обратные пары трения)» и «внутренние поверхности фрикционных накладок – рабочая поверхность тормозного шкива (прямая пара трения)»], что существенно снижает динамическую нагруженность фрикционных узлов тормоза;

- изменять режимы торможения, что способствует выравниванию до некоторой степени удельных нагрузок за счет различного времени взаимодействия внешних и внутренних пар трения тормоза;

- в процессе торможения, а также перед началом торможения изменять положение подвижных накладок относительно рабочей поверхности тормозной

ленты, что способствует равномерному износу поверхностей взаимодействия, а также импульсной термической обработке;

– интенсифицировать вынужденное охлаждение рабочих поверхностей шкива и фрикционных накладок за счет их вращения вместе со шкивом;

Кроме того, наличие двух фрикционных узлов с конструктивными особенностями в тормозе облегчает реализацию принудительного охлаждения (термоэлектрического, магнитного, «тепловой трубы» и других видов) с отводом теплоты от внешних и внутренних пар трения.

Рассмотрим взаимодействие металлического элемента трения со скоростными потоками компонентов омывающих сред. Адсорбционные процессы сильно изменяют работу выхода электронов в процессе образования адсорбционной связи между свободным атомом или молекулой и поверхностным дипольным полем. Изменение работы выхода электронов металлической поверхности фрикционного элемента адсорбированными атомами или молекулами прямопропорционально их эффективному дипольному моменту и степени заполнения поверхности. При адсорбции возникает поверхностный двойной электрический слой, влияющий на изменение и распределение электронных зарядов в нем. Более того, работа совершаемая электроном, находящимся в адсорбированном слое, зависит от того, как диполь (рис. 1) расположен относительно (воображаемой) электронной-нейтральной плоскости. При этом электрон совершает работу по преодолению полного или половины потенциала адсорбированного слоя. Необходимо учитывать тот факт, что в поверхностном слое фрикционной накладки при выгорании связующих компонентов ее материалов при достижении допустимой температуры и выше молекулы образовавшегося растворителя сильно ориентированы, в результате чего их эффективный дипольный момент увеличивается по сравнению с дипольным моментом поверхности металлического элемента трения. Это обстоятельство является одним из основных условий инверсии множества микротоков от рабочей поверхности накладок в рабочую поверхность металлического элемента трения [2].

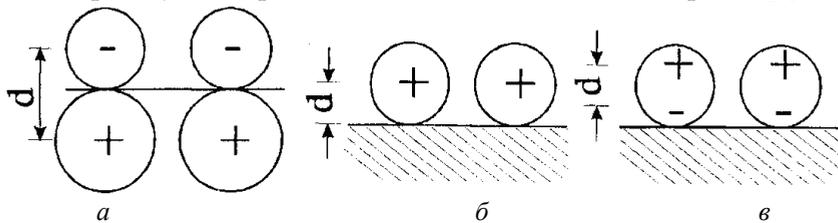


Рис. 1. Диполи, возникающие при адсорбции на поверхности металла: а, б – хемосорбция: ковалентная; ионная; в – физическая сорбция; d – расстояние между центрами зарядов

Электронно-ионная модель металлополимерных пар трения «лента-накладка» и «накладка-шкив» в ленточно-колодочном тормозе приведена на рис. 2.

Оценим трибокинетическую модель взаимодействия металлического фрикционного элемента с газовой фазой при трении.

Трибокинетическая модель предложена для различных процессов, происходящих в слое микронеровностей металлического элемента трения под действием упругих или пластических деформаций при торможении в присутствии газовой среды (рис. 3).

На рис. 3 использованы следующие обозначения: I – химическая реакция $\text{CO}_2 + \text{M} \leftrightarrow \text{MO} + \text{CO}$; II – химическая реакция $\text{CO} + \text{M} \leftrightarrow \text{C} + \text{MO}$; III – каналы в микровыступах. Заштрихован поверхностный слой, нарушенный в результате трения скольжения.

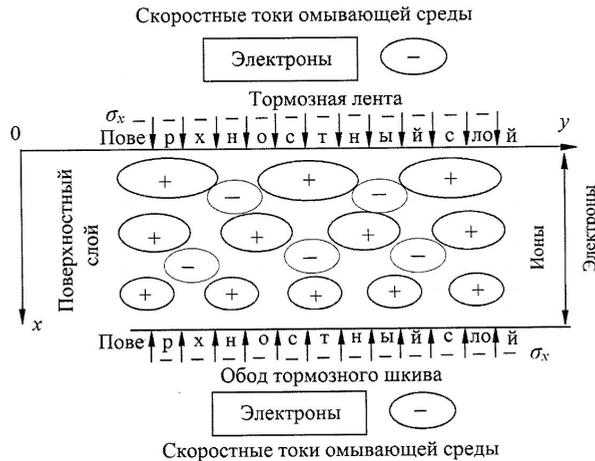


Рис. 2. Электронно-ионная модель металлополимерных пар трения «лента-накладка» и «накладка-шків» в ленточно-колодочном тормозе с подвижными накладками

Стрелкой вверх на границе раздела обозначена трибодесорбция, стрелкой вниз – трибоабсорбция, двойные стрелки – трибодиффузия. Газовая фаза достигает рабочей поверхности металлического элемента трения путем диффузии, а затем адсорбируется. Трибоабсорбция происходит по точкам, которые попали в зону действия сил трения. В зависимости от условий контактирования пар трения тормозного устройства и их теплового состояния непосредственно в процессе торможения происходит трибоабсорбция в трибоплазме из газовой фазы наряду с трибохимической реакцией или с адсорбцией и реакцией газа на рабочей поверхности металлического элемента трения. Кроме того, трибоадсорбированный газ адсорбируется металлом и только после этого происходят с ним химические превращения. Наряду с этим трибоабсорбированный газ на микроучастках контактирования переносится в их приповерхностные слои (трибодиффузия), в которых интенсивность химической реакции в значительной степени определяется процессами трибосорбции и диффузии [2]. В случае, когда скорости трибосорбции и трибореакции одного порядка, реакция смещается в сторону рабочей поверхности металлического элемента трения. При этом необходимо обратить внимание на то, что трибоиндукционные процессы очень часто существенно отличаются от соответствующих термоиндукционных процессов, поэтому константы, характеризующие абсорбцию и диффузию при термоактивации, нельзя использовать для описания трибокинетических закономерностей.

Представление пар трения тормозных устройств в виде конденсатора позволяет рассматривать дифференциальные емкости и эффекты, возникающие возле заряженной поверхности раздела. Особенности структуры двойного слоя представлены на рис. 4. На поверхности раздела могут присутствовать химически адсорбированные ионы, в данном случае анионы, которые имеют тот же знак, что и рабочая поверхность металлического элемента трения тормозного устройства. Данные анионы дегидратированы, и через их центры проходит внутренняя плоскость Гельмгольца. Слой Штерна образовывается, главным образом, электростатически адсорбированными катионами, через центры которых проходит внешняя плоскость Гельмгольца. При этом большая часть поверхности раздела занята молекулами воды. Кроме того, на сильно заряженной поверхности раздела концентрация адсорбированных ионов весьма мала, поскольку один ион приходится на $\approx 10 \text{ \AA}^2$.

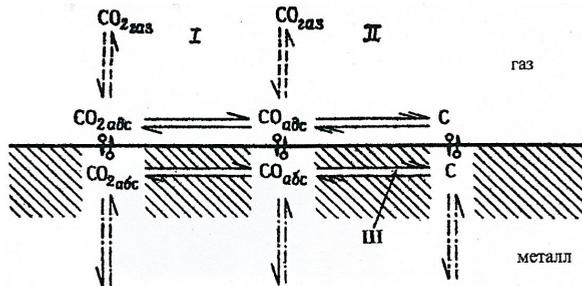


Рис. 3. Трибокинетическая модель трибосорбции и трибореакций в системе « CO_2 –металл»; $\text{CO}_2_{\text{газ}}$ – CO_2 в газовой фазе; $\text{CO}_2_{\text{адс}}$ – CO_2 в адсорбированном состоянии; $\text{CO}_2_{\text{абс}}$ – CO_2 в абсорбированной форме, те же индексы для CO

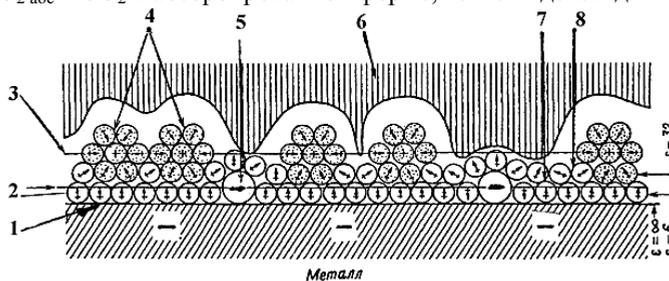


Рис. 4. Детальная модель двойного слоя в паре «рабочая поверхность металлического элемента трения–вода»: 1 – поверхность металла с потенциалом φ_M ; 2, 3 – плоскости Гельмгольца и Гуи с потенциалами φ_1 и φ_2 ; 4 – сольватированные катионы; 5 – специфические адсорбируемые анионы; 6 – нормальная структура воды ($\epsilon = 78,5$); 7, 8 – слои воды: первый ($\epsilon = 6$); второй ($\epsilon = 32$); ϵ – диэлектрическая постоянная воды

Представленная схема на рис. 4 наглядно все иллюстрирует для случая, когда металлический элемент трения находится в статике. Иначе все происходит в динамике [3]. При торможении дискретное множество микроконтактного взаимодействия поверхностей «вращающийся металлический элемент – фрикционная накладка» при различных тепловых состояниях вносит существенные изменения в рассмотренную ранее схему за счет: переполаризации ионов и катионов; изменения положения плоскостей, когда внутренняя стает внешней и наоборот; существенного изменения усредненных электрических свойств; поверхности жидкости, которая становится неоднородной в том понимании, что ее структуру нарушают адсорбированные частицы материалов накладки и другие составляющие.

Анализ процессов теплообмена в ободу тормозного шкива и во фрикционных накладках при взаимодействии их рабочих поверхностей с омывающими газовыми смесями, а также массопереноса от рабочих поверхностей накладок на рабочую поверхность обода шкива показал, что в интенсификации тепло- и массообменных процессов существенную роль играет уровень теплового состояния материалов приповерхностного слоя фрикционной накладки.

Диффузия. Пара трения является составленной из реальных материалов («сталь-полимерная накладка») и имеет пористую структуру. Поверхность раздела между образующими пару трения элементами и скоростными токами омывающей среды включает в себя внешнюю (видимую) и внутреннюю (невидимую) поверхность, образованную микротрещинами в объеме приповерхностных слоев материалов.

Дефекты структуры материалов образуют те каналы, по которым осуществляется диффузия компонентов газовой среды в приповерхностные слои пары

трения. Диффузия компонентов газовой среды и взаимная термодиффузия при поверхностных слоев материалов, образующих пару, это наиболее простые процессы при электротермомеханическом трении. Им принадлежит одна из основных ролей в зарождении, развитии и протекании новых процессов, явлений и эффектов и в конечном изменении свойств поверхностей микровыступов (формирование геометрии контакта и структуры поверхностных слоев, массоперенос, генерирование электрических и тепловых токов, адгезионно-деформационное взаимодействие, интенсивность изнашивания материалов и т.д.).

Выводы. Таким образом, для всесторонней оценки электротермомеханического трения при взаимодействии микровыступов металлополимерных пар ленточно-колодочного тормоза необходимо рассматривать сопровождающие процессы, явления и эффекты, имеющие место при разомкнутом состоянии пар трения.

Список литературы

1. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1985. – 480 с.
2. Лурье С. Прогноз механических и динамических свойств материалов с микро- и наноструктурой на основе градиентной теории сред / С. Лурье // Электронный журнал: Труды ИПРИМ РАН. – М., 2009. – 46 с.
3. Журавлев Д.Ю. Единое поле взаимодействия металлополимерных пар трения / Д.Ю. Журавлев // Проблемы трения и изнашивания: науч.-техн. сб. – К.: НАУ, 2013. – Вып. 1(60). – С.35-41.
4. Фрикционные узлы / [А.А. Петрик, Н.А. Вольченко, П.Ю. Пургал, Д.А. Вольченко] Монография (научное издание). В 2-х томах. Том 1. Кубанск. Государств. технологич. ун-т (Россия). – Краснодар, 2003. – 220 с.
5. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / И.Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 475 с.

Стаття надійшла до редакції 12.12.2013

Д. О. ВОЛЬЧЕНКО

ДО ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНІЧНОГО ТЕРТЯ В НАВАНТАЖЕНИХ БАГАТОПАРНИХ СТРІЧКОВО-КОЛОДКОВИХ ГАЛЬМАХ (частина перша)

Розглянуті матеріали присвячені: елементам теорії механохімічної взаємодії пар тертя стрічково-колодкового гальма; тертю, зношуванню і генеруванню електричних і теплових струмів при взаємодії микровиступів.

Ключові слова: стрічково-колодкове гальмо, пари тертя, микровиступи з плямами контакту, дифузія, абсорбція, механохімічна взаємодія.

D. O. VOLCHENKO

TO PROBLEM OF ELECTRO-THERMO-MECHANICAL FRICTION IN THE LOADED MULTIPAIRS SHOES BAND-BLOCK BRAKES (part I)

The considered materials are devoted: to the elements of theory of mechanical and chemical co-operation of pairs of friction of band-block brake; to the friction, wear and generating of electric and thermal currents at co-operation of microledges of surfaces of friction.

Keywords: band-block brake, multipair friction units, pairs of friction, microledges with the spots of contact, diffusion, adsorption, mechanochemical co-operation.

Вольченко Дмитро Олександрович – д-р техн. наук, професор кафедри розробки та експлуатації нафтових і газових родовищ.