

УДК 629.113: 621.2.082.18

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УРОВНИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ КОНТАКТОВ МИКРОВОЫСТУПОВ ПАР ТРЕНИЯ

М. В. КИНДРАЧУК¹, А. И. ВОЛЬЧЕНКО², Д. А. ВОЛЬЧЕНКО²,
В. С. СКРЫПНИК², А. В. ВОЗНЫЙ²

¹ *Национальный авиационный университет, Киев;*

² *Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа*

Показано, как с помощью дополнительных пар трения металл–полупроводник и полимер–полупроводник, полученных введением в обод шкива цилиндрических вставок из полупроводникового материала – бора, который изменяет тип проводимости с n на p при 550°C , можно снизить энергонагруженность трибосопряжений ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки.

Ключевые слова: пары трения металл–полимер, металл–полупроводник и полупроводник–полимер; контакты микровыступов: нейтральный, блокирующий, омический и выпрямляющий; временные диаграммы токов и напряжений.

Ранее [1] описано влияние электродинамики контактно-термического фрикционного взаимодействия в металлополимерных парах трения тормозных устройств на энергетические уровни их поверхностных и подповерхностных слоев. Уделено внимание водородному изнашиванию – одному из процессов разрушения металлических фрикционных элементов в условиях электротермомеханического трения – обусловленному разложением углеводородных связей с выделением водорода, который диффундирует в поверхностный слой стального изделия, вызывая его охрупчивание [2].

Цель настоящей работы – изучить структуру системы металл–полимер–полупроводники в трибосопряжении, чтобы снизить энергонагруженность фрикционных узлов тормозных устройств.

Электротермомеханическое фрикционное контактное взаимодействие микровыступов исследуемых пар трения. В полимерных накладках из неоднородных материалов существуют аморфные и кристаллические фазы, а также на межфазных границах накапливаются заряды, что обусловлено разницей проводимости этих фаз (эффект Максвелла–Вагнера) [3, 4]. При электризации такого материала носители будут собираться вблизи этой межфазной границы или, наоборот, уходить от нее в зависимости от того, какой из двух токов проводимости больше: притекающий к границе зарядов или уходящий от нее.

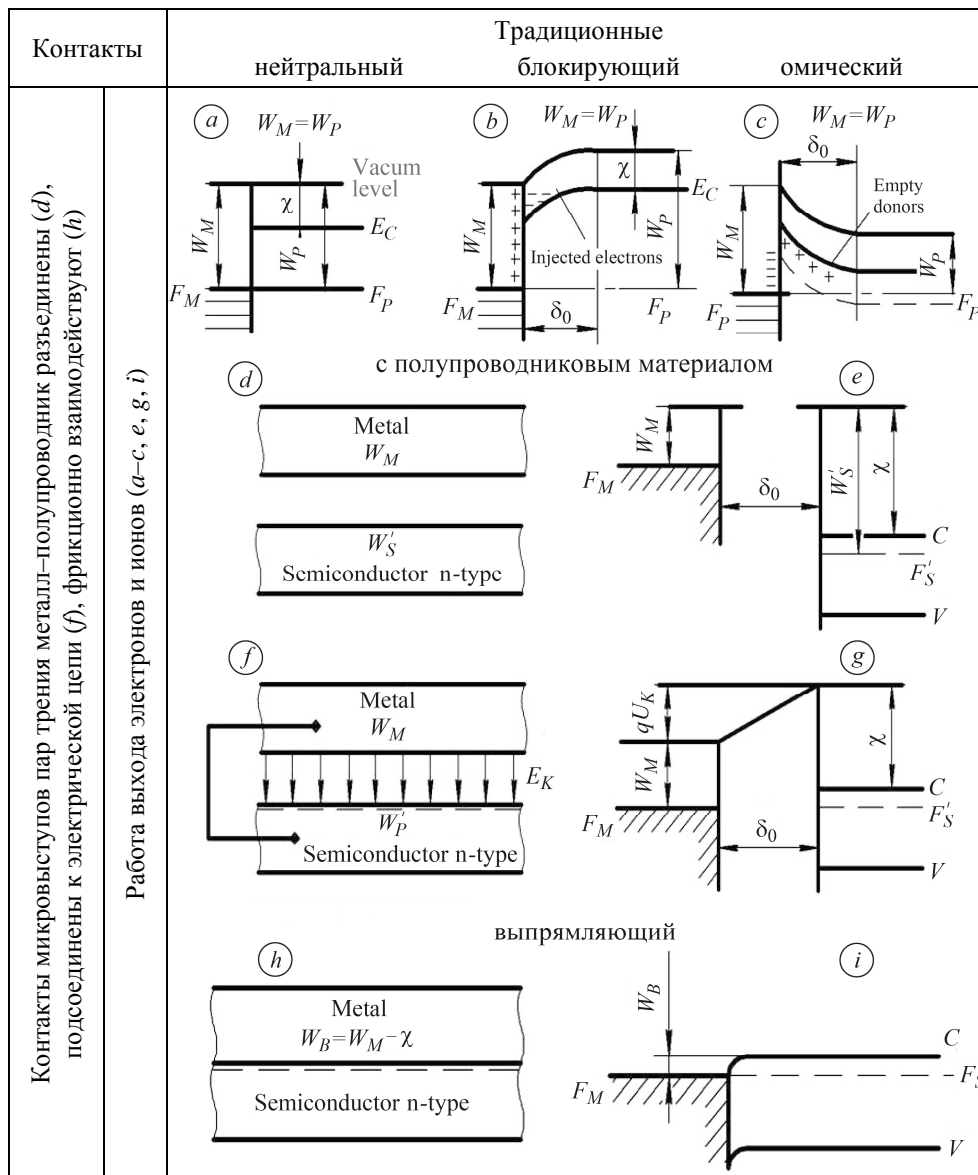
Для нейтрализации зарядов немаловажную роль играют также свойства рабочей поверхности металлического фрикционного элемента. Взаимосвязь между энергетическими уровнями определяют по фрикционному контактно-взаимодействию микровыступов пар трения [5–7]. Проанализируем случаи возникновения нейтральных контактов на микровыступах металлополимерных пар трения (табл. 1, схема *a*).

Поверхностные температуры полимерной накладки ниже допустимых для ее материалов. Работа выхода электронов и ионов из металлического и полимерного фрикционного элементов одинакова. Работа выхода ионов из поверхностного

слоя накладки существенно увеличивается из-за сродства к электрону, т.е. способности некоторых атомов и молекул присоединять добавочный электрон и превращаться в положительные ионы.

Мерой сродства к электрону служит выделяющаяся при этом энергия. Целе-направленная переориентация электронов в ионы и позволяет за счет этого эффекта достичь равенства работ выхода частиц.

Таблица 1. Энергетические диаграммы при фрикционном взаимодействии микровыступов пар трения металл–полимер (а–с) и металл–полупроводник (d) с n-типом проводимости



Условные обозначения: χ – электронное сродство; F_M, F_P, F'_S – уровни Ферми металла, полимера и полупроводника; E_C – энергия образующейся емкости конденсатора (C); δ_0 – расстояние между микровыступами; U_c – контактная разность потенциалов; q – заряд электрона; W_B – работа выхода электронов и ионов с выпрямляющего контакта; V – напряжение поля.

Исследовали переключения в системе вследствие изменения граничных условий в трехслойной структуре металл–полимер–полупроводник, приводящие к перераспределению поверхностного заряда в приконтактной области полимера и полупроводника из-за резкого изменения эффективной работы выхода электронов металла вблизи критической температуры. Таким образом, переход полимера и полупроводника в высокопроводящее состояние вызван изменением положения уровня Ферми металла (эффективной работы выхода электронов) в точке фазового перехода. Необходимо отметить еще одну важную особенность омического (инжектирующего) контакта на микровыступах металлического элемента, напоминающего нагретый катод, но уже в отсутствие поля на поверхности, когда можно спонтанно инжектировать носители внутрь поверхностного слоя полимерной накладки и полупроводникового материала. Возникающее перед электродом облако пространственного заряда, в конце концов, полностью уменьшает эмиссию с электрода, если, конечно, оно не рассеивается приложенным полем. На инжектирующем контакте $E(0, t) = 0$ и плотность зарядов $\rho_s(0) = \pm\infty$, причем полярность зависит от знака инжектируемых носителей.

Поведение микровыступов полимерной накладки существенно зависит от материала микровыступов металлического фрикционного элемента. Обычно пятна контактов микровыступов фрикционного элемента покрыты пленками и при слабых и промежуточных напряжениях поля (табл. 1, схема *a*) препятствуют передаче носителей заряда от электрода внутрь поверхностного и приповерхностного слоев полимерной накладки. В то же время электрод может принимать носители из этих слоев. Приложенное электрическое поле в этом случае удаляет носители положительных зарядов с пятен контактов микровыступов накладки (анодов, расположенных, скажем, в плоскости $x = 0$).

Так как этот электрод не в состоянии передавать материалам положительные заряды, вблизи него в слое толщиной δ_s между плоскостями $x = 0$ и $x = \delta_s$ образуется облако отрицательного пространственного заряда с плотностью ρ_s . Тогда слой пространственного заряда полностью сформируется, напряжение U , первоначально приложенное по всей толщине металлического микровыступа, теперь станет приложенным к слою толщиной δ_s . В результате ток обратится в нуль. Протяженность слоя $\delta_s = \sqrt{2\varepsilon U / \rho_s}$ не зависит от приложенного электрического поля.

Например, при плотности неподвижных (захваченных) носителей зарядов $\rho_s = 1 \cdot 10^{-4}$ С/см³, $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-13}$ Ф/см и $U = 1$ В толщина слоя δ_s составляет $1,25 \cdot 10^{-3}$ см. Следовательно, блокирующие контакты препятствуют полному удалению носителей из полимера, причем независимо от их подвижности.

При достижении рабочей поверхностью полимерной накладки температуры выше допустимой для ее материалов происходит выгорание в поверхностных и подповерхностных слоях связующих компонентов, вследствие чего на поверхности накладки образуются островки жидкости. При контакте рабочей поверхности металлического фрикционного элемента с жидкостью ионы из металла переходят в жидкость.

Металл поступает в раствор в виде либо положительных ионов, либо комплексных отрицательных, если взаимодействует с жидкостью. При этом на его поверхности устанавливается некоторый специфический потенциал, уравнивающий выделение и осаждение ионов. Он зависит как от природы металла, так и от концентрации ионов в жидкости. При некотором значении кислотности (рН) металл не посылает в раствор ионы, а наоборот, принимает их из раствора, приобретая заряды до наступления электрического равновесия.

Металлы располагаются в электрохимический ряд относительно положительного иона водорода H^+ . При погружении в жидкость двух различных металлов каждый из них имеет определенный потенциал. При их контакте возникает электрический ток до тех пор, пока в растворе не будут исчерпаны все ионы металлов или раствора. Электрические токи могут протекать и между различными точками одной металлической поверхности, если она заряжена и неоднородна.

Большое количество зарядов накапливается при удельном сопротивлении жидкости выше $10^9 \Omega \cdot \text{см}$ [1]. Считают, что при этом на поверхности металла, соприкасающейся с жидкостью, образуется двойной электрический слой. Поверхность металла в результате потерь или захвата ионов приобретает незначительный химический потенциал, и по ней распределяется некоторый заряд, а противоположный находится в жидкости. Распределение зарядов на поверхности металла может характеризовать потенциал ϕ_e , который меняется с расстоянием от поверхности в соответствии с электростатическими силами и распределением Больцмана (табл. 1, схема *a*). Аналитическое выражение для расчета потенциала ϕ_e получаем из уравнения Пуассона в предположении о существовании экранирующего двойного слоя [4]:

$$\phi_e = \frac{4\pi\bar{\sigma}}{\epsilon k} \exp k(d-x), \quad (1)$$

где $\bar{\sigma}$ – плотность заряда поверхностного слоя, C/mm^2 ; ϵ – диэлектрическая проницаемость, F/cm ; k – постоянная Больцмана; $d-x$ – толщина двойного слоя, см .

Если работа выхода электронов и ионов полупроводника *n*-типа W_S превышает работу выхода из металла W_M (табл. 1, схемы *d*, *e*), то при их соединении проводом электроны переходят из металла в полупроводник (табл. 1, схема *f*). В результате после установления между ними термодинамического равновесия образуется электростатическое поле E_K , направленное к поверхности полупроводника, и возникает контактная разность потенциалов U_c (табл. 1, схема *g*). Электрическое поле между металлом и полупроводником создают недостающие электроны на поверхности металла и избыточные на поверхности полупроводника.

При уменьшении толщины δ слоя заряда, естественно, поверхностная плотность избыточных зарядов, а также напряженность электрического поля в зазоре увеличиваются. При уменьшении толщины зазора до порядка межатомных расстояний, т.е. при непосредственном контакте металла и полупроводника, поверхностные атомные слои металла и полупроводника образуют единую квантомеханическую систему (табл. 1, схема *h*) и на границе раздела потенциальный барьер для свободных электронов практически не образуется (табл. 1, схема *i*). Таким образом, при контакте металла с полупроводником *n*-типа возникает потенциальный барьер, т.е. контакт обладает выпрямляющими свойствами, если $W_M > W'_S$, и омическими, если $W_M \leq W'_S$. Контакт металл–полупроводник (цинк *p*-типа) имеет выпрямляющие свойства, если $W_M < W'_S$, и омические, если $W_M \geq W'_S$ (рис. 1*a-c*). Следует отметить, что если при контакте металла с полупроводником *n*- и *p*-типа образуются барьеры высотой Φ_{Bn} и Φ_{Bp} , тогда их сумма становится равной ширине запрещенной зоны этого полупроводника Φ_D .

В действительности контакты микровыступов пар трения металл–полимер и металл–полупроводник состоят из совокупности параллельно соединенных и электрически взаимодействующих микроконтактов, работающих в режимах микротермогенераторов и микротермохолодильников [4] с различными высотами потенциального барьера. В результате этого в приповерхностном слое полупроводника наряду с основным электрическим полем контактной разности потенциалов контактирующих пятен микровыступов пары трения металл–полупроводник возникает и дополнительное (поле пятен) контактной разности потенциалов

(< 1 eV) электрически взаимодействующих микроконтактов с различными локальными высотами барьера. В то же время поле пятен образуется в приконтактной области полупроводника реальных микроконтактов, ограниченной площадью пятен микровыступов, также и из-за разности потенциалов между контактной поверхностью с высотой барьера ~ 1 eV и примыкающими к ней свободными боковыми поверхностями микровыступов металла и полупроводника, работа выхода электронов и ионов которых около 4...6 eV.

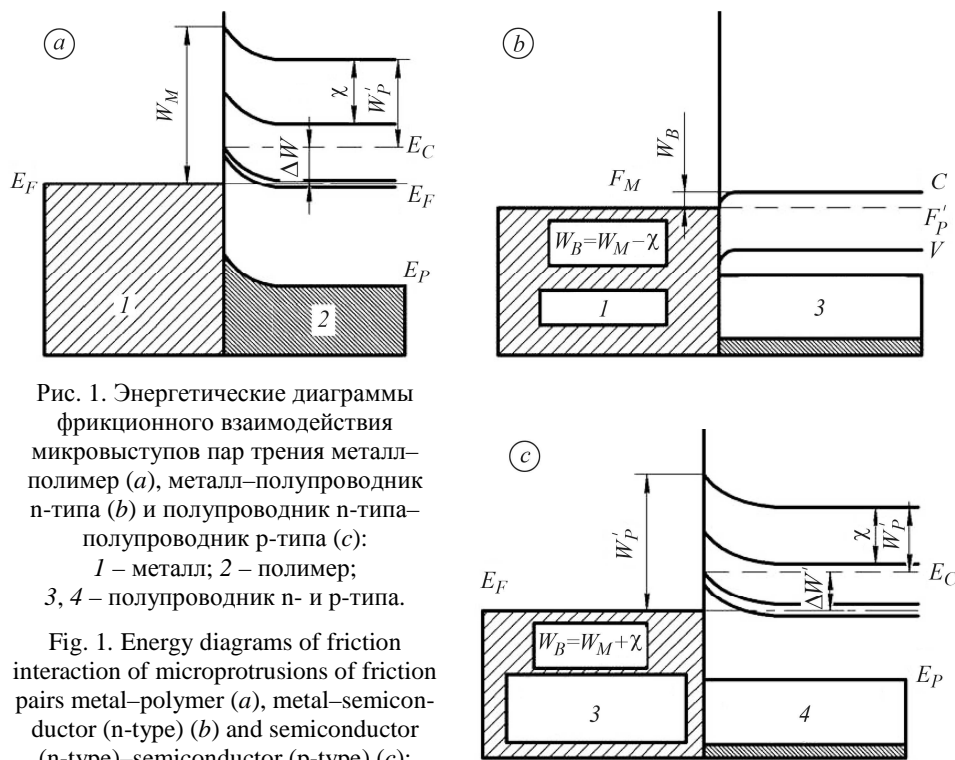


Рис. 1. Энергетические диаграммы фрикционного взаимодействия микровыступов пар трения металл–полимер (а), металл–полупроводник n-типа (b) и полупроводник n-типа–полупроводник p-типа (с):
1 – металл; 2 – полимер;
3, 4 – полупроводник n- и p-типа.

Fig. 1. Energy diagrams of friction interaction of microprotrusions of friction pairs metal–polymer (a), metal–semiconductor (n-type) (b) and semiconductor (n-type)–semiconductor (p-type) (c):
1 – metal; 2 – polymer;
3, 4 – semiconductor of n- and p-type.

Метод временных диаграмм токов и напряжений в паре трения металл–полимер–полупроводники. Туннельная инжекция заряда в полимере может осуществляться в режимах переменного тока и напряжения при электротермомеханическом трении контактных пятен микровыступов структуры металл–полимер–полупроводники в различных комбинациях: металл–полимер, металл–полупроводник, полимер–полупроводник и полупроводник–полупроводник (рис. 2). В первом случае при инжекции переменным является катодное (металлический элемент) электрическое поле, а во втором – анодное (полимер).

Первоначально структуру металл–полимер–полупроводник при электротермомеханическом трении микровыступов контактирующими площадками заряжают импульсами переменного тока микротермобатарей. Затем ее переводят в состояние аккумуляции или глубокой инверсии (рис. 3, участок 1). Полярность токового импульса меняется с увеличением площади пятен контактов микровыступов на противоположную и структура начинает перезаряжаться (участок 2). На этом участке из временной зависимости напряжения на поверхностях контакта структур $V_1(\tau)$ получают зависимость емкости от напряжения для тех микровыступов пар трения, которые еще не вступили во фрикционное взаимодействие.



Рис. 2. Энергетические уровни пятен контактов микровыступов элементов пар трения при электротермомеханическом фрикционном взаимодействии со структурой металл–полимер–полупроводники.

Fig. 2. Energy levels of contact spots of microprotrusions of friction pairs under electric thermal mechanical friction interaction with the structure metal–polymer–semiconductors.

Емкость структуры металл–полимер–полупроводник обратно пропорциональная производной зависимости напряжения на пятнах контакта микровыступов от времени. При заряде пятен контакта микровыступов структуры импульсом переменного тока I_0 временную зависимость поверхностного потенциала описывает выражение

$$\varphi_s(\tau) = V_1(\tau) - I_0 \cdot C_i^{-1} \cdot \tau, \quad (2)$$

где τ – время; C_i – емкость i -го конденсатора, образованного на микровыступах пятен контактов.

Из выражения (2) можно оценить зависимость поверхностного потенциала от напряжения на структуре контактов микровыступов пар трения, а из зависимости напряжения на структуре от времени определить дифференциальную плотность поверхностных ее состояний.

В области сильных электрических полей (рис. 3, участок 3), когда начинается инжекция заряда в полимер, с учетом заряда емкости структуры металл–полимер–полупроводник можно расширить возможности метода переменного тока. Из зависимости напряжения на структуре от времени определяют временные зависимости заряда, инжектированного в полимер, и туннельного тока на всех этапах инжекции – от стадии заряда емкости структуры металл–полимер–полу-

проводник до пробоя полимерной пленки. Из временных зависимостей тока инжекции и напряжения на полимере можно получить их вольтамперную характеристику на участке туннельной инжекции, и, построив ее в однородных координатах, определить высоту потенциального барьера на инжектирующей границе раздела и толщину полимерной пленки. Минимальный уровень тока вольтамперной характеристики ограничен точностью измерений, а максимальный – значением I_0 . Из временных зависимостей напряжения на структуре металл–полимер–полупроводник на стадии инжекции, когда весь ток, пропускаемый через полимер, инжекционный, определяют сечения захвата зарядовых ловушек, изменение эффективного заряда полимера, заряд, инжектированный до пробоя. В области сильных полей устанавливают также напряжение микропробоя. Далее в полимер инжектируют заряд, а по изменению напряжения на поверхности структуры металл–полимер–полупроводник (рис. 3, участок 4) характеризуют зарядовую деградацию. Амплитуда токового воздействия уменьшается (рис. 3, участок 5). Вольтамперную характеристику измеряют сразу после сильнополюевого воздействия и получают полную картину зарядовой деградации полимера.

Рис. 3. Закономерности изменения генерируемых токов (I_0, I_c, I_i) (a, c) и развиваемых переменных напряжений (V_1) (b, d) на площадках контактов микровыступов пар трения металл–полимер–полупроводник при электротермомеханическом трении в зависимости от времени (τ): I_0, I_c, I_i – общий, емкостный и инжекционный токи.

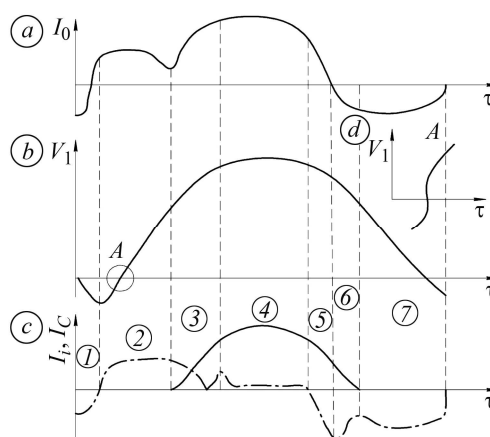


Fig. 3. Change of the generated currents (I_0, I_c, I_i) (a, c) and developed variable voltage (V_1) (b, d) at the contact areas of microprotrusions of the metal–polymer–semiconductor friction pairs with electric thermal mechanical friction depending on time (τ): I_0, I_c, I_i – common, capacitive and injection currents.

На следующем участке полярность токовой нагрузки изменяется на противоположную и поверхностные структуры пар трения металл–полимер–полупроводник начинают перезаряжаться (рис. 3, участок б). Емкость структуры разряжается переменным током. Из временных зависимостей напряжения в области сильных и слабых электрических полей (рис. 3, участок 7) при разряде емкости удастся определить те же параметры структуры металл–полимер–полупроводник, что и при ее заряде.

Выбор материалов для фрикционного взаимодействия пар трения металл–полимер–полупроводники. Тяжелонагруженные фрикционные узлы ленточно-колодочных тормозов лебедок нефтегазового оборудования работают в аperiodическом режиме торможения при удельных нагрузках до 1,2 МПа, скоростях скольжения до 10 м/с, поверхностных температурах до 1000°C. Испытывали (рис. 4) узел тормоза с парой трения металл (1)–полимер (3), в котором вставки из бора и оксида алюминия (Al_2O_3) расположены перпендикулярно и параллельно к поверхности трения.

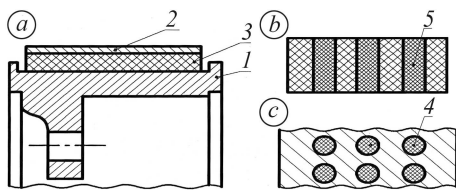


Рис. 4. Тяжелонагруженный фрикционный узел (а) ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки со встроенными полупроводниковыми элементами (b, c): 1 – тормозной шкив; 2 – тормозная лента; 3 – фрикционная накладка;

4 – полупроводниковые элементы бора, расположенные перпендикулярно поверхности трения; 5 – полупроводниковые элементы оксида алюминия, которые расположены параллельно поверхности трения.

Fig. 4. Heavily loaded friction unit (a) of the band-block brake of the draw work with built-in semiconductor elements (b, c): 1 – brake pulley; 2 – brake tape; 3 – friction pad; 4 – semiconductor elements of the boron, located parallel to the friction surface; 5 – semiconductor elements of aluminum oxide, located perpendicular to the friction surface.

Кристаллический бор состоит из икосаэдра-двадцатигранника, содержащего 12 атомов бора, α -ромбический – из икосаэдра, который образует искаженную кубическую упаковку, а β -ромбический – из структурных единиц, которые формируются из икосаэдров. Температура его плавления 2074°C , температура кипения 3658°C , плотность $2,31\dots 2,35\text{ g/cm}^3$. В обычных условиях бор проводит электрический ток плохо. При нагревании до 550°C его электрическая проводимость увеличивается на несколько порядков, причем знак проводимости меняется на электронный (n-типа) при низких температурах и на дырочный (p-типа) – при высоких (выше 550°C). Кристаллический бор является полупроводником и химически инертным. Чистый оксид алюминия находится в нескольких кристаллических формах: $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд), $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$.

В природе встречается только α -модификация оксида алюминия в виде минерала корунда с ромбоэдрической решеткой. Температура его плавления 2044°C , температура кипения 2980°C , плотность $3,99\text{ g/cm}^3$. Он является амфотерным и полупроводником n-типа. Таким образом, оксид алюминия Al_2O_3 и бор обладают постоянной и переменной проводимостью [8, 9].

Чтобы создать слой трения с высокими износотрибционными характеристиками непосредственно во время электротермомеханического торможения при совместном воздействии высоких поверхностных температур и удельных нагрузок на поверхностях трения, использовали пару трения материал “Ретинакс” (табл. 2), состоящий из модифицированной фенолформальдегидной смолы (25%), барита (35%) и асбеста (40%), и сталь 35ХНЛ (табл. 3 [10]).

Таблица 2. Физико-механические свойства материала ФК-24А “Ретинакс”

Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Предел прочности на сжатие, МПа	78,2	Теплоемкость, J/(kg·°C)	962,9
Твердость по Бринеллю, МПа	47,0	Температуропроводность, m^2/s	$3,8 \cdot 10^{-7}$
Сопротивление на срез, МПа	280,0	Водопоглощение, %	<1
Плотность, kg/m^3	2300,0	Жаропрочность (по Штраму) в классах	4
Теплопроводность, W/(m·°C)	0,65		

Таблица 3. Физико-механические свойства стали 35ХНЛ

Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Граница кратковременной прочности, МПа	686,0	Теплоемкость, J/(kg·°C)	479,0
Твердость по Бринеллю, МПа	245,0	Коэффициент линейного расширения, 1/°C	12,2·10 ⁻⁶
Предел текучести, МПа	490,0		
Плотность, kg/m ³	7840,0	Удельное электро-сопротивление, Ω·m	273·10 ⁻⁹
Теплопроводность, W/(m·°C)	44,0		

По мере износа контактный слой постоянно заменялся вновь образовавшимся. Фенолформальдегидная смола в фрикционных накладках при высоких температурах разлагается и взаимодействует с баритом, окружающей средой и поверхностью металлического элемента пары, создавая положительный градиент механических свойств. Барит в сочетании с асбестом обеспечивает “Ретинаксу” повышенную тепло- и износостойкость.

Для предотвращения схватывания с контактирующей поверхностью и налипания на нее фрикционного материала в состав “Ретинакса” ввели противозадирные присадки. Чтобы избежать наволакивания, этот материал необходимо применять только в таких типах узлов трения тормозов, где температура трения не превышает температуру объемного размягчения металлического элемента фрикционной пары. Для литейной стали она равна 800...900°C.

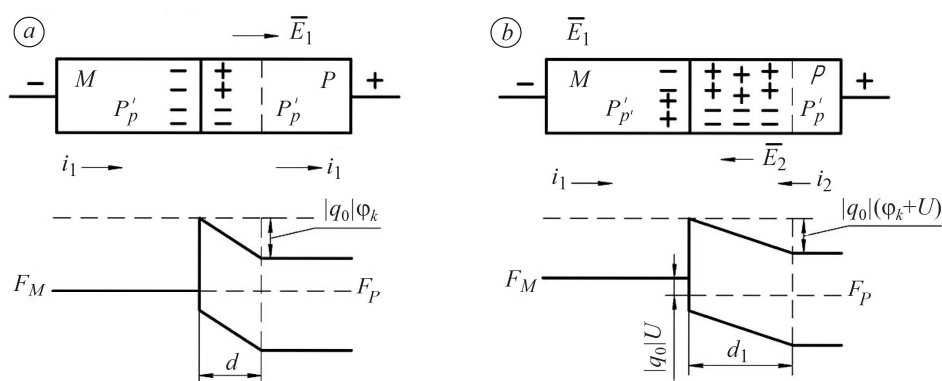


Рис. 5. Циркуляция триботочков через полупроводниковые переходы “бор–оксид алюминия” и “оксид алюминия–бор” до (а) и выше (б) поверхностной температуры 550°C;

M – металл; P – полимер; d, d_1 – толщина подповерхностного слоя пары трения

металл–полимер; E_k – напряженность электрического поля;

I, U – сила тока и напряжение в микроконтакте пар трения;

F_i – уровень Ферми; q – количество зарядов; ϕ_k – потенциал поля.

Fig. 5. Circulation of the tribocurrents through the semiconductor “boron–aluminium oxide” and “aluminium oxide–boron” up to (a) and above (b) the surface temperature of 550°C;

M – metal; P – polymer; d, d_1 – subsurface layer thickness of the friction pair metal–polymer; E_k

– electric field intensity; I, U – current force and voltage in a microcontact of friction pairs; F_i

– Fermi level; q – number of charges; ϕ_k – field potential.

Энергоемкие пары трения тяжело нагруженных фрикционных узлов работают следующим образом. При фрикционном взаимодействии пар трения в поверхностных и подповерхностных слоях возникают небольшие цилиндрические вкрапления из твердых полупроводниковых материалов типа оксида алюминия и карбида бора, которые, соответственно, расположены параллельно в полимерных

Таблица 4. Трибозлектрические и эксплуатационные параметры пар трения ленточно-коiledочного тормоза буровой лебедки У2-5-5

Пара трения	Знак заряда		Эксплуатационные параметры					
	-	+	сила трения $F_T = (S_1 + S_2)$, kN	динамический коэффициент трения f	температурные градиенты		Тормозной момент M_b , kN·m	Энергетическая интенсивность изнашивания накладок I , $\mu\text{g}/\text{J}$
					поверх- ностные T , $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$	объемные T_{vol} , $^{\circ}\text{C}/\text{m}$		
Элементы трения	Плотность элемента							
	Большая	Маленькая						
Сталь 35ХНЛ– ФК-24А	металл	полимер	259,6	0,38	40...60	6...15	188,2	2,5
Сталь 35ХНЛ– Al_2O_3	металл	полупроводник	200,4	0,25	60...100	15...20	145,3	1,98
В (до 550 $^{\circ}\text{C}$)– ФК-24А	полупроводник п-типа	полимер	168,4	0,24	4,5...8,5	2...3	122,1	1,4
В (после 550 $^{\circ}\text{C}$)– ФК-24А	полупроводник р-типа	полимер	152,3	0,18	4...8	1,5...2,5	110,4	1,25
Результаты экспериментальных исследований усовершенствованных пар трения			278,0	0,42	30...50	4...12	201,6	1,9

накладках, а в ободке шкива – перпендикулярно поверхности трения фрикционных элементов. Поэтому в них возникает коэффициент взаимного перекрытия при вращении тормозного шкива и формируются Т-образные энергетические мостики из различных типов контактов (n-n-тип проводимости до температуры бора 550°C и n-p-тип – выше 550°C).

Рис. 5 иллюстрирует циркуляцию триботочек через полупроводниковые переходы “бор–оксид алюминия” и “оксид алюминия–бор”.

При образовании перехода n-p-типа при температурах выше 550°C направление термоэлектродвижущей силы начнет совпадать со знаком полупроводникового перехода и потенциальный барьер со стороны полимерной накладки увеличится на величину $|q_0| U$:

$$|q_0| \varphi_- = |q_0| (\varphi_k - U), \quad (3)$$

где $|q_0| \varphi_-$ – потенциальный барьер, возникающий в контакте.

Вследствие этого толщина поверхностного слоя увеличится ($d_1 > d$), а следовательно, существенно уменьшится триботок и снизится энергонагруженность. При этом одинаковую толщину слоев металлического и неметаллических фрикционных элементов поддерживают за счет разного текущего и дальнейшего износа их рабочих поверхностей при соотношении 1:10. Кроме того, энергоемкость фрикционных пар снижается на 15...20%, что способствует повышению их ресурса на 10...15%.

Таким образом, вводя полупроводниковые материалы в поверхностные и приповерхностные слои пар трения тормозных устройств, можно уменьшить их энергонагруженность, увеличить ресурс, а следовательно, повысить эффективность торможений вследствие формирования новых пар трения с вновь образованными слоями материалов при фрикционном взаимодействии.

Усовершенствованные пары трения испытывали в ленточно-колодочных тормозах буровых лебедок У2-5-5 при естественном и вынужденном их охлаждении во время спуска в скважину на глубину 4108 м колонны бурильных труб. Колонну набирали из 102 свечей, из которых шесть УБТ (утяжеленные бурильные трубы), а остальные – ЛБТ (легкие) с общим весом 962,23 кН. При этом температура окружающей среды 20,2°C, а давление 0,0942 МПа.

Установили, что при сохранении основных эксплуатационных характеристик аналога (табл. 4) предлагаемые пары трения снижают энергетическую интенсивность износа накладок в 1,3 раза при заданных режимах нагружения, влияющих на разность потенциалов между микровыступами (табл. 5).

Таблица 5. Разность потенциалов между пятнами контактов микровыступов пар трения ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки

Пары трения	Сталь 35ХНЛ–ФК-24А	Сталь 35ХНЛ–Al ₂ O ₃	В (< 550°C)–ФК-24А	В (> 550°C)–ФК-24А	В (< 550°C)–Al ₂ O ₃	В (> 550°C)–Al ₂ O ₃
Разность потенциалов ΔV , mV	0,47	0,23	0,44	0,28	0,36	0,78

Наибольшую разность потенциалов наблюдали в паре трения бор (после 550°C)–оксид алюминия Al₂O₃, поскольку доля полупроводниковых вставок из бора и оксида алюминия, расположенных, соответственно, перпендикулярно (в ободке шкива) и параллельно (заподлицо рабочих поверхностей полимерных накладок) по площади в первом элементе составляет всего 14%, а во втором – 30%. В зависимости от диаметра и ширины обода беговой дорожки шкива формиру-

ется площадь вставок из бора и оксида алюминия, внедренного во фрикционные элементы из полимерного материала ФК-24А, расположенные на тормозной ленте.

ВЫВОДЫ

С помощью цилиндрических вставок из полупроводникового материала бора, введенных заподлицо рабочей поверхности обода шкива ленточно-колодочного тормоза, изменившего тип проводимости с n на p при 550°C, удалось создать дополнительное электрическое поле в структуре металл–полимер, а следовательно, уменьшить энергонагруженность трибосистемы тормоза.

РЕЗЮМЕ. З допомогою додаткових пар тертя метал–напівпровідник і полімер–напівпровідник, отриманих введенням у металеву пару тертя (обід шківа) циліндричних вставок з напівпровідникового матеріалу бору, який змінює тип провідності з n на p при 550°C, знижено енерговантаженість трибоспрями стрічково-колодочного гальма бурової лебідки.

SUMMARY. Using the additional friction pairs metal–semiconductor and polymer–semiconductor, obtained due to the introduction into the metal friction pair (brake pulley) cylindrical inserts made of semiconducting material boron, which changes the type of conductivity from n to p at a temperature of 550°C, it is possible to reduce the energyloading of the triboconjugation of the band-block brake of the draw work.

1. *Электродинамика* контактно-термического фрикционного взаимодействия в металло-полимерных парах трения / М. В. Киндрачук, А. И. Вольченко, Д. А. Вольченко, Д. Ю. Журавлев, В. М. Чуфус // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2018. – **54**, № 1. – С. 71–78.
2. *Влияние* водорода на износостойкость материалов в парах трения тормозных устройств / М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко, Н. М. Стебелецкая, А. В. Возный // *Фіз.-хім. механіка матеріалів.* – 2017. – **53**, № 2. – С. 135–141.
3. *Открытие* № 476. Закономерность реализации процесса электротермомеханического трения в рабочих слоях металлополимерных пар / А. Х. Джанахмедов, А. И. Вольченко, Н. А. Вольченко, Э. А. Джанахмедов, М. Я. Джавадов // *Науч. открытия.* – Баку: Апострофф, 2015. – С. 180.
4. *Криптона С. І.* Контактно-імпульсна фрикційна взаємодія. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2015. – 252 с.
5. *Вольченко Д. О.* Наукові основи керування знософрикційними властивостями металополімерних пар тертя гальм для запобігання термостабілізаційного явища: Дис. ... д-ра техн. наук. – Київ, 2011. – 424 с.
6. *Сесслер С.* Электреты. – М.: Мир, 1983. – 482 с.
7. *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. – 312с.
8. *Балицкий А. А., Колесников В. А., Вус О. Б.* Триботехнические свойства азотистых марганцевых сталей в условиях трения качения при добавлении в зону контакта порошков (GaSe)_xIn_{1-x} // *Металлофизика и новейшие технологии.* – 2010. – **32**, № 5. – С. 685–695. (*Balitskii A. A., Kolesnikov V. A., and Vus O. B.* Tribotechnical properties of nitrogen manganese steels under rolling friction at addition of (GaSe)_xIn_{1-x}, powders into contact zone // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii.* – 2010. – **32**, № 5. – P. 685–695.)
9. *Klammann D.* Lubricants and related products. – Synthesis, properties, applications: Int. Standards (Verlag Chemie GmbH: 1984, 126 p.).
10. *Чичинадзе А. В., Белоусов В. Я., Богатчук И. М.* Износостойкость фрикционных полимерных материалов. – Львов: Изд-во при Львовск. гос. ун-те, 1989. – 142 с.

Одержано 18.10.2017