

## МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ В ПРОЦЕССЕ ТРЕНИЯ

*Пантелеев К.В., Свистун А.И., Жарин А.Л.*

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь  
e-mail: psf@bntu.by

*Рассмотрены вопросы измерения работы выхода электрона по контактной разности потенциалов; экспериментально обоснована возможность их применения для оценки и контроля состояния поверхности трения. Разработаны методики и приведены примеры их применения для определения работы выхода электрона при трибологических исследованиях с применением зонда Кельвина. Показано, что исследование работы выхода электрона непосредственно в процессе трения позволяет определить режимы трения, изучать динамику дефектов на поверхности трения, выявлять очаги разрушения на локальных микронеровностях.*

**Ключевые слова:** работа выхода электрона, контактная разность потенциалов, зонд Кельвина, поверхность трения, износ.

### Введение

Установление закономерностей изнашивания сопряженных твердых тел под действием сил трения является важнейшей задачей обеспечения стабильности качества и надежности при эксплуатации изделий триботехнического назначения. Процесс изнашивания, обусловленный необратимым изменением рабочих свойств поверхностных слоев, является интегральным, т.е. суммирующим результатом действия различных процессов, протекающих во времени на локальных микроучастках поверхности. Контролируя физико-химическое состояние поверхностей в процессе трения можно судить об однородности протекающих процессов на поверхности раздела и механизмах изнашивания поверхностей трения.

Методы, основанные на регистрации изменений работы выхода электрона (РВЭ), являются достаточно информативными для контроля состояния подвижных сопряженных поверхностей трения вследствие зависимости РВЭ от деформации и изменения дефектной структуры, изменения химического и фазового состава, адсорбции и десорбции, окружающих узлов трения газов и молекул смазки и иных процессов, обычно протекающих в области фрикционного контакта [1].

Измерения РВЭ позволяют контролировать состояние поверхности трения в пределах первых мономолекулярных слоев и обеспечивают интегральную оценку физико-химических характеристик относительно всей рабочей поверхности.

Существующие методы измерения РВЭ, например по контактной разности потенциалов (КРП) допускают бесконтактные модификации, т.е. позволяющие проводить измерения не внося возмущений в процесс трения, а также не требующие создания каких-либо специфических условий, например вакуумных, или, наоборот, могут быть адаптированы для работы в контролируемых условиях окружающей среды и смазки, что делает их привлекательными для разработки бесконтактных встраиваемых датчиков контроля поверхностной структуры и физико-химического состояния поверхностей элементов узла трения непосредственно в процессе эксплуатации.

Целью настоящих исследований являлся анализ методов измерения РВЭ с точки зрения обеспечения возможности контроля поверхностной структуры и физико-химических характеристик материалов непосредственно в процессе трения, а также обеспечение теоретических основ для разработки бесконтактных встраиваемых датчиков контроля состояния

трущихся поверхностей элементов реальных узлов трения при их эксплуатации.

Наиболее удобными, с точки зрения непрерывного неразрушающего контроля структурного и физико-химического состояния поверхности непосредственно в процессе работы узла трения, являются методы определения РВЭ по КРП [2]. Эффект КРП впервые показан в 1800 г. Александром Вольта. В 1898 г. Лорд Кельвин разработал способ измерения КРП, который в научно-технической литературе встречается под названием – зонд Кельвина (Kelvin probe).

Суть метода Кельвина и практически всех его модификаций заключается в измерении КРП между исследуемой поверхностью и относительно стабильной поверхностью эталонного образца.

**Методы исследований**

*Метод Кельвина–Зисмана* [3]. Наиболее широко для исследований применяется метод Кельвина, модифицированный Зисманом, принципиальная схема которого показана на рисунке 1а. В нем измеряемый  $M_1$  и эталонный  $M_2$  образцы формируют плоский конденсатор емкостью  $C_{12}$ , одна из пластин которого вибрирует под действием электромеханического вибратора. Вследствие различия РВЭ материалов пластин конденсатор будет иметь заряд, в соответствии с уравнением:

$$Q = C_{12} \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{e} = C_{12} U_{CPD} \quad (1)$$

где:  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – РВЭ исследуемой и эталонной поверхностей, соответственно;  $e$  – заряд электрона;  $U_{CPD}$  – КРП.

Емкость конденсатора  $C_{12}$  при периодическом изменении расстояния между эталонным

и измеряемым образцами вследствие вибраций электромеханического вибратора будет периодически изменяться. При достаточно большом сопротивлении резистора  $R_L$  заряд не будет успевать стекать с обкладок конденсатора за период изменения емкости, что вызовет появление на входе предусилителя переменного сигнала. С помощью внешнего источника на конденсатор подается напряжение компенсации  $U_{comp}$  такой величины, чтобы переменный сигнал стал нулевым, т.е. чтобы оно скомпенсировало КРП. При этом  $U_{comp} = -U_{CPD}$ . В современных измерителях КРП напряжение компенсации вырабатывается автоматически с непрерывным контролем значения КРП.

Ток в конденсаторе Кельвина описывается уравнением:

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(C_{12}U_{CPD})}{dt} = U_{CPD} \frac{dC_{12}}{dt} + C_{12} \frac{dU_{CPD}}{dt}. \quad (2)$$

В методе Кельвина–Зисмана полагается, что КРП не изменяется за период колебаний эталонного образца, т.е. второй член уравнения (2) полагается равным нулю, а сигнал формируется только за счет изменения емкости, вызванного колебаниями пластины (первый член уравнения (2)). На рисунке 1б показана модификация метода Кельвина–Зисмана, адаптированная нами для трибологических исследований поверхности трения.

*Метод невибрирующего конденсатора.* В разработанном нами методе невибрирующего конденсатора (НВКРП) [4] эталонный образец и исследуемая поверхность также формируют плоский конденсатор, однако эталонный образец не вибрирует, а перемещается относительно исследуемой поверхности. На рисунке 2 схематично показана реализация метода НВКРП.

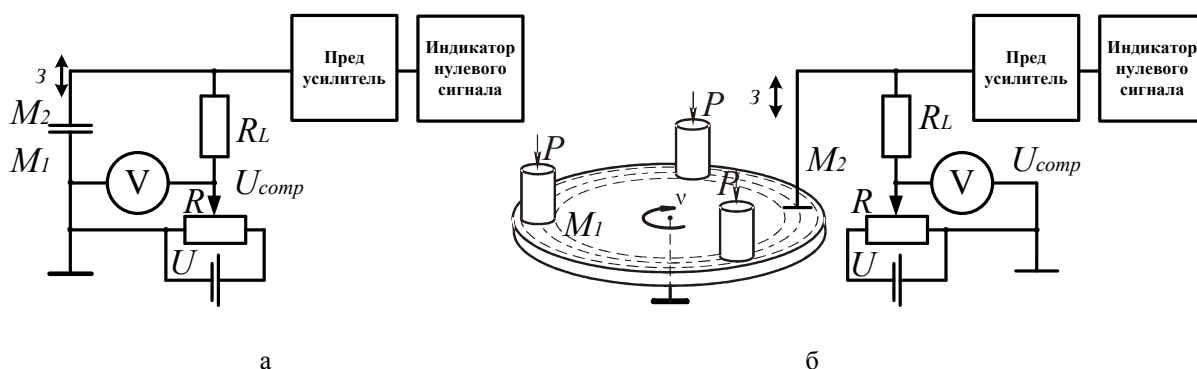


Рисунок 1 – Функциональная схема зонда Кельвина (а) и его модификация для анализа поверхности трения (б) [3]

Если поверхность не имеет значительных геометрических особенностей, то членом  $dC_{12}/dt$  в уравнении (2) можно пренебречь, а член  $dU_{CPD}/dt$  вносит основной вклад в выходной сигнал. Выходной сигнал возникает при прохождении зонда над участками поверхности с геометрическими неоднородностями, а также над участками поверхности с потенциальной неоднородностью. Метод НВКРП обеспечивает получение не абсолютного значения КРП, а ее производной, т.е. позволяет отслеживать появление и развитие в процессе трения «аномальных» зон на поверхности, при этом типичные проблемы классического метода КРП (влияние окружающей среды и др.) практически исчезают.

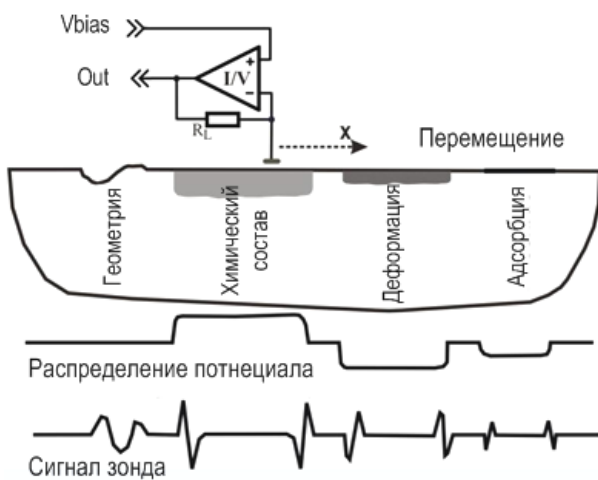


Рисунок 2 – Схематичное представление работы не-вибрирующего зонда Кельвина [3]

Практическая реализация метода НВКРП достаточно проста и может применяться для контроля поверхностной структуры и физико-химического состояния поверхностей в процессе эксплуатации реальных узлов трения.

Датчиками НВКРП может быть оснащено большинство существующих машин и узлов трения, основное требование к которым – наличие участка свободной поверхности трения для размещения над ней измерительного электрода.

### Результаты исследований и их обсуждение

Методики трибологических испытаний с использованием методов КРП и НВКРП. Можно выделить несколько основных методик триботехнических испытаний, в которых может применяться зонд Кельвина.

Наиболее широко применяемая методика заключается в регистрации усредненного интегрального значения КРП за некоторый определенный промежуток времени (число оборотов). Такая схема регистрации позволяет проследить изменения РВЭ в процессе длительных испытаний. Полученный сигнал является устойчивым. При такой схеме регистрации случайные ошибки измерений практически сведены к нулю.

Вторая методика заключается в регистрации сигнала с датчика Кельвина в одной точке трущейся поверхности. Для ее реализации необходима установка, в которой будет производиться синхронизация отсчетов с положением образца. Использование данной схемы позволит получать информацию о процессе трения с различных датчиков в одной точке исследуемой поверхности. Например, при одновременной регистрации таких параметров, как момент трения, износ и РВЭ трущейся поверхности, невозможно разместить датчики над одной и той же точкой исследуемой поверхности, однако соответствующим выбором расположения датчиков положения образца для каждого из регистрируемых параметров можно настроить их таким образом, чтобы информация регистрировалась с одной точки исследуемой поверхности.

Третья методика заключается в регистрации распределения потенциала по всей дорожке трения или по некоторой макрообласти.

Для ее реализации также необходима установка с синхронизацией отсчетов с положением образца. Однако данная схема может быть реализована только с использованием датчика НВКРП.

Преимуществом данной схемы является как возможность получения усредненной по всей поверхности информации, так и исследование состояния локальных областей.

Примеры трибологических исследований с использованием разработанных методик. Оценка работоспособности триботехнических материалов заключается в определении критической нагрузки перехода от нормального износа к катастрофическому. Образцы в виде дисков диаметром 105 мм и толщиной 4 мм, испытывали при постоянной скорости скольжения 3,2 м/с на трехпальчиковой машине трения типа АЕ-5, оснащенной измерителем КРП, аналогичным зонду Кельвина–Зисмана, для непрерывного контроля РВЭ трущейся поверхности, а также устройствами для регистрации момента трения и

объемной температуры. В качестве контртел использовались пальцы диаметром 6,5 мм изготовленные из стали 45 (HRC 40-45).

Исследуемые образцы и контртела прирабатывались под нагрузкой 1 МПа до формирования сплошной дорожки трения. Последнее определялось визуально при осмотре образцов.

Начиная с нагрузки 0,25 МПа, проводилась регистрация и запись исследуемых параметров (РВЭ, температура и момент трения). Далее нагрузка ступенчато увеличивалась на 1 МПа.

Результаты исследований представлены на рисунке 3.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что для широкого класса металлов и их сплавов характер зависимостей РВЭ трущейся поверхности от нормальной нагрузки подобен и имеет три характерных участка. На участке I наблюдается рост РВЭ с повышением нормальной нагрузки. Затем происходит изменение хода кривой и на участке II РВЭ трущейся поверхности понижается. При дальнейшем увеличении нагрузки, на участке III, значение РВЭ перестает понижаться с повышением нагрузки и даже в некоторых случаях возрастает. При схватывании значение РВЭ резко уменьшается. Таким образом, по характеру изменений РВЭ могут быть зарегистрированы изменения в поверхностных слоях материала, которые не проявляются на внешних параметрах трения (момент трения и объемная температура).

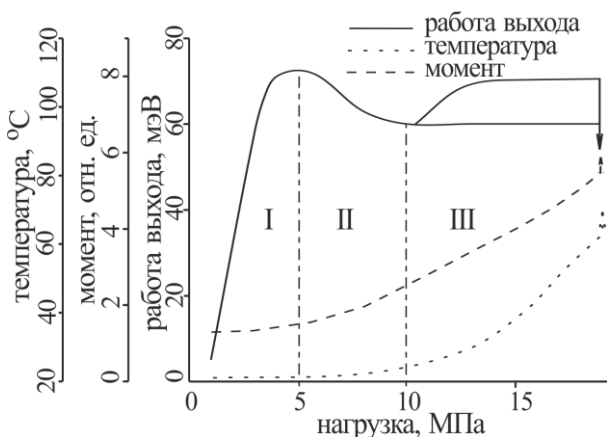


Рисунок 3 – Зависимости РВЭ трущейся поверхности, объемной температуры и момента трения от нормальной нагрузки

Таким образом, нагрузка перехода от участка II к участку III служит объективным критерием оценки работоспособности материала

для узлов трения, и, как было показано, этот критерий может быть применен для оценки работоспособности широкого класса материалов. Методика прошла апробацию для широкого круга материалов триботехнического назначения (металлы и их сплавы, металлокерамические и керамические материалы и др.).

На рисунке 4 представлены зависимости изменения РВЭ от времени сухого трения некоторых материалов при следующих параметрах испытаний: нормальное давление – 0,05 МПа, скорость скольжения – 0,073 м/с.

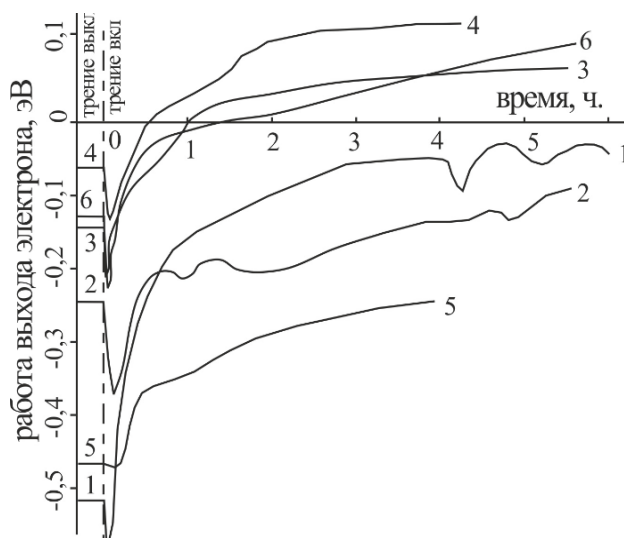


Рисунок 4 – Зависимости работы выхода электрона от времени сухого трения образцов из: 1 – Л63; 2 – Бр.АЖ9-4; 3 – Бр.ОФ6,5-0,15; 4 – М3; 5 – 12Х18Н10Т

В нулевой момент времени образцы пары трения приводились в контакт; до этого момента записаны начальные значения РВЭ материалов. Общим для приведенных кривых является резкое понижение РВЭ в начальные моменты трения относительно исходного значения, связанное с удалением на поверхности исходного окисного слоя. Это подтверждается тем, что в случае трения нержавеющей стали 12Х18Н10Т (кривая 5), на которой образование окисных слоев затруднено, первоначальное понижение РВЭ незначительно. После разрушения окисной пленки для всех исследуемых материалов РВЭ монотонно повышается до установившегося значения. Отсюда можно точно определить момент перехода от этапа приработки к установившемуся режиму трения. С повышением нормального давления в зоне фрикционного контакта время приработки уменьшается (рисунок 5).

При тяжелых режимах трения наблюдаются периодические изменения РВЭ трущейся поверхности (рисунок 5), которые вызваны усталостным разрушением поверхностного слоя материала. За один период изменение РВЭ трущейся поверхности проходит полный цикл усталостного разрушения, т.е. накопление дефектов кристаллической решетки материала, упрочнение поверхностного слоя, зарождение и распространение трещин, разрушение трущейся поверхности.

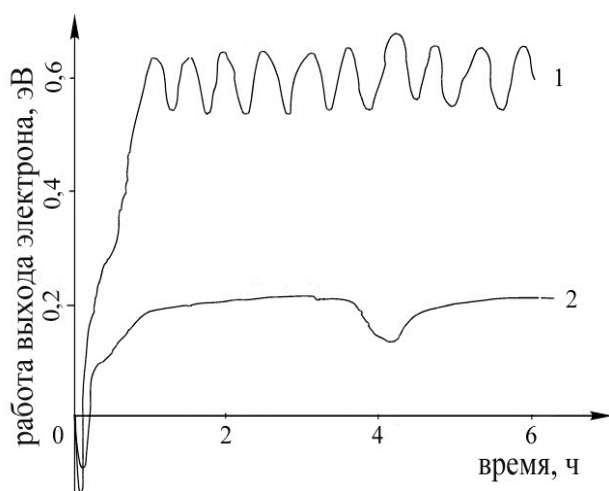


Рисунок 5 – Зависимости работы выхода электрона от времени сухого трения при нормальном давлении 0,12 Мпа образцов из: 1 – ЛБ3; 2 – 12Х18Н10Т

Для анализа периодических изменений разработан алгоритм и программное обеспечение статистической обработки полученных результатов испытаний на основе дискретного преобразования Фурье, который позволял вычислять спектральную функцию изменений РВЭ трущейся поверхности от числа проходов контртела по образцу.

Проведенные исследования с использованием разработанного метода показали, что по периодическим изменениям РВЭ трущейся поверхности возможно построение кривой, аналогичной кривой усталости при объёмном нагружении (кривой Веллера, рисунок 6), и, следовательно, определение параметров кривой усталости и ряда вероятностных характеристик (вероятность разрушения поверхностного слоя при данном количестве циклов нагружения или в заданном диапазоне циклов, доверительные интервалы циклической долговечности и др.), позволяющих более полно охарактеризовать материалы триботехнического назначения.

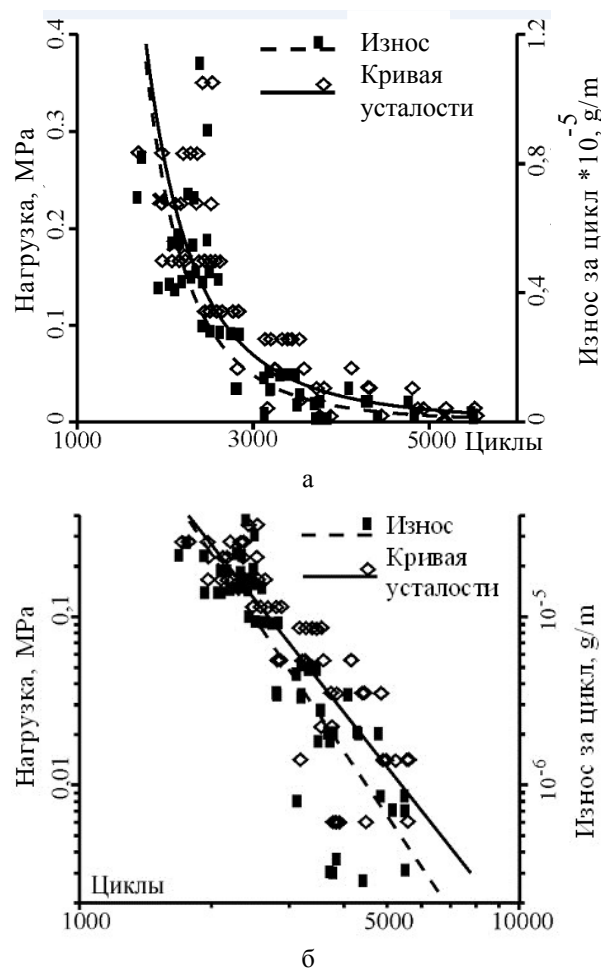


Рисунок 6 – Кривая Веллера и зависимость величины износа за период изменения работы выхода электрона для пары трения ЛБ3 – Бр.08 в линейных (а) и логарифмических (б) координатах

Методика мониторинга разрушения трущейся поверхности заключается в исследовании топологии распределения РВЭ по дорожке трения со временем (рисунок 7). Рисунок 7а получен методом Кельвина–Зисмана, и поэтому вместе с изменением топологии распределения РВЭ наблюдается ее сдвиг по абсолютной величине. Результаты, представленные на рисунке 7б, получены методом НВКРП, при этом контрастируют топологические изменения РВЭ без учета сдвига по абсолютному значению, т.е. регистрируется производная от РВЭ по поверхности трения. Экспериментальные исследования показали, что в процессе трения в областях, где имеет место интенсивная пластическая деформация (смятие выступов поверхности, области пропахивания выступами более твердой поверхности более мягкой или абразивными частицами и др.), наблюдается локальное по-

нижение РВЭ по дорожке трения. В областях, не подвергнутых пластической деформации, РВЭ может быть постоянной или даже несколько увеличиваться. Анализируя изменения РВЭ по дорожке трения можно судить о процессах деформирования и разрушения поверхностного слоя материала. Статистические параметры (спектр, дисперсия и др.) распределения РВЭ существенно зависят от механизмов износа материалов.

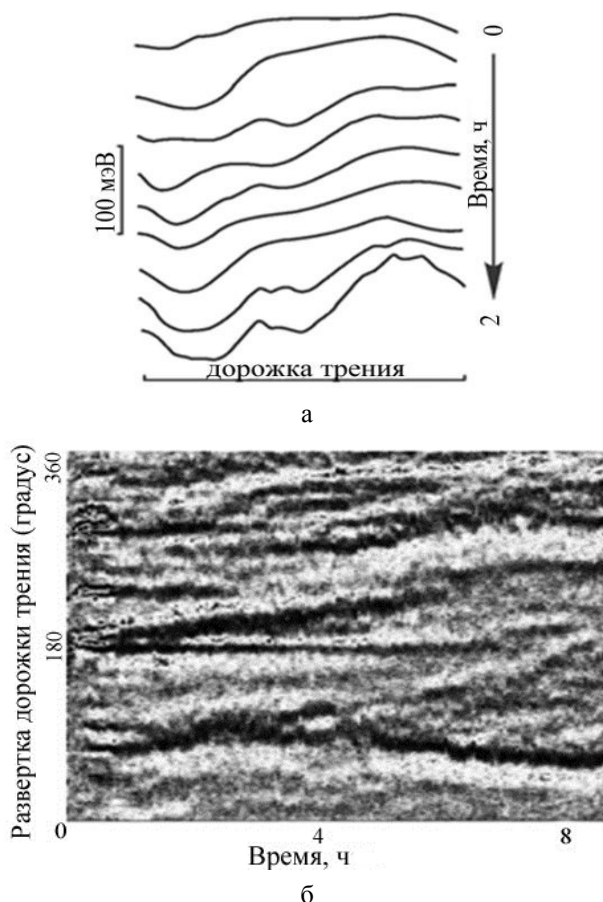


Рисунок 7 – Эволюция топологии распределения работы выхода электрона по поверхности трения со временем работы, полученная методами: а – Кельвина–Зисмана; б – невибрирующего конденсатора

### Заключение

1. Актуальность применения методов исследования работы выхода электрона, связанных с прогнозированием трибологических характеристик поверхностей непосредственно в процессе трения, вызвана высокой стоимостью и ограниченными возможностями оптимизации узлов трения стандартизированными экспериментальными методами. Показано, что суще-

ствующие экспериментальные методы исследований работы выхода электрона непосредственно в процессе трения поверхностей обладают рядом неоспоримых достоинств, позволяющих изучать динамику дефектов на поверхности трения при изменении режимных факторов трения и выявлять локальные очаги разрушения.

2. Использование методов Кельвина–Зисмана и невибрирующего конденсатора позволяют получать новые результаты:

– исследования работы выхода электрона в зависимости от приложенной нагрузки позволяют выявлять наличие критических точек, характеризующих переходы от одного вида фрикционного взаимодействия к другому;

– исследования кинетики интегрального значения работы выхода электрона позволяют выявлять периодические изменения свойств трущейся поверхности в установившемся режиме трения и устанавливать их связь с подповерхностным усталостным разрушением.

3. На основе метода невибрирующего конденсатора могут быть изготовлены бесконтактные, встраиваемые датчики контроля состояния трущихся поверхностей элементов реальных узлов трения при эксплуатации; основным требованием, предъявляемым к узлам трения, является наличие участка свободной поверхности трения для размещения над ней измерительного электрода.

### Список использованных источников

1. Жарин, А.Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии А.Л. Жарин. – Минск : Бестпринт. – 1996. – 235 с.
2. Жарин, А.Л. Мониторинг работы выхода электрона в процессе трения / А.Л. Жарин // Трибология: международная энциклопедия. Т. IV. Физика-химия процессов трибоизнашивания / под ред. К. Н. Войнова. – СПб. : ПГУПС. – 2012. – С. 376–386.
3. Zharin, A.L. Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping / A.L. Zharin // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology (edited by B. Bhushan). – Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010. – Pp. 687–720.
4. Danyluk, S. The non-vibrating capacitance probe for wear monitoring /S. Danyluk, A. Zharin, E. Zanoria, K. Hamall. – 1999: US patent 5,974,869.

---

**METHODS FOR WORK FUNCTION MEASUREMENTS FOR THE TEST OF A SURFACE IN A DURING FRICTION**

*Panteleyev K.V., Svistun A.I., Zharin A.L.*

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus  
e-mail: psf@bntu.by

**Abstract.** The paper describes the electronic work function measurements by the contact potential difference technique, and experimental demonstration of the possibility of their application for the monitoring of the friction surface. The techniques of tribological studies using contact potential difference probes are developed. Examples of measurements work function during friction for the bronze and steel samples are present. The study work function directly in the process of friction possible to determine the modes of friction and dynamics of defects on the surface friction, identify spots of destruction on local microroughnesses.

**Keywords:** work function, contact potential difference, Kelvin probe, surface friction, wear.

**References**

1. Zharin A.L. *Metod kontaktnoj raznosti potentsialov i yego primeneniye v tribologii* [Method of contact potential difference and its application in tribology. Minsk, Bestprint Publ., 1996. 235 p. (in Russian)].
2. Zharin A.L. *Monitoring raboty vyhoda elektrona v protsesse treniya. Tribologiya: Mezhdunarodnaya entsiklopediya. T. IV. Fizika i khimiya v protsesse iznashivaniya (pod redaktsiyey K.N. Voyinova)* [Monitoring work function in the process of friction. Tribology: International Encyclopedia. T. IV. Physics and chemistry of wear processes (edit by K. N. Voynov)]. Petersburg, PGUPS, 2012, pp. 376–386. (in Russian).
3. Zharin, A. L. Contact Potential Dierence Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping. Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology (edited by B. Bhushan). Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010, pp. 687–720.
4. Danyluk S., Zharin A., Zanoria E., Hamall K. The non-vibrating capacitance probe for wear monitoring. Patent US, no. 5974869, 1999.

*Поступила в редакцию 20.102014.*