

Д.Ю.Журавлев, Я.В.Курыляк, А.Б.Стадник

**Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа
ЭНЕРГОНАГРУЖЕННОСТЬ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПАР ТРЕНИЯ
БАРАБАННО-КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗОВ**

Проиллюстрирована энергонагруженность фрикционного взаимодействия трибологической системы барабанно-колодочного тормоза с точки зрения ее удельной энергоемкости и удельной работы разрушения поверхностных и подповерхностных слоев элементов трения.

Ключевые слова: пары трения, барабанно-колодочный тормоз, фрикционное взаимодействие, поверхностный и подповерхностный слой, удельная: энергоемкость, работа разрушения.

Табл 2. Форм 2. Лит 6.

Д.Ю.Журавльов, Я.В.Куриляк, А.Б.Стадник

ЕНЕРГОНАВАНТАЖЕНІСТЬ ФРИКЦІЙНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПАР ТЕРТЯ БАРАБАННО-КОЛОДКОВИХ ГАЛЬМ

Проілюстрована енергонавантаженисть фрикційної взаємодії трибологічної системи барабанно-колодкового гальма з точки зору її питомої енергоємності та питомої роботи руйнування поверхневих і підповерхневих шарів елементів тертя.

Ключові слова: пари тертя, барабанно-колодкового гальма, фрикційне взаємодія, поверхневий і підповерхневий шар, питома: енергоємність, робота руйнування.

D.Zhuravlov, Ya.Kurylyak, A.Stadnyk

ENERGY LOADING OF THE FRICTION INTERACTION OF THE FRICTION PAIRS OF THE DRUM-BLOCK BRAKES

The article demonstrates the energy loading of the tribological system friction interaction of the drum-block brake in terms of its specific energy and specific demolishing performance of the surface and subsurface layers of the friction elements. The research shows that a lack of knowledge about the temperature effects (the limit of inflammability, the surface temperature, the heat content) and the emerging temperature gradients (surface and depth materials) on the demolishing and friction characteristics of the metal-polymer tribosystems reduce the utilization range of the polymeric materials in the friction assemblies of the braking devices. In the drum-block brakes with metal-polymer friction pairs there exists the metal rim of the drum in the processes of electromechanic friction and intervals between the slowdowns of the heat energy by the accumulator and the polymer lining can be found between the positive and negative charges of the accumulator. In addition, the paper presents and analyzes the physical and mechanical properties of the friction material "Tribonit TR-9", currently used for the linings in the braking devices. The classification of the basic physical effects that emerged in the polymer overlay during its performance in the friction assembly is outlined. The author describes two methods to evaluate the demolishing and friction properties at increased surface temperatures during the heating of the friction linings used in testing vehicles with drum-block brakes. The effect of the surface irregularities of the drum rim on the braking process is disclosed. The dimensions to calculate the energy loading of the frictional interaction of the tribosystem materials are given. It should be noted that the strength properties of the new phases of the secondary structures on the friction surfaces are secondary, that's why there is no direct correlation between the intensity of wearing and volumetric properties of the basic material. The research results are relevant as they answer the question what processes occur in the friction pairs during the friction of the drum-block brakes which lead to their impetuous deterioration and, as a result, to the break down of the brakes.

Keywords: friction pairs, drum-block brake, friction interaction, surface and subsurface layers, specific energy, specific demolishing performance.

Введение. Ограниченный объем знаний о влиянии температур (вспышки, поверхностной и объемной) и возникающих при этом температурных градиентов (поверхностных и по глубине материалов) на износотрибологические характеристики металлополимерных трибосистем снижает диапазон использования полимерных материалов в узлах трения тормозных устройств [1]. В реальных узлах трения весьма часто приходится сталкиваться с присутствием отрицательного температурного градиента по толщине поверхностного и подповерхностного слоя полимерной накладке из-за фазовых переходов первого и второго рода, вызванных деструктивными и сублимационными процессами. В этом случае максимальная объемная температура находится внутри объема полимерной накладки, т.е. на границе раздела жидкой и твердой фазы ее материалов. В барабанно-колодочном тормозе с металлополимерными парами трения металлический обод барабана является в процессах электротермомеханического трения и пауз

©Д.Ю.Журавлев, Я.В.Курыляк, А.Б.Стадник

между торможениями аккумулятором тепловой энергии, а полимерная накладка – аккумулятором положительных и отрицательных зарядов. Кроме того, в процессах торможения они выполняют роль якоря и статора генератора.

Состояния проблемы. Наличие "букета" процессов, явлений и эффектов в поверхностном и подповерхностном слоях полимерных накладок заставляет обратить внимание на их характеристики.

На основании ТУ У6-05495578.006.97 в табл. 1 приведены эксплуатационные и физико-механические характеристики фрикционного изделия "Трибонит ТР-9", используемого в настоящее время для накладок в тормозных устройствах. Проанализируем некоторые из характеристик.

Таблица 1

Эксплуатационные и физико-механические характеристики фрикционного изделия "Трибонит ТР-9"

Х а р а к т е р и с т и к и :			
эксплуатационные		Физико-механические	
Удельные нагрузки –	до 1,15 МПа	Плотность материалов –	1,8 – 2,0 г/см ³
Толщина накладки –	до 14,0 мм	Твердость по Шору –	70 – 95
		Динамический коэффициент трения –	0,4 – 0,5
		Линейный износ не более –	0,25 мм
		Температуры:	
Температуры:		Воспламенения –	375°С
допустимая поверхностная –	300°С	Самовоспламенения –	425°С
окружающего воздуха –	до (-60°С)		

Удельные нагрузки превышающие 1,15 МПа будут способствовать разрушению поверхностного слоя накладки. Линейный износ (максимальный) за одно торможение регламентирован до 0,25 мм. Допустимая величина износа накладки по толщине составляет 8,0 – 9,0 мм. Разность температур между воспламенения и допустимой с одной стороны и самовоспламенения и допустимой с другой стороны составляет, соответственно, 75,0 и 125,0°С. Температуры воспламенения и самовоспламенения поверхностных слоев полимерных накладок являются предохранительным фактором, который исключает электрический или тепловой взрыв металлических включений, находящихся в их слоях. Таким образом достигается предотвращение явления пиролиза в поверхностных и подповерхностных слоях накладок [2].

При испытании транспортных средств с барабанно-колодочными тормозами производится нагревание их фрикционных накладок, которое необходимо для оценки износофрикционных свойств при повышенных поверхностных температурах, производится двумя способами. Первый способ реализуется нагреванием в условиях, когда заданы параметры единичного торможения, их частота и количество. Диапазон максимально допустимой температуры при этом не является лимитированным, а зависит от теплофизических свойств материалов накладки и интенсивности торможений. Второй способ реализуется нагреванием накладок до заданного значения поверхностной температуры при определенных параметрах единичного торможения. Количество единичных торможений в этом случае не лимитируется. При испытании фрикционных накладок барабанно-колодочных тормозов принимается допустимая поверхностная температура 300°С [3].

Цель работы - оценка энергонагруженности фрикционного взаимодействия металлополимерных пар трения барабанно-колодочных тормозов.

Энергетические уровни поверхностных и подповерхностных слоев полимерных накладок. Активные диэлектрики являются материальной средой, позволяющей достигать непосредственного преобразования энергии и информации. Указанные преобразовательные функции обусловлены физической структурой и химическим составом фрикционных полимерных материалов и их поверхностных и подповерхностных слоев. В табл. 2 приведена классификация основных физических эффектов, которые появились в той или иной степени в полимерной накладке при ее работе во фрикционном узле.

Таблица 2

Основные эффекты в «активных» (smart) диэлектриках

Отклик	Механический	Электрический	Магнитный	Тепловой
Воздействие				
1	2	3	4	5
Электрическое поле	Обратный пьезоэффект	Поляризация, электрический ток	Электромагнитный эффект	Электрокалорический эффект
Магнитное поле	Магнито-стрикция	Магнитоэлектрический эффект	Намагничивание	Магнитокалорический эффект
Механические напряжения	Деформация	Прямой пьезоэффект	Пьезомагнитный эффект	Упруго-тепловой эффект
Изменение теплоты	Термическое расширение	Пироэлектрический эффект	Терромагнитный эффект	Теплоемкость

Для систематизации и наглядности использовали метод «воздействие-отклик». Воздействие на полимерную накладку производится извне при торможении. При этом в зависимости от режима нагружения фрикционного узла в накладке возникают различные поля (механические, электрические, магнитные и тепловые). В полимерных накладках основное совместное воздействие оказывает электрическое и тепловое поле. При изучении воздействия на них других видов полей (механического, магнитного и химического) необходимо учитывать изменение электрических свойств ее поверхностных и приповерхностных слоев. Под «откликом» фрикционных материалов полимерной наклейки подразумевают индуцированные в них физические явления. Это может быть не только электрический или тепловой ток, вызывающие возникновение электрического потенциала (создаваемый зарядами на поверхности и в приповерхностном слое полимерной наклейки), а также поверхностных и по толщине слоя наклейки температурных градиентов, но и деформации, намагничивание, поверхностные и объемные температуры и др. При этом необходимо помнить, что прирост поверхностной температуры никогда не превышает прирост объемной температуры в подповерхностном слое наклейки. Кроме того, до допустимой температуры материалов поверхностного слоя наклейки почти не принимает участие в теплообменных и теплопередающих процессах. За счет накопления объемных зарядов на поверхности полимерных накладок в процессах электротермомеханического трения происходит искровой разряд способствующий массопереносу с их поверхностей частиц на рабочую поверхность металлического фрикционного элемента. В тот момент на микроуровне создается новая пара "полимер - полимер", т. е. в этом случае происходит экранирование контртела. Оживление теплообменных и теплопередающих процессов на поверхности накладок происходит в том случае, когда на их поверхностях развиваются температуры выше допустимой для фрикционных материалов, вызывающие деструктивные процессы (происходит выгорание связующих компонентов). В этом случае возникают теплообменные схемы с одной стороны "поверхность наклейки – поверхность обода барабана" и с другой стороны "поверхность обода барабана – фланец барабана", в результате которых возникает термостабилизационное состояние обода барабана. Объясняется указанное явление минимальным температурным градиентом по толщине обода тормозного барабана [4].

Поверхностное состояние полимерной наклейки при любых температурах является основой для создания двойных электрических слоев типа "поверхность обода барабана – поверхность наклейки" и "поверхность наклейки – подповерхностный слой жидкого состояния ("электролита") наклейки". Возникающая при этом трибоЭДС генерируется в электрические токи, которые и усиливают температурное поле поверхностного слоя полимерных накладок.

Влияние шероховатости поверхностей фрикционных узлов на их теплонагруженность. Обработанная рабочая поверхность тормозного барабана как бы она ни была совершенна, имеет отличия профиля поверхностей от геометрической формы, заданной чертежами детали. Для данных фрикционных узлов в чертежах не указывается требуемое

©Д.Ю.Журавлев, Я.В.Курыляк, А.Б.Стадник

направление следов обработки, которое оказывает влияние на фрикционные свойства контакта. Согласно работы [3] различают макроотклонения (нерегулярное отклонение поверхности от правильной геометрической формы), волнистость (более или менее периодические макроотклонения от геометрической формы детали, представляющие собой практически равные по размерам возвышения и впадины) и шероховатость (макроотклонения геометрического профиля волнистой поверхности от геометрической формы). И. В. Крагельский на основе молекулярно-механической теории трения обосновал и показал экспериментально, что по мере снижения шероховатости от грубой поверхности до зеркально гладкой сила трения сначала уменьшается, затем остается постоянной, а при низкой шероховатости увеличивается. Однако известно, что для снижения деформационной составляющей трения надо уменьшить высоту микронеровностей и увеличить опорную площадь поверхности, что приведет к уменьшению удельных нагрузок в зоне контакта, и как следствие, к снижению ее поверхностных температур. В то же время для снижения адгезионной составляющей трения надо, наоборот, увеличить высоту микронеровностей и уменьшить опорную площадь поверхности, что незамедлительно приведет к возникновению больших удельных нагрузок и высоких локальных ее поверхностных температур.

В барабанно-колодочном тормозе за цикл торможения изменение шероховатостей при приработке осуществляется за счет контактирования мягкого фрикционного материала, т.е. наружных поверхностей фрикционных накладок (НВ 12-45) с твердым, т.е. внутренней поверхностью тормозного барабана (НВ 207-250) обусловлено подстройкой шероховатостей поверхностей накладок под шероховатости поверхностей металлических фрикционных элементов.

На рабочих поверхностях фрикционных узлов происходит следующее. При относительном перемещении микронеровности рабочей поверхности тормозного барабана, скользя по наружным поверхностям фрикционных накладок, оттесняют ее материал, образуя перед собой волны (валики). В связи с большими размерами номинальной площади соприкосновения пар трения образуются десятки волн, по которым происходит их контактирование. Волны в общем случае имеют форму вытянутых эллипсоидов. При контакте волны испытывают в основном упругую деформацию, а микронеровности, расположенные на них, претерпевают упругую и пластическую деформацию. При упругих деформациях в процессе приработки в зонах взаимодействия пар трения фрикционных узлов тормоза вследствие изнашивания их поверхностей разрушаются те микронеровности, которые подвержены наибольшим, силовым воздействиям (набегающие участки поверхностей фрикционных накладок). В результате появляются новые микронеровности на рабочих поверхностях фрикционных узлов тормоза, отличные по своим размерам и форме от изношенных, вызывающих меньшее силовое воздействие. Такое взаимодействие рабочих поверхностей фрикционных узлов тормоза по истечении некоторого времени работы приводит к появлению установившейся шероховатости, которая в течении определенного промежутка времени не изменяется. Установившаяся шероховатость соответствует минимально возможному в данных условиях динамическим коэффициентом трения. При этом высота микронеровностей рабочих поверхностей фрикционных узлов тормоза допускается до 1,5-3,8 мкм.

Энергонагруженность фрикционного взаимодействия материалов трибосистем. Фрикционное взаимодействие относится к открытым термодинамическим системам, обменивающейся энергией и веществами со скоростными токами омывающей среды. Указанный обмен изменяет состав и свойства поверхностных и подповерхностных слоев материалов пары трения и определяет прочность и экранирующую способность новых самоорганизующихся вторичных структур – их качество. Вторичные структуры - формируются в результате кинетического фазового перехода, основой которого является совместное (синергетическое) действие деформационных, электрических, тепловых, адсорбционных, диффузионных и химических процессов.

Образование вторичных структур сопровождается процессами, явлениями и эффектами при:

- масштабном скачке когда все виды взаимодействия локализуются в тонкопленочном слое, т.е. вторичной структуре, когда глубина (h) активных слоев при нормальном износе уменьшается на 4 – 5 порядков по сравнению с глубиной слоев при повреждаемости;
- тепловой скачок когда фрикционные трибоЭДС усиливается трибоэлектрической ЭДС и поверхностная температура увеличивается в 2-3 раза;
- кинетическом скачке, когда скорости диффузии и химических реакций увеличиваются на 5 – 10 порядков возникает аномалия пластичности [5];

- формирование структурных и фазовых состояний, отличающихся от равновесных, когда вторичные структуры имеют бездислокационное фрагментарное строение, растворимость увеличивается на 3 – 5 порядков; образуются твердые растворы окислителей в металлах – вторичные структуры типа II.

Механо-деформационные процессы обуславливают упорядоченность структуры: измельчение, ликвидацию дефектов, ориентацию.

Физико-химические процессы обмена веществами со скоростными токами компонентов омывающих сред заключаются в изменении элементарного состава вторичных структур, обеспечивают эффект экранирования (прилипания) на фрикционном контакте. Рациональные по составу и свойствам вторичные структуры формируются в определенном интервале температур трения.

Выполняемая работа сил трения ($A_{тр}$) определяет энергетику активирования, кинетику образования и разрушения вторичных структур и их качество.

Упрощенное представление об импульсной силе трения F как о функции импульсной нормальной нагрузки оказалось несостоятельным как в теоретическом, так и в экспериментальном плане. Импульсная сила трения интегрально отражает действие всех факторов сложного электромеханического процесса трения. Установлено, что импульсная сила трения является не функцией импульсной нормальной нагрузки, а оператором A процессов, возникающих при том или ином сочетании импульсной нормальной нагрузки N , скорости скольжения v и вектора параметров трения C (свойства материалов, среды, температуры и т.п.) [5]:

$$F(N)=A(N, v, C) \quad (1)$$

Такое представление о силах и работе трения позволяет проанализировать процессы трансформации материалов в зоне электротермомеханического трения.

Исследование энергетического баланса электротермомеханического трения трибосистем с помощью метода колориметрирования позволило установить, что работа сил трения $A_{тр}$ в основном превращается в теплоту Q и аккумулируется в поверхностном и подповерхностном слоях трибосопряжения (ΔE), а затем с различным темпом передается в тело металлического и полимерного фрикционных элементов

$$A_{тр}=Q+\Delta E \quad (2)$$

При этом от условий трения зависит не только суммарная величина работы трения $A_{тр}$, но и соотношение между ее величиной и основными составляющими – количеством запасаемой ΔE и рассеиваемой энергии Q . Однако, здесь не все так просто, поскольку темп нагревания в сотни раз превышает темпы охлаждения элементов трибосопряжения. Основным результатом работы сил трения является контактная упругопластическая деформация – физическая основа структурно-термического активирования и определяющий фактор пассивации, кинетического фазового перехода и образования вторичных структур. В соответствии с представлениями механохимии пластическая деформация приводит к образованию реакционно активных ультрадисперсных ориентированных структур, взаимодействию их с активными скоростными токами компонентов омывающих сред (адсорбция, диффузия, химическая реакция и др.), генерированию электрических и тепловых токов и формированию защитных вторичных структур.

Для количественной оценки энергонагруженности используются критерии энергоемкости трибосистемы и удельной работы поверхностного разрушения [6].

Под общей энергоемкостью трибосистемы ($\mathcal{E}_{общ}$) понимается предельное количество энергии (суммарная плотность), которое может рассеивать и поглощать трибосистема до наступления повреждаемости ее поверхностных слоев. Наибольшее значение для практики имеет удельная энергоемкость трибосопряжения по температурному показателю \mathcal{E}_Q , характеризующая затраты работы трения $A_{тр}$ на повышение поверхностной температуры на 10°C

$$\mathcal{E}_Q=A_{тр}/\Delta T, \text{ Вт}/(\text{мм}^2 \cdot ^\circ\text{C}). \quad (3)$$

Удельная энергоемкость по структурному показателю ε характеризует затраты работы трения на увеличение степени пластической деформации.

Удельная работа разрушения A_p характеризует затраты работы трения $A_{тр}$ на удаление с поверхности трения единицы объема материала 1 мм^3 :

$$A_p=A_{тр}/\Delta V, \text{ Дж}/\text{мм}^3. \quad (4)$$

Необходимо отметить, что прочностные характеристики новых фаз вторичных структур на поверхностях трения являются вторичными, поэтому прямой корреляции между интенсивностью изнашивания и объемными свойствами основного материала нет. Однако геометрические параметры вторичных структур – толщина (h) и коэффициент заполнения зазоров между

микровыступами (k) – зависят от механических свойств материалов трибосопряжения, импульсной удельной нагрузки N и импульсной силы трения F . Интенсивность изнашивания поверхностей трибосопряжения описывается зависимостью вида

$$\dot{I} = (h / \tau)k, \quad (5)$$

где τ – продолжительность цикла образования, стабилизации и разрушения вторичных структур.

Следующим этапом работы является оценка интенсивности изнашивания металлополимерных пар трения барабанно-колодочных тормозов транспортных средств на основе полученных экспериментальных данных.

Выводы. Таким образом, показан подход к энергонагруженности фрикционного взаимодействия пар трения барабанно-колодочных тормозов с точки зрения оценки общей энергоемкостью трибосистемы, а также удельной работы разрушения ее поверхностных слоев.

1. Руденко Е. Г. Анализ испытаний фрикционных материалов тормозных устройств / Е. Г. Руденко, Л. И. Кобзева // Вестник СНУ им. Владимира Даля. – Луганск, 2009. - №11(141). – С.200-204.
2. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 475 с.
3. Харламов П. В. Трибоспектральная идентификация и прогнозирование критического состояния подсистемы "тормозной диск – колодка" автомобиля: дисс. ...канд. техн. наук: 05.02.04 / Харламов Павел Викторович. – Ростов на Дону, 2009. – 164 с.
4. Диплом № 444 на открытие "Явление тепловой стабилизации в металлополимерных парах трения" от 18.01.2013 г авторов А. И. Вольченко, М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко. – М.: Международн. академ. авторов научн. открыт. и изобрет. – Экспертиза заявки на открытие № А – 558 от 05.09.2012.
5. Поверхностная прочность материалов при трении / Под общ. редакц. Б. И. Костецкого. – Киев: Техника, 1976. – 296 с.
6. Поляков П. А. Повышение эффективности тяжело нагруженных фрикционных узлов тормозных устройств: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.02 / Поляков Павел Александрович. – Краснодар, 2013. – 157 с.

Стаття надійшла до редакції 17.04.2014