

УДК 621.891

М. В. КИНДРАЧУК¹, Д. А. ВОЛЬЧЕНКО², Д. Ю. ЖУРАВЛЕВ², И. О. БЕКИШ²,
Н. В. КАШУБА³

¹Национальный авиационный университет, Украина

²Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина

³Надворнянский колледж Национального транспортного университета, Украина

ЭРГОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ЭНЕРГОНАГРУЖЕННОСТИ И ИЗНОСА ПАР ТРЕНИЯ ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНОГО ТОРМОЗА БУРОВОЙ ЛЕБЕДКИ

В материалах статьи рассмотрены: эргодический подход при эволюции трибосопряжений, деформационный возбуждающий фактор, кинетика состояния рабочей поверхности; природа нормального износа вторичных структур I и II типа при электротермическом трении трибосистемы ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки.

Ключевые слова: ленточно-колодочный тормоз, пара трения; микровыступы пятен контакта, термическая неустойчивость, аналитические модели, эргодический подход, температурные напряжения, вторичные структуры I и II типов.

Введение. Известно, что повышение температуры на пятнах контактов микровыступов пар трения оказывает влияние на параметры электротермомеханического трения и износа, а также вызывает дополнительные температурные напряжения и деформации в зоне контакта. Трибосистема стремится приспособиться в новых условиях на макроуровне на данном переходном процессе, являющимся термической неустойчивостью, характеризующего квазипериодическими изменениями параметров трения. Термическая неустойчивость состоит из следующих составляющих: термоупругой неустойчивости; неустойчивостью обусловленной температурной зависимостью динамического коэффициента трения; неустойчивостью, связанной со сменой режимов электротермомеханического трения; неустойчивостью, вызванной крекинг процессом в приповерхностных слоях полимерной накладки. Все перечисленные типы неустойчивости ведут к самоорганизации фрикционно взаимодействующих микровыступов пар трения. При этом появляется явление структурной приспособляемости поверхностных и приповерхностных слоев пар трения из-за их переменной энергонагруженности.

Состояние проблемы. В энергонагруженности пар трения ленточно-колодочного тормоза существенная роль отводится тормозному шкиву, поскольку он является аккумулятором тепловой энергии, как в процессах электротермомеханического трения, так и пауз между аperiodическими циклическими торможениями, т.е. при вынужденном охлаждении [1].

Эргодический анализ электротермомеханического трения во фрикционных узлах ленточно-колодочного тормоза показал, что поверхностная температура и ее градиент приводят к значительным температурным напряжениям на поверхности обода шкива в зависимости от стохастической природы электротермического контакта микровыступов пар трения и условий теплоотдачи от матовых и полированной поверхностей тормозного шкива, которая напрямую зависит от его конструктивных особенностей.

Интенсивное развитие нанотехнологий заставило обратиться к необходимости построения адекватных аналитических моделей, позволяющих описать физико-механические свойства объектов наноразмерного масштабного уровня. Во многих существующих моделях подобного рода принимается, что основные механические характеристики нанообъектов совпадают со своими значениями, полученными из макроскопических экспериментов. Однако, когда речь идет о структурах, содержащих всего несколько слоев атомов, не может не сказываться противоречие между очевидной дискретностью рассматриваемого объекта и непрерывностью его описания. Несоответствие между значениями модулей упругости, полученных из микро- и макроэкспериментов отмечалось многими исследователями [2]. Дискретность наноструктур приводит к отклонению в значениях модулей упругости от их макроскопических значений. К тому же, в определении размера нанообъекта существует принципиальный произвол, приводящий к неоднозначности макроскопических характеристик, таких как напряжение, модуль Юнга. Однако указанную проблему можно решить за счет генетических свойств поверхностных и приповерхностных слоев металлополимерных пар трения.

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

- теоретический эргодический подход при исследовании эволюций трибосопряжений;
- деформационный возбуждающий фактор во фрикционном узле тормоза;
- кинетика состояния рабочей поверхности металлополимерного элемента при фрикционном взаимодействии с позиций фракталов;
- природа нормального износа вторичных структур I и II типов при электротермомеханическом трении.

Цель работы – реализовать эргодический подход к энергонагруженности и электротермомеханическому износу пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки.

Теоретический эргодический подход при исследовании эволюции трибосопряжений. Эргодическая теория представляет собой математический результат рассмотрения задач физики, в первую очередь, статистической механики [3]. Одним из основных результатов последней является теорема Ж. Лиувилля, которая утверждает, что если координаты в фазовом пространстве выбраны надлежащим образом, то омывающий поток в фазовом пространстве не меняет фазового объема. Иными словами преобразования, образующие поток (подразумевается однопараметрическая группа преобразований) сохраняют меру.

Эргодический процесс – это стационарный случайный процесс в котором для любой функции $f[x(t_1), \dots, x(t_n)]$ с вероятностью 1,0 средняя величина во времени совпадает со средним по множеству наблюдений $p\{<f>=M(f)\}=1,0$.

Физический смысл эргодической теории заложен в теореме Биркгофа-Хинчина, которая устанавливает равенство с вероятностью 1,0 средней величины по пространству реализаций и временной средней величины от одной реализации.

Пусть для некоторой развивающейся системы векторные функции времени \hat{X}_t и \hat{Y}_t выражают определенный закон развития для состояния входов и выходов (направляющие функции развития), а векторные функции времени \bar{X}_t

и \bar{Y}_t выражают действительное развитие системы во времени. Согласно О. Ланге [4] развитие системы является эргодическим, если

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{X}_t = \lim_{t \rightarrow \infty} \hat{X}_t ; \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \bar{Y}_t = \lim_{t \rightarrow \infty} \hat{Y}_t . \quad (1)$$

Если через $\Delta \bar{X}_t = \bar{X}_t - \hat{X}_t$ и $\Delta \bar{Y}_t = \bar{Y}_t - \hat{Y}_t$ обозначить возмущения (отклонения функций развития) системы, то определение эргодического процесса записываем в виде

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta \bar{X}_t = 0 ; \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta \bar{Y}_t = 0 . \quad (2)$$

Что же такое эргодические процессы? Это такие процессы развития, которые с течением времени становятся независимыми от начального состояния системы (или от состояния системы в момент возмущения ($\Delta \bar{X}_t$, $\Delta \bar{Y}_t$)). В эргодическом процессе развития системы (\bar{X}_t , \bar{Y}_t) осуществляется направленное перемещение в соответствии с данным законом развития (\hat{X}_t и \hat{Y}_t), не зависящем от начального состояния системы (или от ее состояния в момент возмущения). Это означает, что в эргодическом процессе всякое возмущение в развитии системы с течением времени исчезает. Стремление развития системы к норме, т.е. к своим направляющим функциям развития (к ликвидации возмущений в ходе развития) называют самоуправлением в развитии системы. Такое утверждение является справедливым применительно и к трибосистеме.

Развивается система эргодически при условии наличия хотя бы одной обратной связи. Обратные связи эргодической системы называют компенсаторами или связями управления и контроля. Системы без обратных связей являются нейтральными; такая система, выведенная однажды из нормы, может принимать произвольные состояния или продолжать оставаться в любом произвольном состоянии, в котором она случайно оказалась.

Если функция развития системы не зависит от времени, т.е. $\hat{X}_t = \hat{X} = const$ и $\hat{Y}_t = \hat{Y} = const$, то система находится в состоянии равновесия. Равновесная система называется стабильной, если она устойчива в состоянии равновесия, т.е. условием стабильности системы является

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{X}_t = \hat{X} ; \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \bar{Y}_t = \hat{Y} . \quad (3)$$

Стремление развития стабильной системы к норме, т.е. к своим направляющим функциям развития называют саморегуляцией стабильной системы. Выходит, что стабильная система является частным случаем эргодической развивающейся системы, а саморегуляция стабильной системы – частный случай самоуправления развитием. Кроме эргодических систем известны неэргодические системы [5], для которых обратные связи являются кумулятивными. Система с неэргодическим процессом развития характеризуется тем, что каждое возмущение вызывает кумулятивное удаление состояния системы от направляющих функций ее развития.

Условие неэргодичности развития системы записываются так:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta \bar{X}_t = \infty \text{ (или } -\infty \text{)} , \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta \bar{Y}_t = \infty \text{ (или } -\infty \text{)} . \quad (4)$$

Частным случаем неэргодической системы является неустойчивая системы. Будучи выведенной из условия стабильности, такая система все более (кумулятивно) удаляется от него.

На рис. 1. показана классификация пар трения, являющихся развивающимися системами в зависимости от фрикционной взаимосвязи их эксплуатационных параметров. На рис. 1. во второй вертикальной колонке с названием «Вид функций применены следующие обозначения: t – температура поверхности трения; dt/dz – температурный градиент; $K_{\text{вз}}$ – коэффициент взаимного перекрытия пар трения; f_m – динамический коэффициент трения; F_m – сила трения.

Остановимся на функциональной взаимосвязи эксплуатационных параметров пар трения ленточно-колодочного тормоза. Взаимосвязь коэффициента перекрытия $K_{\text{вз}}$ с параметрами процесса трения показывает, что снижение $K_{\text{вз}}$ приводит к снижению средней температуры t и возрастанию градиента температуры dt/dz . Этот эффект достигается при нормальных удельных нагрузках (0,4–0,8 МПа) $p_t = \text{const}$ и скорости скольжения (3,5–4,0 м/с) $V_{\text{ск}} = \text{const}$. Следствием этих изменений является возрастание динамического коэффициента трения f_m (до 0,4) при снижении интенсивности изнашивания I в среднем на 12,5%.

Так, для фрикционных пар ленточно-колодочного тормоза уменьшение $K_{\text{вз}}$ при работе трения $W_{\text{тр}} = \text{const}$ и начальной скорости скольжения $V_{\text{ск}} = \text{const}$ приводит к высокому и стабильному динамическому коэффициенту трения f_m , а также к минимальному износу только при условии, когда функции $f_m = f(K_{\text{вз}}, p_a)$ и $I = I(K_{\text{вз}}, p_a)$ изменяются больше от $K_{\text{вз}}$, чем от p_t :

$$\frac{df_m(K_{\text{вз}}, p_t)}{dK_{\text{вз}}} > \frac{df_m(K_{\text{вз}}, p_t)}{dp_t}; \quad (5) \quad \frac{dI(K_{\text{вз}}, p_t)}{dK_{\text{вз}}} > \frac{dI(K_{\text{вз}}, p_t)}{dp_t}; \quad (6)$$

Указанные неравенства справедливы до того времени пока не будет достигнута допустимая поверхностная температура элемента (E_2), т.е. рабочей поверхностью фрикционной накладки.

Теоретически возможно существование пяти классов пар трения ленточно-колодочного тормоз, как развивающихся систем (рис. 1). Системы первого класса имеют убывающие функции развития элементов (возрастающую износостойкость, ускоренное изнашивание $a_i < 0$) и убывающую обратную связь. Системы второго класса имеют возрастающие функции развития (убывающую износостойкость, замедленное изнашивание $a_i > 0$) и возрастающую обратную связь. К третьему классу относятся пары трения, имеющие убывающие функции развития элементов (возрастающую износостойкость при $a_i < 0$) при возрастающей обратной связи. Четвертый класс пар трения имеет возрастающие функции развития элементов (убывающей износостойкостью $a_i > 0$) и с убывающей обратной связью. Наконец, к пятому классу принадлежат системы, функции развития которых зависят от термостабилизационного состояния обода тормозного шкива и явления крекинга поверхностного слоя фрикционной накладки ($a_i = 0$), а обратная связь отсутствует.

Деформационный возбуждающий фактор во фрикционном узле тормоза.

Одним из возбуждающих факторов в ленточно-колодочном тормозе буровой лебедки является натяжение набегающей и сбегающей ветви тормозной ленты. Данный фактор существенным образом влияет на: силу трения, динамический коэффициент трения, контактные нормальные усилия, тормозной момент, и как следствие, на износ пар трения.

Характеристика ка функции		Классы пар трения:				
		I-ый		II-ой		III-ий
		I-ый	II-ой	III-ий	IV-ый	V-ый
Вид функции		эргодическая	эргодическая	неэргодическая	неэргодическая	неэргодическая
		системы функции:				
Функция развития элементов системы	Зависимости: $t = f(K_{63});$ $dt/dz = f(K_{63});$ $dt/dz = f(K_{63});$ $f_m = f(t);$ $f_m = f(dt/dz);$ $f_m = f(K_{63}).$					
						Термостаби- лизационное состояние обода тормозного шкива
Трансформация элемента	Зависимости: $F_m = f(t);$ $F_m = f(K_{63});$ $I = f(dt/dz);$ $I = f(K_{63});$ $F_m = f(I).$					
		$I = \text{ср.}$				
Обратная связь (элементы E2)	$P_t = f(I_t)$					

Дестабилизирующим фактором является то обстоятельство, что на участках ветвей ленты вместе с фрикционными накладками размещено n -ое количество тормозных устройств (рис. 2). Особенностью расчета таких устройств является то, что для усилий натяжений одного из участков соблюдается условия $S_{Hi} = S_{(i+1)c}$ через каждые $45,0^\circ$ на дуге обхвата в $270,0^\circ$ лентой тормозного шкива.

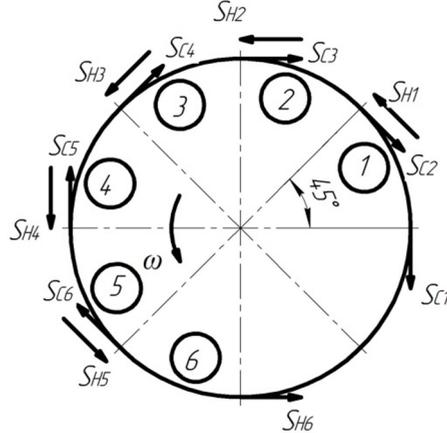


Рис. 2. Схема натяжения набегающих (S_{Hi}) и сбегающих (S_{Ci}) участков с шагом 45° по углу обхвата в 270° лентой тормозного шкива (не показан), вращающегося с угловой скоростью ω

Результаты расчетов натяжений участков тормозной ленты в зависимости от их углов обхвата и динамических коэффициентов трения во фрикционных узлах тормоза приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов натяжений участков тормозной ленты в зависимости от их углов обхвата и динамических коэффициентов трения во фрикционных узлах тормоза

f	Значение сбегающих и набегающих усилий (в кН) со стороны сбегающего конца ленты на ее различных участках											
	S_{c1}	1		2		3		4		5		S_{n6}
		S_{n1}	S_{c1}	S_{n2}	S_{c3}	S_{n3}	S_{c4}	S_{n4}	S_{c5}	S_{n5}	S_{c6}	
0,25	50,0	60,8	60,8	74,0	74,0	90,1	90,1	109,6	109,6	133,4	133,4	162,3
0,3		63,3	63,3	80,1	80,1	101,3	101,3	128,3	128,3	162,3	162,3	205,4
0,35		65,8	65,8	86,6	86,6	114,0	114,0	140,0	140,0	197,5	197,5	260,0
0,4		68,4	68,4	93,7	93,7	128,3	128,3	175,6	175,6	240,3	240,3	329,0
0,45		71,2	71,2	101,3	101,3	144,3	144,3	205,4	205,4	292,4	292,4	416,3
0,5		74,0	74,0	109,6	109,6	162,3	162,3	240,3	240,3	355,9	355,9	526,9
0,25	100,0	121,7	121,7	148,1	148,1	180,2	180,2	219,2	219,2	266,8	266,8	324,6
0,3		126,6	126,6	160,2	160,2	207,7	207,7	256,5	256,5	324,6	324,6	410,5
0,35		131,6	131,6	173,2	173,2	228,0	228,0	300,1	300,1	395,0	395,0	519,9
0,4		136,9	136,9	187,4	187,4	256,5	256,5	351,1	351,1	480,7	480,7	658,0
0,45		142,4	142,4	202,7	202,7	288,6	288,6	410,8	410,8	584,9	584,9	832,7
0,5		148,1	148,1	219,2	219,2	324,6	324,6	480,7	480,7	711,7	711,7	1053,8
0,25	150,0	182,5	182,5	222,1	222,1	270,3	270,3	328,9	328,9	400,2	400,2	486,9
0,3		189,8	189,8	240,2	240,2	304,0	304,0	384,8	384,8	486,9	486,9	616,2
0,35		197,4	197,4	259,9	259,9	342,0	342,0	450,2	450,2	592,5	592,5	779,9
0,4		205,3	205,3	281,1	281,1	384,8	384,8	526,7	526,7	721,0	721,0	987,0
0,45		213,6	213,6	304,0	304,0	432,8	432,8	616,2	616,2	877,3	877,3	1249,0
0,5		222,1	222,1	328,9	328,9	486,9	486,9	721,0	721,0	1067,6	1067,6	1580,7

Анализ полученных данных (табл. 1) позволяет констатировать следующее:

– изменение динамического коэффициента трения в два раза (от 0,25 до 0,5) на пяти участках тормозной ленты при постоянном натяжении ее сбегающего конца в 50,0; 100,0 и 150,0 кН способен вызвать натяжение набегающего конца ленты, соответственно, в 526,9; 1053,8 и 1580,7 кН, т.е. больше чем в десять раз;

– постоянное изменение натяжений участков тормозной ленты, которые можно рассматривать как отдельные тормозные устройства, присоединив к ней фрикционные накладки и беговую дорожку трения обода шкива приведет к большим колебаниям величин импульсных нормальных усилий, удельных нагрузок и тормозных моментов.

Особое внимание при этом необходимо обратить на зависимость температурных напряжений на рабочей поверхности обода шкива от условий теплоотдачи. Наиболее важным для практики при этом являются следующие расчетные случаи, которые рекомендуется учитывать при проектировании фрикционного узла. При аperiодическом циклическом режиме торможения температурные напряжения при нагревании поверхности обода шкива почти в десять раз превышают значения напряжений, возникающих по его толщине. Напряжения достигают максимума, когда процесс теплоизолирован и согласно утверждению

академика А.Х. Джанахмедова относительно критерия Био ($Bi = \frac{ab}{\lambda}$, где a – ко-

эффициент теплоотдачи; b – глубина проникновения теплового потока в обод шкива; λ – коэффициент теплопроводности материала обода), то $Bi = 0$, когда теплообмен бесконечен ($Bi \rightarrow \infty$). Величина напряжений при остывании так же существенно зависит от критерия Био. Причем, с увеличением продолжительности процесса торможения влияния его на величину напряжения так же возрастает. Так, величины температурных напряжений на поверхности тепловыделения почти в пять раз больше, чем по толщине обода шкива. При этом характер влияния интенсивности теплообмена на величину напряжения такой же, что и при нагревании. Такой подход к расчету температурных напряжений в ободах тормозных шкивов являются некорректным по следующим причинам:

– темп нагревания и охлаждения отличаются между собой по интенсивности процессов в сотни раз;

– импульсный и длительный подвод теплоты, которые необходимо учитывать по времени отличаются между собой в десятки тысяч раз;

– понятия бесконечного теплообмена не существует, поскольку при теплоизоляции матовых поверхностей обода шкива функционирует кондуктивный теплообменом между его элементами;

– выходит, что при ограничении наружного теплообмена путем применения теплоизоляции при оценке теплового баланса шкива при максимальных напряжениях его обод может треснуть как скорлупа ореха.

Кинетика состояния рабочей поверхности металлополимерного элемента при фрикционном взаимодействии с позиций фракталов. Оценка кинетики рабочей поверхности металлического элемента при фрикционном взаимодействии пятен контактов микровыступов пар трения с позиций фрактального подхода завоевывает все большее место в трибологии. Особое место уделено фрактальному подходу в работе [3] академика А. Х. Джанахмедова.

Особый интерес представляет изучение и применение теории сильно возбужденных состояний в кристаллах металлического фрикционного элемента пластичности и прочности его поверхностных и приповерхностных слоев. При этом пластическая деформация (напряжения) должны рассматриваться с соблюдением законов поведения неоднородных, сильно неравновесных систем, претерпевающих локально-структурные превращения и следующих к равновесию путем движения составляющих новых структур по кристаллу под действием градиентных напряжений. При этом деформируемый кристалл способен осуществлять в локальных объемах пластическое течение, протекающее как диссипативный процесс, за счет эстафетной перестройки между двумя смежными структурами.

Генерирование энтропии в рассматриваемой зоне кристалла является локальным кинетическим структурным переходом, способствующему зарождению пластического сдвига.

Отмеченное структурное превращение отличается от термодинамического структурного перехода и должно отвечать неравновесной термодинамике, являющейся составляющей неравновесной трибологии при фрикционном взаимодействии пар трения тормозных устройств. При этом в каждой точке деформируемых пятен контактов микровыступов в заданный момент времени осуществляется только по одной системе плоскостей скольжения, в которой происходит потеря сдвиговой устойчивости. Сдвиговая информация, носящая характер анизотропной, всегда сопровождается материальным поворотом внутри структурного элемента деформации (зерна блока, ячейки дислокационной структуры и т.д.). При этом материальный поворот в отличие от кристаллографического не влияет на пространственную ориентацию кристаллической решетки [6]. Это, в свою очередь, со стороны окружающего материала на границе структурного элемента деформации вызывает поворотный момент. Поворотные моды (одна из численных характеристик распределения вероятности случайной величины, оцениваемая их плотностью) деформации приводит в движение всю иерархическую структуру уровней деформируемых пятен контактов микровыступов. Структурные элементы начинают двигаться как целое, испытывая трансляцию (передачу) и кристаллографический поворот. Поворотные моды деформации формируют поле поворотных моментов и обеспечивают внутри структурного элемента деформации выхода дислокаций из своих плоскостей скольжения, что вызывает розориентирование ячеистой дислокационной субструктуры с последовательным вовлечением множественного скольжения пятен контактов микровыступов как вихря материальных поворотов кристаллографических сдвигов на цилиндрической поверхности. Взаимосвязь сдвигов и поворотов показывает, что элементарным актом пластической деформации является не сдвиг, а трансляционно-ротационный вихрь. Последний по своему масштабу может быть на нано, микро и макроуровнях. Иерархия вихрей возникает за счет формируемой иерархии различных структурных уровней деформаций. Движение всей иерархии структурных уровней деформации и вызывает ее вихревой характер, способствуя при этом возникновению новых каналов диссипации энергии, более эффективных, чем от движения отдельных дислокаций.

Поворотные моды деформации на различных масштабных уровнях отличаются друг от друга. Их эволюция при увеличении степени деформации закономерно отражается в изменении фрактальной размерности в местах присутствия

концентраторов механических напряжений на поверхности металлического фрикционного элемента. Гипотеза трансляционно-ротационного вихря применительно к структурным уровням деформируемых материалов пятен контактов микровыступов связана с энергетическими уровнями самого его ядра в котором градиенты температуры увеличиваются по сечению ядра к периферийным слоям, и, следовательно, температурные напряжения. Что касается механических деформаций то они уменьшаются в сторону центра ядра, и следовательно, и возникающих поворотных моментов. Изменение перечисленных выше градиентов и является движущим фактором трансляционно-ротационных вихрей, возникающих на структурных уровнях деформируемых материалов пятен контактов микровыступов металлического фрикционного элемента.

Природа нормального износа вторичных структур I и II типов при электротермомеханическом трении. При нормальном износе объектом разрушения являются вторичные структуры толщиной порядка десятков нанометров. Такая локальная по глубине трансформация микровыступов металлического фрикционного элемента обусловлена фрикционным воздействием на их пятнах контактов механического, электрического, теплового, электромагнитного и химического полей, омываемых скоростными токами компонентов среды. В механическом поле, в первую очередь, необходимо выделить напряженно-деформированное состояние микровыступов и их термическое искажение при наличии больших градиентов диффузии активных компонентов омывающей среды. При этом существенную роль играет дискретность контактов. Кроме того, необходимо учитывать тот факт, что рост трещины проходит двухстадийный характер развития при:

– электротермическом сопротивлении дискретных контактов с различной энергетической активностью микроконденсаторов и термобатарей с мгновенным их переключением при изменении площадей пятен контакта микровыступов при соблюдении условия на первом этапе фрикционного взаимодействия ($A_{\phi} < A_n$), исходя из того, что фактическая площадь контактирования (A_{ϕ}) мала по сравнению с номинальной (A_n) и при этом производится суммирование составляющих генерируемых импульсных токов имеющих плотность ($\sim 1,5 \cdot 10^4$ А/мм), которая способствует росту микротрещин в поперечном направлении относительно приложенного поля;

– условия $A_n = A_{\phi}$ сопровождается увеличивающейся трибоЭДС с переменным градиентом механических свойств материалов при резком росте плотности тепловых токов до $0,75 \cdot 10$ Вт/мм² наблюдается страгивание поперечной микротрещины и ее расширение с последующим появлением слабых продольных микротрещин.

Упруго-пластическая деформация поверхностей пятен контактов микровыступов способствует гомогенизации пластической деформации, и как следствие, пластифицированию их площадок. Данный процесс заметно интенсифицирует диффузию активных компонентов среды и сопутствующие ему химические реакции, что вызывает изменение структурно-химического состава пленок пятен контактов микровыступов, подверженных разрушению. Известно, что при нормальном механохимическом износе разрушаются не основные материалы микровыступов, а трансформированные их поверхностные слои пятен контактов. Поэтому в поверхностное разрушение необходимо включать совокупность процессов, явлений и эффектов – от образования вторичных структур до их раз-

рушения. При этом необходимо выделить кинетику процесса образования, прочностные характеристики вторичных структур и взаимодействие их с основными материалами микровыступов.

Отделение частиц (разрыва связей) при нормальном износе определяется не только кинетикой сопряженных и взаимовлияющих процессов трансформации типов дефектов в объемах материалов поверхностных слоев, адсорбции, диффузии и химических превращений, а также воздействием выше перечисленных полей, омываемых скоростными токами компонентов среды.

В зависимости от соотношения темпов протекания процессов могут реализовываться различные этапы нормального износа. Наиболее характерными этапами являются:

1. Соскальзывание подвижных составляющих пленки на первых стадиях структурно-химических превращений (до образования метастабильной структуры). Такому состоянию отвечают вторичные структуры I типа - неравновесные твердые растворы, подвергающиеся дальнейшему интенсивному окислению после отделения от поверхностей основных материалов пятен контактов (образование продуктов износа). В это время материалы вторичных структур I типа находятся в состоянии сверхпластичности. Важно заметить, что в этом случае наблюдается не истинное разрушение с отрывом одних атомов от других, а пластическая деформация с особым течением тончайших поверхностных пленок. Геометрия последних в условиях дискретности контакта способствует заполнению неровностей поверхностей между зазорами микронеровностей. Отделение слоев пленок с поверхностей совершается при неблагоприятных условиях электротермомеханического трения. При этом перемещение вторичных структур I типа способствует измельчению структуры ее ориентированию к перпендикулярному положению остальных слоев пленки, являющихся своего рода электромагнитами, а также оказывающих сопротивление движению при электротермомеханическом трении и устранению дефектов типа дислокаций, появление которых на поверхностях контактов становится естественным процессом.

При увеличении темпа химических превращений (по сравнению с темпом развития несовершенств) образуются пленки, которые по составу подобные химическим соединениям.

Разрушение вторичных структур II типа обусловлено постепенным увеличением количества несоответствий между вторичными структурами и основными материалами пятен контактов микровыступов. Пленки, образующиеся на поверхностях пятен контактов микровыступов при электротермомеханическом трении, и материалы основного металла отличаются химическим составом, структурой, параметрами решетки, плотностью (удельным объемом), энергетическими уровнями и т.п. Поэтому на границе раздела зарождается и развивается сетка дислокаций несоответствия, блокирующая их выход на наружные поверхности пятен контактов. При этом на поверхностях раздела материалов основного металла и модифицированных слоев (пленок) вторичных структур появляются трещины. Эта особенность согласуется с представлением о том, что линии токов скольжения, образованные дислокациями и заблокированные на поверхностях раздела пятен контактов между материалами основного металла и слоем вторичных структур, создают большую концентрацию волн напряжений, которые при достижении допустимых величин приводит к трещинам, и как следствие, к разрушению.

В основу такого вида разрушения может быть положена модель зарождения и развития трещины, базирующаяся на концентрации нагромождения дислокаций перед барьером (границы двойников и зерен с большим углом разориентации, прочие чужеродные включения и др.).

Допустимая поверхностная прочность материалов пятен микровыступов может быть достигнута при условии максимальной энергооснащенности объемов поверхностных слоев и высоким темпом рассеивания энергии при электротермомеханическом трении. Это может быть достигнуто путем формирования защитных вторичных структур, отвечающих следующим условиям по данным Б.И. Костецкого [5]:

– высокой степени измельчения и однородности

$$K_{\tilde{A}} = V_{\tilde{a}} / V_{\tilde{y}} - 1,$$

где $K_{\tilde{A}}$ – коэффициент гомогенности; $V_{\tilde{a}}$, $V_{\tilde{y}}$ – деформированный и эффективный объемы;

– минимальной толщине вторичных структур h

$$h \rightarrow \min;$$

– рациональному размеру участков вторичных структур и их равномерному распределению на поверхностях пятен микровыступов

$$K_{\tilde{A}} = A_{i\tilde{e}} / (l_{\tilde{A}} \cdot h) \leq \tilde{N}_1,$$

где $A_{i\tilde{e}}$ – площади, занимаемыми пленками вторичных структур; $l_{\tilde{A}}$ – протяженность линии границ пленок; C_1 – константа, определяющая релаксацию волн напряжений на границе раздела вторичных структур и основных материалов;

– величина запасенной энергии (ΔE) и свойств материалов на поверхностях (dz – элементарный участок) их раздела с вторичными структурами не должны резко изменяться

$$\max \partial(\Delta E) / \partial z \leq C_2,$$

где C_2 – константа, определяемая допустимым значением градиента запасенной энергией.

При этом дополнительным условием является наличие минимальной подповерхностной деформации слоев материалов микровыступов за счет их растяжения и сжатия.

Энергоемкость объемов поверхностных слоев, прямо зависящая от степени измельчения и однородности, природы взаимодействия поверхностных слоев со скоростными токами компонентов омывающей среды, имеющая прямые и обратные связи с темпами рассеивания энергии, обусловленными теплофизическими свойствами объемов поверхностных слоев и константой C_1 .

Удалось установить неизвестные ранее закономерности формирования характеристик процессов, явлений и эффектов на нестабильных иерархических уровнях электротермомеханического фрикционного нагружения в трибосопряжении при увеличении общей энтропии поверхностных слоев его материалов с одновременным уменьшением их свободной энергии и находящихся в упругодеформированном состоянии, заключающиеся в том, что под воздействием механических, электрических и тепловых полей импульсного характера на площадках пятен микровыступов, являющихся различными типами контактов, поверхностные слои структур материалов, обладающих эффектом памяти, за счет смоделированных повторяющихся композиционных матриц в подповерхностных и нижележащих слоях материалов размещены шаровидные и короткие цилиндрические вкрапления, ориентированные параллельно и перпендикулярно поверхностям трения, которые формируют T -образные энергетические

мостики, позволяющие достичь квазидинаковой энергонагруженности поверхностных слоев путем отвода избытка генерируемой энергии в выше и ниже лежащие слои с различной толщиной, что и обеспечивает их одинаковый износ, а протекающие преобразования на площадках пятен контактов микровыступов, реализуемых квазиадекватно с прогнозируемой аperiodичностью повторяющихся процессов, явлений и эффектов на нано-, микро и миллиуровнях с соблюдением количественных принципов суперпозиции «уменьшение-увеличение» и «увеличение-уменьшение» их характеристик, а также принципов суперпозиции, касающихся процессов, явлений и эффектов, которым сопутствуют «расширение (охлаждение) - сжатие (нагревание)» при одинаковых темпах их протекания, «восстановление - разрушение» и «разупрочнение - упрочнение», воспроизведя первичную и вторичную текстуры с пленками различных типов на пятнах контактов за одинаковый промежуток времени в результате реализации различных технологических способов упрочнения участков поверхности фрикционного металлического элемента при аperiodических режимах электротермомеханического нагружения трибосопряжения» (предполагаемое открытие) [1]. Все вышеизложенное требует тщательной проверки.

Выводы. Таким образом, проиллюстрированы принципы эргодического подхода к энергонагруженности поверхностных слоев трибосопряжений и износу их рабочих поверхностей в парах трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки.

Список литературы

1. Трибология / А. И. Вольченко, М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко и [др.]. – Киев - Краснодар: Изд-во "Плай", 2015. – 371 с.
2. Лобода О. С. Влияние масштабного фактора на упругие характеристики кристаллических структур: дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04/ Лобода Ольга Сергеевна // Санкт-Петербург, 2007. – 105 с.
3. Джанахмедов А. Х.. Синергетика и фракталы в трибологии / А. Х. Джанахмедов, О. А. Дішин, М. Я. Джавадов. – Баку: Апострофф, 2014. – 504 с.
4. Ланге О. Целое и развитие в свете кибернетики. – В кн.: Исследования по общей теории систем. / О. Ланге. – М.: Прогресс, 1989. – С. 181 – 251.
5. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах / Б. И. Костецкий. – Киев: Техника, 1980. – 394 с.
6. Проектный и проверочный расчет фрикционных узлов ленточно-колодочных тормозов транспортных средств / А. Х. Джанахмедов, Д. А. Вольченко, Д. Ю. Журавлев [и др.]. Стандарт. – Баку: «Апострофф», 2016. – 311с.

*М. В. КИНДРАЧУК, Д. О. ВОЛЬЧЕНКО, Д. Ю. ЖУРАВЛЬОВ, І. О. БЕКИШ,
М. В. КАШУБА*

ЕРГОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ЕНЕРГОНАВАНТАЖЕНОСТІ ТА ЗНОШУВАННЯ ПАР ТЕРТЯ СТРІЧКОВО-КОЛОДКОВОГО ГАЛЬМА БУРОВОЇ ЛЕБІДКИ

У матеріалах статті розглянуто: ергодичний підхід при еволюції трибоспряжень, деформаційний збуджуючий фактор, кінетика стану робочої поверхні, природа нормального зношування вторинних структур I та II типу при електротермічному терті трибосистеми стрічково-колодкового гальма бурової лебідки.

Ключові слова: стрічково-колодке гальмо, пара тертя, мікроступи плям контакту, термічна нестійкість, аналітичні моделі, ергодичний підхід, температурні напруження, вторинні структури I та II типів.

Киндрачук Мирослав Васильевич – докт. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой машиноведения, Национальный авиационный университет, пр. Космонавта Комарова, 1, Киев, Украина, 03058, E-mail: nau12@ukr.net.

Вольченко Дмитрий Александрович - докт. техн. наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019, тел.: +38 0342 72 71 41, E-mail: vol21@ukr.net.

Журавлев Дмитрий Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры механики машин, 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.

Бекиш Ирина Орестивна – канд. техн. наук, доцент кафедры инженерной и компьютерной графики, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, Украина, 76019, тел.: +38 0342 72 47 19, E-mail: arina555@ Rambler.ru.

Кашуба Николай Васильевич – преподаватель естественнонаучных дисциплин, Надвирнянский колледж Национального транспортного университета, ул. Соборная, 177, г. Надвирня, Ивано-Франковская область, тел. : +38 0347 52 22 марта, E-mail: nickolask14@gmail.com.

*M. V. KINDRACHUK, D. O. VOLCHENKO, D. YU. ZHURAVLEV, I. O. BEKISH,
M. V. KASHUBA*

ERGODIC APPROACH TO ENERGY LOADING AND FRICTION PAIR WEARING OF A BAND-SHOE BRAKE OF A DRAWWORKS

The article considers the ergodic approach during the tribounit evolution, the deformative drilling factor, kinetics of the working surface, the nature of normal wearing of secondary structures of type I and type II at electrothermal tribounit friction of a band-shoe brake of a drawworks. In energyloading of friction pairs of a band-shoe brake the important role belongs to a brake pulley because it is an accumulator of heat energy in the process of electrothermomechanical friction and pauses between aperiodic cyclic braking, that is while forced cooling. One of the drilling factors of the band-shoe brake of a drawworks is the tension of slack and tight branches of a brake band. This factor significantly affects the friction force, dynamic coefficient of friction, contact normal force, braking torque and, as a result, wearing of friction pairs. The generation of entropy in the area of a crystal is a local kinetic structural transition which contributes to the emergence of a plastic shift. During the normal wearing the object of destruction is the secondary structure having tens of nanometers. Such local transformation of micro projections of a metal friction element is caused by their friction effect on the contact spots of mechanical, electrical, thermal, electromagnetic and chemical fields that are washed by speed currents of the environment components.

Key words: band-shoe brake, friction pair, microprojections of contact spots, thermal instability, analytical models, ergodic approach, thermal stress, secondary structures of types I and II.

References

1. Trybolohvva / A. I. Volchenko, M. V. Kindrachuk, D. A. Volchenko i [in.]. – Kyiv – Krasnodar: Vyd-vo "Play", 2015. – 371 s.
2. Loboda O. S. Vlivanive masshtabnogo faktora na uprugive kharakteristiki kristalicheskikh struktur: diss. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.02.04/ Loboda Ol'ga Sergeevna //Sankt-Peterburg, 2007. – 105 s.
3. Dzhanakhmedov A. KH. Sinergetika i fraktaly v tribologii / A. KH. Dzhanakhmedov, O. A. D'ishin, M. YA. Dzhavadov. – Baku: Apostroff, 2014. – 504 s.
4. Lange O. Tselove i razvitive v svete kibernetiki. – V kn.: Issledovaniya po obshchey teorii sistem. / O. Lange. – M.: Progress, 1989. – S. 181 – 251.
5. Kostetskiy B. I. Treniye, smazka i iznos v mashinakh / B. I. Kostetskiy. – Kiyev: Tekhnika, 1980. – 394 s.
6. Provektnyy i proverchnyy raschet friktsionnykh uzlov lentochno-kolodochnykh tormozov transportnykh sredstv / A. KH. Dzhanakhmedov, D. A. Vol'chenko, D. YU. Zhuravlev [i dr.]. Standart. – Baku: «Apostroff», 2016. – 311s.