

## **ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ ЗОНДОВЫЙ МИКРОСКОП ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ**

*Пантелеев К.В.*

*Белорусский национальный технический университет*

Повышение надежности машин и механизмов является одной из важнейших задач обеспечения технико-экономической эффективности производства. Решение задачи обеспечения надежной работоспособности пар сопряжения может быть реализовано путем организации системы контроля и управления сроком службы реальных узлов трения. Такая система, с одной стороны, позволяет максимально использовать внутренний резерв элементов ответственных узлов, если их остаточный ресурс превышает нормативный срок эксплуатации, а с другой стороны препятствует эксплуатации потенциально опасной техники, если назначенный ресурс не выработан полностью.

Трибологические поверхности имеют ряд характерных особенностей, которые следует принимать во внимание при выборе адекватных методов диагностики их работоспособности. С учетом неоднородности технических поверхностей целесообразно применение методов, обеспечивающих характеризацию объектов трения по интегральному участку поверхности. Кроме того, современные тенденции в исследовании три-бологических поверхностей состоят в исследовании кинетики процессов, протекающих в тонких поверхностных слоях (порядка моноатомного слоя). Следует также отметить, что большинство современных методов диагностики состояния работающей пары сопряжения дают суммарную информацию о поведении обеих поверхностей (например, методы три-бо-э.д.с., электросопротивление контакта, момента трения, акустической эмиссии и т.д.), когда интерес все же представляет поведение каждой поверхности в отдельности.

Целью работы является модификация динамического конденсатора по методу Кельвина-Зисмана для построения зарядочувствительного сканирующего зондового модуля для непрерывного контроля состояния поверхности трения, а также разработка методических принципов построения встраиваемых бесконтактных датчиков на его основе для контроля состояния поверхности реальных узлов трения машин и механизмов в процессе эксплуатации.

На основании сказанного выше основными требованиями к системам непрерывного контроля физико-химического и механического состояния поверхности материалов реальных узлов трения являются следующие:

- регистрация свойств моноатомного поверхностного слоя;
- характеристика интегрального участка поверхности;
- регистрация свойств поверхности, непосредственно находящейся под воздействием сил трения;
- регистрация свойств каждой из поверхностей в отдельности;

- регистрация состояния поверхности в широком диапазоне окружающих газовых сред как при сухом, так и при граничном трении;
- элементы системы не должны вносить никаких возмущений в процесс трения, то есть должны быть непрерывными и бесконтактными;
- иметь простую техническую реализацию.

Одним из немногих методов для контроля и анализа трибологической поверхности, удовлетворяющим изложенным выше требованиям, является метод контактной разности потенциалов (КРП), также известный как метод Кельвина-Зисмана, основанный на регистрации интегрального изменения работы выхода электрона (РВЭ) с поверхности металла или пространственного распределения собственного или приобретенного электростатического потенциала по поверхности диэлектрика.

Регистрация относительных изменений РВЭ при трении позволяет контролировать состояние поверхности в пределах первых мономолекулярных слоев и обеспечивает интегральную оценку физико-химических параметров относительно всей рабочей поверхности.

Также метод КРП является в настоящее время единственным чувствительным к дефектам методом, позволяющим контролировать в процессе трения только одну из сопряженных поверхностей. Упрощенная модификация данного метода, использующая невибрирующий конденсатор (НВКРП) может быть использована при построении бесконтактных встраиваемых датчиков мониторинга поверхностей в реальных узлах трения. Некоторые методы, наиболее применимые к диагностике и анализу систем трения, описаны в работе. Рассмотрим методики регистрации РВЭ поверхности трения методами КРП и НВКРП более подробно.

Наиболее широко применяемая методика заключается в регистрации усредненного интегрального значения РВЭ 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 невибрирующего зонда (НВКРП).

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

Пример реализации методик. Оценка работоспособности триботехнических материалов заключалась 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 зарядочувствительным зондовым модулем, обеспечивающим непрерывную регистрацию 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. Начиная с нагрузки 0,25 МПа, проводилась регистрация и запись контролируемых параметров (РВЭ, температура и момент трения). Далее нагрузка ступенчато увеличивалась на 1 МПа. Результаты исследований представлены на рисунке 1-а.

Проведенные исследования показали, что для широкого класса металлов и их сплавов характер зависимости 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).

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

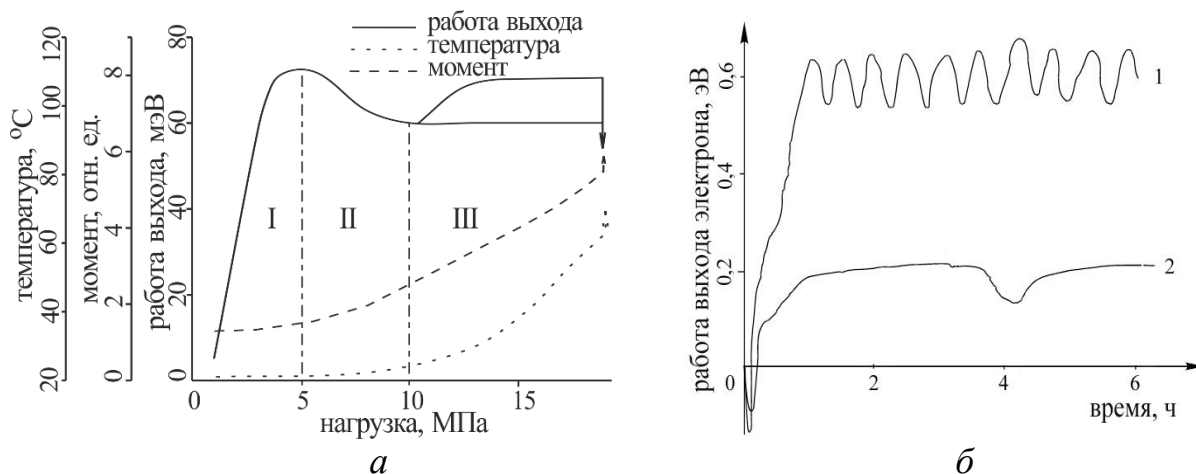


Рис. 1 – а) Зависимости РВЭ трущейся поверхности, объемной температуры и момента трения от нормальной нагрузки; б) Зависимости работы выхода электрона от времени сухого трения при нормальном давлении 0,12 МПа образцов из: 1 – Л63; 2 – 12Х18Н10Т

При тяжелых режимах трения наблюдаются периодические изменения РВЭ трущейся поверхности (рисунок 1-б), 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.

Проведенные исследования с использованием разработанного метода показали, что по периодическим изменениям РВЭ трущейся поверхности возможно построение кривой, аналогичной кривой усталости при объёмном нагружении, 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.

Методика мониторинга разрушения трущейся поверхности заключается в исследовании топологии распределения РВЭ по дорожке трения со временем (рисунок 2). Рисунок 2а получен методом Кельвина–Зисмана, и поэтому вместе с изменением топологии распределения РВЭ наблюдается ее сдвиг по абсолютной величине. Результаты, представленные на рисунке 2б, 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 понижение 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. Ста-

тистические параметры (спектр, дисперсия и др.) распределения РВЭ существенно зависят от механизмов износа материалов.

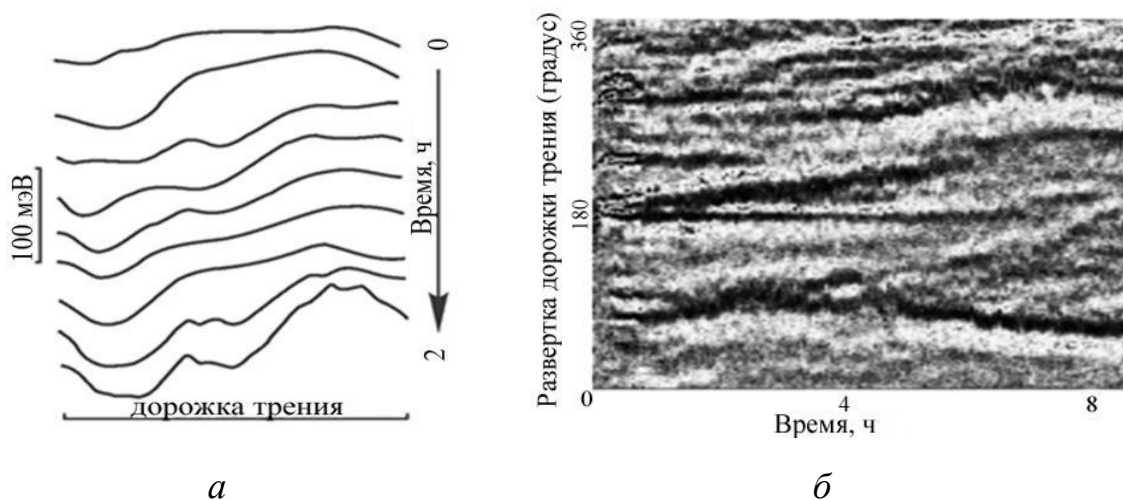


Рис. 2 – Эволюция топологии распределения работы выхода электрона по поверхности со временем трения, полученная методами: а – Кельвина–Зисмана; б – невибрирующим конденсатором

Актуальность применения зарядочувствительных зондовых методов, основанных на регистрации относительных изменений работы выхода электрона, связанных с прогнозированием трибологических характеристик поверхностей непосредственно в процессе трения, вызвана высокой стоимостью и ограниченными возможностями оптимизации узлов трения стандартизированными методами исследования. Существующие методы регистрации работы выхода электрона обладают рядом неоспоримых достоинств, позволяющих контролировать кинетику дефектов на поверхности трения при изменении режимных факторов и выявлять локальные очаги разрушения задолго до появления обнаруживаемых другими методами признаков.

Следует также отметить, что хотя данный метод рассматривался в работе применительно к трибологической поверхности, он может быть успешно применен для решения широкого ряда задач в области исследования поверхности, контроля технологических процессов обработки материалов, включая нанесение различных типов покрытий.