

УДК 62-92.113

Д.А. Вольченко, доцент, канд. техн. наук,

Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника

Ул. Шевченка, 57, г. Івано-Франківськ, Україна, 76000

В.С. Скрыпник, доцент, канд. техн. наук,

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ул. Карпатська, 15, г. Івано-Франківськ, Україна, 76019

М.И. Клендий, ст. преподаватель

Бережанський агротехнічний інститут

Ул. Академічеська, 20, г. Бережани, Тернопільської обл., Україна, 47501

К ВОПРОСУ ЭЛЕКТРОТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНОСА МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАР ТРЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

Раскрыта сущность электротермомеханического износа металлополимерных пар трения тормозных устройств, исходя из их динамической, электрической и тепловой нагруженности микровыступов поверхностей.

Ключевые слова: пара трения; металлический и полимерный элементы; электротермомеханический износ; тормозное устройство.

Введение. Тормозное устройство буровой лебедки является одним до наиболее важных и ответственных узлов бурового оборудования, предназначенных, главным образом, для спускоподъемных операций, от технического состояния которого 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].

Состояние проблемы. 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; подавляемость элементов пары трения и ее контактного стыка; коэффициенты статического и динамического взаимного перекрытия; удельные нагрузки; динамические коэффициенты трения; тормозной момент; температуры: всплшки, 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 материалов; потенциальные барьеры в условиях равновесия при контактно-импульсном взаимодействии термоэлементов микротермоэлектробатарей в парах трения; контакты между микровыступами металлического элемента трения и полупроводниковыми пленками полимерной накладки; переходы типа p-n в микротермоэлектробатареях металлического элемента трения и полупроводниковыми пленками полимерных накладок; взаимодействия электрических и тепловых полей и др.

Цель работы. Раскрыть сущность электротермомеханического износа поверхностных слоев металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки, исходя из действия на поверхности микровыступов динамических, электрических и тепловых полей.

Электротермомеханическая теория износа металлополимерных пар трения тормозных устройств. 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. Трибозффект при трении микровыступов рабочих поверхностей вызывает возникновение «термических» очагов. Они обладают более высоким энергетическим уровнем. В результате этого более разогретье 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 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 переполяризацией из-за изменения направления микротермотоков. Все это влияет на интенсивность процессов нагревания 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 [3].

Решение проблемы разрушения при трении в тонком поверхностном слое, обусловленного дислокационным и диффузионным механизмами пластичности в широком интервале температур, нагрузок и скоростей, связано с трудностями теоретического и экспериментального характера. Это, с одной стороны, вызвано противоречивыми результатами исследований состояния микровыступов поверхностей трения, с другой стороны, определяется отсутствием в литературе критического анализа и соответствия различных методов исследований реальным условиям эксплуатации.

Нами проанализировано физико-механическое состояние поверхностных и приповерхностных слоев металлического элемента трения в условиях тяжелого электротермомеханического нагружения. Такой анализ необходим при разработке критериев выбора оптимальных конструктивных параметров и материалов элементов трения.

Явления, происходящие при разрушении тормозного шкива под действием развивающейся при трении теплоты, обусловлены не только высокими температурами, но и напряжениями, возникающими от температурных градиентов. Благодаря высоким температурам и температурным градиентам на поверхности трения шкивов могут возникать напряжения, которые, как показал Т.А. Оберлс, значительно превышают напряжения от импульсных нормальных сил. Поэтому задача учета термических напряжений не является просто задачей термопрочности. Она представляет собой комплексную задачу тепловой динамики трения и прочности, поскольку термическое разрушение является следствием электротеплообразования при трении. Это обстоятельство должно быть учтено при выборе материалов для реального узла трения.

Основная часть возникающих при трении напряжений сосредоточена в приповерхностных слоях металлических элементов трения (рисунок 1), что подтверждается известной аналитической зависимостью между временем торможения и эффективной глубиной проникновения теплоты, $b = 1,73\sqrt{at}$. На пятнах фактического касания, как показано Г.А. Фазекасом, А.В. Чичинадзе, В. Черпелем, Ф. Пиггелем и др., эти напряжения становятся пропорциональными температуре вспышки и вызывают сильный нагрев в тонких приповерхностных слоях, что приводит к образованию прижогов, термических пятен и очагов микротрещин.

Поэтому можно считать, что в процессе торможения именно в приповерхностном слое элементов трения при воздействии электрического разряда и температурной вспышки $\vartheta_{всп}$ зарождаются трещины, обусловленные термической усталостью материала. Эти трещины развиваются в результате остывания поверхностного слоя и возникновения температурного градиента от ϑ^* , когда термические напряжения в приповерхностном слое достигают наибольших значений и проходят через максимум. При повышении температуры изменяется характер перемещения структурных составляющих в материале, снижается прочность границ зерен и увеличивается скорость окисления.

Анализ механизма изнашивания фрикционных пар показал, что в условиях циклического действия электрических токов, нагревания и вынужденного охлаждения большое влияние на зарождение и развитие трещин оказывают как многофазность структуры, так и термические свойства отдельных фаз. Определенную роль в разрушении материала играет характер распределения трещин по поверхности.

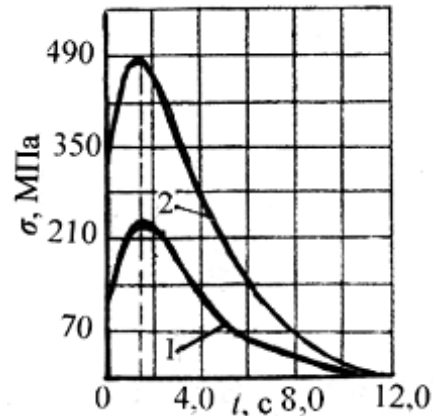


Рисунок 1 – Изменение поверхностных напряжений в материале обода шкива, вызванные температурами вспышки и температурными градиентами в процессе торможения: кривая 1 - σ_z ; кривая 2 - σ_x

Поскольку температуры вспышки могут быстро достичь нескольких сот градусов, то их скачок приводит материал в состояние пластичности, когда сопротивление трению уменьшается. Поскольку длительность взаимодействия на пятнах фактического контакта микровыступов составляет $10^{-3} - 10^{-6}$ с, то важное значение имеют не свойства статической прочности поверхностного слоя материала пары трения, а возникновение усталостной прочности, если учесть, что кристаллическая решетка твердого тела реагирует на воздействия через $10^{-5} - 10^{-8}$ с. Поэтому перестройка поверхностного слоя под действием внешних электрических и тепловых нагрузок происходит именно при преобладании температурного поля, и к моменту достижения установившейся температуры поверхностный слой обода шкива уже находится под действием тех или иных остаточных напряжений.

Проведенные исследования показали, что значительное влияние на основные показатели качества поверхностного слоя обода тормозного шкива оказывает скорость протекания теплового процесса, вызванного действием электрических токов.

Скорость электротермомеханических процессов обуславливает существенное изменение характера структурных превращений в поверхностных и приповерхностных слоях, а также физико-механических свойств материала обода шкива. В процессе трения зона пластической деформации не ограничивается объемом микронеровностей, а простирается вглубь материала. При этом материал поверхностного и приповерхностного слоев имеет невысокую плотность дислокаций. При скольжении дислокации накапливаются на некотором расстоянии от поверхности, происходит повышение их плотности, что приводит к образованию микропустот в приповерхностном слое обода шкива.

Анализ напряженного состояния поверхностного слоя обода шкива при торможении показал, что силы трения способствуют упрочнению поверхностного слоя и возникновению сжимающих остаточных напряжений. Температурные деформации приводят, как правило, к развитию в поверхностном слое эффекта разупрочнения, связанного с образованием растягивающих остаточных напряжений.

На глубину нагревания поверхностных слоев обода шкива оказывает существенное влияние интенсивность вынужденного охлаждения (критерий Био). При одинаковых параметрах теплового источника максимальная глубина прогрева поверхностного слоя до заданной температуры при охлаждении всегда меньше, чем без охлаждения. Наличие теплоотдачи увеличивает скорость вынужденного охлаждения поверхности материала, но по мере удаления от поверхности влияние охлаждения уменьшается. Это особенно важно для пар трения тормозов, работающих в повторно-кратковременном режиме.

Поскольку электротермомеханическое воздействие влияет на характер изменения скоростей нагревания и охлаждения, а также температур по толщине обода, его можно использовать при исследовании влияния условий вынужденного охлаждения на кинетику теплового процесса.

Предложенная теоретическая модель механизма разрушения в результате электротермомеханического нагружения при трении подтверждает предположение об образовании поверхностного слоя на ободке шкива с низкой плотностью дислокаций и интенсивным трещинообразованием в приповерхностных слоях, что хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований Ц.Су.

Известно, что электротепловая и внешняя нагрузки, приложенные к твердому телу, вызывают напряжения межатомных связей, которые из-за гетерогенности строения большинства твердых тел могут носить локальный характер. Именно на фактических пятнах касания микровыступов происходят локальные перенапряжения, наиболее интенсивно идет термофлуктуационный процесс разрыва

межатомных связей, что приводит к разрушению твердого тела. Согласно кинетической концепции прочности электротепловое движение атомов, характеристикой которого является температура, играет существенную роль в разрушении твердого тела.

На рисунке 2 показано влияние температуры на относительные деформации σ/E обода шкива (где σ_P - предел прочности; σ_s - напряжение, вызванное электротемпературными импульсами). Этот эффект может быть полезным при построении различных схем расчета остаточных микронапряжений, без знания которых невозможно дать полную оценку состояния поверхностного слоя материала, работающего в условиях повторно-кратковременного режима нагружения.

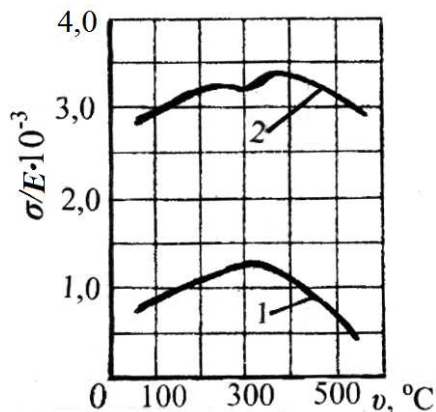


Рисунок 2 – Эффект влияния поверхностной температуры на относительные деформации материала обода шкива: кривая 1 – σ_P/E ; кривая 2 – σ_s/E

Конструкторско-технологические и эксплуатационные пути управления тепловой стойкостью элементов трения схематически показаны на рисунке 3.

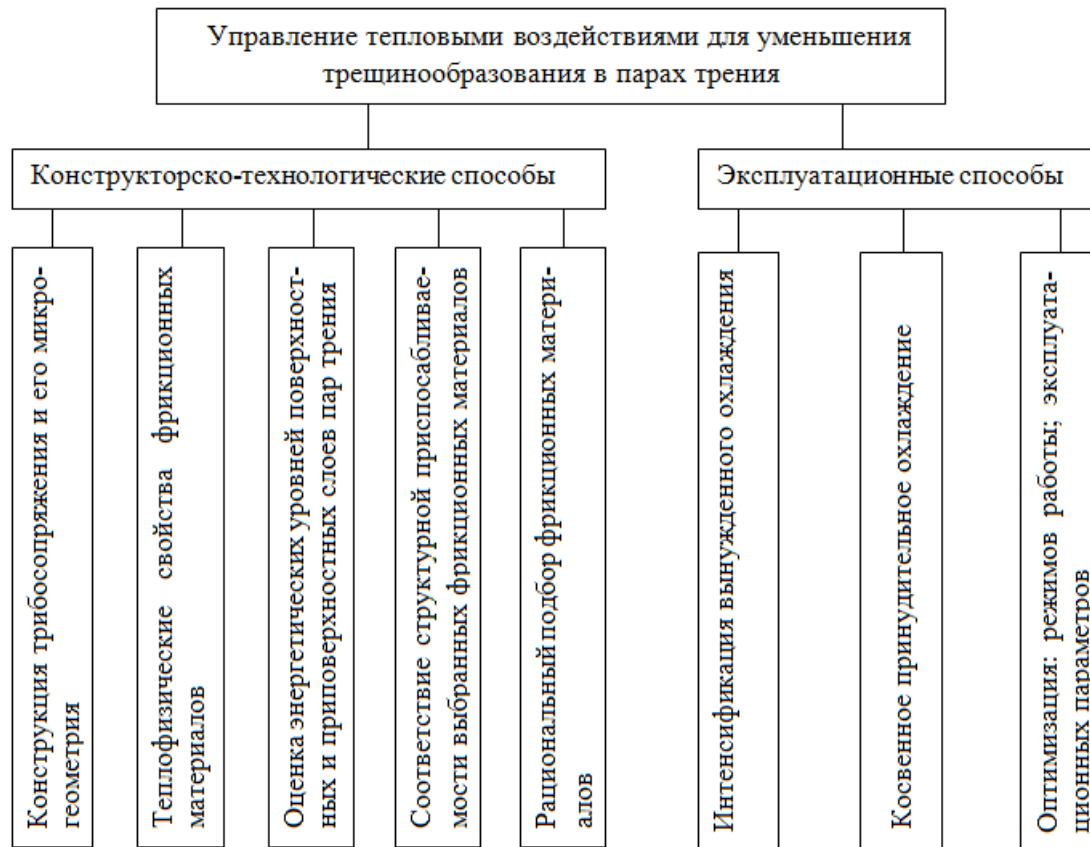


Рисунок 3 – Способы управления тепловыми воздействиями для предотвращения трещинообразования на рабочих поверхностях металлополимерных пар трения в процессе их нагревания

Явление теплового разрушения материалов при торможении представляет собой тот механизм, воздействуя на который можно управлять процессами трения и изнашивания. Зная основные внутренние параметры теплового разрушения и влияние на них конструкции, материалов, режимных параметров, интенсивности вынужденного охлаждения и др., можно обоснованно управлять этим явлением.

Рассмотрение теоретической модели процесса изнашивания (разрушения) в результате электротермомеханического нагружения показывает, что на поверхностных слоях металлического элемента трения плотность дислокаций низкая, это приводит к трещинообразованию в его приповерхностных слоях.

Эта модель может служить основой при конструктивной разработке металлического элемента трения на стадии его проектирования.

Выводы. Таким образом, проиллюстрирована природа электротермоимпульсного износа микровыступов поверхностей металлополимерных пар трения тормозных устройств под действием динамических нагрузок.

Библиографический список использованной литературы

1. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.
2. Чичинадзе А.В. Материалы в триботехнике нестационарных процессов / А.В. Чичинадзе, Р.М. Матвеевский, Э.Д. Браун – М.: Наука, 1986. – 248 с.
3. 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.
4. Джанахмедов А.Х. Триботехнические проблемы в нефтегазовом оборудовании / А.Х. Джанахмедов. – Баку: Элм, 1998. – 216с.

Поступила в редакцию 14.05.2013 г.

Вольченко Д.А., Скрипник В.С., Клендїй М.І. До питання електротермомеханічного зношення металополімерних пар тертя гальмівних пристроїв

Розкрито суть електротермомеханічного зношення металополімерних пар тертя гальмівних пристроїв, виходячи з їх динамічної, електричної і теплової навантаженості мікроставів поверхонь.

Ключові слова: пара тертя; металевий і полімерний елементи; електротермомеханічне зношення; гальмівний пристрій.

Volchenko D.A., Skrypnyk V.S., Klendiy M.I. Electrothermomechanical wear of metal-polymer friction pairs of braking devices.

We've displayed the essence of electrothermomechanical wear of metal-polymer friction pairs of braking devices based on their dynamic, electrical and thermal loading of surfaces micro-ledges.

Keywords: friction pairs; metal and polymer elements; electrothermomechanical wear; braking device.