

УДК 621.891 (043.3)

DOI: 10.18372/0370-2197.1(90).15246

Д. А. ВОЛЬЧЕНКО<sup>1</sup> М. В. КИНДРАЧУК<sup>2</sup>, В. С. СКРЫПНИК<sup>1</sup>,  
Д. Ю. ЖУРАВЛЕВ<sup>1</sup>, В. Я. МАЛЫК<sup>1</sup>, Е. Ю. АНДРЕЙЧИКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа,  
Украина

<sup>2</sup>Национальный авиационный университет, Украина

## ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ФРИКЦИОННЫХ УЗЛОВ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

*В материалах статьи рассмотрены: трибологические подсистемы различных типов фрикционных узлов тормозов; эксплуатационные параметры, принципы структурной приспособляемости и собственно структурная приспособляемость материалов пар трения тормозных устройств, а также их энергетические уровни. Оценена работа выхода частиц из микровыступов поверхностей трения металлополимерных сопряжений с учетом удельной нагрузки, скорости скольжения, поверхностной температуры и энергетических уровней приповерхностных слоев пары трения с соблюдением принципов структурной приспособляемости их материалов. Показано, что избыточная энтропия, генерируемая трущимися поверхностями тормозных устройств, при  $K_f \gg K_T$  (где  $K_f$  и  $K_T$  – кинематические константы химических реакций) отрицательно влияет на эксплуатационные параметры пар трения, повышая их энергонагруженность. По результатам выполненных исследований установлены закономерности формирования характеристик процессов, явлений, и эффектов на иерархических уровнях текстур трущихся материалов трибосопряжения при их электротермомеханическом фрикционном нагружении.*

**Ключевые слова:** фрикционный узел, внешнее трение, трущиеся материалы, структурная приспособляемость, неравновесная термодинамика.

**Введение.** Качество и надежность создаваемых конструкций фрикционных узлов тормозных устройств зависят от интенсивности процессов, явлений и эффектов, происходящих при фрикционном взаимодействии микровыступов поверхностей трения. Контакт микровыступов носит дискретный характер, его интенсивность оценивается динамическим коэффициентом взаимного перекрытия пар трения, а величина колеблется в пределах 0,15-0,75 в зависимости от типа фрикционного узла.

Процесс динамического взаимодействия микровыступов поверхностей трения тормозов наиболее полно объясняет молекулярно-механическая теория [1]. Согласно этой теории происходит внедрение жестких микронеровностей металлического элемента трения в поверхность менее жесткой полимерной накладке в зонах их фактического контакта вследствие различий физико-механических свойств и микропрофилей контактирующих участков поверхностей, а также структурной неоднородности. Это сопровождается деформированием поверхностных слоев пар трения тормозов, вследствие чего они находятся в напряженном состоянии.

**Состояние проблемы.** Общей целью управления поверхностной прочностью во всех случаях является обеспечение диапазона нормального трения без повреждаемости, оптимизация интенсивности трения и минимизация износа в этом диапазоне.

От степени поверхностного упрочнения в процессе структурной приспособляемости во многом зависит объемная прочность деталей фрикционных узлов тормозных устройств, что существенно влияет на общее распределение напряжений. С точки зрения неравновесной термодинамики структурная приспособляемость способствует возникновению устойчивой диссипативной структуры потока энергии и вещества внешней среды, направленного в систему трения и поддерживаемого механическими воздействиями. Это способствует изменению удельных нагрузок, скорости скольжения и динамического коэффициента трения.

Схемы напряженно-деформированного состояния при объемном и поверхностном разрушениях абсолютно различны. Анизотропия кристаллической решетки, имеющей «букет» дефектов (точечных, линейных, поверхностных и объемных), способствует возникновению негомогенной пластической деформации. Указанные дефекты вызывают энергетические дефекты. При этом возникает поле напряжений на микроскопическом уровне, распределяемое в зависимости от характера расположения несовершенств структуры, являющихся концентраторами напряжений. При этом в материале металлического элемента трения работает лишь незначительная его часть, а остальная практически бездействует [2].

В [3] оценена работа выхода частиц из микровыступов поверхностей трения металлополимерных сопряжений в зависимости от поверхностной температуры и удельных нагрузок с учетом энергетических уровней приповерхностных слоев пары трения. Однако здесь не учтена структурная приспособляемость материалов пар трения.

**Постановка задачи.** В данной публикации рассмотрены следующие вопросы применительно к решаемой проблеме:

- трибологические подсистемы различных типов фрикционных узлов тормозных устройств;
- эксплуатационные параметры и структурная приспособляемость материалов пар трения тормозных устройств;
- энергетические уровни и принципы структурной приспособляемости материалов пар трения.

**Цель работы** – установить взаимосвязь между эксплуатационными параметрами пар трения тормозных устройств и условиями структурной приспособляемости их материалов.

**Трибологические подсистемы различных типов фрикционных узлов тормозных устройств.** Рассмотрим конструктивные особенности различных типов фрикционных узлов тормозных устройств.

На рис. 1, *а, б* показаны пары трения дисково-колодочного тормоза. Пары трения состоят из фрикционных накладок 2, которые находятся в неподвижных тормозных колодках. При фрикционном взаимодействии рабочих поверхностей накладок 2 с вращающимся тормозным диском 1 под действием нормального прижимного усилия  $N$  образуется беговая дорожка трения диска 3.

На рис. 1, *в* проиллюстрирован фрикционный узел ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки. При затягивании тормозной ленты 4 под действием нормального прижимного усилия  $N$  рабочая поверхность фрикционной накладки 2 взаимодействуют с беговой дорожкой трения обода шкива 5. Он при помощи крепежного выступа 8 соединен с фланцем барабана. [4]. Фрикционный узел барабанно-колодочного тормоза автомобиля представлен на рис. 1, *г*. Узел содер-

жит обод тормозного барабана б с фланцем 7 и фрикционные накладки 2, находящиеся на тормозных колодках. При их разжатии рабочие поверхности накладок 2 взаимодействуют с внутренней (рабочей) поверхностью обода тормозного барабана б.

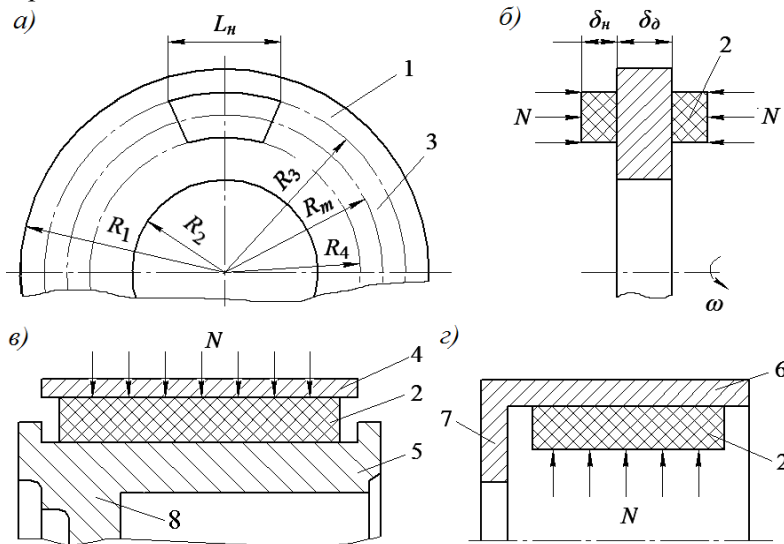


Рис. 1. Схемы различных типов фрикционных узлов тормозных устройств: а, б – дисково-колодочного (продольный и поперечный разрезы); в – ленточно-колодочного (поперечный разрез); з – барабанный-колодочного (поперечный разрез)

Установим взаимосвязь между трибосистемой, которой являются фрикционные узлы тормоза, и ее термодинамическим состоянием. Данная трибосистема является открытой, в ее материалах число электронов и ионов переменное. В термодинамике условием равновесия между открытыми системами является равенство температур и химических потенциалов  $\mu$ . Химический потенциал – это интенсивная величина, которая определяется из выражения:

$$\mu = \left( \frac{\partial A}{\partial(N)} \right)_{TV}, \quad (1)$$

где  $\partial A$  – полный дифференциал свободной энергии  $\partial A = -SdT - PdV + \mu d(N)$ ;  $N$  – количество электронов и ионов;  $T$ ,  $P$ ,  $V$  – температура, давление, объем;  $S$  – энтропия.

Четыре наиболее употребляемых термодинамических потенциала  $E$ ,  $H$ ,  $A$ ,  $G$  ( $E$  – энергия подсистемы;  $H$  – гамильтониан (полная энергия системы),  $H(q_1, p_1)$ , где  $q_1$  – обобщенная координата;  $p_1$  – обобщенные импульсы;  $G$  – свободная энтальпия) соответствуют описанию подсистемы в переменных  $(S, V, \langle N \rangle)$ ,  $(S, P, \langle N \rangle)$ ,  $(T, V, \langle N \rangle)$ ,  $(T, P, \langle N \rangle)$ . Воспользуемся описанием, в котором экстенсивная переменная  $\langle N \rangle$  заменяется сопряженной с ней интенсивной переменной  $\mu$ . Для построения термодинамического потенциала в переменных  $(T, V, \mu)$  можно поступать так же, как при выводе свободной энтальпии (энергии Гиббса)  $G(T, P, \langle N \rangle)$  из свободной энергии  $A(T, V, \langle N \rangle)$ , т.е. воспользоваться «преобразованием Лежандра» [5].

Рассмотрим фрикционные пары различных видов тормозных устройств как

трибосистемы с ее составляющими – подсистемами. Остановимся на наиболее характерных подсистемах согласно таблицы.

Таблица

## Подсистемы различных видов тормозных устройств

Виды тормозных устройств		Первая	Вторая	Третья	Четвертая	
		<i>I</i> *	Поверхности поясов трения диска, взаимодействующие с фрикционными накладками	Торцевые и боковая поверхности диска, взаимодействующие со скоростными потоками омывающей среды	Тело сплошного диска или развитые поверхности самовентилируемого диска	Поверхностные и приповерхностные слои трибосопряжения «диск – накладки колодок»
		<i>II</i> *	Рабочая поверхность тормозного барабана, взаимодействующая с накладками	Наружная поверхность обода барабана, взаимодействующая со скоростными потоками омывающей среды.	Поверхностные и приповерхностные слои трибосопряжения «барабан - накладки»	Взаимодействие обода барабана с его боковой стенкой.
<i>III</i> *	Рабочая поверхность тормозного шкива, взаимодействующая с накладками	Внутренняя поверхность обода шкива, взаимодействующая со скоростными потоками омывающей среды.	Поверхностные и приповерхностные слои трибосопряжения «шкив – накладки»	Взаимодействие обода шкива с его крепежным выступом.		

\*Примечание: *I*, *II*, *III* – дисково-, барабанно- и ленточно-колодочные тормозные устройства.

В правильно спроектированном металлическом элементе трения любого вида тормозного устройства должны строго выдерживаться величины отношения площадей матовых и полированной (рабочей) поверхностей. При этом увеличение площади матовой поверхности достигается введением наружных конструктивных элементов. В барабанно- и ленточно-колодочных тормозах это выполнение оребрения, дефлекторов, канавок, выступов и т. д.), в дисково-колодочных тормозах используют внутренние развитые поверхности в самовентилируемых дисках (выступы, полурёбра, ребра, каналы и т. д.). Такой подход связан с необходимостью интенсификации вынужденного охлаждения металлических элементов трения, которые являются аккумуляторами тепловой энергии в любом виде тормозного устройства. Поэтому вторая и третья подсистемы различных видов тормозных устройств рассматриваются с точки зрения взаимодействия металлических элементов трения со скоростными потоками омывающей среды, снижающих их энергонагруженность (см. таблицу) [4].

При оценке интенсивности охлаждения одновременно с вынужденным охлаждением в ленточно- и барабанно-колодочном тормозе необходимо учитывать кондуктивный вид теплообмена в сопряжениях «обод шкива - крепежный выступ» и «обод барабана – боковая стенка». Наличие крепежного выступа существенно влияет на интенсивность циркуляции основных и дополнительных потоков в ободу шкива. Боковая стенка барабана играет существенную роль в

формировании термостабилизационного состояния его обода (см. в таблице, четвертая подсистема).

**Эксплуатационные параметры и структурная приспособляемость материалов пар трения тормозных устройств.** Избыточное производство энтропии в парах трения тормозных устройств выполняет отрицательную роль, в частности, когда  $K_f \gg K_T$ . Это ведет к тому, что устойчивость системы больше не поддерживается, ее стационарное состояние нарушается и может стать неустойчивым. Сказанное может быть представлено диаграммой устойчивости (рис. 2). Пусть параметр  $\Delta$  характеризует степень отклонения от равновесия. Для каждого значения  $\Delta$  система будет релаксировать к стационарному состоянию, обозначенному через  $X_s$ . Условие равновесного состояния соответствует  $\Delta = 0$  (2);  $X_s$  является непрерывным расширением равновесного состояния, оно называется термодинамической ветвью. Пока условие (2) выполняется, термодинамическая ветвь устойчива; если это условие нарушается, термодинамическая ветвь может стать неустойчивой. Если она становится неустойчивой, система может перейти на новую ветвь, которая в общем случае представляет собой организованные структуры.

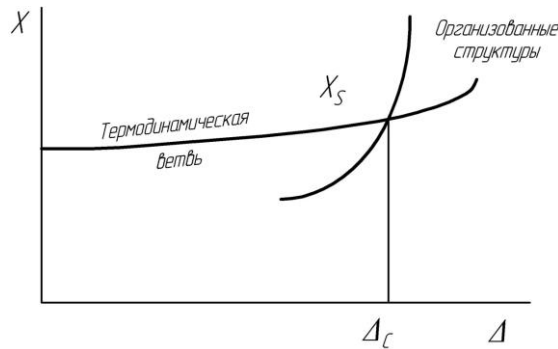


Рис. 2. Зависимость некоторого состояния  $X$  термодинамической системы от степени ее отклонения от равновесия  $\Delta$

На рис. 3 приведена диаграмма энергетического соотношения для различных зон трения на единицу контурной площади  $S$  при изменении динамического коэффициента трения  $f$  от удельной нагрузки  $p$  и скорости скольжения  $V$  (по данным Б. И. Костецкого). Процесс фрикционного взаимодействия пар трения разделен на четыре зоны. В первой и второй зонах происходит накопление тепловой энергии.

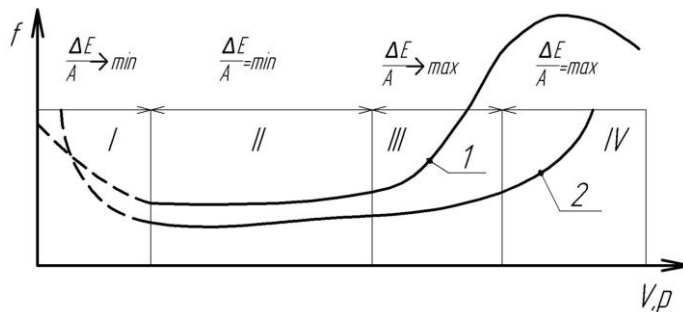


Рис. 3. Энергетические соотношения для различных зон трения при изменении динамического коэффициента трения от: 1 – удельной нагрузки  $p$ ; 2 – скорости скольжения  $V$

При явлении структурной приспособляемости в паре трения «металл – полимер» (1), «металл – металл» (2) и «рабочая поверхность металла с износостойким слоем - кермет» (3) необходимо для первой пары трения различать два уровня энергонагруженности: ниже и выше допустимой температуры поверхностного слоя полимерной накладки. При этом происходит масштабный и энергетический скачок с «букетом» градиентов (рис. 4).

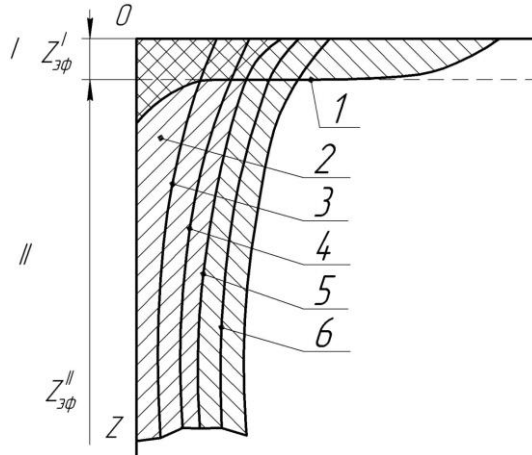


Рис. 4 Схема распределения энергии при структурной приспособляемости (1) и воздействии энергии полей: остаточного (2), механического (3), теплового (4), электрического (5), химического (6)

В дисково-колодочном тормозе эффективный объем взаимодействий  $V_{эф}$  необходимо рассматривать в продольном сечении, а в ленточно- и барабанно-колодочном тормозе – в поперечном. Сечения проходят через приповерхностные слои полимерной накладки и металлического элемента трения как можно ближе к поверхностям их раздела.

Принцип явления структурной приспособляемости может быть представлен в виде:

$$\int_V \frac{\Delta E(V)}{A} dV = \min$$

Он иллюстрируется рис. 4, где направление  $z$  является нормалью к поверхности трения. Линией 1 показано приращение внутренней энергии при структурной приспособляемости, локализованной в зоне I вторичных структур. Линией 2 ограничена область приращения внутренней энергии при других процессах трения (повреждаемости).

Следствиями принципа являются условия:

$$V_{эф} \rightarrow \min; \frac{A}{V_p} \rightarrow \max; \frac{V\bar{E}}{V_{эф}} \rightarrow \max,$$

где  $A$  – выполняемая работа;  $V_p$  – объем разрушенного материала;  $V\bar{E}$  – объем разрушенного материала, поглотившего энергию  $\bar{E}$ , близкую к предельной.

На пару трения накладываются соответствующие классические однозначности и граничные условия, а также граничные условия существования структурной приспособляемости. Последняя представляет принцип экранирования, состоящий в том, что скорости деструктивных и восстановительных процессов в зоне трения должны быть согласованы таким образом, чтобы обеспечивалась

достаточная экстенсивность пассивирования поверхностей трения (площадь  $S_{кр}$ ), и вероятность встречи активных (ювенильных) участков была пренебрежимо мала. На самом деле обеспечить максимальный коэффициент взаимного перекрытия  $K_{эз}$  пар трения в условиях эксплуатации не представляется возможным. Исходя из вышеизложенного, можно записать следующие граничные условия:

$$(K_{эз}; V_{ск}; p; f; M_T) \leq \max; \quad (3) \quad T \left( \frac{dQ}{d\tau}, \bar{\Theta} \right) < T_{\delta}; \quad (4)$$

$$\int_0 (W_{об} - W_p) d\tau > S_{кр}; \quad (5) \quad \frac{d\Delta H}{d\tau} < \max\{W_a, W_d, W_x\}. \quad (6)$$

Анализ граничных условий показал следующее:

– условие (3) связано с основными эксплуатационными параметрами ( $K_{эз}$ ,  $V_{ск}$ ,  $p$ ,  $f$ ,  $M_T$ ) пар трения (после подбора для них материалов) различных видов тормозных устройств.

– условие (4) накладывает ограничение на температуру  $T$  поверхностей трения, зависящую от темпа теплообразования  $\frac{dQ}{d\tau}$  и теплофизических констант  $\bar{\Theta}$  системы; эта температура не должна быть выше допустимой  $T_{\delta}$  для материала полимерной накладки (десорбции, химического разложения и т.п.).

– условие (5) накладывает ограничения на скорости образования  $W_{об}$  и разрушения  $W_p$  вторичных структур;

- условие (6) заключается в том, чтобы одна из скоростей возможных пассивирующих процессов (адсорбции  $W_a$ , диффузии  $W_d$ , химических реакций  $W_x$  и т.п.) была выше скорости активации – приращение энтальпии  $\frac{d\Delta H}{d\tau}$  трансформируемого объема  $V_{эф}$ .

**Энергетические уровни и принципы структурной приспособляемости материалов пар трения.** Валентные электроны при  $T \approx 0$  К, лежащие у верхнего края заполненной энергетической полосы (т. е. в тонком слое, примыкающем к поверхности Ферми) помимо обмена виртуальными фотонами (обычный кулоновский механизм взаимодействия заряженных частиц), ослабленного за счет экранирования, обмениваются фотонами. Обмен фотонами приводит к слабому притяжению электронов. Если сила этого притяжения больше силы отталкивания, образуются связанные электронные пары с пониженной энергией. Образование электронных пар обуславливает понижение основного энергетического уровня на величину энергии связи  $\Delta$ . Между уровнем Ферми и примыкающими к нему свободными уровнями возникает щель, ширина которой равна  $\Delta$  (рис. 5, б).

Если выразить энергию  $E$  через волновое число  $K = \frac{2\pi}{h} A$  (где  $h$  – постоянная Планка;  $A$  – работа за с) с учетом волновых свойств электронов в  $k$ -пространстве, то наряду с понятием поверхности Ферми возникает еще одно понятие – зоны Бриллюэна. Первая зона Бриллюэна для простой кубической решетки, как известно, представляет куб, длина ребра которого равна  $\frac{\pi}{a}$ ; для графенцентрированной кубической решетки – усеченный октаэдр, для объемноцентрированной – правильный декаэдр.

Поверхность Ферми можно тоже представить в  $k$ -пространстве. Для простой кубической решетки это будет сфера, вписанная в куб. Когда поверхность Ферми приближается к минимальному значению  $k$ , равному  $\frac{\pi}{a}$ , появляются отклонения от энергетического уровня.

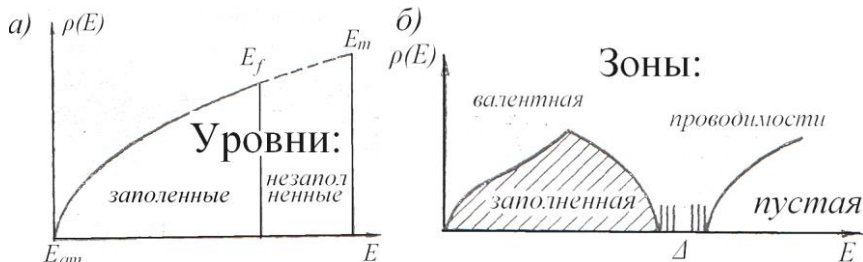


Рис. 5. Схематические зависимости плотности энергетических уровней от их состояния: а – для металла с простой кубической решеткой; б – для полимеров и полупроводниковых элементов

Кривая  $\rho(E)$  начинает идти выше нормальной, так как плотность энергетических состояний возрастает. После того как поверхность Ферми коснется граней зоны Бриллюэна, плотность состояний уменьшается по мере заполнения углов зоны, спадая к нулю, когда заполняется последнее состояние.

В общем случае кривая зависимости  $\rho$  от  $E$  имеет вид, изображенный на рис. 5 а. Между энергетическими зонами может быть щель  $\Delta$ . Ширина щели может изменяться в широких пределах, например при 0 К для ковалентных кристаллов она изменяется от 0,08 эВ для серого олова до 7 эВ для алмаза.

Для металлов второй группы (Be, Mg, ...) и для переходных металлов (Fe, Co, Ni) наблюдается перекрытие зон. Истинные металлы (Li, Na, K, Ag, Cu) имеют незаполненную валентную зону.

Точнее выражаясь, валентная зона в металлах содержит незанятые уровни, расположенные несколько выше уровня Ферми, но непосредственно к нему примыкающие. При возбуждении электроны заполненных уровней, близких к уровню Ферми, могут переходить на эти незанятые уровни, причем требуется для этого энергия ничтожно малого порядка  $10^{-9} - 10^8$  эВ. Большинство известных свойств металлов обусловлено именно низкой энергией возбуждения.

Максимальные принципы внешнего трения при явлении структурной приспособляемости в диапазоне температур до допустимой для материала полимерной накладке проявляются и в соответствующем изменении геометрии поверхности раздела контактирующих тел. При переходе от состояния поверхностей после технологической обработки к состоянию структурной приспособляемости происходит масштабный скачок геометрического спектра элементарных контактирований микровыступов. Если в первом случае дискретность фактического контакта главным образом проявляется на уровне пятен микронеровностей, то при структурной приспособляемости дискретность контактирования определяется размерами субмикронеровностей порядка сотен и тысяч нанометров (того же порядка, что и толщина пленок вторичных структур и протяженность области когерентного рассеивания) [6].

Энергетический скачок состоит в выделении локализованного места эффективного объема  $V_{эф}$  взаимодействий и достижения в этом объеме предельной энергона-



сущности разрушаемой фазы, что реализуется путем перехода материала к метастабильному состоянию, соответствующему максимальной прочности.

Это соответствует смещению частот энергетического спектра в сторону высоких частот, т. е. нижняя частота спектра  $\omega_0 \rightarrow \max$ . При этом уменьшаются и амплитудные значения спектра или его энергия  $\Delta G(\omega)$ , соответствующая частоте  $\omega$ , т. е.  $\frac{\Delta G(\omega)}{\omega} \rightarrow \min$ . Минимизация трения и износа при структурной приспособляемости реализуется также посредством резкого уменьшения факторов ориентации. В данном случае в качестве фактора ориентации выбрана дисперсия области когерентного рассеивания  $D_{\text{окр}}$ , которая при структурной приспособляемости стремится к минимуму. При этом продукты износа, попадающие в зазоры между микровыступами пар трения, заряжены отрицательно. Поэтому направление ориентации частиц совпадает с направлением относительного перемещения (вращения) металлического элемента трения.

Анализ экспериментальных данных по исследованиям энергонагруженности пар трения различных видов тормозных устройств и явления структурной приспособляемости [6] позволяет сделать следующие количественные оценки параметров:

$$\frac{K_{\text{вз}_2} \max}{K_{\text{вз}_1} \min} < 0,1 - 1,0; \quad \frac{V_{\text{СК}_1} \max}{V_{\text{СК}_2} \min} < 10 - 20; \quad \frac{P_1}{P_2} < 2,0 - 25,0; \quad \frac{f_1}{f_2} < 2,0 - 5,0;$$

$$\frac{M_{T_1}}{M_{T_2}} < 10 - 50; \quad z_{\text{эф}} < 100 \text{ нм}; \quad \int_0^{z_{\text{эф}}} \frac{\Delta E(z)}{A} dz < 0,01; \quad \frac{A}{V_p} > 10^6 \text{ Дж/мм}^3; \quad \frac{V_{\bar{E}}}{V_{\text{эф}}} > 0,9$$

Например, для металлических материалов интенсивность поверхностного разрушения при структурной приспособляемости имеет порядок  $10^{-2} \text{ мм}^3/(\text{см}^3 \cdot \text{км})$ , для полимерной накладке транспортного средства –  $2,3 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^3/(\text{см}^3 \cdot \text{км})$ . Эти оценки могут быть приняты для расчета интенсивности нормального (допустимого) износа пар трения различных видов тормозных устройств и использованы для улучшения процессов электротермомеханического трения.

**Вывод.** На основании выполненных исследований предложены закономерности формирования характеристик процессов, явлений и эффектов на иерархических уровнях текстур материалов контактов трибосопряжения при их электротермомеханическом фрикционном нагружении. Установлены неизвестные ранее закономерности формирования характеристик процессов, явлений и эффектов на нестабильных иерархических уровнях электротермомеханического нагружения в трибосопряжении при соблюдении принципов структурной приспособляемости при увеличении общей энтропии поверхностных слоев его материалов с одновременным уменьшением их свободной энергии и находящихся в упруго-пластическом состоянии. Это заключается в том, что под воздействием механических, электрических и тепловых полей импульсного характера, а также химических полей площадки контактов микровыступов имеют различные свойства. Поверхностные слои структур материалов имеют кристаллические решетки с поперечно и продольно колеблющимися электронами и ионами. Это происходит при нелокальных откликах ее структуры на изменение удельных нагрузок. За счет моделирования повторяющихся композиционных матриц в приповерхност-

ных и нижележащих слоях материалов размещены шаровидные и короткие цилиндрические вкрапления, ориентированные параллельно и перпендикулярно поверхностям трения. Они уменьшают деформационные составляющие и являются  $T$ -образными энергетическими мостиками. Это позволяет достичь квазиодинаковой энергонагруженности поверхностных слоев путем отвода избытка генерируемой энергии в выше- и нижележащие слои с различной толщиной. При этом обеспечивается их одинаковый износ, а протекающие преобразования на площадках пятен контактов микровыступов реализуются квазиадекватно с прогнозируемой аperiodичностью повторяющихся процессов, явлений и эффектов на нано-, микро и миллиуровнях. Отмечено соблюдение количественных принципов суперпозиции «уменьшение-увеличение» и «увеличение-уменьшение» при изменении их характеристик, а также принципов суперпозиции, касающихся процессов, явлений и эффектов, которым сопутствуют «расширение (нагревание) - сжатие (охлаждение)». При одинаковых темпах протекания процессов «восстановления-разрушения» и «разупрочнения-упрочнения» воспроизводится первичная и вторичная текстуры с пленками различных типов на пятнах контактов за одинаковый промежуток времени. Это происходит в результате реализации различных технологических способов упрочнения рабочей поверхности металлического элемента трения, работающего в аperiodических режимах электротермомеханического нагружения.

### Список литературы

1. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский // М.: Машиностроение, 1984. – 480 с.
2. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Констецкий // К.: Техника, 1976. – 296 с.
3. Взаимосвязь внешнего и внутреннего трения электротермомеханического трения во фрикционных узлах / А. И. Вольченко, М. Я. Джавадов, Н. А. Вольченко [и др.] // Вестник Азербайджанской инженерной академии. – Баку. – 2020. – Том 12. - №4. – С. 27 – 39.
4. Проектный и проверочный расчет фрикционных узлов ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок / А. Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко, В. С. Скрыпник, И. Я. Ширали, Э. А. Джанахмедов, Н. А. Вольченко, Д. Ю. Журавлев / Под общ. ред. акад. А. Х. Джанахмедова. – Баку: Апострофф, 2016. – 312 с.
5. Трибология. Электротермомеханические основы, анализ и синтез на нано-, микро- и миллиуровнях и технические приложения: учебник для вузов / А. И. Вольченко, М. В. Киндрачук, Д. Ю. Журавлев [и др.]. – Киев – Краснодар: Изд-во «Плай», 2015. – 371 с.
6. Диплом №482 на открытие «Явление массопереноса продуктов трения в металлополимерных парах» авторов: А. Х. Джанахмедова, А. И. Вольченко, Э. А. Джанахмедова, Н. А. Вольченко, Д. Ю. Журавлева. – Москва. Регистрационный №618 от 27.02.2015 г.

Стаття надійшла до редакції 10.02.2021.

*D. A. VOLCHENKO, M. V. KINDRACHUK, V. S. SKRYPNYK, D. YU. ZHURAVLOV, V. YA. MALYK, YE. YU. ANDREYCHIKOV*

### EXTERNAL FRICTION OF MATERIALS OF FRICTION ASSEMBLIES OF BRAKING DEVICES

In the materials of the article, the tribological subsystems of various types of frictional units of brakes are considered; performance parameters and structural adaptability of materials of friction pairs of braking devices; energy levels and principles of structural adaptability of friction pair materials. The work function of particles from the microprotrusions of the friction surfaces of metal-polymer interfaces is estimated depending on the specific load, sliding speed and surface temperature, taking into account the energy levels of the surface layers of the friction pair, observing the principles of structural adaptability of their materials. It is shown that the excess entropy generated on the rubbing surfaces of the brake devices plays a negative role if  $K_f \gg K_T$  (where  $K_f$  and  $K_T$  are the kinematic constants of chemical reactions). On the basis of the studies performed, regularities of the formation of the characteristics of processes, phenomena, and effects at the hierarchical levels of textures of the materials of the tribo-conjugate contacts under their electrothermomechanical frictional loading are proposed. On the basis of the performed studies, the regularities of the formation of the characteristics of processes, phenomena and effects at the hierarchical levels of textures of the materials of the tribo-conjugate contacts under their electrothermomechanical frictional loading are proposed, expressed in the following: the regularities of the formation of characteristics of processes, phenomena and effects at the hierarchical levels of textures of materials of contacts of tribo-conjugation during their electrothermomechanical frictional loading is expressed in the following: Previously unknown regularities of the formation of characteristics of processes, phenomena and effects at unstable hierarchical levels of electrothermomechanical loading in triboconjugation were established, observing the principles of structural adaptability with an increase in the total entropy of the surface layers of its materials with a simultaneous decrease in their free energy and being in an elastic-plastic state, consisting in the fact that under the influence of mechanical, electrical and thermal fields of a pulsed nature, as well as chemical fields, areas of spots of microprotrusions, which are contacts with different properties, surface layers of structures of materials that have crystal lattices in transversely and longitudinally oscillating electrons and ions with nonlocal the responses of its structure to changes in specific loads, due to the simulation of repeating composite matrices in the near-surface and underlying layers of material materials, spherical and short cylindrical inclusions oriented parallel and perpendicular to the friction surfaces, reducing the deformation components and being T-shaped energy bridges, allowing to achieve a quasi-identical energy loading of the surface layers by removing excess generated energy into the higher and lower layers with different thicknesses, which ensures their identical wear, and the ongoing transformations on the areas of contact spots of microprotrusions, implemented quasi-adequately with the predicted aperiodicity of repetitive processes, phenomena and effects at nano, micro and milli-level in compliance with the quantitative principles of superposition "decrease - increase" and "increase - decrease" of their characteristics, as well as the principles of superposition concerning the processes, phenomena and effects that are accompanied by "expansion (heating) - compression (cooling)", as well as at the same rate of their flow, "recovery - destruction" and "softening - strengthening", reproducing the primary and in toric texture with films of various types on the contact spots for the same period of time as a result of the implementation of various technological methods of strengthening the surface areas of a friction metal element under aperiodic modes of electrothermomechanical loading of triboconjugation. "

**Key words:** friction assembly, external friction, rubbing materials, structural adaptability, nonequilibrium thermodynamics.

#### References

1. Kragel'skiy I. V. Treniye i iznos / I. V. Kragel'skiy // M.: Mashino-stroyeniye, 1984. – 480 s.
2. Kostetskiy B. I. Poverkhnostnaya prochnost' materialov pri trenii / B. I. Konstetskiy // K.: Tekhnika, 1976. – 296 s.
3. Vzaimosvyaz' vneshnego i vnutrennego treniya elektrotermomekhanicheskogo treniya vo friktsionnykh uzlakh / A. I. Vol'chenko, M. YA. Dzhavadov, N. A. Vol'chenko [i dr.] // Vestnik Azerbaydzhanskoy inzhenernoy akademi. – Baku. – 2020. – Tom 12. - №4. – S. 27 – 39.

4. Proyeektnyy i proverochnyy raschet friktsionnykh uzlov lentochno-kolodochnykh tormozov burovykh lebedok / A. KH. Dzhanakhmedov, D. A. Vol'chenko, V. S. Skrypnyk, I. YA. Shirali, E. A. Dzhanakhmedov, N. A. Vol'chenko, D. YU. Zhuravl'ov / Pod obshch. red. akad. A. Kh. Dzhanakhmedova. – Baku: Apostroff, 2016. – 312 s.

5. Tribologiya. Elektrotermomekhanicheskiye osnovy, aanliz i sintez na nano-, mikro- i milliurovnyakh i tekhnicheskkiye prilozheniya: uchenik dlya vuzov / A. I. Vol'chenko, M. V. Kindrachuk, D. YU. Zhuravlev [i dr.]. – Kiyev – Krasnodar: Izd-vo «Play», 2015. – 371 s. 6. Diplom №482 na otkrytiye «Yavleniye massoperenosa produktov treniya v metallopolimernykh parakh» avtorov: A. KH. Dzhanakhmedova, A. I. Vol'chenko, E. A. Dzhanakhmedova, N. A. Vol'chenko, D. Yu. Zhuravleva. – Moskva. Registratsionnyy №618 ot 27.02.2015 g.

*Д. О. ВОЛЬЧЕНКО, М. В. КИНДРАЧУК, В. С. СКРИПНИК, Д. Ю. ЖУРАВЛЬОВ,  
В. Я. МАЛИК, С. Ю. АНДРЕЙЧИКОВ*

### **ЗОВНІШНЄ ТЕРТЯ МАТЕРІАЛІВ ФРИКЦІЙНИХ ВУЗЛІВ ГАЛЬМІВНИХ ПРИБОРІВ**

У матеріалах статті розглянуто трибологічні підсистеми різних типів фрикційних вузлів гальм; експлуатаційні параметри і структурна пристосовуваність матеріалів пар тертя гальмівних пристроїв; енергетичні рівні та принципи структурної пристосовуваності матеріалів пар тертя. Оцінено роботу виходу частинок з мікроступів поверхонь тертя металополімерних спряжень в залежності від питомого навантаження, швидкості ковзання і поверхневої температури з урахуванням енергетичних рівнів приповерхневих шарів пари тертя з дотриманням принципів структурної пристосовуваності їх матеріалів. Показано, що надлишкова ентропія, яка генерується на тертьових поверхнях гальмівних пристроїв, виконує негативну роль, коли  $K_f \gg K_T$ . (де  $K_f$  і  $K_T$  – кінематичні константи хімічних реакцій). На підставі виконаних досліджень запропоновано закономірності формування характеристик процесів, явищ та ефектів на ієрархічних рівнях текстур контактуючих матеріалів трибоспрязень при їх електротермомеханічному фрикційному навантаженні.

**Ключові слова:** фрикційний вузол, зовнішнє тертя, матеріали, що труться, структурна пристосовуваність, нерівноважна термодинаміка.

**Вольченко Дмитрій Александрович** – докт. техн. наук, професор кафедри добычи нефти и газа, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019, тел.: +38 0342 72 71 41, моб. 050-373-82-42, E-mail: [divo99@ukr.net](mailto:divo99@ukr.net).

**Киндрачук Мирослав Васильевич** – докт. техн. наук, професор, заведующий кафедрой машиноведения, Киевский национальный авиационный университет, пр. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, Украина, 03058, E-mail: [nau12@ukr.net](mailto:nau12@ukr.net)

**Скряпник Василий Степанович** – докт. техн. наук, доцент, кафедры автомобильного транспорта, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019

**Журавлев Дмитрий Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры технической механики, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019, тел.: +38 0342 72 71 47, E-mail: [dmytro.2103@ukr.net](mailto:dmytro.2103@ukr.net)

**Малык Владимир Ярквич** – канд. техн. наук, доцент кафедры нефтегазовых машин и оборудования, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019.

**Андрейчиков Евгений Юрьевич** – подполковник, преподаватель военной кафедры, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019.