

МАШИНЫ, ОБЛАДНАНИЕ ТА МАТЕРИАЛЫ

УДК 62-92.113

НАНОТРИБОЛОГИЯ ПРИ ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАР ТРЕНИЯ ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ БУРОВЫХ ЛЕБЕДОК

¹Д.А. Вольченко, ¹И.О. Бекиш, ²М.Я. Джавадов, ¹Д.Ю. Журавлев, ³А.Ю. Журавлев,
¹О.Б. Стаднык

¹ ИФНТУНГ; 76019, г. Ивано-Франковск, ул. Карпатская, 15, тел. (03422) 42195,
e-mail: public@nimg.edu.ua

² Государственная нефтяная компания Азербайджанской республики (SOCAR);
AZ1000, г. Баку, пр-т. Нефтяников, 73, Сабаильский район,
тел. (+99412) 521-02-82, факс (+99412) 521-03-83, email: info@socar.az

³ Сумской государственной университет; 40007, Сумы, ул. Римского-Корсакова, 2
тел. (0542) 330024

Проиллюстрирована нанотрибология пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок, исходя из их энергонагруженности, электропроводности и пути трения пятен контактов и времени существования на них пленок. Известно, что обод тормозного шкива является аккумулятором тепловой энергии, а полимерная накладка - накопителем положительных (ионов) и отрицательных (электронов) зарядов. Время существования контактной пленки и определяет энергонагруженность совокупности пятен контактов микровыступов трибосопряжения. Основными требованиями к пятнам контактов микровыступов металлополимерных пар трибосопряжения являются: малое переходное сопротивление, стабильность, износостойчивость. Установлено, что сопротивление разное в восстановленном (аминном) и окисленном (иминном) состоянии полимера. Иминные группы, вероятно, более диффузно рассеивают электроны проводимости по сравнению с аминными, а потому в окисленном состоянии сопротивлению выше. При выгорании связующих компонентов в поверхностных слоях полимерной накладки выше допустимой температуры для их материалов, (т.е. в электрохимических условиях в растворах электролитов) появляется возможность изменять электрический (свободный) заряд поверхности в широких пределах, т.е. выявить эффект поля более наглядно.

Ключевые слова: микровыступ трибосопряжения; пятно контакта; энергонагруженность; поверхностная и объемная температуры; электропроводность; металлополимерная пленка; путь трения; время существования.

Проілюстрована нанотрибологія плям контактів микровиступів металоолімерних пар тертя стрічково-колодочних гальм бурових лебідок, виходячи з їх енергонавантажності, електропровідності та шляхи тертя плям контактів і часу існування на них плівок. Відомо, що обід гальмівного шкива є аккумулятором теплової енергії, а полімерна накладка - накопичувачем позитивних (іонів) і негативних (електронів) зарядів. Час існування контактної плівки і визначає енергонавантажність сукупності плям контактів микровиступів трибоспряжень. Основними вимогами до плям контактів микровиступів металоолімерних пар трибоспряжень є: малий перехідний опір, стабільність, зносостійкість. Встановлено, що опір різний у відновленому (аміному) і окисленому (імінному) стані полімеру. Імінні групи, ймовірно, більш дифузно розсіюють електрони провідності в порівнянні з амінними, а тому в окисленому стані опору вище. При вигорянні сполучних компонентів в поверхневих шарах полімерної накладки вище допустимої температури для їх матеріалів, тобто в електрохімічних умовах в розчинах електролітів з'являється можливість змінювати електричний (вільний) заряд поверхні в широких межах, тобто виявити ефект поля більш наочно.

Ключові слова: микровиступ трибоспряження; пляма контакту; енергонавантажність; поверхнева та об'ємна температури; електропровідність; металоолімерна плівка; шлях тертя; час існування.

Illustrated nanotribology spots contacts microirregularities metal-vapor friction belt drum brakes drawworks, based on their energy loading, conductivity and friction path of the contact points and the lifetime of the films on them. It is known that the rim brake pulley is an accumulator of heat energy, and the polymer pad drive positive (ions) and negative (electron) charge. The contact film lifetime determines energy loading aggregate contacts microirregularities friction unit spots. The main requirements for the contact patch microirregularities of the metal-vapor friction unit are as follows: low contact resistance, stability and durability. It is established that the resistance varied in the reduced (amine) and oxidized (imine) form polymer. Imine groups, probably more diffusely scatters electrons conductivity as compared with amine, and therefore a higher resistance to oxidation state. When burnout binders in the surface layers of the polymer lining above the permissible temperature of the materials, i.e. in electrochemical conditions in electrolyte solutions, it is possible to change the electric (free) surface charge over a wide range, i.e. to identify more clearly the effect of the field

Keywords: friction unit microirregularity; contact patch; energy loading; surface and bulk temperature; electrical conductivity; metal-polymeric film; friction path; lifetime.

Введение. Бурное развитие нанотрибологии воздвигает все новые требования к тормозостроителям, в частности к энергонагруженности металлополимерных пар трения ленточно-колодочных тормозов буровой лебедки. Известно, что обод тормозного шкива является аккумулятором тепловой энергии, а полимерная накладка накопителем положительных (ионов) и отрицательных (электронов) зарядов. При электротермомеханическом трении пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения в зависимости от работы выхода электронов и ионов с их рабочих поверхностей на площадках взаимодействия формируются различного типа контакты, покрытые пленками с поверхностным сопротивлением. Время существования контактной пленки и определяет энергонагруженность совокупности пятен контактов микровыступов трибосопряжения.

Состояние проблемы. Если импульсные нормальные силы, действующие на пятна контактов микровыступов, создают поле равномерных удельных нагрузок, обеспечиваются одинаковые поверхностные градиенты и равномерно распределяются электрические и тепловые токи. Наличие микровыступов взаимодействующих поверхностей различной высоты приводит к концентрации удельных нагрузок и, следовательно, к генерированию электрических и тепловых токов на отдельных участках поверхностей контакта, что способствует повышению локальных температур. Этот процесс назван Бертоном «термоупругой неустойчивостью». Взаимодействие микровыступов сопровождается, поднятием их участков, где развиваются удельные нагрузки. Другие участки будут понижаться вследствие износа, пока контакт не наступит повсюду. При этом новые контактные участки начинают нагреваться, расширяться и воспринимать нагрузку; старые снижают нагрузку, охлаждаются. Масштаб нагретых участков велик по сравнению с масштабом поверхностных шероховатостей, и время описанного цикла велико по сравнению с временем взаимодействия шероховатостей [1, 2]. Однако в данной работе не было установлено влияние импульсных электрических токов на энергонагруженность пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения трибосистемы, а также не были определены допустимые температуры для микровыступов при электротермомеханическом трении.

В реальных условиях микровыступы металлополимерных пар при электротермомеханическом трении могут подвергаться следующим термическим нагрузкам: ударное импульсное нагревание и медленное вынужденное охлаждение; моментальное нагревание и вынужденное охлаждение; медленное нагревание и интенсивное вынужденное охлаждение; нагревание и охлаждение с малыми темпами [3]. Однако выше перечисленные термонагрузки микровыступов трибосопряжения в значительной степени зависят от пути трения их пятен контактов, и, как следствие, от выполняемой работы трения. При этом важную роль играет время существования пятна контакта микровыступов. Последнее в значительной степени зависит от типа контакта (нейтрального, блокирующего, омического) и от электропроводности окисных пленок, которые в данный момент находятся на их площадях микровыступов при фрикционном взаимодействии.

Механизм разрушения тонких металлополимерных пленок на пятне контакта микровыступов трибосопряжения при электротермомеханическом трении имеет полярно-чувствительный характер, связанный с электромиграционными процессами [3], происходящими в двойных электрических слоях рабочих поверхностей металлического и полимерного фрикционных элементов.

Постановка задачи. В данной публикации рассмотрены следующие вопросы:

- электропроводность пятен контактов микровыступов трибосопряжения;
- оценка поверхностной и объемной температуры при фрикционном взаимодействии пар трения;
- тепловая модель и определение коэффициентов распределения тепловых потоков между парами трения;
- определение пути трения пятна контакта микровыступа и времени его осуществления.

Цель работы – оценка энергонагруженности пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок.

Электропроводность пятен контактов микровыступов трибосопряжения при фрикционном взаимодействии. Нарушение электротеплового контакта микровыступов металло-

полимерных пар трибосопряжения изменяет его энергетические уровни в результате влияния механического воздействия, т.е. импульсного нормального усилия.

Основными требованиями к пятнам контактов микровыступов металлополимерных пар трибосопряжения являются: малое переходное сопротивление, стабильность, износоустойчивость. Эти характеристики зависят, в первую очередь, от импульсного нормального усилия (N), действующего в контакте. Характер этих зависимостей противоречив. Так, величину переходного сопротивления в упрощенном виде записывают так:

$$R_{\Pi} = \alpha_k / N^n, \quad (1)$$

где α_k – постоянная, зависящая от вида материала и состояния поверхности;

n – показатель степени, характеризующий тип контакта (нейтральный, блокирующий или инжектирующий).

Таким образом, качество контактирования непосредственно зависит от импульсного нормального усилия. Стабильность также непосредственно зависит от N. Однако износ контактов и усилие, необходимое для их разъединения (или смещения скользящего контакта), с ростом N увеличивается. Эти причины заставляют поддерживать контактное усилие на определенном уровне, не превышающем значения, соответствующего допустимому переходному сопротивлению R_n . В этих условиях дополнительные инерционные силы, возникающие в контактных устройствах в результате механических воздействий, легко могут изменять (или полностью компенсировать) контактное усилие. В результате в узле контакта изменяется переходное сопротивление, в следствие чего возникают флуктуации протекающего импульсного тока. Это явление носит название «динамической нестабильности контакта».

Предположим, что между двумя металлическими пятнами контактов микровыступов находится пленка с равномерной толщиной δ и удельным сопротивлением ρ_{Π} . В этом случае дополнительное сопротивление в цепи электрического тока выразится как

$$R_{\Pi} = \frac{\rho_{\Pi} \cdot \delta}{A}, \quad (2)$$

где A – площадь поверхностей пятен контактов микровыступов.

Вместо произведения $\rho_{\Pi} \delta$ рекомендуется подставлять эмпирически определяемую величину σ_{Π} , Ом·см, обозначающую «удельное поверхностное сопротивление», так как из опытов известно, что при весьма тонких поверхностных пленках, имеющих место на пятнах контактов микровыступов, их сопротивление R_{Π} зависит от толщины δ , а не от типа пленки.

Пусть поверхностное сопротивление обоих контактов – приведенная окружность d [4]. Тогда зависимость (2) приобретает вид

$$R_{\Pi} = \frac{\sigma_{\Pi}}{\pi d^2},$$

где σ – удельное поверхностное сопротивление пленки.

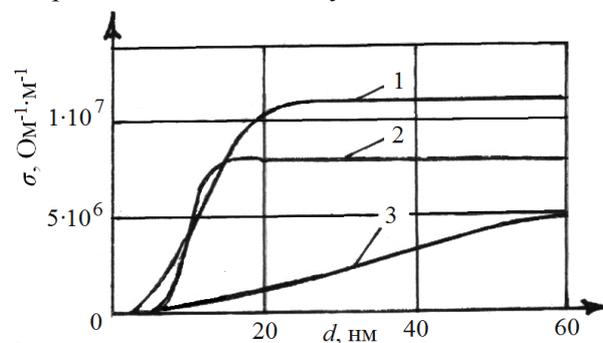
Общее контактное сопротивление R_k , складывающиеся из переходного сопротивления R_{Π} и сопротивления поверхностных пленок $R_{\Pi\Pi}$, для данного случая примет вид

$$R_k = \frac{\rho_{\Pi}}{2a} + \frac{\sigma}{\pi a^2}, \quad (3)$$

где a – радиус поверхности соприкосновения пятен контактов микровыступов, см.

Зависимость (3) представляет собой лишь приближенную формулу, так как она содержит, наряду с условиями, принятыми при получении формулы для переходного сопротивления, также положения, справедливые лишь для исключительно тонких пленок. Так, из зависимости (3) следует, что переходное и поверхностное сопротивление не взаимозависят (их связывает лишь радиус пятна контакта). Однако такое предположение неверно для более толстых пленок [5]. Кроме того, при выгорании поверхностных пленок, находящихся в химическом поле, удельная проводимость и толщина поверхностных слоев связующих компонентов полимерных накладок неравномерны.

На рис. 1 приведены результаты измерений удельной проводимости σ от толщины пленок различных металлов в вакууме при 10^{-5} Торр и комнатной температуре (для пленок железа удельной проводимости увеличены в 5 раз). Экспериментальные данные хорошо аппроксимируются функцией Больцмана (рис. 1). Из последнего следует, что при толщинах до 5 – 7 нм для всех пленок зависимость проводимости от толщины незначительна. Для таких толщин характерна кластерно-островковая структура пленок, для которой свойственно очень большое поверхностное удельное сопротивление. Кроме того, для таких малых толщин характерны малое количество свободных электронов, имеющих малую величину свободного пробега, которая ограничена поверхностями пленки, кластерами и островками жидкости на пленке, вызванными попаданием рабочей поверхности полимерной наклейки в зону температур выше допустимых для ее материалов. Все это приводит к малому значению поверхностного удельного сопротивления пленок. С увеличением толщины



1 – медь; 2 – алюминий; 3 – железо
Рисунок 1 – Зависимость удельной проводимости от толщины пленок различных материалов

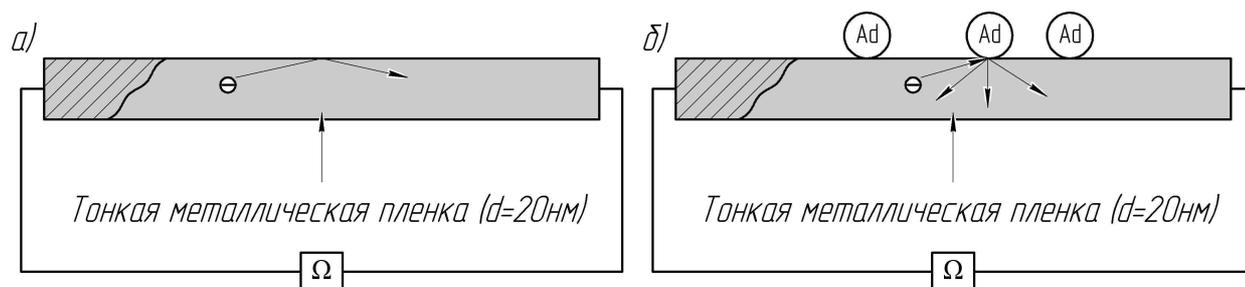


Рисунок 2 – Зеркальное отражение электронов проводимости от полированной металлической поверхности обода тормозного шкива (а); диффузное рассеивание электронов проводимости от поверхности, вызванное присутствием адсорбированных атомов (Ad) (б)

пленок наблюдается тесная зависимость проводимости от толщины (интервал толщин 5–60 нм для пленок железа, 6–20 нм для пленок меди, 5–40 нм для пленок алюминия). Для пленок железа эта зависимость не столь ярко выражена, а диапазон роста проводимости лежит в интервале от 5 до 60 нм и более. При дальнейшем увеличении толщины пленки зависимость $\sigma(d)$ менее выражена, а удельная проводимость пленок близка к максимальной. Следует отметить, что характер роста проводимости меди, алюминия и железа в указанном диапазоне толщин практически одинаковые, а величина проводимости для всех пленок в области насыщения близка к проводимости их объемных аналогов. Так, для пленок алюминия эта величина составляет около $2 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, для пленок меди – $1,1 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, а для пленок железа – около $10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

Микровыступы металлического фрикционного элемента играют важную роль в формировании двойных электрических слоев за счет диффузионных процессов, происходящих между их боковых сторон, которые омываются скоростными токами сред.

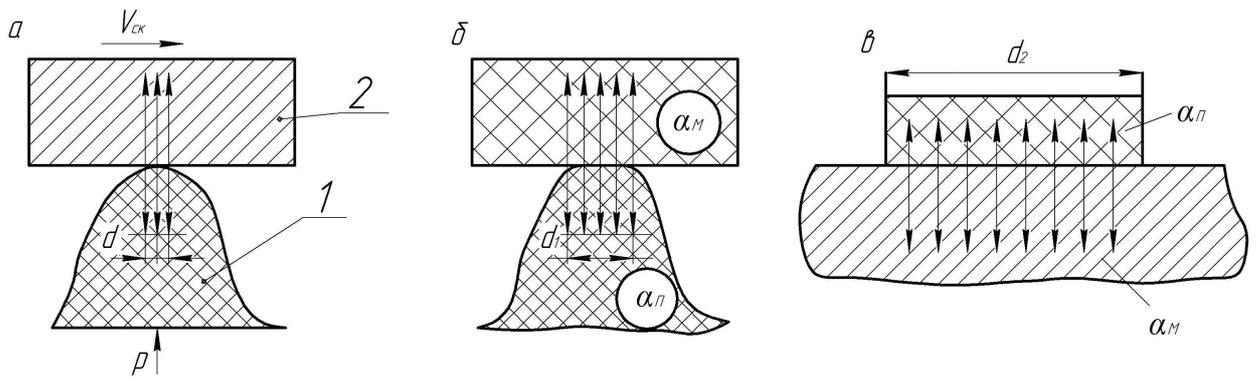
При упругом отражении проекции импульса электрона на направление электрического поля (рис. 2 а), т.е. величина проводимости не изменяется по сравнению с величиной для объема металла обода шкива. Доля $(1 - p)$ электронов рассеивается по поверхности диффузно, что уменьшает их скорость и увеличивает удельное сопротивление пленки. При этом необходимо учитывать тот факт, что при $p=0$ имеет место полностью диффузное рассеивание электронов проводимости от поверхности, вызванное присутствием адсорбированных атомов в двойном электрическом слое микровыступов металлического фрикционного элемента (рис. 2 б), а при $p=1,0$ полностью зеркальное. При этом наличие полного или частичного зеркального рассеивания в пленках ряда металлов (Fe, Al, Cu и др.), наблюдаемые в опытах, означает, что шероховатость поверхности металлического фрикционного элемента не является доминирующим фактором в определении величины p .

При выгорании связующих компонентов в поверхностных слоях полимерной накладке выше допустимой температуры для их материалов, т.е. в электрохимических условиях в растворах электролитов появляется возмож-

ность изменять электрический (свободный) заряд поверхности в широких пределах, т.е. в принципе выявить эффект поля более наглядно. Однако при этом могут проявляться эффекты, обусловленные зависящей от потенциала адсорбцией ионов раствора и полярных молекул растворителя. Особенности наблюдения эффекта поля в электрохимических системах будут показаны ниже.

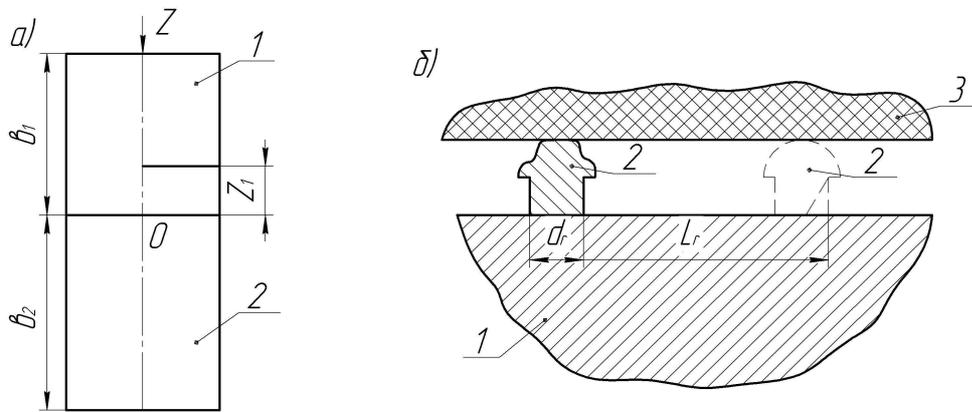
Измерение проводилось в области потенциалов электрохимической активности полимера. Появление слоя полимера приводит к уменьшению сопротивления пары «металл – полимер», выраженному более сильно по мере увеличения толщины слоя полимера > 60 нм, рассчитываемой кулонометрически, сопротивление перестает зависеть от толщины слоя и от состава электролита, образующегося на поверхности полимерной накладке. Однако более тонкий слой полимера, видимо, не предотвращает полностью контакт электролита с поверхностью.

Установлено, что сопротивление различны в восстановленном (аминном) и окисленном (иминном) состоянии полимера. Иминные группы, вероятно, более диффузно рассеивают электроны проводимости по сравнению с аминными, а потому в окисленном состоянии сопротивлению выше. При переходе из одного состояния в другое сопротивление изменяется от величины, соответствующей полностью восстановленному состоянию, к величине, отвечающей полностью окисленному состоянию полимера. Явление деградации полимера по достижении анодных достаточных значений потенциала выражается в увеличении сопротивления. Деградация приводит, по видимому, к интенсификации диффузному рассеиванию из-за увеличения расстояния между рассеивающими центрами. Интересными являются данные о том, что сопротивление изменяется практически линейно с возрастанием степени окисления полимера. Предполагается, что именно таким образом изменяется параметр зеркальности при изменении степени окисления. По результатам исследования эффектов сделан вывод, что применение метода поверхностной проводимости позволит информировать об изменении структуры полимерной пленки при различных свойствах внешнего электролита, если толщина пленки не слишком велика [5].



a – импульсные электрические токи;
б, в – импульсные температурные токи: вспьшки; поверхностные;
 α_M, α_P – коэффициенты распределения тепловых потоков между элементами пары трения

Рисунок 3 – Расчетные модели для оценки характеристик взаимодействий пятен контактов с различными диаметрами (d, d_1, d_2) пары «металл (2) – полимер (1)» при генерировании токов



a – упрощенная стержневая модель одномерной тепловой задачи двух контактирующих тел;
б – путь трения единичного пятна контакта микровыступа (2)

Рисунок 4 – Расчетные модели для оценки температур при дискретном контактировании в паре трения «металл (1) – полимер (3)»

Энергонагруженность пятен контактов микровыступов трибосопряжения

При исследовании энергонагруженности пятен контактов микровыступов трибосопряжения необходимо учитывать их расчетные модели с различными диаметрами поверхностей взаимодействия «металл – полимер» при генерировании и аккумуляции электрических и тепловых токов на их площадках и, как следствие, определять коэффициенты распределения тепловых потоков между элементами пары трения. (рис. 3 а, б, в).

Оценка поверхностной и объемной температур при фрикционном взаимодействии пар трения

При расчетах средней поверхностной и объемной температур теплоотдачей во внешнюю среду при длительном процессе трения не пренебрегаем, так как в этих условиях тепловой поток может превышать 15% общего количества теплоты, выделяемой при трении. Что касается кратковременного импульсного подвода теплоты, то теплоотдачей во внешнюю среду в процессе электротермомеханического трения

можно пренебречь, так как этот тепловой поток в данных условиях не превышает 5% общего количества теплоты, генерируемой при трении.

Экспериментальная проверка различных методик по оценке энергонагруженности большинства узлов трения, работающих при стационарных и нестационарных тепловых режимах трения [1–4] показала, что математическое описание температурного поля, средней температуры поверхности трения t^* и температурной вспьшки $t_{всп}$ может быть выполнена при использовании одномерной тепловой задачи, т.е. при распространении теплоты только по нормали к поверхности трения, поскольку так действует импульсная нормальная сила на пятна контактов микровыступов трибосопряжения (по координате z) (рис. 4 а).

Для расчета поля температур в объемах элементов пары трения $t_{V1,2}$ и средней температуры поверхности трения $t_{1,2}^*$ рассмотрим упрощенную стержневую модель одномерной тепловой задачи двух контактирующих тел 1 и 2, пренебрегая теплоотдачей в процессе трения (рис. 4 а). Для расчета температуры вспьшки $t_{всп}$ рассмотрим схему движения полупростран-

ства с микровыступом по гладкому полимерному полупространству (рис. 4 б). обычно время существования температурной вспышки $t_{всп}$ очень мало, $\tau_{всп} = 10^{-3} \dots 10^{-9}$ с, что позволяет рассматривать микрообъемы в зоне фактического контакта как полупространства, а расчет $t_{всп}$ вести для среднего статистического размера пятна контактирования металлического микровыступа d_r . При этом необходимо не забывать, что в реальных условиях при $A_r \ll A_a$ температуры вспышки будут предшествовать импульсные электрические токи, которые способствуют увеличению поверхностной и, как следствие, объемной энергонагруженности тела 1.

Путь трения единичного контакта микровыступа L_r (рис. 3 б) зависит от физико-механических свойств и интенсивности процессов фризико-химической механики трения (особенно полимерной накладке, поверхность которой находится до или выше допустимой температуры для ее материалов) и износа на фрикционном контакте.

Жесткий твердый микровыступ, пятно контакта которого покрыто пленкой, прошиваемой импульсными электрическими и тепловыми токами, движется по гладкому деформируемому полупространству до тех пор, пока в результате нагрева и размягчения этот микровыступ не будет смят (не обязательно разрушен), и в контакт вступит другой (меньший по высоте) микровыступ.

Это произойдет, когда текущая твердость пятна контакта микровыступа вследствие нагрева и испытывающих термонапряжений станет равна текущей твердости материала полупространства. Путь трения L_r может быть оценен при решении уравнений для полупространства 1 и микровыступа 2:

для полупространства 1 при $0 \leq \tau \leq \tau_{всп1}$
 $\tau_{всп1} = d_r / v_{ск}$ ($v_{ск}$ - скорость скольжения)

$$\frac{\partial^2 t_1}{\partial z_1^2} = \frac{1}{\alpha_1} \frac{\partial t_1}{\partial \tau}; \quad (4)$$

для микровыступа 2 при $0 \leq \tau \leq \tau_{всп2} = d_r / v_{ск}$

$$\frac{\partial^2 t_2}{\partial z_2^2} = \frac{1}{\alpha_2} \frac{\partial t_2}{\partial \tau}. \quad (5)$$

Как известно, решения уравнений (4) и (5) с использованием теоремы Дюгамеля и интегралов вероятностей имеют вид:

$$t_1 = \frac{q_1}{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}} \times \left[\frac{2\sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{z_1^2}{4\alpha_1 \tau}\right) - \frac{z_1}{\sqrt{a}} \operatorname{erfc}\left(\frac{z_1}{2\sqrt{\alpha_1 \tau}}\right) \right]; \quad (6)$$

$$t_2 = \frac{q_2}{\sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}} \times \left[\frac{2\sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{z_2^2}{4\alpha_2 \tau}\right) - \frac{z_2}{\sqrt{a}} \operatorname{erfc}\left(\frac{z_2}{2\sqrt{\alpha_2 \tau}}\right) \right]; \quad (7)$$

где $\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial z_1} = q_1$ при $z_1 = 0$ и $t_1 = 0$ при $z_1 = \infty$;

$$\lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial z_2} = -q_2 \text{ при } z_2 = 0 \text{ и } t_2 = 0 \text{ при } z_2 = \infty;$$

λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности материалов полупространства 1 и микровыступа 2;

q_1, q_2 – тепловые потоки, воспринимаемые полупространством 1 и микровыступом 2;

ρ_1, ρ_2 и c_1, c_2 – плотности и теплоемкость материалов полупространства 1 и микровыступа 2;

τ – время торможения;

α_1, α_2 – коэффициенты температуропроводности материалов полупространства 1 и микровыступов 2;

$$\operatorname{erfc}\left(\frac{z_1}{2\sqrt{\alpha_1 \tau}}\right) \text{ и } \operatorname{erfc}\left(\frac{z_2}{2\sqrt{\alpha_2 \tau}}\right) - \text{дополнительные функции ошибок.}$$

Поверхностные температуры находим из уравнений (6) и (7) при $z_{1,2} = 0$ при $0 \leq \tau \leq \tau_{всп1}$;

$$t_1(0, \tau) = \frac{2q_1 \sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi \lambda_1 c_1 \rho_1}}; \quad \text{при } 0 \leq \tau \leq \tau_{всп1};$$

$$t_2(0, \tau) = \frac{2q_2 \sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi \lambda_2 c_2 \rho_2}}.$$

Средние интегральные значения по времени поверхностной температуры полупространства 1 и микровыступа 2

$$t_{1cp} = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \frac{q_1}{\sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}} \sqrt{\frac{d_r}{v_{ск}}}; \quad (8)$$

$$t_{2cp} = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \frac{q_2}{\sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}} \sqrt{\frac{L_r}{v_{ск}}}. \quad (9)$$

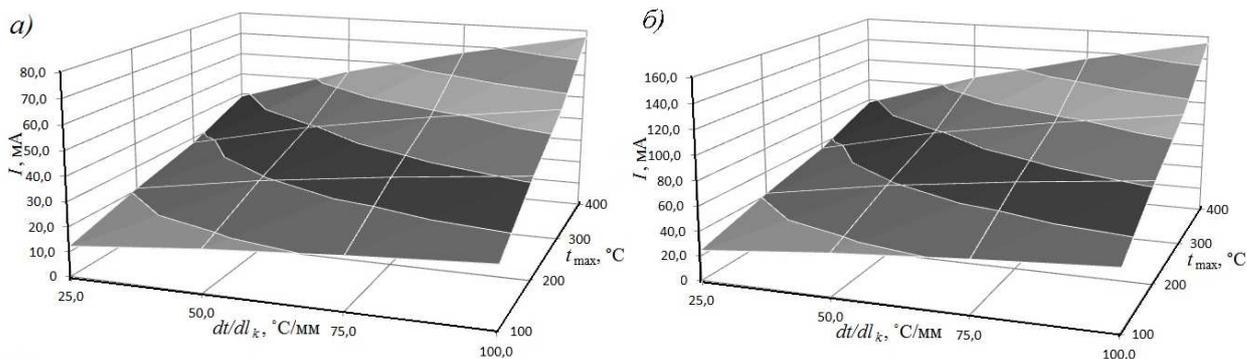
В соответствии с гипотезой Х.Блока максимальная температура микровыступа, т.е. температура вспышки $t_{всп}$ при прохождении пути трения L_r будет на задней его грани:

$$t_{всп} = t_{2max} = \frac{q_2}{\sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}} \sqrt{\frac{L_r}{v_{ск}}}. \quad (10)$$

Учитывая гипотезу суммирования температур на поверхности трения и формулу (10), получим максимальную температуру на поверхности трения микровыступа

$$t_{max} = t_{всп} + t_2^* = \frac{q_2}{\sqrt{\pi \lambda_2 c_2 \rho_2}} \sqrt{\frac{L_r}{v_{ск}}} + t_2^*. \quad (11)$$

Связь между микротоками, генерируемых на пятнах контактов микровыступов трибосопряжения, в зависимости от поверхностной температуры (t_{max}) и температурного градиента по длине пятен контактов (dt/dl_k) при различном времени (τ) электротермомеханического фрикционного взаимодействия при постоянной импульсной нормальной нагрузке (N), установлена с помощью зависимости вида



а – $\tau = 0,005$ с; б – $\tau = 0,02$ с

Рисунок 5 – Закономерности изменений микротоков на пятне контактов микровыступов трибосопряжения в зависимости от поверхностной температуры (t_{max}) и температурного градиента по длине пятен контактов (dt/dl_k) при различном электротермомеханическом фрикционном взаимодействии при постоянной импульсной нормальной нагрузке на пятнах контактов ($N=4,0$ кН)

$$I = \sqrt{\frac{t_{max} \cdot \alpha_T \cdot (dt/dl_k) \cdot V \cdot \tau}{R_k \cdot \rho \cdot N}}, \quad (12)$$

где t_{max} – максимальная температура на пятне контакта микровыступов, °С;

α_T – коэффициент внешней теплоотдачи, Вт/(м²·°С);

(dt/dl_k) – градиент температуры по длине контакта, °С/мм.

V – объем микровыступа, м³;

τ – время контактирования, с;

R_k – термическое сопротивление контакта, °С/Вт;

ρ – удельное электрическое сопротивление, (Ом·мм²)/м;

N – импульсное нормальное усилие, Н.

По зависимости (12) были произведены расчеты, по которым были построены графические зависимости (рис. 5 а, б). Выполненный анализ последних показал следующее:

- с увеличением поверхностной температуры и времени торможения, а также поверхностного градиента температуры при постоянных значениях α_T , R_k и ρ при $t=100; 200; 300$ и 400°C и постоянных значениях V и N наблюдалось увеличение микротоков (I);

- увеличение времени торможения с $0,005$ с до $0,02$ с, т.е. в четыре раза, а микротоки увеличились в два раза, что свидетельствует о воздействии тепловых токов на зарядно – разрядные свойства пятен контакта микровыступов трибосопряжения.

Таким образом, в действительности распределение температур носит синусоидальный гармонический характер как без учета теплопроводности среды, так и с ней при условии, что температуры в стыке контакта равны, а использование мнимого температурного скачка ΔT_k по длине стыка, находящегося между зазорами со средой, позволяет оценить ее теплопроводную способность и подготовить почву для электроимпульсного разряда.

Определение пути трения пятна контакта микровыступа и времени его существования

Известно, что $q_1=(1-\alpha_{II})q$, $q_2=\alpha_m q$ (где q – общий тепловой поток) и на скользящем пятне контакта отсутствует скачок температуры, получаем

$$1 - \alpha_{II} = \frac{\sqrt{L_r \lambda_1 c_1 \rho_1}}{\sqrt{L_r \lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{d_r \lambda_2 c_2 \rho_2}}; \quad (13)$$

$$\alpha_{II} = \frac{\sqrt{L_r \lambda_3 c_3 \rho_3}}{\sqrt{L_r \lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{d_r \lambda_2 c_2 \rho_2}}. \quad (14)$$

Подставим (14) в (13), получим

$$t_{max} = \frac{2q\sqrt{L_r d_1}}{\sqrt{\pi v_{ск}} (\sqrt{L_r \lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{d_r \lambda_2 c_2 \rho_2}) + \sqrt{d_r \lambda_3 c_3 \rho_3}} + t_2^* \quad (15)$$

Путь трения L_r и продолжительность времени t_r существования пятна контакта микровыступа можно определить из условия равенства текущих твердостей выступа и полупространства, т.е. из условия движения по свежему следу:

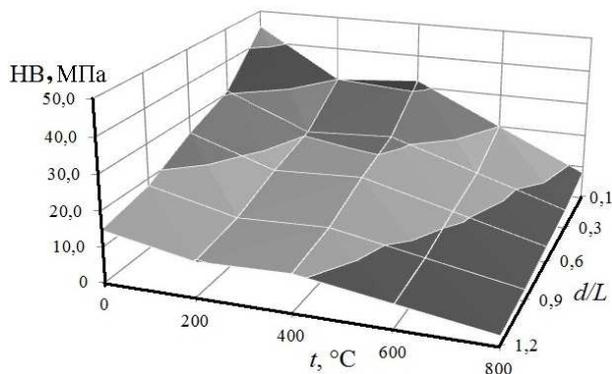
$$HB(t_{max}) = HB_1(t_1). \quad (16)$$

Из зависимостей твердости от температуры (см. рис. 6) можно определить допустимые температуры, при которых это условие выполняется. Например, если полупространство из материала ретинакс ФК-16 Л имеет температуру $t_1^* = 400^\circ\text{C}$ при текущей твердости $HB_1(t_1) = 78\text{МПа}$, то микровыступ из стали 30ХГСА для выполнения условия (16) должен иметь допустимую температуру $t_{max} = 620^\circ\text{C}$.

Возможный путь трения L_r находим из (15)

$$\sqrt{L_r} \leq \frac{(t_{max} - t_2^*) \sqrt{\pi v_{ск}} \sqrt{d_r \lambda_2 c_2 \rho_2}}{2q\sqrt{d_r} - (t_{max} - t_2^*) \sqrt{\pi v_{ск}} \lambda_1 c_1 \rho_1 \sqrt{\pi v_{ск}} \lambda_3 c_3 \rho_3}. \quad (17)$$

Необходимо учитывать, что в (17) $d_r, \lambda_{1,2}, c_{1,2}$ и $\rho_{1,2}$ зависят от средней температуры $t_{1,2}$



d, L – диаметр контакта микровыступа и его путь трения

Рисунок 6 - Зависимости твердости НВ полимерного материала ретинакс ФК-16-Л от температуры t и величины относительного отношения d/L

поверхности трения выступа и пятна контакта микровыступа и полупространства. Расчеты и эксперименты показывают, что обычно $L_r \approx (10...150) d_r$ (по данным А.В. Чичинадзе).

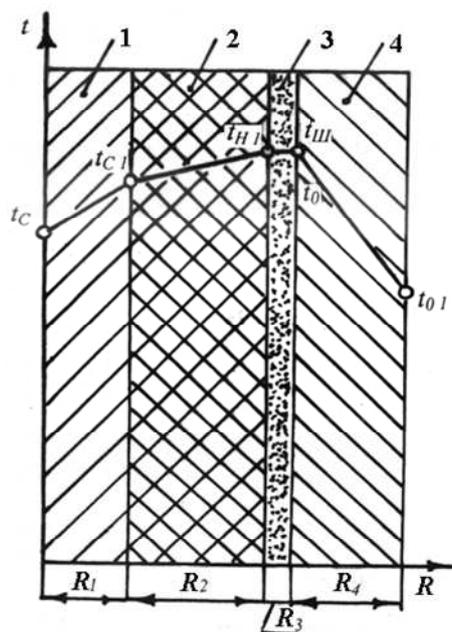
Тепловая модель и определение коэффициентов распределения тепловых потоков между парами трения

Коэффициенты распределения тепловых потоков между парами трения трибосопрежения зависят, в основном, от коэффициентов теплопередачи через их элементы.

На величину коэффициентов теплопередачи влияют термические сопротивления элементов трения тормоза, которые непосредственно принимают участие в теплообменных процессах. На рис. 7 приведены общие закономерности изменения поверхностных температур (t) фрикционных узлов барабанно-колодочного тормоза в зависимости от термического сопротивления (R) по толщине их элементов трения. При этом использованы следующие обозначения: t_K, t_{K1} – температуры внутренней и внешней поверхности основания тормозной колодки; t_H, t_{H1}, t_{H2} – температуры внутренней и рабочей поверхности фрикционной накладки и ее приповерхностного слоя; t_B, t_{B1} – температуры рабочей и наружной поверхностей обода тормозного барабана; R_1, R_2, R_3, R_4 – термические сопротивления основания тормозной колодки, фрикционной накладки и ее приповерхностного слоя, а также обода тормозного барабана.

Представим закон Фурье в форме, аналогичной закону Ома в электротехнике, оперируя понятием о термическом сопротивлении неоднородной многослойной стенки с температурами поверхностей деталей фрикционного узла барабанно-колодочного тормоза. Получим следующую зависимость для определения величины теплового потока:

$$q = \frac{t_{\theta_1} - t_K}{\sum_{i=1}^n R_i}, \quad (18)$$



1 – основание тормозной колодки; 2,3 – фрикционная накладка и ее приповерхностный слой; 4 – обод тормозного барабана

Рисунок 7 – Тепловая модель фрикционного узла барабанно-колодочного тормоза

где $\sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$.

В свою очередь, термическое сопротивление любого слоя стенки равно:

$$R = \frac{\delta_i^{-1}}{\lambda_i},$$

где δ_i, λ_i – толщина слоя и коэффициент его теплопроводности.

Зависимость для определения термического сопротивления фрикционного узла барабанно-колодочного тормоза имеет вид:

$$R = \frac{\delta_1^{-1}}{\lambda_1} + \frac{\delta_2^{-1}}{\lambda_2} + \frac{\delta_3^{-1}}{\lambda_3} + \frac{\delta_4^{-1}}{\lambda_4}. \quad (19)$$

Анализ интенсивности теплообмена от металлических элементов трения тормозных устройств указывает на то, что коэффициенты теплоотдачи (α) существенно отличаются по модулю и закону изменения и зависят от линейной скорости обода тормозного барабана. Кроме того, матовые и полированная (рабочая) поверхности металлического элемента трения омываются (различными по химическому составу и термодинамическим параметрам) средами.

С поверхностей (матовых и полированной) металлического элемента трения осуществляется теплоотдача лучеиспусканием обтекающему их воздуху. Согласно закону Стефана-Больцмана [5] коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием определяется из выражения:

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{c_{\text{л}} \left[\left(\frac{T_H}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_B}{100} \right)^4 \right]}{T_H - T_B}, \quad (20)$$

где T_H – температура нагревания поверхностей металлического элемента трения, °К;

T_B – температура окружающей среды, К;

$c_{Л}$ – коэффициент излучения, Вт/(м²·К⁴).

Результаты расчета по формуле (20) представлены на рис. 8 а, б, из которых следует, что коэффициент α_L увеличивается с повышением температуры.

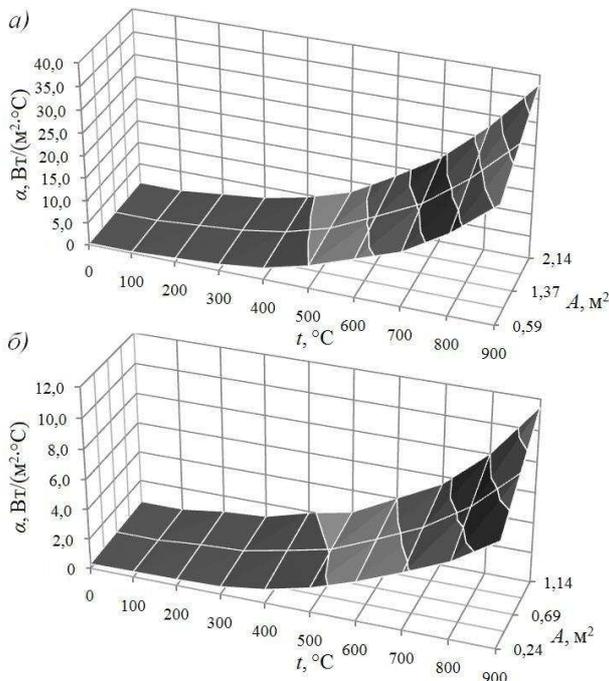


Рисунок 8 – Зависимость коэффициентов теплоотдачи (а) лучеиспусканием матовых (а) и полированных (б) поверхностей (б) при различных их площадях (А) от температуры нагревания (t)

Установлено, что величина отношения коэффициентов излучения матовой поверхности к полированной должна быть равной отношению площадей охлаждаемой поверхности и нагреваемой поверхностей металлического элемента трения. По ее значению можно судить о наступлении его установившегося теплового состояния.

В виде соотношений получаем:

для барабанно-колодочного тормоза
(тормозной барабан изготовлен из чугуна)

$$\frac{c_{ЛМ}}{c_{ЛП}} = \frac{3,748}{1,134} = 3,3; \quad \frac{A_{охл}}{A_{нагр}} = \frac{0,6945}{0,2375} = 2,92;$$

для ленточно-колодочного тормоза
(тормозной шкив изготовлен из стали)

$$\frac{c_{ЛМ}}{c_{ЛП}} = \frac{5,0}{1,1512} = 3,31; \quad \frac{A_{охл}}{A_{нагр}} = \frac{2,767}{1,048} = 2,64.$$

В данном случае рассматриваются площади поверхностей теплообмена: заднего тормозного барабана транспортного средства КрА3-250 (табл. 1) и тормозного шкива ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки У2-5-5 (табл. 2). Процентное расхождение между величинами отношений для различных видов то-

рмозных устройств составляет 11,5% – для первого случая и 23,0% – для второго.

Установлено, что после реализации циклических торможений температура поверхности трения достигает максимальной для данного режима работы величины $t_{уст}$ и является установившейся температурой. Дальнейший рост температуры прекращается, поскольку количество теплоты, поглощаемое при торможении, становится равным количеству теплоты, рассеиваемому в окружающую среду [5].

Установлено, что 15,5% теплоты отводится вынужденным конвективным и кондуктивным теплообменами от поверхностей тормозного барабана транспортного средства в интервале небольших температур, т. е. 15-125 °С. Установившееся тепловое состояние шкива ленточно-колодочного тормоза возможно только по достижении парами трения допустимой температуры материалами фрикционной накладки.

Оценим интенсивность теплопередачи через элементы пары трения с учетом физико-химического состояния приповерхностного слоя фрикционной накладки.

Коэффициент теплопередачи в теплообменном процессе через такой многослойный объект, как «среда межконтактной зоны-металлический элемент трения-омывающий воздух» определяется зависимостью вида:

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1^{-1}}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (21)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи от: межконтактной среды к рабочей (полированной) поверхности металлического элемента трения; внешней (матовой) его поверхности к омываемому воздуху;

δ_1, λ_1 – толщина и коэффициент теплопроводности металлического элемента трения.

Коэффициент теплопередачи в теплообменном процессе через «среду межконтактной зоны – приповерхностный слой фрикционной накладки – тело фрикционной накладки – основание тормозной колодки – омывающий ее воздух» определяется зависимостью вида:

$$K_2 = \frac{1}{\alpha_1 + \left(\frac{\delta_n^{-1}}{\lambda_n} + \frac{\delta_i^{-1}}{\lambda_i} + \frac{\delta_l^{-1}}{\lambda_l} \right) + \frac{1}{\alpha_3}}, \quad (22)$$

где α_3 – коэффициент теплоотдачи от матовой поверхности основания тормозной колодки к омываемому воздуху;

$\delta_n, \delta_i, \delta_l$ – толщина: приповерхностного слоя фрикционной накладки, собственно накладки и основания тормозной колодки;

$\lambda_n, \lambda_i, \lambda_l$ – коэффициенты теплопроводности приповерхностного слоя накладки, собственно накладки и основания тормозной колодки.

В случае достижения стабилизационного теплового состояния металлическим элементом трения тормозного устройства зависимость для определения коэффициента теплопередачи

Таблица 1 – Площади поверхностей теплообмена заднего барабана транспортного средства КрАЗ-250

Площади поверхностей, принимающих участие в различных видах теплообмена в окружающую среду, и боковая стенка ступицы заднего моста, м ²				Вес (кг) элементов тормозного барабана:	
Площади поверхностей (м ²) тормозного барабана:			Площадь поверхностей (м ²) боковой стенки барабана, которая стыкуется со ступицей заднего моста	обода	боковой стенки
полированная	матовая				
	внутренняя	наружная			
0,2375	0,121	0,476	0,0975	-	-

Таблица 2 – Площади поверхностей теплообмена тормозного шкива ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки

Площади поверхностей, принимающие участие в различных видах теплообмена в окружающую среду и боковая стенка барабана лебедки, м ²				Вес (кг) элементов тормозного барабана:		
Площади поверхностей (м ²) тормозного барабана:			Площадь поверхностей (м ²) боковой стенки барабана, которая стыкуется со ступицей заднего моста	обода	выступа	боковой стенки
полированная	матовая					
	внутренняя	наружная				
1,048*/0,091	1,405	0,73	0,541	324,48	31,98	72,54

*Примечание: Площади рабочей поверхности тормозного шкива: в числителе – перекрываемый накладками, а в знаменателе – не перекрываемой накладками

Таблица 3 – Начальные данные и результаты расчетов коэффициентов теплопередачи через элементы пары трения и распределение тепловых потоков между их поверхностями взаимодействия заднего тормозного механизма транспортного средства КрАЗ-25

Поверхностные температуры:		100	150	200	250	300	350
полированной ($t_{П}$)	обода тормозного шкива, °С						
матовой ($t_{М}$)		70	80	140	240	300	330
Толщина:							
приведенная обода тормозного шкива δ , мм;		22,5					
приповерхностного слоя фрикционной накладке $\delta_{Ш}$, мкм;		5,6	8,2	11,4	14,4	15,8	19,6
фрикционной накладке $\delta_{Н}$, мм;		20,0					
основы тормозной колодки $\delta_{К}$, мм.		20,0					
Коэффициенты теплопроводности материалов элементов фрикционной пары, Вт/(м·°С):							
обода тормозного барабана (λ_0);		52,47					
тормозной колодки, ($\lambda_к$);		52,47					
фрикционной накладке (λ_n).		0,53					
Коэффициенты теплоотдачи от поверхностей, Вт/(м ² ·°С):							
полированной (α_1);		11,67	11,67	24,5	25,0	40,0	76,67
и матовой (α_2) обода барабана;		11,67	11,67	23,7	82,1	123,3	164,67
Тормозной колодки (α_3).		11,67					
Коэффициенты теплопередачи через поверхности пар трения, Вт/(м ² ·°С):							
обод тормозного барабана (κ);		5,82	5,82	11,98	19,0	29,82	51,17
фрикционную накладку (κ_1).		4,772	4,772	6,072	6,102	6,72	7,303
Коэффициенты распределения тепловых потоков через элементы пар трения:							
металлический ($\alpha_{Т.П. 1}$);		0,55	0,55	0,664	0,757	0,816	0,875
нематаллический ($\alpha_{Т.П. 2}$);		0,45	0,45	0,336	0,243	0,184	0,125

через «омывающий воздух – металлический элемент трения – среду межконтактной зоны – приповерхностный слой фрикционной накладки» определяется зависимостью:

$$K_3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_1^{-1}}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_n^{-1}}{\lambda_n}}. \quad (23)$$

Зависимости (22) и (23) учитывают термическое сопротивление $R = \frac{\delta_n^{-1}}{\lambda_n}$ приповерхност-

ного слоя фрикционной накладки, от величины которого зависит направление теплового потока.

По значениям коэффициентов теплопередачи в парах трения определим коэффициенты распределения теплоты между их элементами в процессе торможения [6 - 8]:

$$K = \frac{\sum K'_{cp}}{\sum K'_{cp} + \sum K''_{cp}}, \quad (24)$$

где $\sum K'_{cp}$ – средняя величина коэффициентов теплопередачи в теплообменном процессе «среда межконтактной зоны-металлический элемент трения-омывающий его воздух» за период времени от начала до конца торможения;

$\sum K''_{cp}$ – средняя величина коэффициентов теплопередачи в теплообменном процессе «среда межконтактной зоны – приповерхностный слой фрикционной накладки – тело фрикционной накладки – основание тормозной колодки – омывающий ее воздух» за период времени от начала до конца торможения.

Для определения коэффициента распределения теплоты между элементами пар трения тормозных устройств при достижении стабилизационного теплового состояния ободом барабана в зависимость (22) необходимо подставить выражение (21). $\sum K'_{cp}$ определен за период торможения, который равен продолжительности его стабилизационного теплового состояния.

Проанализируем значения коэффициентов теплопередачи через элементы пар трения (зависимость 24) заднего барабанно-колодочного транспортного средства КраЗ-250 (табл. 3).

При изменении теплового состояния полированной (рабочей) поверхности тормозного барабана от 100 до 350 °С коэффициент теплопередачи (K) увеличился с 5,82 до 51,17 Вт/(м²·°С), т.е. примерно в 8,8 раза. Коэффициент распределения тепловых потоков между элементами пары трения барабанно-колодочного тормоза для первого элемента в интервале температур от 100 до 350 °С он увеличивается от 0,55 до 0,875, а для второго элемента – уменьшается от 0,45 до 0,125. Это свидетельствует о том, что в зоне допустимой температуры для материалов фрикционной накладки обод тормозного барабана аккумулирует тепловую энергию, что обуславливает интенсификацию адсорбционно-десорбционных процессов в приповерхностных слоях элементов трения.

Выводы

Таким образом, оценена энергонагруженность пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок путем определения их поверхностных и объемных температур с учетом электропроводности металлополимерных поверхностных пленок и времени их существования.

Литература

- 1 Чичинадзе А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение. – 2003. – 576 с.
- 2 Балакин В.А. Тепловые расчеты тормозов и узлов трения / В.А. Балакин, В.П. Сергиевко. – Гомель: ИММС НАНБ, 1999. – 220 с.
- 3 Джанахмедов А.Х. Нефтяная трибология / А.Х. Джанахмедов. – Баку: Элм, 2003. – 326 с.
- 4 Ленточно-колодочные тормозные устройства: Монография (научное издание) в 2 т., т.2 / [Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко, С.И. Крыштопа, Д.Ю. Журавлев]. – Кубанск. госуниверситет. технолог. ун-т. – Краснодар – Ивано-Франковск, 2013. – 441 с.
- 5 Хайнике Г. Трибология / Г.Хайнике. – М.: Мир, 1987. – 584 с.
- 6 Пат. 2386061 С2 Российская Федерация МПК F16D 49/08, F16D 65/813. Способ определения коэффициентов распределения тепловых потоков между парами трения различных видов фрикционных узлов в ленточно-колодочных тормозах буровых лебедок (варианты) / Вольченко А.И., Петрик А.А., Вольченко Н.А., Вольченко Д.А.; заявитель и патентообладатель Ивано-Франковск. национал. техн. ун-т нефти и газа. – №2007128496/11; заявл. 24.07.2007; опубл. 10.04.2010, Бюл. №10. – 14 с.
- 7 Вольченко Д.А. Снижение энергонагруженности металлополимерных пар трения ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок / Д.А. Вольченко // Научно-техн. журнал. – Киев: НАУ. – №3(64). – 2014. – С.17 – 30.
- 8 Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике; Под редакцией В.К. Кошкина. – М.: Машиностроение, 1985. – 624 с.

Стаття надійшла до редколегії
01.04.15

Рекомендована до друку
професором **Копеєм Б.В.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук **Вольченко Д.А.**
(Прикарпатський національний університет
ім. В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)