

¹А. И. Вольченко, д-р техн. наук, проф.,
²М. В. Киндрачук, д-р техн. наук, проф.,
¹Д. А. Вольченко, канд. техн. наук, доц.,
³Н. А. Вольченко, канд. техн. наук, доц.,
¹В. Я. Малик, канд. техн. наук, доц.,
³П. А. Поляков, асп.

НОВЫЙ ПОДХОД К ТЕПЛОВОЙ ДИНАМИКЕ ТРЕНИЯ ФРИКЦИОННЫХ УЗЛОВ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ (часть 4)

¹Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

²Национальный авиационный университет

³Кубанский государственный технологический университет (Россия)

Раскрыты основы зарождения и возникновения явления термостабилизационного состояния металлических фрикционных элементов тормозных устройств. Показано взаимодействие фрикционного элемента (обода) с приповерхностными слоями накладок при температурах ниже и выше допустимых для их материалов.

Введение. В настоящее время многие ученые пытаются объяснить процессы и явления, происходящие в приповерхностных слоях пар трения тормозных устройств с позиции нанотрибологии.

Пары трения тормозных устройств можно представить как термоэлектрогенератор, который генерирует в результате возникновения явления Зеебека: возникновение электрической силы и тока в замкнутой цепи состоящей из разнородных материалов «металл-полимер», поверхности которых находятся при различных контактных температурах. Контактная разность потенциалов $\Delta\varphi$ зависит от разности потенциалов выхода φ_1 – φ_2 взаимодействующих материалов, абсолютной температуры T в зоне контакта, который отличается концентрацией n_1 и n_2 электронов в них:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}, \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана; e – электрический заряд.

Поскольку контактирующие поверхности фрикционного узла тормозного устройства имеют различные температуры, в цепи возникает термоэлектродвижущая сила, величина которой в широких пределах пропорциональна разности температур поверхностей $\varepsilon_T = \alpha(T_1 - T_2)$. Постоянная α тем больше, чем больше разность между концентрациями электронов у поверхности контактирующих материалов фрикционного узла тормоза.

Авторами исследовано в работе [1] для тормозных устройств процессы происходящие при взаимодействии поверхностей трения; формирование микротермобатарей и их работа в парах трения; определение генерируемых токов на поверхности трения экспериментальным путем. В дальнейшем в работе [2] были определены направления составляющих электрических токов, которые генерируются на поверхности трения тормозных устройств.

В продолжение ранее изложенного материала рассмотрим применительно к тормозным устройствам: материалы пар трения; термоэлектрические модели взаимодействия металлического фрикционного элемента при трении в различных средах; контактное взаимодействие пар трения с различными энергетическими уровнями их материалов; обоснование явления термостабилизационного состояния металлических фрикционных элементов.

Материалы пар трения тормозных устройств. Из разнообразия материалов для металлических фрикционных элементов остановимся на структурных особенностях чугуна Gh190, полученных Д.А.Болдыревым в исследовательском центре ВАТ «АВТОВАЗ» (г. Тольятти, Россия) табл. 1.

Для микроструктуры материала импортных дисков характерен преимущественно графит типа А (кроме микроструктуры материалов тормозных дисков 4, которым свойствен также графит типов В и D); тормозных дисков 2 – типы В и Е, и тормозных дисков 3 – тип В); микроструктуры чугуна Gh190 присущ графит типов А, В, D, то есть материалы-аналоги для тормозных дисков имеют более тонкие и равномерно распределенные (кроме материала тормозного диска 5) включения графита, что может способствовать повышению его износостойкости, за счет намазывания на поверхности фрикционных накладок, и как следствие, увеличение электропроводности.

Таким образом, при длительной эксплуатации дискового тормоза под нагрузочным тепловым воздействием на поверхности полимерной накладки возникают на микроучастках графены, за разработку которых в 2010 году была вручена Нобелевская премия.

В структуре материалов тормозных дисков импортного производства обнаружен феррит, количество которого изменяется от 1 % (тормозной диск 6) до 10–15% (тормозные диски 1, 2 и 4). В структуре чугуна Gh190 феррита не обнаружено. Были обнаружены включения сульфида марганца (при повышенном, по сравнению с чугуном Gh190, содержании серы) которые способствуют повышению износостойкости; в чугуне Gh190 сульфиды отсутствуют.

Таблица 1

Результаты металлографических исследований тормозных дисков

Параметр	Чугун			
	Gh 190	Диск 1	Диск 2	Диск 3
Графит	Тип А №4, 5; В; D	Тип А №4, 5;	Тип А №4, 5; В; E	Тип А №4, 5; В;
Металлическая основа	Перлит пластинчатый, MnS – 0,06% _{мас} *	Перлит пластинчатый, феррит до 10% _{об} , MnS – 0,17% _{мас} *	Перлит пластинчатый, феррит до 15% _{об} , MnS – 0,22% _{мас} *	Перлит пластинчатый, MnS – 0,18% _{мас} *
Графит	Диск 4	Диск 5	Диск 6	
	Тип А №4, 5; В; D	Тип А №4, 5;	Тип А №4, 5;	
Металлическая основа	Перлит пластинчатый, феррит до 10% _{об} , MnS – 0,24% _{мас} *	Перлит пластинчатый, феррит до 5% _{об} , MnS – 0,29% _{мас} *	Перлит пластинчатый, феррит до 1% _{об} , MnS – 0,33% _{мас} *	
* - Рассчитано по стехиметрическому соотношению; _{мас} – массовые доли; _{об} – объемные доли				

Остановимся на химическом составе полимерных фрикционных накладок, которые представлены в табл. 2.

Материалы фрикционной накладки представляют собой композит, состоящий из фракции, различной степени дисперсности и химического состава. В табл. 2 приведен химический состав материала фрикционных накладок, отечественных DAFmi, Tans. Master (Украина) и зарубежных QH Zucas, AP Zockheed Eerodo (Великобритания); ATE, Bosch (Германия); Samko (Италия); RouludS (Венгрия) и Полиэдр, ВАТИ, STS, ТИИР, ЕЗАТИ (Россия). Все представленные материалы фрикционных накладок отличаются по твердости, прочности, упругости, химическому составу дисперсностью структурных составляющих.

Связующим всех материалов фрикционных накладок является фенолформальдегидная смола (табл. 2). Во всех материалах фрикционных накладок основными твердыми включениями являются стальная высечка, алюминиевая и латунная стружка (в материале накладки D – медная стружка, слюда).

Таблица 2

Химический состав материалов фрикционных накладок

Фрикционная накладка	Содержание элементов, %								
	C _{своб}	S	Al	Cu	Fe	Si	Zn	Pb	Ni
G	16,40	3,70	3,33	7,66	3,69	0,64	2,78	3,10	0,260
B	24,20	2,95	3,95	3,34	14,90	1,08	2,23	0,08	0,020
C	18,10	-	0,84	11,80	27,40	-	3,28	0,13	-
A	22,70	-	1,97	5,84	14,30	1,12	3,67	0,16	0,023
H	19,60	-	0,24	5,13	19,50	0,34	1,10	0,01	0,004
D	19,10	-	0,13	11,77	35,20	0,29	3,52	0,05	0,008
J	22,30	-	0,31	0,23	30,90	0,21	0,07	2,08	0,001
K	-	-	0,50	9,50	32,70	0,28	2,68	2,40	-
L	-	-	0,36	10,50	34,00	0,29	2,97	2,66	-
E	19,4	19,4	0,67	8,23	19,4	0,11	2,41	0,09	0,01
F	19,0	19,0	0,82	9,85	19,6	0,24	3,56	0,16	0,05
Фрикционная накладка	Ti	Sb	Ba	Ca	K	Mn	Mg	Na	Sr
G	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C	0,140	-	-	-	-	-	-	-	-
A	0,140	-	-	-	-	-	-	-	-
H	0,060	-	-	-	-	-	-	-	-
D	0,020	-	-	-	-	-	-	-	-
J	0,060	-	-	-	-	-	-	-	-
K	0,040	4,50	0,84	-	-	-	-	-	-
L	0,040	4,90	0,58	-	-	-	-	-	-
E	0,002	-	2,88	2,88	0,04	0,13	0,10	0,05	0,02
F	0,080	-	2,87	0,36	0,21	0,17	0,30	0,05	0,03

Сравнительный анализ компонентов, входящих в состав материалов тормозных дисков и фрикционных накладок показал, что большинство из них относится к полупроводниковым материалам. Кроме того, при взаимодействии пар трения «чугун-полимер» в различных средах формируются на их поверхностях полупроводниковые пленки в зависимости от теплового состояния металлического и неметаллического фрикционного элемента (рис. 1).

В связи с тем, что материал фрикционной накладки ведет себя по разному в интервале температур до допустимой и выше ее, приповерхностные слои накладки могут находиться в твердом состоянии полностью, и частично в жидком и газообразном состоянии. Исходя

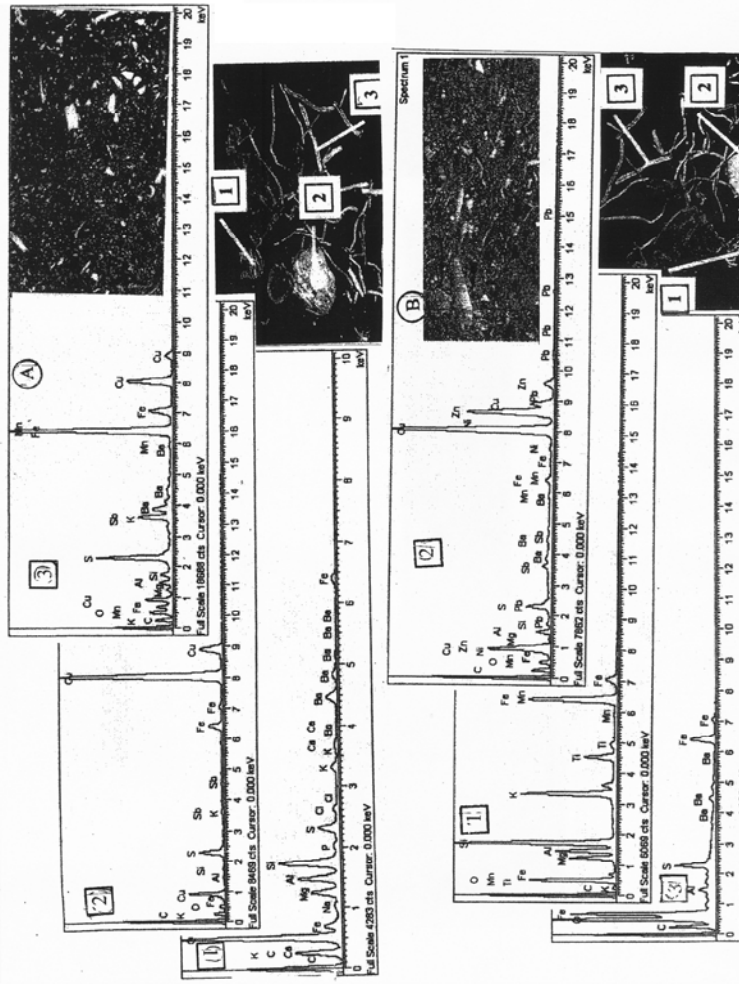


Рис. 1. Структура, композиционные составляющие материала фрикционной накладки AuB ($\times 16\times 0,33$) со спектральным составом (1, 2, 3) и суммарным спектром содержания химических элементов на поверхностях трения тормозного диска (в правом углу без цифровых обозначений)

из этого, выделим следующие типы поверхностей раздела: «металл-полимер»; «металл-полимер с жидкостью»; «металл-полимер с жидкостью и газом»; «металл-газ-полимер». Имеют влияние на разделяющие слои в парах трения тормозных устройств: объемная и граничная вязкости, теплоемкость; химическая активность и состав ее, что является предметом особых исследований, так как благодаря им происходит процессы сорбции, десорбции и адсорбции. При этом на поверхностях взаимодействия пар «чугун-полимер» также формируются обычные пленки с остальных компонентов, которые способны выполнять функции термоэлектрической пары.

В дополнение к термобатареям, проиллюстрированным в работе [1], на рис. 2 *а, б, в, г* показаны термоэлектрические пары с замкнутой (*а, б, в*) и незамкнутой (*г*) цепью. Замкнутая цепь (вариант *в*) свойственна накладке, когда ее фрикционные материалы имеют температуру выше допустимой.

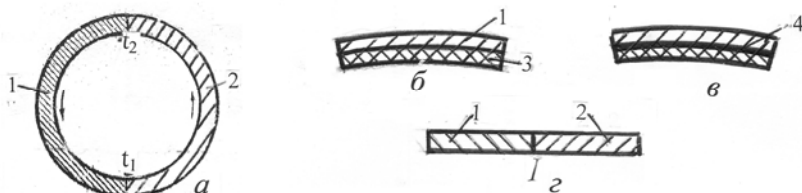


Рис. 2. Термоэлектрическая пара с замкнутой (*а, б, в*) и незамкнутой (*г*) цепью: 1, 2 – металлы; 3 – полимер; 4 – слабый электролит

Адсорбционные процессы сильно изменяют работу выхода электронов в процессе образования адсорбционной связи между свободным атомом или молекулой и поверхностным дипольным слоем. Изменение работы выхода электронов металлической поверхности фрикционного элемента адсорбированными атомами или молекулами прямо пропорционально их эффективному дипольному моменту и степени заполнения поверхности. При адсорбции возникает поверхностный двойной электрический слой, влияющий на изменения и распределения электронных зарядов в нем.

Термокинетические модели взаимодействия металлического фрикционного элемента при трении с различными средами. Более того, работа совершаемая электроном, находящимся в адсорбированном слое, зависит от расположения диполя (рис. 3) относительно

но (воображаемой) электронейтральной плоскости. При этом, электрон совершает работу по преодолению полного или половины потенциала адсорбированного слоя. Необходимо так же учитывать тот факт, что в поверхностном слое фрикционной накладки, при выгорании связующих компонентов ее материалов при достижении допустимой температуры и выше, молекулы образовавшегося электролита сильно ориентированы. В результате их эффективный дипольный момент увеличивается по отношению к дипольному моменту поверхности металлического фрикционного элемента. Это обстоятельство и является одним из основных условий инверсии множества микроотков от рабочей поверхности накладок в рабочую поверхность металлического фрикционного элемента.

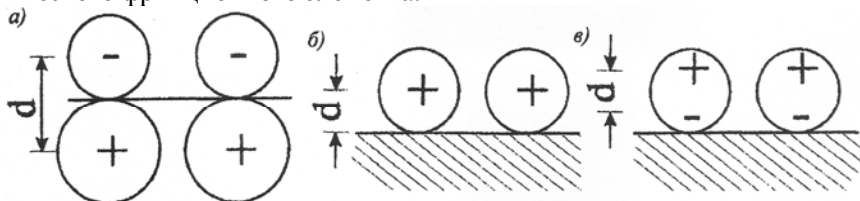


Рис. 3. Диполи, которые возникают при адсорбции на поверхности металла:
а – хемосорбция ковалентная; *б* – хемосорбция ионная; *в* – физическая сорбция;
d – расстояние между центрами зарядов

Из вышеизложенного следует, что трибохимия занимает важное место в трибологии пар трения тормозных устройств (табл. 3).

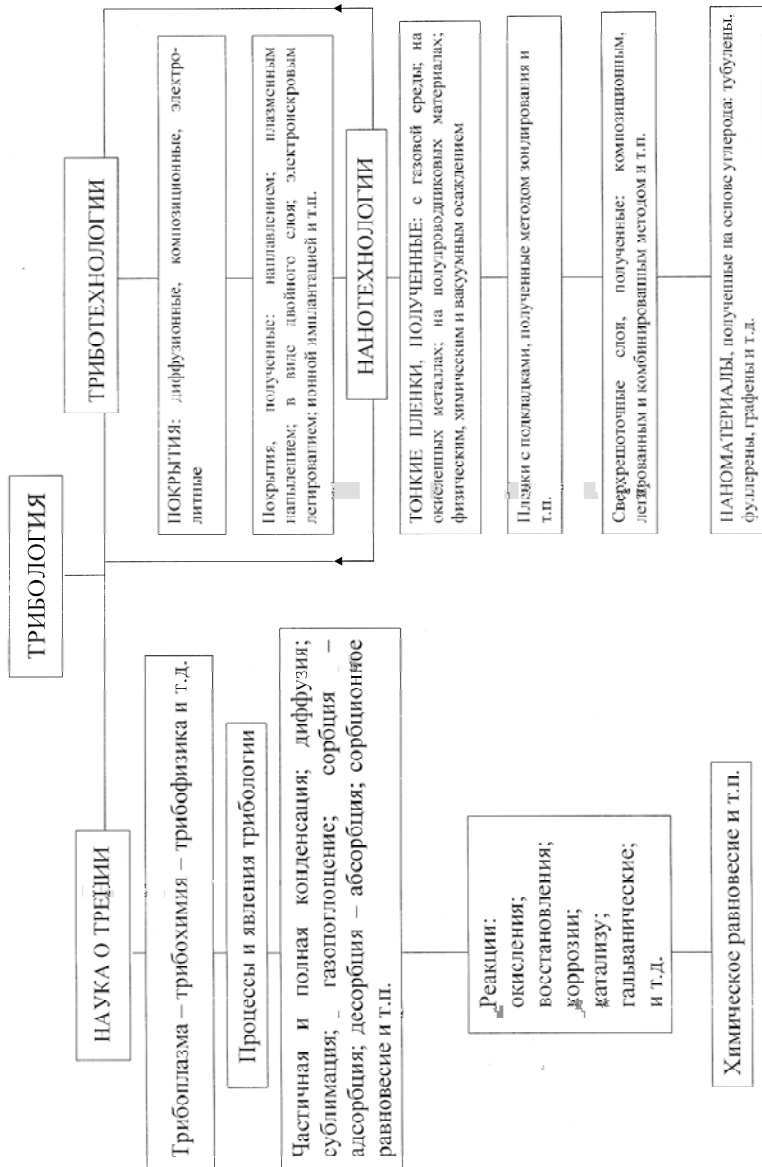
Перейдем к оценке трибокинетической модели взаимодействия металлического фрикционного элемента при трении с газовой фазой.

Трибокинетическая модель предложена для различных процессов, которые происходят в слое микронеровностей металлического фрикционного элемента под действием упругих или пластических деформации – при торможении в присутствии газовой среды (рис. 4).

На рис. 4 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; штриховкой показан поверхностный слой, нарушенный путем трения скольжения; стрелкой вверх на границе раздела обозначена трибодесорбция; стрелкой вниз – трибоабсорбция, двойные стрелки – трибодиффузия; газовая фаза достигает рабочей поверхности металлического фрикционного элемента путем диффузии, а потом адсорбируется.

Место трибохимии в трибологии пар трения тормозных устройств



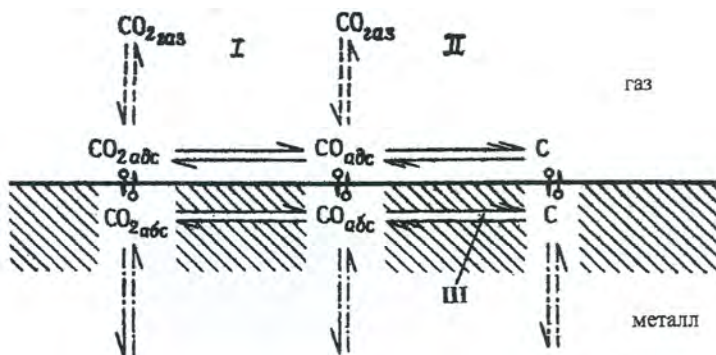


Рис. 4. Трибокинетическая модель трибосорбции и трибореакции в системе CO_2 -металл для CO те же индексы: $\text{CO}_{2\text{газ}}$ - CO_2 в газовой фазе; $\text{CO}_{2\text{адс}}$ - CO_2 в адсорбированном состоянии; $\text{CO}_{2\text{адс}e}$ - CO_2 в адсорбированной форме

Трибоабсорбция происходит по точках 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 фрикционного элемента. 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 химическая реакция в значительной степени определяется процессами трибосорбции и диффузии [3]. В случае когда скорость трибосорбции и трибореакции одного порядка, реакция смещается в сторону рабочей поверхности металлического фрикционного элемента. При этом, необходимо обратить внимание на трибоиндукционные процессы, которые очень часто существенно отличаются от соответствующих термоиндукционных процессов, и поэтому константы, которые характеризуют абсорбцию и диффузию при термоактивации, нельзя использовать для описания трибокинетических закономерностей.

Представление пар трения тормозных устройств в виде конденсатора позволяет констатировать, что наличие дифференциальных емкостей дает возможность объяснить многие эффекты, возникающие возле заряженной поверхности раздела. На поверхности

раздела могут присутствовать химические адсорбированные ионы, в данном случае – анионы, которые имеют тот же знак, что и рабочая поверхность металлического фрикционного элемента 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 $\approx 10 \text{ \AA}^2$. Особенности структуры двойного слоя представлены на рис.5.

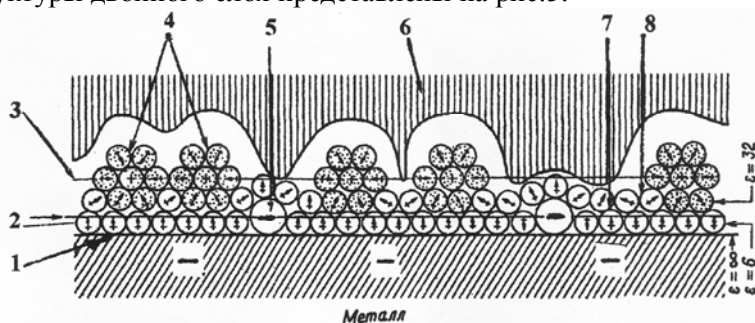


Рис. 5. Детальная модель двойного слоя в паре «металл-вода»: 1 – поверхность металла с потенциалом φ_M ; 2, 3 – плоскости Гельмгольца и Гуи с потенциалами φ_1 и φ_2 ; 4 – сольватированные катионы; 5 – специфические адсорбированные анионы; 6 – нормальная структура воды ($\epsilon = 78,5$); 7, 8 – слои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

Представленная схема (рис. 5) наглядно все иллюстрирует для случая, когда металлический фрикционный элемент находится в статике. Иначе все происходит в динамике [4].

При торможении дискретное множество микроконтактного взаимодействия поверхностей «вращающийся металлический элемент-фрикционная накладка» при различных их тепловых состояниях будут вносить существенные изменения в рассмотренную ранее схему: происходит переполяризация ионов и катионов; изменяется положение плоскостей (внутренняя плоскость становится внешней, и наоборот); существенно изменяются электрические свойства ионов и катионов усредненные; поверх-

ность жидкости становится неоднородной поскольку ее структуру нарушают адсорбированные частицы материалов накладки кроме того другие составляющие вносят изменения в указанные выше процессы и явления.

Контактное взаимодействие пар трения с различными энергетическими уровнями их материалов. Работа выхода электронов с металлических фрикционных элементов влияет на величину и направление термотоков, которые генерируются на поверхности пар трения тормозных устройств.

Рассматриваемый метод определения работы выхода электронов базируется на том, что при электронной эмиссии каждый электрон, который покидает рабочую поверхность металлического фрикционного элемента, выносит энергию, доля которой составляет работу выхода электрона W . При нагревании металлического фрикционного элемента тормоза во время торможения до температуры достаточной для термоэлектронной эмиссии вблизи его поверхности образуется так называемая электронная туча (пространственный заряд). В случае разомкнутой пары трения тормоза устанавливается равенство числа электронов, которые покидают рабочую поверхность металлического фрикционного элемента и числа электронов, которые возвращаются на нее с области пространственного заряда [6; 7]. При замыкании пар трения (предварительно нагретых) тормоза возникает движение электронов от рабочей поверхности металлического фрикционного элемента к неметаллическому (полимерному). В результате, происходит снижение поверхностной температуры рабочей поверхности металлического фрикционного элемента, связанное с указанным переносом энергии каждым электроном.

Известно, что зависимость плотности тока от абсолютной температуры металлического фрикционного элемента описывается зависимостью Ричардсона-Дэшмана [5].

$$j = CT^2 e^{\frac{W}{kT}}, \quad (2)$$

где C – постоянная, термодинамически одинаковая для всех металлов; T – термодинамическая температура рабочей поверхности металлического фрикционного элемента; k – постоянная Больцмана; W – работа выхода электрона с металлического фрикционного элемента.

Представив зависимость Ричардсона-Дэшмана в виде $j/T^2 = Ce^{\frac{W}{kT}}$, и после логарифмирования получаем

$$\ln \frac{j}{T^2} = \ln C - \frac{W}{kT} \ln e.$$

Полученное равенство запишем для двух тепловых состояний металлического фрикционного элемента, т.е. до (T_1) и после (T_2) процесса торможения. При этом учитываем, что $\ln e = 1$ и $j = \frac{I}{A}$ (где I – ток, который генерируется в паре трения на микроучастке площадью A). В результате чего получим зависимости:

$$\ln \frac{I_1}{AT^2} = \ln C - \frac{W}{kT_1}; \quad (3)$$

$$\ln \frac{I_2}{AT^2} = \ln C - \frac{W}{kT_2}. \quad (4)$$

Разность между зависимостями (4) и (3) позволила получить

$$\ln \frac{I_2 T_1^2}{I_1 T_2^2} = \frac{W}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right),$$

которое превращается в расчетную зависимость для определения работы выхода электрона с металлического фрикционного элемента

$$W = k \frac{\ln \frac{I_2 T_1^2}{I_1 T_2^2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}. \quad (5)$$

Таким образом, работа выхода электронов (5) устанавливает связь между токами, которые генерируются на рабочих поверхностях пар трения тормоза и поверхностными температурами которые они вызывают на них.

Рассмотрим контактное явление для пары трения «металл-полимер», разделенной тонким вакуумным зазором, при температуре фрикционных материалов полимера ниже допустимой (рис. 6, а). Контактная разность потенциалов (ϕ) определяется как разность между электрическими потенциалами (уровнем Ферми) E_ϕ металла (M_2) и полимерного материала (P_1).

На рис. 6, а поверхностный потенциальный барьер показан пунктирной линией, а уровни Ферми «металл-полимер» – сплошными горизонтальными линиями. Представленная схема соответствует начальному моменту, когда металл и полимер расположены на расстоянии d_o , при котором возможный эффективный обмен электронами и ионами.

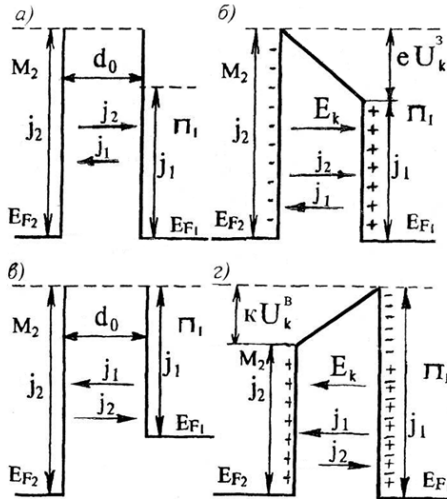


Рис. 6. Контактные явления в паре трения «металл (M_2)-полимер (Π_1)» при работе накладки ниже (а) и выше (б) допустимой температуры для ее фрикционных материалов и в случае установления равновесия (в, з)

Согласно рис. 6, а, при условии если $\varphi_2 > \varphi_1$, тогда $j_2 > j_1$, и будет совершаться перенос электронов слева направо. При этом поверхность металла заряжена отрицательно, а полимера – положительно. В зазоре возникает внешнее электрическое поле $E_K^{(en)}$ и соответствующая разность потенциалов $U_K^{(en)}$. В этом случае условием равновесия является равенство уровней Ферми. При этом, токи выравниваются, т.е. $j_1 = j_2$ (см. рис. 6, б). Данное равенство означает, что потенциальный барьер для электронов, которые движутся слева направо, $\varphi_2 + eU_K^{(en)}$, должен быть равным потенциальному барьеру для ионов, которые движутся справа налево, φ_1 , то есть справедливо равенство

$$\varphi_2 + eU_K^{(en)} = \varphi_1, \quad (6)$$

Таким образом, после установления равновесия возникает контактная разность потенциалов.

$$U_K^{(en)} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{e}, \quad (7)$$

Более сложным является случай, когда рассматривается пара трения «металл-полимер» разделенная тонким вакуумным зазором, при темпера-

туре фрикционных материалов полимера выше допустимой (рис. 6, в). В этом случае поверхностный потенциальный барьер (показан пунктирной линией) является одинаковым ($j_2=j_1$), поскольку фрикционный материал полимера достиг допустимой температуры и начались деструктивные процессы в его приповерхностных слоях, которые приводят к образованию в них жидкостных островков. Последние являются слабыми электролитами, которые разрешают водороду или металлу стать положительными зарядами (катионами), а кислотный радикал жидкостей получает отрицательный заряд, образуя таким образом анионы. Слой жидкости у поверхности насыщен катионами и анионами, которые образуют между собой внутреннее электрическое поле $E_k^{(BT)}$ с соответствующей разностью потенциалов $u_k^{(BT)}$. При этом $E_k^{(BT)}$ становится намного большим $E_k^{(BH)}$. Исходя из равенства $j_2=j_1$ (рис. 6, з) получаем, что потенциальный барьер для катионов, которые движутся справа налево, т.е. $\varphi_1 + ku_k^{(BT)}$, должен быть равным потенциальному барьеру для электронов, которые движутся слева направо, т.е. φ_2 . Получает равенство

$$\varphi_1 + ku_k^{(BT)} = \varphi_2. \quad (8)$$

После установления равновесия возникает контактная разность потенциалов

$$u_k^{(BT)} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{k}. \quad (9)$$

На основании вышеизложенного, перейдем к рассмотрению явления термостабилизационного состояния металлических фрикционных элементов тормозных устройств.

Явление термостабилизационного состояния металлических фрикционных элементов тормозных устройств. На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований сформулируем открытое новое явление: «Установлено ранее неизвестное явление устойчивого стабилизационного теплового состояния металлических фрикционных элементов в парах трения «металл-полимерные материалы», которые имеют приповерхностные слои, в интервале поверхностных температур выше допустимой для материалов фрикционной накладки, при динамическом контактировании дискретных зон, подверженных адсорбционно-десорбционным и деструктивным изменениям, а на их поверхностях происходит непрерывное образование «жестких» (на рабочей поверхности металлического фрикционного элемента) и «мягких» (на рабочих поверх-

ностях накладок) окисленных пленок, с которых часть становится полупроводниковыми микротермобатареями, а вторая их часть экранируется взаимным массопереносом, в которых соединительными мостиками микротермоэлементов выступают частицы продуктов износа, ионизированная газовая среда и компоненты десорбции влаги, образуя таким образом множество проводимых и полупроводимых микротермобатарей с различными контурами цепей, после чего возникает тепловое равновесие между металлическими фрикционными элементами и их боковыми стенками в связи с перераспределением теплоты между ними, которая поддерживается множеством микротермобатарей, образующих внешние и внутренние электрические поля с различными двойными электрическими слоями, и работающими в режимах микротермоэлектрогенераторов и микротермоэлектрохолодильников, а при сильном внутреннем электрическом поле происходит инверсия токов от приповерхностного слоя накладок в приповерхностные слои металлического фрикционного элемента».

Выводы. Таким образом, на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований обосновано новое явление термостабилизационного состояния металлических фрикционных элементов при их одновременном взаимодействии с боковой стенкой и с фрикционными накладками, материалы которых находятся при температуре выше допустимой. В заключительной публикации будет показано место данного явления в тепловой динамике пар трения тормозных устройств.

Список литературы

1. *Новый* подход к тепловой динамике трения фрикционных узлов тормозных устройств (часть 2)/ А.И. Вольченко, М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко [и др.]/Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. Вип.55. – С.27–46.
2. *Новый* подход к тепловой динамике трения фрикционных узлов тормозных устройств (часть 3)/ А.И. Вольченко, М.В. Киндрачук, Д.А. Вольченко [и др.]/Проблемы тертя та зношування: наук.-техн.зб.–К.:НАУ,2011.Вип.55.–С.47–64.
3. *Хайнике Г.* Трибохимия/Хайнике. Мир, 1987. – 584 с.
4. *Вольченко Д.А.* Методы прямого преобразования тепловой энергии в электрическую в парах трения тормозных устройств/ Д.А. Вольченко// Проблемы трибології. – 2010. – №2. – С.85–93.
5. *Трибологія/* М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут // – К.: Вид-во нац. авіац. ун-ву «НАУ-друж». – 2009. – 392 с.
6. *Жарин А.Л.* Кинетические и физико-химические процессы в тонких поверхностных слоях металлов и сплавов при трении скольжения: дисс. ... докт. техн.

наук.: 05.02.04 / Жарин Анатолий Леонидович. – Минск, 1994. – 366 с.

7. *Фадин Ю.А.* Кинетика разрушения поверхности металлических материалов при трении: дисс. ... докт. техн. наук.: 05.02.04 / Фадин Юрий Александрович. – Санкт-Петербург, 1997. – 208 с.

Вольченко О.І., Кіндрачук М.В., Вольченко Д.О., Вольченко М.О., Малик В.Я., Поляков П.О. **Новий підхід до теплової динаміки тертя фрикційних вузлів гальмівних пристроїв (частина 4)** // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 56. – С.55–70.

Розкрито основи зародження та виникнення явища термостабілізаційного стану металевих фрикційних елементів гальмівних пристроїв. Показана взаємодія металевого фрикційного елемента (обода) з приповерхневими шарами накладок при температурах нижче та вище допустимої для їх матеріалів.

Табл. 3, рис.: 6, список лит.: 7.

Volchenko O.I., Kindrachuk M.V., Volchenko D.O., Volchenko M.O., Malyk V.Ja., Poliakov P.O. **A new approach to thermal dynamics of friction, friction nodes braking devices (part 4).** Reveals the origin and basis of the phenomenon of thermostabilization metallic friction elements of braking devices. Illustrates the interaction of metallic friction element (rim) of the overlays in the surface layers at temperatures below and above permissible for their content.

Стаття надійшла до редакції 12.10.2011