

УДК 621.891

В. Я. МАЛЫК

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Украина

ФИЗИКО-ТЕРМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В ЛЕНТОЧНО-КОЛОДОЧНЫХ ТОРМОЗАХ (часть вторая)

Физико-термические явления при фрикционном взаимодействии в парах трения ленточно-колодочных тормозов рассмотрены применительно к термофрикционной стабильности полимерных материалов и влияния на них температурного поля, депрессионным зонам трибосопряжения.

Ключевые слова: ленточно-колодочный тормоз, металлополимерная пара трения, полимерная накладка, поверхностный и подповерхностный слой, термофрикционная стабильность, депрессионные зоны трибосопряжения.

Введение. В металлополимерных фрикционных узлах ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки основную нагрузку несут полимерные фрикционные накладки и обод тормозного шкива. Как известно, полимеры могут существовать в четырех физических состояниях – кристаллическом и трех аморфных (стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем). Полимеры во фрикционных накладках находятся в стеклообразном или кристаллическом состояниях и поэтому их называют твердыми полимерами. С каждым из физических состояний связан определенный комплекс механических свойств и каждому состоянию отвечает режим нагружения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки. Однако, до сего времени мало внимания исследователями уделено термофрикционной стабильности полимерных материалов в трибосистемах, а также влиянию температурного поля на физико-химические и трибологические характеристики полимерных накладок [1-6].

Что касается обода тормозного шкива, то до сего времени отсутствует теоретическое обоснование его депрессионного состояния, исходя из его фрикционного взаимодействия с поверхностными слоями полимерных накладок тормозной ленты [7, 8]. Однако наличие депрессионной зоны наблюдается и при закономерностях изменения удельных нагрузок в металлополимерных парах трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки [9, 10].

Термофрикционная стабильность полимерных материалов в трибосистемах. Разработка и создание термофрикционных стабильных систем базируется на исследовании трибохимических процессов в полимерах. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что по поведению поверхностных и подповерхностных слоев при электротермомеханическом трении полимерные материалы можно разделить на две группы:

– «трибохимически активные» – трение которых сопровождается неустойчивым и высоким значением динамического коэффициента трения в результате протекания на поверхности сложных деструктивно-структурирующих процессов, явлений и эффектов;

– «трибостабильные» полимеры, динамический коэффициент трения которых сохраняет стабильность в течение продолжительного периода времени в определенном температурном интервале (от 50 до 390 °С) в результате протекания процессов деструкции.

Металлополимерные пары трения нашли широкое применение во фрикционных узлах ленточно-колодочных тормозов буровой лебедки, поэтому уделим внимание «трибостабильным» полимерам. Последние представляют собой полимеры линейного строения как ароматического, так и алифатического типа. Использование трибостабильных полимеров, даже весьма термостойких, в качестве связующих во фрикционных материалах не дали положительных результатов, т.к. возникновение подвижности макромолекул в поверхностных слоях накладок проявляется до температур их стеклования. Повышение температуры размягчения для успешного использования трибостроительных полимеров, в качестве связующих, также невозможно, т.к. полимеры приобретают чрезмерную жесткость и теряют способность к переработке через расплав. Поэтому необходимо использовать во фрикционных материалах термостойкие полимерные волокна, являющиеся по химическому строению трибостабильными полимерами и одновременно находящиеся в предельно термофрикционно стабильном состоянии. Как правило, волокна различных типов не плавятся, а температуры их размягчения находятся выше температур разложения фрикционных материалов.

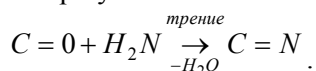
В результате многочисленных исследований фрикционных материалов с термостойкими полимерными волокнами можно сформулировать общий вывод, что с повышением скорости скольжения у всех материалов наблюдалась тенденция к повышению температуры и снижению динамического коэффициента трения. Однако химическая природа армирующих тканей оказывает существенное влияние на величину динамического коэффициента трения, особенно, в области невысоких скоростей скольжения (до 1,5 м/с), где полимерные связующие (например, резольная фенолформальдегидная смола) находятся в застеклованном состоянии. При повышении скорости скольжения и поверхностной температуры металлополимерных пар трения имеет место постепенное снижение динамического коэффициента трения. Более существенно природа волокна влияет на поверхностную температуру. Установлено, что наиболее жесткосцепные и термостойкие полимеры, из которых изготовлены ткани сверхмодульных волокон на основе термостойкого сополимера и «лола» – на основе полинафтоилбензимидазольных волокон, приводит к более высоким значениям динамического коэффициента трения и поверхностных температур при трении армированных ими органопластов. Так, при скорости скольжения 1,60 м/с у композита на основе волокна «лола» поверхностная температура достигала 300 °С, в то время как у композита с «оксалом» – 160 °С. У последнего при $p = 0,1$ МПа и $V = 2,0$ м/с рабочая поверхность полимерной накладки при электротермомеханическом трении мало отличается от исходной.

Достоинством тканей типа «оксалон», наряду с высокими эксплуатационными параметрами, является и ряд экономических причин. Волокна этого типа выпускаются в настоящее время по ценам более низким, чем другие типы полегетероариленовых, термостойких волокон. Это обстоятельство позволило в последние годы начать широкое внедрение композитов «оксалон» в тяжелонагруженных узлах трения тормозных устройств.

«Трибохимические активные» полимеры имеют фрикционную нестабильность из-за функциональных групп, связанную с возможностью осуществления реакцией синтеза на границе раздела с металлическим фрикционным элементом. Если рассматривать трибосинтез как типичную механохимическую реакцию то необходимо иметь как минимум две функциональных группы различного типа в

полимерных цепях при электротермомеханическом трении. В этой связи интересно уделить внимание линейному полигетероарилену – полифенилхиноксалину и сополимеров на его основе.

Концевыми группами полифенилхиноксалина являются электродонорные – NH_2 группы. Электротермомеханическое трение указанного полимера характеризует его как термофрикционно стабильный полимер. Введение в макромолекулу полифенилхиноксалина электроакцепторных карбональных групп приводит к резкому возрастанию фрикционной активности уже при комнатных температурах, причем нестабильность возрастет при увеличении количества $C = 0$ групп:



С точки зрения трибохимии под влиянием температуры происходит самоорганизующий процесс формирования новых азометиновых связей (см. выше реакцию), в результате которого на рабочей поверхности полимерной накладки образуется термически более устойчивая структура, повышающая свою устойчивость при возрастании температуры трения.

Влияние температурного поля на физико-химические и трибологические характеристики полимерных накладок. Влияние теплового поля на трибологические характеристики поверхностных и приповерхностных слоев материалов полимерных накладок проявляется через изменение их механических свойств (модуля упругости для упругого контакта) и твердости (для пластического контакта). Кроме того, в литературе недостаточно отражена связь поверхностных температурных градиентов с физико-механическими свойствами полимерных фрикционных накладок [2].

Основными физико-механическими характеристиками полимерных накладок, оказывающими решающее влияние на формирование пятна контакта металлополимерных выступов, процессы их электротермомеханического трения и изнашивания являются:

- твердость HB ;
- модуль упругости E ;
- предел прочности σ ;
- сопротивление срезам σ_c .

Из анализа зависимостей, полученных многочисленными исследователями, в том числе и автором настоящей статьи, можно сделать следующие выводы:

– с повышением температуры твердость материалов полимерной накладки понижается резко, затем менее интенсивно.

– с увеличением градиента температуры по поверхности твердость увеличивается, но затем интенсивность ее увеличения падает, а при дальнейшем росте градиента твердость уменьшается. Увеличение твердости с ростом градиента температуры по толщине обусловлено в поверхностном слое напряжений сжатия (при отрицательном $grad T$), препятствующих внедрению индентора.

Остановимся на влиянии температуры (объема поверхностного слоя) и температурного градиента на модуль упругости и предел прочности полимерных материалов. С молекулярной точки зрения последние характеризуются силами взаимодействия микрочастиц, в значительной степени зависящие от температур, поскольку последние в рассматриваемом слое изменяют энергетическое состояние молекул и их подвижность. В большинстве случаев установлено, что падение значения модуля упругости с повышением температур объясняется ослабле-

нием межмолекулярных связей материалов в поверхностном слое полимерной накладки.

Влияние температуры и температурного градиента на модуль упругости E и предел прочности σ определяется на испытательной машине с термостатом согласно работы [2].

Что касается пленок полимерных веществ, то они обладают вязкоэластичными свойствами и напоминают трехмерные гели. Геологические свойства пленок очень сильно зависят от их структуры. Так, фазовые переходы, не обнаруживаемые на кривых $\pi - \sigma$, могут приводить к резкому изменению наклона кривой зависимости вязкости от π . Ряд таких перегибов наблюдается даже на кривых, полученных, казалось бы, для простых пленок длинноцепочных жирных кислот.

В смешанных пленках возможно образование стехиометрических соединений. Большинство работ выполнено на пленках, растекшихся на водяных подложках. Пленка влияет только на скорость испарения, но никак не влияет на равновесную упругость воды.

В результате реакции вещество, образующее пленку, может измениться (и при этом площадь пленки, приходящая на одну молекулу, станет совсем другой) или может разделиться на растворимые в воде фрагменты. Очевидно, что за ходом реакции можно следить, контролируя либо изменение площади при постоянном поверхностном давлении, либо изменение давления при постоянной площади пленки (почти так же, как при исследовании гомогенных газовых реакций); в обоих случаях параллельно можно проводить измерения поверхностного потенциала.

Депрессионные зоны трибосопряжения металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза. Рассмотрим сущность метода термостабилизации металлического фрикционного элемента, используя закономерности изменения поверхностных температур пары трения «рабочая поверхность обода – рабочая поверхность накладки». При этом имеет место инверсия тепловых потоков от матовой (нерабочей поверхности) к полированной (рабочей поверхности) обода металлического фрикционного элемента, происходящая за счет адсорбционно-структурных процессов в приповерхностных слоях накладок.

Пусть для момента времени τ_0 , который примем за начало отсчета, наблюдается стационарный режим, т.е. устанавливается преддопустимая температура $T_{\text{п}}$ для материалов фрикционной накладки. В момент времени τ_0 в приповерхностном слое фрикционных накладок происходят адсорбционно-деструктивные процессы, вызывающие принудительное охлаждение их рабочих поверхностей. За этот промежуток времени приповерхностный слой фрикционных накладок охлаждается до температуры T_1 и при этом снижение температуры составляет $\Delta T = T_2 - T_1$ по отношению к температуре T_2 металлического обода, которая на протяжении экспериментальных исследований остается неизменной. Затем пары трения тормоза размыкаются и их рабочие поверхности взаимодействуют со скоростными токами компонентов газовой смеси и потоками воздуха.

По истечении времени необходимого до наступления термостабилизационного состояния металлического обода, разность температур $T^* - T_2 = \Delta T^*$ начнет изменяться во времени по закону

$$\Delta T'(\tau) = \Delta T^* e^{-m(\tau - \tau^*)}, \quad (1)$$

где e – основание натурального логарифма; m – темп охлаждения металлического обода.

За время $\Delta\tau = \tau_1 - \tau^*$ приповерхностный слой фрикционных накладок охладится до температуры T_1 и потеряет количество теплоты

$$\Delta Q = C_c (T - T^*) = C_c \Delta T_1, \quad (2)$$

где C_c – приведенная теплоемкость приповерхностного слоя фрикционной накладки, находящегося под воздействием фазовых превращений.

Если пренебречь приведенной теплоемкостью приповерхностного слоя фрикционной накладки при различных фазах его нахождения, то количество теплоты $Q(\tau)$, передаваемое через межконтактную среду в момент времени τ , по закону Фурье составит

$$Q(\tau) = \lambda \frac{2\pi l}{\ln r_2 / r_1} \Delta T(\tau), \quad (3)$$

где λ – приведенный коэффициент теплопроводности слоя газа, находящегося в межконтактном зазоре между парами трения; l – ширина фрикционной накладки; r_1, r_2 – радиусы рабочей поверхности накладки и обода металлического элемента, и поэтому количество теплоты ΔQ_1 которое пройдет через слой газа, находящегося в межконтактном зазоре, за промежуток времени $\Delta\tau = \tau_1 - \tau^*$ будет равно

$$\Delta Q = \lambda \frac{2\pi l}{\ln r_2 / r_1} \Delta \bar{T} \Delta \tau, \quad (4)$$

где

$$\Delta \bar{T} = \frac{1}{\Delta \tau} \int_{\tau^*}^{\tau_1} \Delta T^* e^{-m(\tau - \tau^*)} d\tau = \frac{\Delta T^* - \Delta T_1}{m \Delta \tau} = \frac{T^* - T_1}{m \Delta \tau} = \frac{\Delta T_1}{m \Delta \tau}; \quad (5)$$

$$\Delta T_1 = \Delta T^* e^{-m \Delta \tau} = T_1 - T_2. \quad (6)$$

Темп охлаждения m определяется по результатам непосредственных измерений $\Delta T^*, \Delta T_1, \Delta \tau$

$$m = \frac{\ln \Delta T^* - \ln \Delta T_1}{\Delta \tau}. \quad (7)$$

Более детально данный вопрос раскрыт в работе [5] при импульсном и длительном подводе теплоты к металлополимерным парам трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки. Одинаковые результаты при исследовании фрикционных пар на лабораторных и реальных установках могут быть получены только в том случае, если кроме равенства скоростей скольжения, удельных нагрузок, объемной и поверхностной температуры, геометрического подобия испытательных систем (в идеальных условиях), будут равны и температурные градиенты. Наибольшее затруднение создает воспроизведение равенства температур и температурных градиентов, оказывающих наибольшее влияние на физико-механические и фрикционные свойства трущихся материалов. На рис. проиллюстрированы закономерности изменения удельных нагрузок (рис. а, в) и динамических коэффициентов трения (рис. б, г) в зависимости от угла обхвата (φ) тормозной лентой внешних поверхностей подвижных фрикционных накладках в многопарных узлах трения модельного ленточно-колодочного тормоза при натяжении сбегавшей ветви ленты $S_C = 800$ Н.

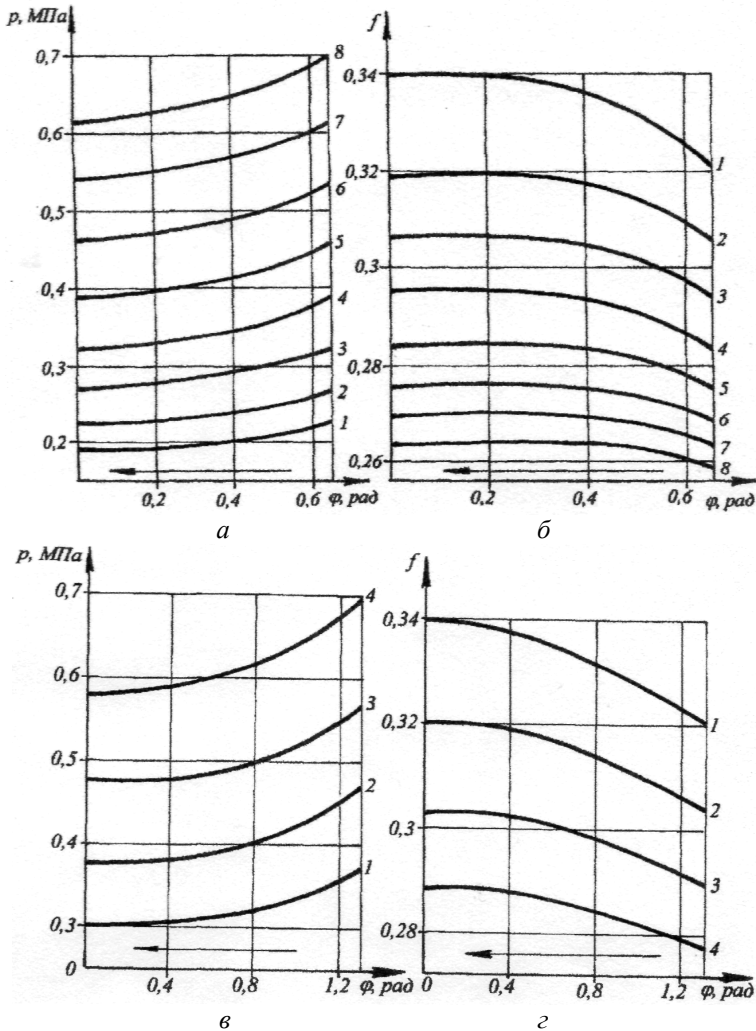


Рис. Закономерности изменения удельных нагрузок (*a*, *в*) и динамических коэффициентов трения (*б*, *г*) в зависимости от угла обхвата тормозной лентой внешних поверхностей подвижных фрикционных накладок в модельном ленточно-колодочном тормозе при $S_C = 800 \text{ Н}$

Влияние температуры трения полимерных фрикционных материалов вызвало наличие длительной зоны низких и достаточно устойчивых значений динамического коэффициента трения (рис. *б*, *г*), образующейся при достижении определенных значений температур. Эта зона депрессии образуется, как правило, после снижения первоначальных высоких значений динамического коэффициента трения, связанного с разрядом указанной зоны поверхностей. Длительность зоны депрессии зависит от скорости скольжения и от значения коэффициента взаимного перекрытия. Уменьшение коэффициента взаимного перекрытия снижает зарядную способность поверхностей взаимодействия и положительно влияет на стабильность динамического коэффициента трения, способствует увеличению среднего значения динамического коэффициента трения и повышает износостойкость. Но эффективность пары трения с уменьшением коэффициента взаимного перекрытия при прочих равных условиях несколько снижается за

счет падения между рабочими поверхностями трибоэлектрического потенциала. Увеличение коэффициента взаимного перекрытия приводит к сокращению зоны депрессии из-за активности ее зарядной части. При попадании в зону депрессии темп нагревания в процессе трения резко уменьшается из-за падения химического потенциала равновесия. На зону депрессии влияет также и увеличение удельных нагрузок (рис. а, в), приводящее к увеличению площади фактического контакта и повышению динамического коэффициента трения из-за роста их зарядной способности. Снижение динамического коэффициента трения при увеличении поверхностной температуры приводит, в свою очередь, к уменьшению интенсивности теплового потока, ослабленного трибоэлектрическим эффектом, и как следствие, и уменьшению температуры.

Таким образом, оба фактора – температура, характеризующая изменение механических свойств трущихся элементов, и коэффициент трения, характеризующий динамику торможения, – оказываются взаимосвязанными.

Выводы. Проиллюстрирована термофрикционная стабильность полимерных накладок, а также влияние на их физико-химические и трибологические характеристики температурного поля. Впервые приведено теоретическое обоснование депрессионных зон трибосопряжения металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки.

Список литературы

1. Луцейкин Г. А. Методы исследования электрических свойств полимеров / Г. А. Луцейкин. – М.: Химия, 1988. – 160 с.
2. Колесников В. И. Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах / В. И. Колесников. – М.: Наука, 2003. – 279 с.
3. Ленточно-колодочные тормозные устройства. Монография (научное издание) в 2 т. Т.2 / [Н. А. Вольченко, Д. А. Вольченко, С. И. Крыштопа, Д. Ю. Журавлев, А. В. Возный]. – Кубанск. госуниверсит. технолог. ун-т. – Краснодар – Иваново-Франковск, 2013. – 441 с.
4. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1986. – 480 с.
5. Джанахмедов А. Х. Темпы нагревания металлополимерных пар трения при импульсном и длительном подводе теплоты трения в ленточно-колодочном тормозе [А. Х. Джанахмедов, А. И. Вольченко, Д. А. Вольченко и др.] // Проблемы трения и износа: научн. – техн. сб. – К.: НАУ, 2013. Вып. 2(61). С. 20 – 28.
6. Аскадский А. А. Химическое строение и физические свойства полимеров / А. А. Аскадский, Ю. И. Матвеев. – М.: Химия, 1983. – 248 с.
7. Фрикционные узлы / [А. А. Петрик, Н. А. Вольченко, П. Ю. Пургал, Д. А. Вольченко] Монография (научное издание). В 2-х томах. Том 1. Кубанск. госуниверсит. технолог. ун-т (Россия). – Краснодар, 2003. – 220 с.
8. Градиентные полимерные материалы / [А. А. Аскадский, Л. М. Голенева, К. А. Бычко и др.] Рос. хим. ж. (Журнал. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева), 2001, т. XLV, №3. – С. 123 – 129.
9. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / Под общ. редакцией А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 575 с.
10. Ленточно-колодочные тормозные устройства. Монография в 2 т. Т.1 / [А. А. Петрик, Н. А. Вольченко, Д. А. Вольченко, В. Я. Малык, П. А. Поляков]; под общ. ред. А. А. Петрика. – Краснодар: Из-во Кубанск. госуниверсит. технолог. ун-та, 2009. – 276 с.

В. Я. МАЛИК

**ФІЗИКО-ТЕРМІЧНІ ЯВИЩА ПРИ ФРИКЦІЙНІЙ ВЗАЄМОДІЇ В
СТРІЧКОВО-КОЛОДКОВИХ ГАЛЬМАХ (частина друга)**

Фізико-термічні явища при фрикційній взаємодії у парах стрічково-колодкових гальм розглянуті, застосовуючи їх до термофрикційної стабільності полімерних матеріалів та впливу на них температурного поля, депресивних зон трибоспряження.

Ключові слова: стрічково-колодкове гальмо, металополімерна пара тертя, полімерна накладка, поверхневий та приповерхневий шар, термофрикційна стабільність, депресивні зони термоспряження.

V. Ya. MALYK

**PHYSICO-THERMAL PHENOMENA IN FRICTIONAL INTERACTION IN
BAND-BLOCK BRAKES (part two)**

Physical and thermal phenomena in frictional interaction in pairs of friction belt drum brakes are considered in relation to: termofriction stability polymeric materials and their effect on the temperature field; tribomating depression zones. We have considered the following questions: thermal friction stability of polymer materials in tribosystem; effect of temperature field on the physico-chemical and tribological properties of polymer pads; depression zones of tribomating of metall-polymer friction pairs of band-block brake.

Keywords: band-block brake, metal-polymer friction pair, polymer pad, surface and subsurface layer, termofriction stability zone, tribomating depression.

Малык Владимир Ярквич – канд. техн. наук, доцент кафедри нафтогазового обладнання, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, г. Івано-Франківськ, Україна.