

УДК 621.891

С.И. Криштопа, доц., канд. техн. наук  
Ивано-Франковский национальный технический  
университет нефти и газа, Украина, [rettes@mail.ru](mailto:rettes@mail.ru)

### ТРИБОХИМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ КОНТАКТНО-ИМПУЛЬСНОМ ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

*В материалах статьи рассматриваются трибохимические процессы в парах трения тормозных механизмов. Сделаны теоретические исследования контактно-импульсного фрикционного взаимодействия на пятнах контактов микровыступов металлополимерных пар трения. Детально анализируются процессы и явления, происходящие в тормозных механизмах с учетом химического состава газов в межконтактном пространстве пары трения. Проведены экспериментальные исследования износа фрикционных пар в зависимости от их материалов и состава газов межконтактного пространства.*

**Ключевые слова:** тормозные механизмы, материалы пар трения, контактно-импульсное взаимодействие, трибохимические процессы, пятно контакта, микровыступ, геометрические и эксплуатационные параметры.

**Состояние проблемы.** Вопросам исследования трибохимических процессов и тепловым напряжениям в энергонагруженных фрикционных узлах ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок и барабанно-колодочных тормозных механизмов автотранспортных средств уделяется все большее внимание. Износ и разрушение фрикционных материалов при трении обусловлен совместным действием механических, электрических, тепловых, химических и электромагнитных полей на поверхностные и приповерхностные слои материалов и их градиентов, которые вызывают различные изменения в материалах. Особенно себе проявляет температурный градиент во фрикционных материалах по их слоям, имеющим, в зависимости от материала накладок, различные коэффициенты линейного расширения, что ведет к возникновению в них существенных тепловых напряжений.

Таким образом, проблема сопротивления тепловому импульсу и тепловым напряжениям, обусловлена действием не только тепловых полей, но и совокупности других полей сопровождающих первые. Разработка обобщенной электротермомеханической теории трения и износа металлополимерных пар трения тормозных устройств с учетом трибохимических процессов позволит в дальнейшем осуществлять прогнозирование, регулирование и управление изменением их внутренних и внешних эксплуатационных параметров с целью повышения эффективности и ресурса фрикционных узлов.

**Анализ последних исследований.** На протяжении последних лет в отечественных и зарубежных изданиях [1-4 и др.] появились публикации о едином поле взаимодействия для различных объектов исследований, одним из которых являются сопряженные трибосистемы. На микровыступах пятен контактов металлополимерных пар при электротермомеханическом трении действуют динамические нагрузки, генерируются электрические и тепловые токи, происходят химические реакции и возникают электромагнитные волны в виде солитонов.

Основным параметрами, на которые необходимо обратить внимание для определения импульсных удельных нагрузок на пятнах контактов микровыступов и

износа пар трения являются импульсная нормальная сила, тормозной момент, а также материалы пар трения и составы газов в межконтактном пространстве. Перечисленные параметры существенно влияют на градиентную теорию единого поля взаимодействия.

На основании анализа многочисленных теоретических и экспериментальных исследований [5, 6 и др.] установлена взаимосвязь процессов, явлений и эффектов, происходящих на макро-, микро- и наноуровнях при контактно-импульсном фрикционном взаимодействии.

**Направления исследования полимерных материалов.** В настоящее время пользуются эмпирическими интуитивными подходами к физико-химическому состоянию рабочих слоев полимерных накладок. Направление в физике и химии полимеров, связанное с количественным анализом влияния химического строения на физические свойства полимеров и с прогнозированием этих свойств. Появившееся направление базируется на том, чтобы без привлечения какого-либо эксперимента, исходя из данных только по химическому строению повторяющегося звена и типу присоединения звеньев друг к другу, рассчитать основные физические параметры полимера. В результате полученной зависимости, описывающей состояние повторяющегося звена полимера, который предполагается синтезировать и можно заранее определить такие параметры: температуры стеклования, плавления, начала интенсивной термодекструкции; плотность полимера; оптические и оптико-механические показатели (преломления и коэффициенты оптической чувствительности), плотность энергии когезии; растворимость и диффузия, механических свойств, коэффициент объемного расширения и др. Перечисленные параметры должны вписываться в жесткие пределы для материалов полимерной накладки применительно к процессам, явлениям и эффектам электромеханического, электродинамического, термодинамического, теплового, химического, электрического и электромагнитного характера. При этом все процессы, явления и эффекты должны рассматриваться на электронно-ионном уровне, т.е. в области нанотрибологии.

Таким образом, единый подход к объяснению всей совокупности изучаемых процессов, явлений и эффектов в полимерах труден, часто приводит к неувязкам. Но, с точки зрения трибологии, это единственно правильный подход, так как он позволяет путем выявления противоречий при объяснении отдельных процессов, явлений и эффектов уточнить модель полимерного тела (на уровне гамильтонианов), и избавиться от некоторых заблуждений.

**Трибохимические явления при взаимодействии микровыступов металло-полимерных пар трения.** Теоретические исследования нестационарных физико-химических процессов в контактном зазоре между микровыступами металлополимерных пар трения тормозных устройств при условии, что  $K_{\text{вз}} \leq 1$  (коэффициент взаимного перекрытия пар трения) базируется на использовании основных положений теории: нестационарной диффузии; газовой динамики; химической кинетики и электротермомеханического трения. При этом немаловажная роль отводится процессам нестационарной доставки и потребления активного компонента среды в межконтактный зазор микровыступов металлополимерных пар трения. Особую роль занимают адсорбционные процессы, происходящие на металлическом фрикционном элементе.

Адсорбционные процессы сильно изменяют работу выхода электронов из металлического фрикционного элемента в процессе образования адсорбционной связи между свободным атомом или молекулой и поверхностным дипольным слоем. Изменение работы выхода электронов с 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. Более того, работа совершаемая электроном, находящимся в адсорбированном слое, зависит от того как диполь расположен относительно (воображаемой) электронейтральной плоскости.

При этом электрон совершает работу по преодолению только полного или половины потенциала адсорбированного слоя. При этом необходимо учитывать тот факт, что в поверхностном слое фрикционной накладки, при выгорании связующих компонентов ее материалов при достижении допустимой температуры и выше ее молекулы образовавшегося растворителя сильно ориентированы, в результате чего их эффективный дипольный момент увеличивается по отношению к дипольному моменту поверхности металлического фрикционного элемента. Это обстоятельство и является одним из основных условий инверсии множества микротоков от рабочей поверхности накладок в рабочую поверхность металлического фрикционного элемента.

Из вышеизложенного следует, что трибохимия занимает важное место в трибологии пар трения тормозных устройств. Остановимся на месте трибохимии в трибологии пар трения тормозных устройств.

К химическим процессам, явлениям и эффектам необходимо отнести: поверхностные и подповерхностные слои полимерной накладки, в которых происходят частичная и полная конденсация; диффузию; сублимацию; газопоглощение; сорбцию – адсорбцию; десорбцию – абсорбцию; сорбционное равновесие; электротермический взрыв; пиролиз и т.п. При этом процессы, явления и эффекты сопровождаются реакциями: окисления, восстановления, коррозии, катализа, гальванические и т. п. При этом процессы, явления и эффекты, свойственные поверхностным и подповерхностным слоям накладки, совершаемые над их частицами, т. е. электронами и ионами, носят импульсный и волновой характер. Коллективное взаимодействие в системе совокупности волн, характеризующие механические, электрические, тепловые и химические поля, которые имеют коллективные степени свободы (зависящие от координат всех частиц системы) и могут обмениваться энергией и импульсами, т.е. взаимодействовать между собой. Одиночный импульс можно представить как бесконечную сумму наложенных друг на друга гармонических волн. Кроме того, импульсы возникают при смещении пятен контактов микровыступов пар трения.

Необходимо отметить тот факт, что в интервале поверхностных температур выше допустимой для материалов полимерной накладки, на ее рабочей поверхности имеет место твердое состояние и фазовые переходы I-го и II-го рода. Необходимо заметить, что никогда поверхностный и подповерхностные слои накладок не могут возвратиться в свое первоначальное состояние.

Трибокинетическая модель предложена для различных процессов, которые происходят в слое микронеровностей металлического фрикционного элемента под действием упругих или пластических деформаций при торможении в присутствии газовой среды (рис. 1). На рис. 1 использованы следующие обозначения: I – химическая реакция  $CO_2 + M \leftrightarrow MO + CO$ ; II - химическая реакция  $CO + M \leftrightarrow C + MO$ ; III - каналы в микровыступах. Заштрихован поверхностный слой, нарушенный путем трения скольжения. Стрелкой вверх на границе раздела обозначена трибодесорбция, стрелкой вниз - трибоабсорбция, двойные стрелки – трибодиффузия [7].

Газовая фаза достигает рабочей поверхности металлического фрикционного элемента путем диффузии, а потом адсорбируется. Трибоабсорбция происходит по

точкам, которые попали под действие импульсных сил трения. В зависимости от условий контакта 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 пятнах контактов микровыступов металлического фрикционного элемента. Кроме того, трибоадсорбированный газ адсорбируется поверхностями микровыступов металла и только после этого происходят с ним химические превращения.

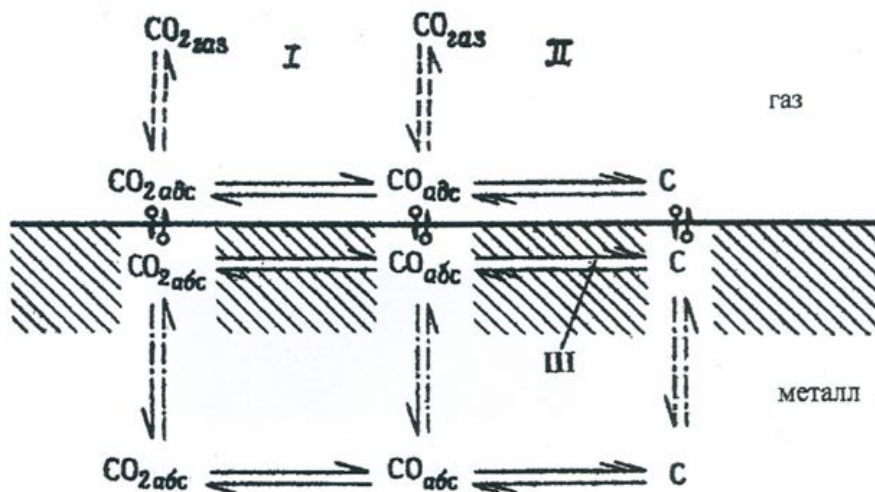


Рис. 1. Трибокинетическая модель трибосорбции и трибореакций в системе «CO<sub>2</sub> – металл»; CO<sub>2</sub> газ – CO<sub>2</sub> в газовой фазе; CO<sub>2</sub> адс – CO<sub>2</sub> в адсорбированном состоянии; CO<sub>2</sub> абс – CO<sub>2</sub> в абсорбированной форме, те же индексы для CO

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. В случае когда скорость трибосорбции и трибореакции одного порядка, то тогда реакция смещается в сторону рабочей поверхности металлического фрикционного элемента. При этом необходимо обратить внимание на то, что трибоиндукционные процессы 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 дифференциальные емкости дают ответы на многие эффекты, возникающие возле заряженной поверхности раздела. Особенности структуры двойного слоя представлены на рис. 2 [6].

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  $\approx 10 \text{ \AA}^2$ .

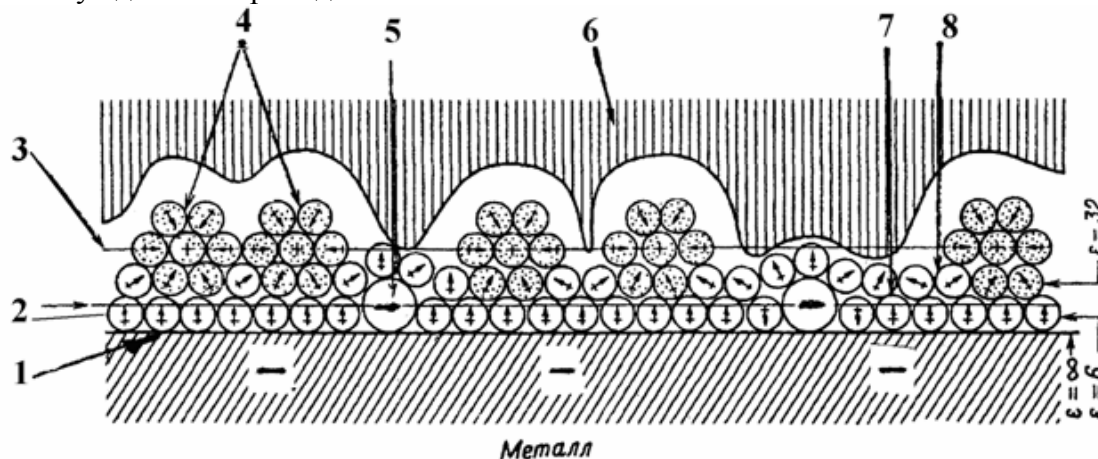


Рис. 2. Детальная модель двойного слоя в паре «рабочая поверхность металлического фрикционного элемента-вода»: 1 – поверхность металла с потенциалом  $\varphi_M$ ; 2, 3 – плоскости Гельмгольца и Гуи с потенциалами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ ; 4 – сольватированные катионы; 5 – специфические адсорбируемые анионы; 6 – нормальная структура воды ( $\epsilon=78,5$ ); 7, 8 – слои воды: первый ( $\epsilon=6$ ); второй ( $\epsilon=32$ );  $\epsilon$  – диэлектрическая постоянная воды

Представленная схема на рис. 2 наглядно все иллюстрирует для того случая, когда металлический фрикционный элемент находится в статике. Иначе все происходит в динамике. 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 за счет: переполяризации ионов и катионов; изменения положения плоскостей, когда внутренняя становится внешней и наоборот; существенного изменения усредненных электрических свойств; поверхности жидкости, которая становится неоднородной в том понимании, что ее структуру нарушают адсорбированные частицы материалов накладки и другие составляющие вносят изменения в процессы и явления. При этом необходимо учитывать, что с увеличением площадей пятен контактов микровыступов металлополимерных пар трения наблюдается рост зарядов поверхностей фрикционного взаимодействия за счет трибоэффекта.

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

Процессы и явления, происходящие в парах трения барабанно-колодочного тормоза транспортного средства, реализуются посредством теплопередачи. На рис. 3 а, б использованы следующие обозначения:  $t_P$ ,  $t_{ф.р.}$ ,  $t_{об}$ ,  $t_{о.с.}$  – температуры: рабочей поверхности обода тормозного барабана; рабочей поверхности фрикционной накладки; обода тормозного барабана; окружающей среды. При этом элементам фрикционного узла тормоза отвечают соответствующие координаты ( $x$ ).

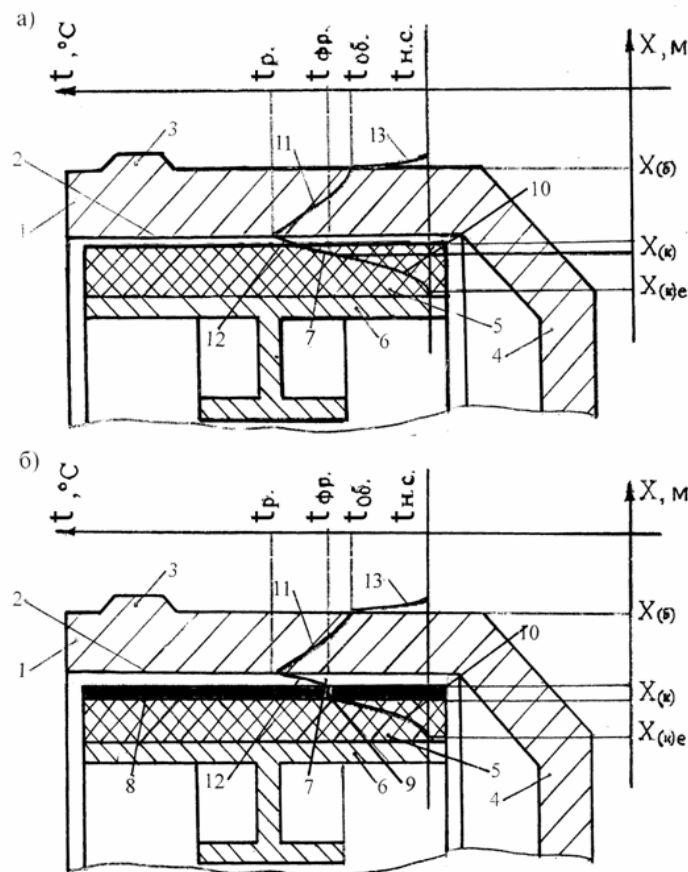


Рис. 3 а, б. Теплопередача через элементы пар трения (а – до, б – после допустимой температуры материалов фрикционной накладки) барабанно-колодочного тормоза автомобиля: 1 – тормозной барабан; 2, 3, 4 – обод, подкрепляющее кольцо, боковая стенка барабана; 5 – фрикционная накладка; 6 – тормозная колодка; 7 – зазор между элементами трения; 8 – приповерхностный слой накладки; 9, 10, 11, 12, 13 – закономерности изменения температур по толщине: приповерхностного слоя накладки, собственно накладки, обода тормозного барабана и слоя воздуха, омывающего его внутреннюю и наружную поверхности

Различают следующие температурные перепады между: наружной поверхностью обода тормозного барабана и омывающим воздухом; внутренней и наружной поверхностями обода тормозного барабана и омывающим воздухом; рабочими поверхностями фрикционных накладок и омывающим воздухом (в интервале температур, ниже допустимой температуры); рабочими поверхностями и уровнями приповерхностных слоев фрикционных накладок; рабочими поверхностями фрикционных накладок и омывающей газовой смесью; внутренней поверхностью обода тормозного барабана и газовой смесью, омывающей внутреннюю и наружную поверхности обода. Кроме того, различают еще и поверхностные градиенты, которые для полированной рабочей поверхности металлического фрикционного элемента в 1000 раз больше, нежели по его толщине. Что касается равновесного теплового состояния поверхностей фрикционного взаимодействия, то его необходимо непременно связывать с химическим потенциалом по отношению к скоростным токам омывающего воздуха и компонентов газовой среды межконтактного зазора пар трения.

В интервале допустимых температур для материалов фрикционной накладки имеет место фазовый переход I-го рода его компонентов. Рассмотрим процесс, который имеет место между парами трения барабанно-колодочного тормоза при условии, что поверхностный слой фрикционной накладки достиг температуры выше допустимой.

Вероятными источниками поступления окружающей среды в контактную зону пар трения тормоза является межконтактный зазор и открытые участки полированной поверхности трения. На них происходит адсорбирование молекул газа (адсорбционный эффект) при неполном взаимном перекрытии пар трения.

При этом основной средой является омывающий воздух между парами трения тормоза. В то же время приповерхностный слой накладок тормозных колодок является либо источником компонентов газовой среды вследствие протекания процессов испарения, сублимации, десорбции, и т.п., либо поверхностью их стоков при конденсации, адсорбции, абсорбции и т.п. По отношению к газовым смесям в целом поверхности раздела играют роль полупроницаемых перегородок. Компоненты непрерывно диффундируют в направлении, нормальном к рабочей полированной поверхности обода тормозного барабана.

Этот диффузионный поток компонентов сопровождается встречной диффузией основной среды, т.е. омывающим воздухом. Но с другой стороны, совершенно очевидно, что основная среда, для которой поверхности пар трения непроницаемы, не должна перемещаться в направлении, нормальном к рабочей полированной поверхности обода тормозного барабана. Эти два взаимно противоположных требования удовлетворяются тем, что возникает течение смеси, направленное навстречу диффузионному потоку основной среды и компенсирующее его (эффект Стефана).

Таким образом, на явления диффузионной природы накладывается процесс, имеющий характер конвективного переноса вещества. Нейтрализуя диффузионный перенос основной среды, конвективный поток смеси, очевидно, усиливает перенос составляющих компонентов. Общая картина перераспределения газовой смеси в объеме зазора между парами трения тормоза изменяется, о чем свидетельствуют данные, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Процентное соотношение компонентов газовой смеси, образованной в межконтактном пространстве пары трения

Номер пробы	Марка компонента	Температура, °C	Содержание газа, мас. доля, %						
			H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	ΣC <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	другие газы***
1	ФК-24А	150	*	19,8	78,8	0,28	*	*	Остальное
2	-	215	*	19,8	78,8	0,23	*	*	
3**	-	420	0,123	19,1	79,5	0,13	*	*	
4**	-	500	0,171	16,3	81,6	0,24	0,43	0,24	
5	-	730	0,308	9,8	81,2	0,08	6,51	1,06	

#### Примечание

\*Наличие следов указанных газов.

\*\*Отбор проб осуществлялся из четырех зон (точек) одновременно.

\*\*\*Под другими газами подразумевается: Ar, Ne, He, Kr, N<sub>2</sub>O, Xe, O<sub>2</sub>, Rn [8].

Фрикционные материалы для тормозных устройств должны исследоваться с позиций физико-химической механики трения в режиме торможения с применением

термогравиметрического и дифференциально-термического методов анализа. Результаты указанных исследований для образца из материала ФК-24А представлены на рис. 4 (согласно данным А.Х. Джанахмедова). Установлено, что деструкция образца ФК-24А начинается при температуре 300 °С. Рассчитанная энергия активации разложения образца ФК-24А составила  $85,5 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ . Доказано, что образец распадается в течение 15 минут при поддержании его температуры 400 °С. Скорость уменьшения его массы при дальнейшем увеличении температуры возрастает. Необходимо отметить, что режимы исследования материала ФК-24А на термостойкость в виде образца не всегда отвечают реальным условиям работы приповерхностных слоев фрикционных накладок из-за их метастабильного состояния при фрикционном взаимодействии в тормозном устройстве.

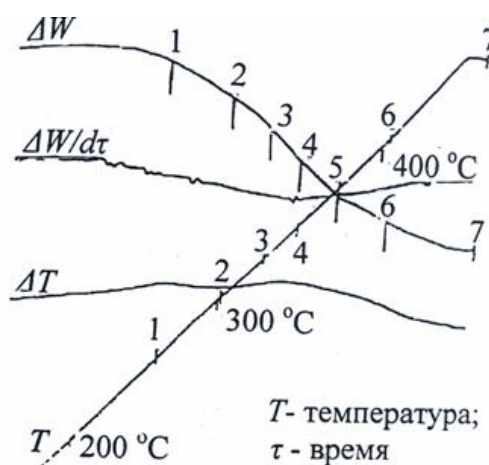


Рис. 4. Дериватограмма образца ФК-24А:  $\Delta W$  – потери массы, определяемые по термогравиметрической кривой;  $dW/d\tau$  – скорость изменения (дифференциально-термогравиметрическая кривая);  $\Delta T$  – дифференциально-термическая кривая

Деструкция фрикционных материалов сопровождается интенсивным дымлением, а затем образованием жидких фракций в порах их поверхностного слоя. При этом молекулы адсорбента наиболее прочно удерживаются в микропорах поверхностного слоя материала вследствие того, что они окружены большим количеством атомов углерода. Адсорбция газовой фазы – это процесс конденсации, который происходит в условиях, когда энергия адсорбции оказывается достаточной для конденсации пара. Сконденсировавшийся пар остается в пористой структуре углерода в виде жидкости. Кроме того, экспериментальными исследованиями установлено, что состав газовой среды оказывает значительное влияние на процессы электротермомеханического трения и изнашивания. При работе в газовых средах, содержащих в своем составе  $O_2$ , на пятнах контактов микровыступов происходит интенсивное образование окисных пленок, обеспечивающих работу фрикционного сопряжения в режиме окислительного износа, что исключает схватывание.

**Выводы.** Таким образом, теоретически та экспериментально исследованы трибохимические процессы в пятнах контактов микровыступов для металлополимерных материалов тормозных механизмов.



**Список литературы:**

1. Лурье С. Прогноз механических и динамических свойств материалов с микро- и наноструктурой на основе градиентной теории сред / С. Лурье // Электронный журнал: Труды ИПРИМ РАН. – М., 2009. – 46 с.
2. Журавлев Д.Ю. Единое поле взаимодействия металлополимерных пар трения / Д.Ю. Журавлев // Проблемы трения и изнашивания: научн.-техн. сб. – К.: НАУ, 2013. Вып. 60. – С. 35-41.
3. Материалы в триботехнике нестационарных процессов / А.В. Чичинадзе, Р.М. Матвеевский, Э.Д. Браун и др. – М.: Наука, 1986. – 245 с.
4. Фрикционные узлы / [А.А. Петрик, Н.А. Вольченко, П.Ю. Пургал, Д.А. Вольченко] Монография (научное издание). В 2-х томах. Том 1. Кубанск. государств. технологич. ун-т (Россия). – Краснодар, 2003. – 220 с.
5. Пашаев А. М. Закономерность изменения износотрибционных характеристик поверхностных слоев металлополимерных пар трения при их контактно-импульсном взаимодействии (диплом открытия № 462 от 28 декабря 2013 г.) / А.М. Пашаев, А.Х. Джанахмедов, А.И. Вольченко, Д.А. Вольченко, Н.А. Вольченко, С.И. Криштопа – Заявитель: Азербайджанская Инженерная Академия (Азербайджан). Приоритет открытия: 1998 г.
6. Ленточно-колодочные тормозные устройства: монография / Н.А. Вольченко, Д.А. Вольченко, С.И. Криштопа, [и др.]. – Кубанск. государств. технолог. ун-т. – Краснодар, Ивано-Франковск, 2013. – 441 с.
7. Вольченко Д.А. Научные основы управления износотрибционными свойствами металлополимерных пар трения тормозов для предотвращения термостабилизационного явления: дисс... докт. техн. наук: 05.02.04 / Вольченко Дмитрий Александрович. – Киев, 2012. – 424 с. – На укр. яз.
8. Чичинадзе А.В. Износостойкость фрикционных полимерных материалов / А.В. Чичинадзе, В.Я. Белоусов, И.М. Богатчук. – Львов: Вища школа, 1989. – 144 с.

Надійшла до редакції 30.01.2014

**С.І. Криштопа**

# **ТРИБОХІМІЧНІ ЯВИЩА ПРИ КОНТАКТНО-ІМПУЛЬСНІЙ ФРИКЦІЙНІЙ ВЗАЄМОДІЇ**

*У матеріалах статті розглядаються трибохімічні процеси в парах тертя гальмівних механізмів. Зроблені теоретичні дослідження контактно-імпульсної фрикційної взаємодії на плямах контактів мікроставів металополімерних пар тертя. Детально аналізуються процеси і явища, що відбуваються в гальмівних механізмах з урахуванням хімічного складу газів в міжконтактному просторі пари тертя. Проведені експериментальні дослідження зносу фрикційних пар залежно від їх матеріалів і складу газів міжконтактного простору.*

**Ключові слова:** гальмівні механізми, матеріали пар тертя, контактно-імпульсна взаємодія, трибохімічні процеси, пляма контакту, мікростав, геометричні і експлуатаційні параметри.

**S.I. Kryshchopa**

# **TRIBOCHEMICAL PHENOMENA DURING CONTACT-IMPULSIVE FRICTION CO-OPERATION**

*Trybochemical processes in friction pairs of brake mechanisms are examined in the article. Theoretical researches of contact-impulsive friction co-operation on the spots of contacts of microbulge of metal-polymer friction pairs are made. Processes and phenomena taking place in brake mechanisms are analysed in detail taking into account chemical composition of gases in the intercontact space of a friction pair. Experimental researches of wear of friction pairs depending on their materials and gas composition of intercontact space are conducted.*

**Keywords:** brake mechanisms, materials of friction pairs, contact-impulsive co-operation, trybochemical processes, contact spot, microbulge, geometrical and operating parameters.