

УДК 629.113: 621.2.082.18

## ЭЛЕКТРОДИНАМИКА КОНТАКТНО-ТЕРМИЧЕСКОГО ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПАРАХ ТРЕНИЯ

М. В. КИНДРАЧУК<sup>1</sup>, А. И. ВОЛЬЧЕНКО<sup>2</sup>, Д. А. ВОЛЬЧЕНКО<sup>2</sup>,  
Д. Ю. ЖУРАВЛЕВ<sup>2</sup>, В. М. ЧУФУС<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный авиационный университет, Киев;*

<sup>2</sup> *Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа*

Проиллюстрирован новый подход к созданию модифицированных материалов для пар трения ленточно-колодочных тормозов буровых лебедок.

**Ключевые слова:** пара трения, пятна контактов микровыступов, материалы пар трения, микротермобатареи и микроконденсаторы, потенциальный барьер, энергетические уровни Ферми.

Объяснить процессы, явления и эффекты в приповерхностных слоях пар трения при их электротермомеханическом нагружении с привлечением нанотрибологии – актуальная научная задача.

Пары трения тормозных устройств можно представить как термоэлектрогенератор, генерирующий ток в результате явления Зеебека. Электрическая сила тока в замкнутой цепи, состоящей из разнородных материалов “металл–полимер”, “металл–полупроводник”, “металл–полимер–полупроводник”, возникает при различных контактных температурах. Контактная разность потенциалов  $\Delta\varphi$  зависит от разности потенциалов  $\varphi_1 - \varphi_2$  выхода частиц из фрикционно взаимодействующих материалов, абсолютной температуры  $T$  в зоне контакта, где сконцентрированы  $n_1$  и  $n_2$  электроны, т.е.

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 + \frac{kT}{q} \ln \frac{n_1}{n_2}. \quad (1)$$

Здесь  $k$  – постоянная Больцмана;  $q$  – электрический заряд.

Из-за разности температуры контактирующих поверхностей фрикционного узла тормозного устройства в цепи возникает термоэлектродвижущая сила, значение которой пропорционально разности температур поверхностей  $\varepsilon_T = \alpha(T_1 - T_2)$ . Постоянная  $\alpha$  тем больше, чем существеннее разница между концентрациями частиц у поверхности контактирующих материалов фрикционного узла.

Ранее описаны [1–7] процессы, происходящие при взаимодействии поверхностей трения тормозных устройств; проанализированы способы формирования микротермобатарей и их работа в парах трения; экспериментально определены генерируемые токи на поверхности трения. Оценены направления составляющих электрических токов [4], которые генерируются на поверхности трения тормозных устройств, а также случаи использования слоистых полупроводниковых порошков в зоне контакта в качестве твердых смазок [8, 9].

Цель работы – применить полупроводниковые материалы и пленки полимерных накладок при формировании в структуре “металл–полимер–полупроводники” микротермобатарей и микроконденсаторов для снижения энергонагруженности пар трения тормозных устройств.

**Состояние рабочей поверхности металлополимерных элементов при фрикционном взаимодействии с использованием фракталов.** Такая оценка рабочей поверхности металлического элемента при фрикционном взаимодействии пятен контактов микровыступов пар трения актуальна в трибологии [7]. Привлекает внимание теория сильно возбужденных состояний в кристаллах металлического фрикционного элемента, изучение пластичности и прочности его поверхностных слоев. При этом, исследуя пластическую деформацию, необходимо соблюдать законы поведения неоднородных сильно неравновесных систем, претерпевающих локально-структурные превращения и стремящихся к равновесию [8].

Генерирование энтропии в рассматриваемой зоне кристалла – это локальный кинетический структурный переход, способствующий зарождению пластического сдвига и отличающийся от термодинамического. Такое превращение должно отвечать неравновесной термодинамике при фрикционном взаимодействии пар трения тормозных устройств. При этом в каждой точке деформируемых пятен контактов микровыступов в заданный момент времени существует только одна система плоскостей скольжения, теряющая сдвиговую устойчивость. Структурные элементы начинают двигаться как целое, испытывая трансляцию (передачу) и кристаллографический поворот. Поворотные моды деформации формируют поле поворотных моментов и обеспечивают внутри структурного элемента выход дислокаций из своих плоскостей скольжения, что вызывает многосистемную ориентацию ячеистой дислокационной субструктуры с последовательным множественным скольжением пятен контактов микровыступов как вихря материальных поворотов кристаллографических сдвигов на цилиндрической поверхности. Взаимосвязь сдвигов и поворотов свидетельствует, что элементарным актом пластической деформации является не сдвиг, а трансляционно-ротационный вихрь, который по своему масштабу может быть на нано-, микро- и макроуровнях. Движение всей иерархии структурных уровней деформации и обуславливает ее вихревой характер, способствуя возникновению новых более эффективных, чем от движения отдельных дислокаций, каналов диссипации энергии.

**Работа выхода частиц с пятен контактов металлополимерного трибосопряжения.** Оценим зависимость работы выхода электронов и ионов с рабочих поверхностей металлополимерных пар трения и их поверхностной температуры от импульсных удельных нагрузок, действующих на пятна контактов микровыступов (рис. 1). Поверхностные температуры полимерных накладок были ниже (рис. 1а–с) и выше (рис. 1d) допустимых для их материалов, несмотря на то, что в контактах взаимодействия они были одинаковыми.

Проанализируем температуры, возникающие на поверхностях пятен микровыступов при различных типах контакта при фрикционном взаимодействии (рис. 1). Участок I на рис. 1с смещен влево, а на рис. 1d вообще отсутствует, расширяясь на участке II. Это можно объяснить тем, что в первом случае начинаются деструктивные процессы выгорания связующих компонентов материалов в поверхностных слоях полимерной накладки и на ее поверхности образуются пятна жидкости, а во втором они заканчиваются увеличением их количества. Третий участок во всех случаях характеризуется динамическим равновесием процессов генерации и ангиляции дефектов с образованием микропор и микротрещин в поверхностных слоях металлополимерных пар трения. В результате изменений площади поверхностей металлополимерных пар трения работа выхода электронов и ионов с поверхностей трения уменьшается (рис. 1а). Жидкая фаза вызывает увеличение удельных нагрузок в парах трения (рис. 1с, d). Работа выхода ионов на них больше, нежели выхода электронов, вследствие преобразования электронов в ионы. Поверхностная температура монотонно повышается, не имеет экстремумов и коррелирует с работой выхода электронов и ионов.

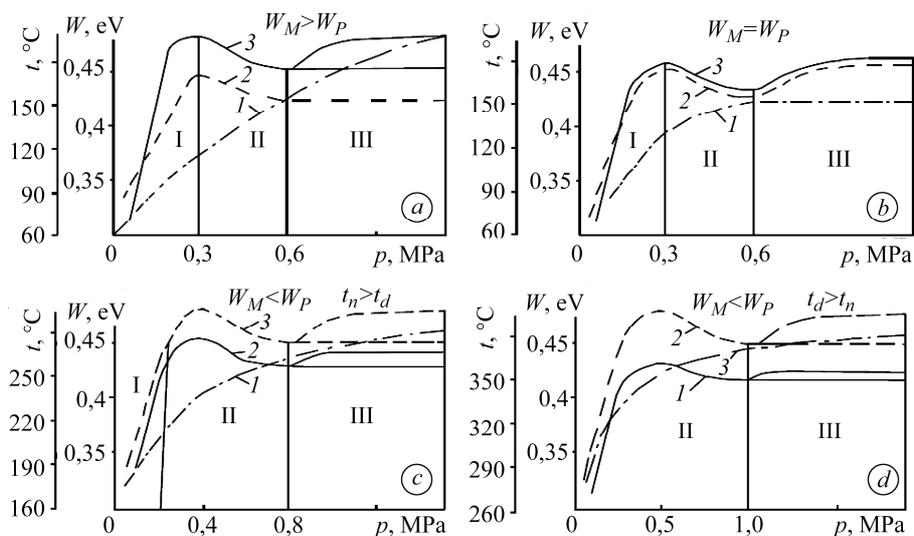


Рис. 1. Зависимость работы выхода электронов и ионов с рабочих поверхностей металлополимерных пар трения и их поверхностной температуры от импульсных удельных нагрузок, действующих на пятна контактов микровыступов с температурой ниже (*a, b*) и выше (*c, d*) допустимой ( $t_d$ ): I – область упругой деформации поверхностных слоев материалов элементов трения, II и III – области пластических деформаций без и с большой плотностью дислокаций;  $t_n$  – поверхностная температура полимера.

Fig. 1. Dependence of the operation of the electrons and ions output from the working surfaces of metal-polymer friction pairs and their surface temperature on the pulse specific loads influencing the contact spots of micro-irregularities with lower (*a, b*) and higher (*c, d*) permissible temperature: I – elastic deformation area of surface layers of friction element materials, II and III – areas of plane deformation without and with large dislocation density;  $t_n$  – surface temperature of polymer.

Однако на участках III (рис. 1*b, c*), если  $W_M = W_P$  и  $W_M < W_P$ , (где  $W_M, W_P$  – работа выхода электронов и ионов с поверхностей материалов) в интервале температур, соответственно, ниже и выше допустимых для материалов полимерной накладки зафиксировали постоянную и термостабилизационную температуры. Первая возникает, когда кратковременно количество теплоты, генерируемой на поверхностях трения, отводится от матовых поверхностей металлического фрикционного элемента в окружающую среду.

**Потенциальные барьеры и условия равновесия при контактно-термическом взаимодействии термоэлементов микротермобатарей в металлополимерных парах трения тормозов.** Формирующиеся полупроводниковые пленки на поверхностях фрикционных накладок и рабочая поверхность металлического фрикционного элемента (обод барабана или шкива) обладают потенциальным барьером, который предотвращает утечку электронов (дырок). В *n*-проводнике этот барьер возникает между отрицательным зарядом у поверхности и положительным внутри, формируя таким образом элементы микротермобатарей.

В паре “металл–металл” (второй слой металла получен на поверхности фрикционной накладки при массопереносе) электроны, идущие от одного элемента (например, обода шкива) и пересекающие плоскость контакта, сразу же переходят в состояние равновесия с электронами второго элемента. При этом никаких сил и потенциальных барьеров, препятствующих обмену электронами, не возникает. В данном случае равновесие между электронами обусловлено тем, что уровни Ферми совпадают с одинаковыми электрическими уровнями металлов. В то же время не важно, будут ли нижние слои пленок отличаться по высоте,

поскольку электроны не могут обмениваться на уровнях, где один из них попадает в запрещенную зону пленочного полупроводника.

Если работы выхода двух слоев металлических пленок различны ( $W_1 > W_2$ ), то возникает разность потенциалов, которую экспериментально определить сложно, поскольку имеем дело с чужеродными поверхностными слоями. В действительности измеренная разность – это разность контактных потенциалов.

Для достижения условий равновесия необходимо равное распределение электронов по уровням выше потенциального барьера по обеим сторонам контакта, что обуславливает равные диффузионные токи в обоих направлениях в термоэлементах микротермобатарей. Для металлов такое распределение максвелловское ( $\nu(T)$  электронов в  $1 \text{ см}^3$ ), нижний уровень которого находится на уровне Ферми. Распределение электронов в слое проводимости микротермобатареи обычно строго максвелловское, но нижняя граница этого слоя пленки лежит выше уровня Ферми металла, поскольку пленка проводимости термоэлемента микротермобатареи содержит менее чем  $\nu(T)$  электронов в  $1 \text{ см}^3$ . Уровни Ферми в пленках металла и проводника термоэлементов микротермобатареи совпадут, если уровень Ферми в слое пленки проводника будет находиться где-то между донорным уровнем и нижней границей слоя.

При таком взаимодействии равновесному состоянию отвечает граничный барьер и поэтому диффузионный ток от металла, т.е. от поверхности металлического фрикционного элемента, ограничен высотой барьера  $W_1$ . Чтобы поддержать постоянный диффузионный ток от полупроводникового термоэлемента, необходимо, чтобы наклон граничного барьера проводящего слоя совпадал с уровнем Ферми металла и на него не влияла высота барьера ( $W$ ). Это обстоятельство дает основание называть указанную высоту работой выхода электронов из контакта.

Используя теорию Шоттки, определим наклон кривой потенциального барьера при условии, что все доноры в его области ионизированы. Выходим из следующих рассуждений. Барьер представляет собой поле, которое приводит в движение электроны, появляющиеся в этой области, и направляет их в термоэлемент микротермобатареи. При этом поступление новых электронов из металла через верхнюю границу потенциального барьера ограничено. Следовательно, для ионов донора маловероятна рекомбинация с электронами.

На рис. 2а изображен потенциальный барьер между металлом и термоэлементом микротермобатареи в условиях равновесия, т.е. без приложения напряжения. Со стороны металла барьер очень крут, поскольку в его образовании задействовано достаточное количество ионов решетки (вертикальная линия). В термоэлементе микротермобатареи наклон невелик.

Рис. 2б иллюстрирует  $n$ -проводимость термоэлемента микротермобатареи с учетом таких соображений:

– высота ( $AB$ , равная  $W$ ) барьера над уровнем Ферми составляет 1 eV;

– донорный уровень и верхняя граница  $D$  заполненного слоя пленки находятся, соответственно, при 0,2 и 1,2 eV.

В нижней границе слоя пленки проводимости плотность доноров в  $1 \text{ см}^3$  составляет  $n = 10^{16}$ ; все доноры ионизированы в области барьера; относительная диэлектрическая постоянная слоя пленки термоэлемента  $\epsilon_r = 10$ .

Вычисление базируется на дифференциальном отношении Пуассона между дивергенцией потенциала и плотностью пространственного заряда:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = \frac{\rho}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0} = \frac{10^6 n \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – электросопротивление слоя пленки,  $\Omega \cdot \text{м}$ ;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная вакуума в контакте, которая равна  $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ . Если высоту барьера над

нижней границей слоя пленки проводимости внутри металла обозначить через  $\varphi$  (V), а его толщину через  $y$  (cm), то, заменяя  $x$  (m) на  $y$  (cm), интегрированием уравнения (2) получим:

$$\varphi = 9,05 \cdot 10^{-7} \frac{n}{\epsilon_r} y^2. \quad (3)$$

Следовательно, для всего барьера, т.е. при  $y = y_0$ ,

$$W = 9,05 \cdot 10^{-7} \frac{n}{\epsilon_r} y^2, \text{ V}. \quad (4)$$

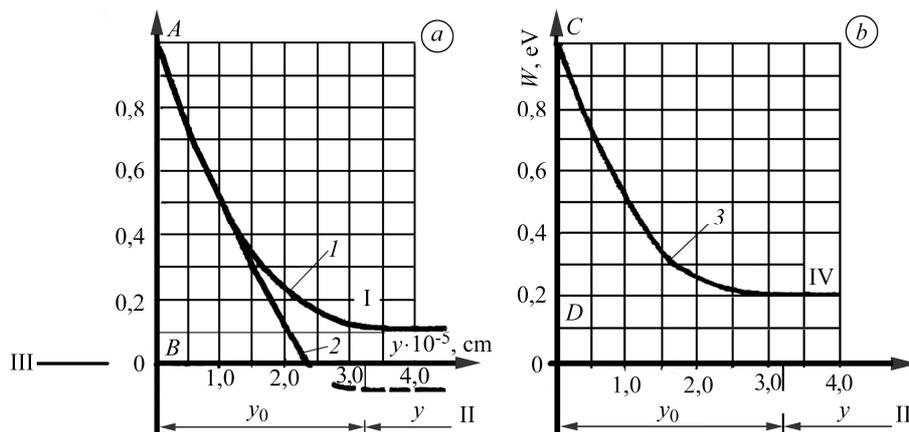


Рис. 2. Потенциальный барьер между металлом (a) и полупроводником (b) в паре трения: I – нижняя граница сжимаемого слоя; II – уровень донора; III – уровень Ферми; IV – верхняя граница сжимаемого слоя.

Fig. 2. Potential barrier between a metal (a) and a semiconductor (b) in a friction pair: I – the lower boundary of the reductive layer; II – donor level; III – Fermi level; IV – the upper boundary of the reductive layer.

Электроны, чтобы перейти в полупроводниковый термоэлемент с уровня Ферми (рис. 2b), должны преодолеть барьер в 1 eV, а электроны нижней поверхности слоя пленки (термоэлемента) микротермобатареи, чтобы войти в обод металлического фрикционного элемента, – барьер 0,2 eV (условный отрезок CD). Это возможно только в случае их приближения к уровню Ферми металла, поскольку только тут существуют свободные уровни. Работа выхода для электронов, идущих из металла к слою пленки полупроводника, составляет 1 eV, а для электронов, движущихся в противоположном направлении из заполненного слоя пленки (термоэлемента) микротермобатареи, равна 0,2 eV. Различные значения работы выхода электронов (1 и 0,2 eV), вероятно, отвечают геометрической интерпретации специальных условий испытаний, в частности, чистого  $n$ -проводника с низким уровнем Ферми, являющегося термоэлементом микротермобатареи (рис. 2b).

**Контакт рабочей поверхности металлического элемента трения и пленки полупроводника, сформированной на поверхности фрикционной накладки.** Рассмотрим случай, когда пленка металлического обода фрикционного элемента и пленка полупроводника, сформированная на поверхности фрикционной накладки, являются  $n$ -проводниками. В равновесном состоянии уровни Ферми в металле и полупроводнике совпадают. Предположим теперь, что приложено отрицательное напряжение  $U = -0,3$  V, которое смещает уровень Ферми полупроводника на  $-0,3$  V относительно уровня Ферми металла. Это означает, что характер наклона кривой I (рис. 3) изменился таким образом, что напряженность поля

в граничной области полупроводника стала слабее, или, другими словами, создается меньшее количество ионизированных доноров.

Плотность донорных ионов остается примерно постоянной:

$$n = \nu(T) e^{-5800\Delta iE/T}, \quad (5)$$

где  $\nu(T) = 5 \cdot 10^{15} T^{1,5}$  – общее число электронов в  $1 \text{ cm}^3$  слоя пленки полупроводника;  $T$  – усредненная его температура;  $\Delta iE/T$  – разность потенциалов при собственной проводимости, создающихся поверхностями слоя пленки полупроводника.

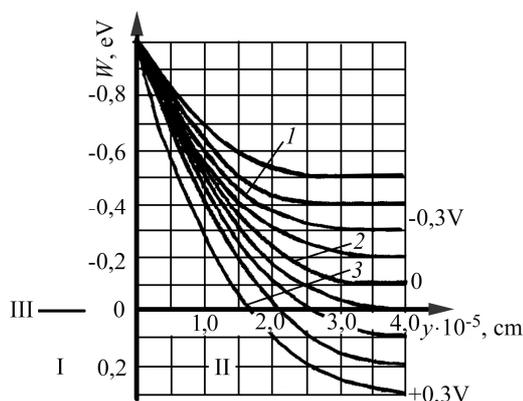


Рис. 3. Распределение потенциала вокруг границы между металлом (I) и полупроводником (II) в паре трения: кривая 2 – обратимая; кривые ниже и выше кривой 1 имеют наклон в прямом направлении; кривые выше кривой 3 – в обратном (III – уровень Ферми).

Fig. 3. Potential distribution around the boundary between a metal (I) and a semiconductor (II) in a friction pair: curve 2 – inverse; curves below and above curve 1 are characterized by a slope in the forward direction; curves above curve 3 – by a slope in the backward direction (III – Fermi level).

В данном случае количество  $n$ -электронов, находящихся в любой момент времени в слое пленки полупроводника, является результатом равновесия между электронами, попадающими в пленку и уходящими из нее. Например, при температуре вспышки на контакте металлополимерных пар трения ленточно-колодочного тормоза 1500 К общее количество электронов в  $1 \text{ cm}^3$  составляет  $2,9 \cdot 10^{20}$ . При этом уменьшение количества донорных ионов связано с утончением барьерного слоя. Его ширина, согласно уравнению (5), уменьшилась от  $3,15 \cdot 10^{-5}$  до  $2,57 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$ . С другой стороны, если приложить напряжение  $U = 0,3 \text{ V}$ , то толщина слоя проводящей пленки уменьшится и барьер расширится до значения  $y_0 = 3,64 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$  (кривая 3 на рис. 2).

Ширина потенциального барьера влияет на процесс выпрямления тока. Известно, что в термоэлементе полупроводника с  $n$ -проводимостью электроны движутся из граничной области в полупроводник. Следствием этого является обеднение области потенциального барьера носителями тока, что обуславливает плохую ее проводимость. Поэтому Шоттки назвал ее обедненным слоем, который становится шире и его сопротивление возрастает, при этом приложенное напряжение (здесь  $0,3 \text{ V}$ ) заставляет носителей тока двигаться из металла в  $n$ -полупроводник. При напряжении противоположного знака обедненный слой становится тоньше и его сопротивление ослабевает, т.е. ток через него проходит значительно легче. Таким образом, приложенное напряжение вызывает токи в том или другом направлении, изменяет наклон потенциального барьера в полупроводнике, но обычно не меняет его наклона.

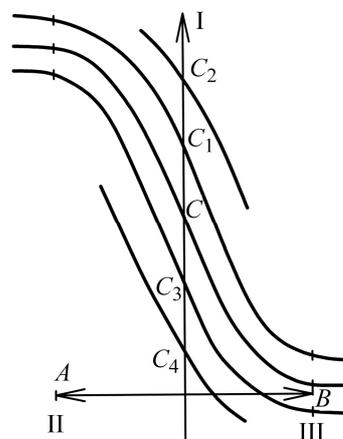
Носителями тока, на пути которых возникает это сопротивление, являются электроны чистого  $n$ -проводника. В практических условиях, т.е. во время работы металлополимерных пар трения тормозных устройств, существуют также неосновные носители, в данном случае – дырки. Дело в том, что они не исчезают из области граничного барьера под воздействием градиента потенциала, как основ-

ные, а способствуют переносу большей части тока внутрь обедненных слоев пленки. Запирающее или обратное направление выпрямляющего контакта всегда совпадает с направлением движения основных носителей тока от металлического к полупроводниковому термоэлементу.

**Переходы типа  $p-n$  в микротермобатареях металлополимерных пар трения тормозных устройств.** Представим себе полупроводник  $p$ -проводимости (термоэлемент) на металлическом фрикционном элементе в контакте с полупроводником  $n$ -проводимости (термоэлемент), сформировавшимся на поверхности полимерной фрикционной накладки. Поверхностные барьеры термоэлементов могут совпадать так, как показано на рис. 4 (кривая 1). При таком положении на контактной поверхности у точки  $C$  заряды не появляются. На самом деле в них нет потребности, так как между отрицательными акцепторными ионами в обедненном слое  $p$ -проводника и положительными донорными ионами  $n$ -проводника возникают градиенты потенциала. Последние не имеют знака, а дополняют друг друга, образуя общий градиент, способный перемещать электроны вправо в  $n$ -проводнике и дырки влево в  $p$ -проводнике из-за его акцепторных свойств, вследствие чего образуется широкий обедненный слой  $AB$  (рис. 4). Если бы носители тока не удалялись из-за градиента, то существовал бы установившийся диффузионный поток дырок слева и электронов справа, вследствие чего носители не рекомбинировались бы вблизи контакта и исчезли. При отсутствии внешнего поля в  $p-n$ -переходе возникает заметный градиент потенциала. В равновесном состоянии общая высота потенциального барьера как раз достаточна, чтобы не дать возможность протекать току по цепи микротермобатареи, т.е. ток, циркулируемый в цепи, равен противоположному диффузионному току.

Рис. 4. Распределение потенциала вокруг  $p-n$ -перехода в термоэлементах микротермобатарей в металлополимерных парах трения тормозных устройств (I – отрицательный потенциал; II, III –  $p$ - и  $n$ -проводники).

Fig. 4. Potential distribution around the  $p-n$  transition in thermoelements of micro-thermobatteries in metal-polymer friction pairs of braking devices (I – negative potential; II, III –  $p$ - and  $n$ -conductors).



Наложение внешнего напряжения не изменит знак градиента, но повлияет на его значение. При этом напряжение соответствующего знака сблизит основные уровни в  $n$ - и  $p$ -проводниках.

В этом случае равновесие больше не поддерживается и начинает протекать диффузионный ток. В случае асимметрии (рис. 4) точку  $C$  считают неподвижной. В действительности, из-за разности в подвижности положительных и отрицательных носителей тока возникает отклонение от асимметрии. Так, смещение точек  $C_1$  и  $C_2$  вверх от точки  $C$  свидетельствует, что большинство микротермобатарей будет работать в режиме микротермоэлектрогенераторов, а смещение точек  $C_3$  и  $C_4$  вниз от точки  $C$  – что большинство микротермобатарей работает в режиме микротермоэлектрохолодильников. В первом случае металлополимерный контакт пар трения тормозных устройств будет нагреваться, а во втором – охлаждаться.

Сформированные на поверхностях металлополимерных пар трения тормозных устройств термоэлементы, в частности полупроводники с  $p-n$ -переходом и объединенные в микротермобатареи, обладают выпрямляющими свойствами.

Прямое направление потенциального барьера связано с напряжением градиента при условии, что внешнее напряжение отклоняет электроны влево, а противоположное выполняет функции запирающего. Однако для этого необязательно, чтобы  $n$ - $p$ -проводники были разделены связующими компонентами термоэлементов. На практике принято вводить в полупроводник (термоэлемент) доноры и акцепторы, чтобы образовать  $p$ - $n$ -переход где-то внутри термоэлемента, который является уже отдельной микротермобатарей. Например, германиевый пленочный слой можно снабдить индиевым электродом с одной его стороны и сурьмяным слоем – с другой, затем нагреть так, чтобы атомы электродов диффундировали внутрь германиевой решетки, в результате чего атомы индия становятся акцепторами, а атомы сурьмы – донорами. Такая рекомбинация электронов и дырок в пленочных микротермобатареях позволяет изменять градиент напряжения как во внутренней, так и во внешней цепи за счет диффузионных токов, которые влияют на работу выхода электронов из металлического фрикционного элемента.

### ВЫВОДЫ

Выявлено, что движущим фактором при работе микротермобатарей в режимах микротермоэлектрогенераторов и микротермоэлектрохолодильников является градиент потенциала в их термоэлементах, формирующийся за счет рекомбинации электронов и ионов в слоях полупроводниковых пленок с  $p$ - $n$ -типами проводимости.

*РЕЗЮМЕ.* Проілюстровано новий підхід до створення модифікованих матеріалів для пар тертя стрічково-колодкових гальм бурових лебідок.

*RESUME.* A new approach to the creation of modified materials for friction pairs of band-shoe brakes of draw-works is presented.

1. *Новый* подход к тепловой динамике трения фрикционных узлов тормозных устройств (Ч. 4) / А. И. Вольченко, М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко, В. Я. Малык // Проблемы тертя та зношування. – 2011. – Вип. 56. – С. 55–70.
2. *Нанотрибология* при контактно-термическом взаимодействии в металлополимерных парах трения тормозных устройств / М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко, С. И. Криштопа, Д. Ю. Журавлев // Проблемы тертя та зношування. – 2012. – Вип. 58. – С. 5–16.
3. *Патент* 2459986 С2 России, МГОС F16D 65/82, 51/10. Способ определения составляющих электрических токов в парах трения “полимер–металл” барабанно-колодочного тормоза при их нагревании в стендовых условиях (варианты) / А. И. Вольченко, Н. А. Вольченко, Д. А. Вольченко, И. В. Бачук, А. Н. Горбей, П. А. Поляков. – Опубл. 27.08.2012; Бюл. № 24.
4. *Патент* 2462628 С2 России, МГЖ F16D 65/82, F16D 51/10. Способ определения направлений составляющих электрических токов в парах трения “полимер–металл” барабанно-колодочного тормоза при их нагревании в стендовых условиях / А. И. Вольченко, Н. А. Вольченко, Д. А. Вольченко, И. В. Бачук, А. Н. Горбей, П. А. Поляков. – Опубл. 27.09.2012; Бюл. № 27.
5. *Трибология* / А. И. Вольченко, М. В. Киндрачук, Д. А. Вольченко, Н. А. Вольченко, Д. Ю. Журавлев, П. С. Красин. – К.; Краснодар: Плай, 2015. – 372 с.
6. *Мамедов Р. К.* Контакты металл–полупроводник с электрическим полем пятен. – Баку: Госуниверситет, 2013. – 232 с.
7. *Емельянов О. А.* Локальное разрушение тонких металлических пленок при электродинамических нагрузках // Журн. техн. физики. – 2008. – **78**, вып. 7. – С. 48–56.
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)<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub> // Металлофизика и новейшие технологии. – 2010. – **32**, № 5. – С. 685–695.
9. *Klammann D.* Lubricants and related products. – Synthesis, properties, applications: Int. Standards (Verlag Chemie GmbH: 1984, 126 p.).

Получено 07.07.2017