

Глава 21 ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТРЕНИИ МЕТОДОМ КЕЛЬВИНА

Жарин А.Л., Пантелеев К.В., Свистун А.И.,
*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь, nilpt@tut.by*

Аннотация. С использованием непрерывного неразрушающего контроля трущейся поверхности методом Кельвина экспериментально обнаружены периодические изменения ее работы выхода электрона (РВЭ).

Исследования комплексом независимых методов показали, что периодические изменения РВЭ являются следствием усталостных процессов, протекающих в относительно толстых подповерхностных слоях, т.е., по сути, позволили обнаружить новый вид изнашивания материалов при тяжелых режимах трения. Проведенный анализ периодических изменений РВЭ трущейся поверхности показал, что они являются воспроизводимыми и незатухающими, следовательно, могут применяться для анализа кинетики протекания процессов усталостного разрушения при трении.

С учетом общности закономерностей объемного и поверхностного деформирования, один цикл периодических изменений РВЭ трущейся поверхности будет соответствовать сломанному образцу при классических усталостных испытаниях, а с учетом того, что регистрация РВЭ производится интегрально по дорожке трения, то один цикл периодических изменений соответствует статистически обработанной серии результатов испытаний на усталость. Из вышесказанного следует, что поиск корреляции между результатами испытаний на объемную усталость и установленными периодическими изменениями РВЭ при трении может привести к созданию ряда экспрессных методов испытания материалов на объемную усталость.

Введение

Оценка фактического состояния трущихся сопряжений является важной задачей обеспечения стабильности качества и надежной эксплуатации изделий триботехнического назначения. Среди различных механизмов повреждаемости материала особый интерес вызывают усталостные процессы. Доступные методы и технические средства экспериментальной оценки процесса усталостного износа обеспечивают исследования объемных параметров деформации и разрушения материала. При этом, практически все методы сводятся к тому, что в изучаемом материале вызывают состояние неустойчивости, приводящее со временем к вынужденному разрушению материала под нагрузкой [1]. Между тем при трении, очаги разрушения зарождаются в поверхностных слоях материалов трущихся пар. Учитывая, что трибологические поверхности являются техническими, т.е. сильно неоднородными, особый интерес представляет интегральная оценка их свойств по значимому участку трущейся поверхности. Для подавляющего большинства экспериментальных методов требования интегральности и локальности в глубь поверхностного слоя являются взаимоисключающими. Поэтому, вопросы выбора физических параметров, позволяющих контролировать кинетику усталостной повреждаемости и разрушения поверхности трения, и, соответственно, методов и технических средств оценки этих параметров остаются наиболее актуальными в области трибологии.

Работа выхода электрона (РВЭ) поверхности является чувствительным параметром к состоянию поверхности материалов и процессам, имеющим место при трении твердых тел [2–4]. Бесконтактные измерения РВЭ зондовыми методами позволяют с высокой чувствительностью определять такие неоднородности поверхности металлов и сплавов, как химические загрязнения, микротрещины, внутренние механические напряжения [5–6], дислокации и другие дефекты кристаллической решетки [7, 8]. Для контроля состояния трущейся поверхности и оценки протекающих при этом процессов наиболее удобен метод Кельвина [9, 10]. Он

позволяет определять относительное значение РВЭ по контактной разности потенциалов (КРП). Отличительной особенностью методов КРП является измерение относительно большого участка поверхности (до нескольких квадратных миллиметров). При этом получают информацию о состоянии слоя металлических материалов субнаноразмерной толщины. Кроме того, отдельные модификации зонда Кельвина позволяют проводить бесконтактные неразрушающие измерения на воздухе или в иных условиях окружающей среды (в вакууме, контролируемых средах, при смазке и др.) [10, 11], что в совокупности определяет их эффективность для трибологических исследований.

Мониторинг процессов трения по работе выхода электрона

Современные методы исследования в области трибологии имеют одну общую тенденцию – обеспечение возможности прямого изучения явлений на фрикционном контакте, т.е. тенденцию оснащения машины трения (или реального узла трения) каким-либо физическим измерительным прибором, обеспечивающим непрерывный мониторинг изменений регистрируемого параметра в процессе трения. К сожалению, круг физических методов, принципиально позволяющих регистрировать физические свойства поверхности в процессе трения, весьма ограничен.

В этой связи, весьма привлекательным является использование РВЭ для исследования поверхностей трения [10–14]. Существующие методы регистрации РВЭ допускают модификации, позволяющие проводить мониторинг трущейся поверхности непосредственно в процессе трения.

На рисунке 1 показана типовая схема установки для мониторинга РВЭ трущейся поверхности методом Кельвина. Следует отметить, что метод может быть реализован для различных машин и узлов трения с неполным перекрытием поверхностей [4, 13].

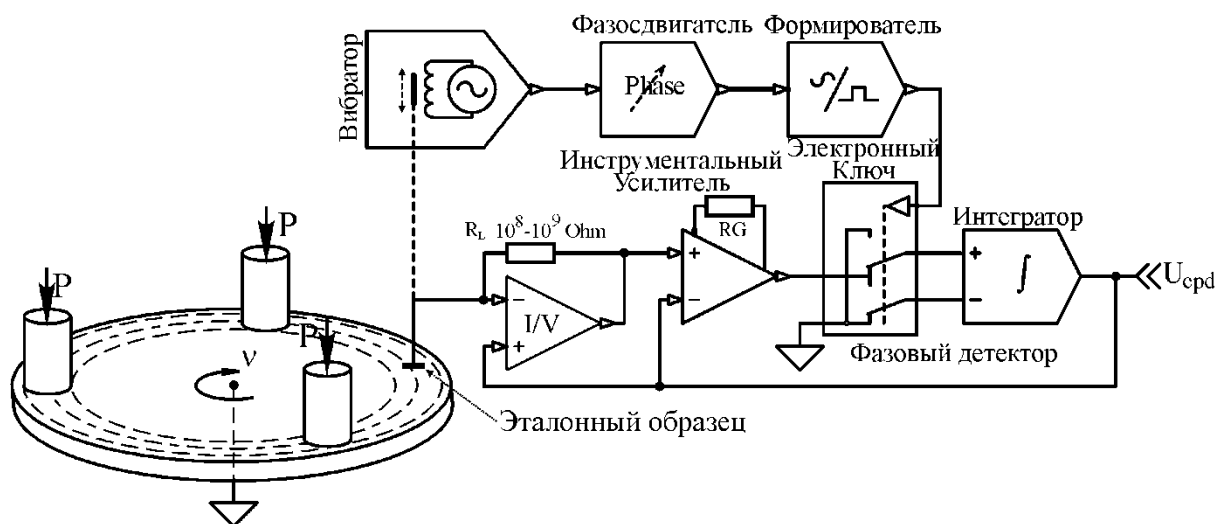


Рисунок 1 - Схема установки для мониторинга процессов трения зондом Кельвина. Измерительный конденсатор образован дорожкой трения $M1$ и вибрирующим эталонным образцом $M2$ [13]

Измеритель непрерывно отслеживает изменения КРП между эталонным и измеряемым образцами по фазе сигнала. Считая РВЭ эталонного образца постоянной, установка непрерывно регистрирует изменения РВЭ трущейся поверхности.

Кинематическая схема узла трения приведена на рисунке 2. Образец в виде диска имеет вертикальную ось вращения. Три цилиндрических контртела размещены в углах

равностороннего треугольника, прижимаются сверху через нагружающий механизм рычажного типа. Над свободным участком поверхности трения вращающегося образца закреплен измеритель КРП.

Возможны две схемы эксперимента при использовании метода [13]: регистрация РВЭ с малым временем интегрирования сигнала и ее синхронизация с положением образца, что позволяет исследовать эволюцию топологии распределения РВЭ по дорожке трения; регистрация РВЭ с использованием дополнительного интегратора со временем интегрирования, значительно большим периода вращения образца пары трения, что позволяет исследовать кинетику изменений интегрального значения РВЭ всей трущейся поверхности.

В данной работе время интегрирования выбрано значительно большим времени одного оборота образца. Такая схема регистрации позволила проследить изменения РВЭ в процессе длительных испытаний по всей трущейся поверхности.

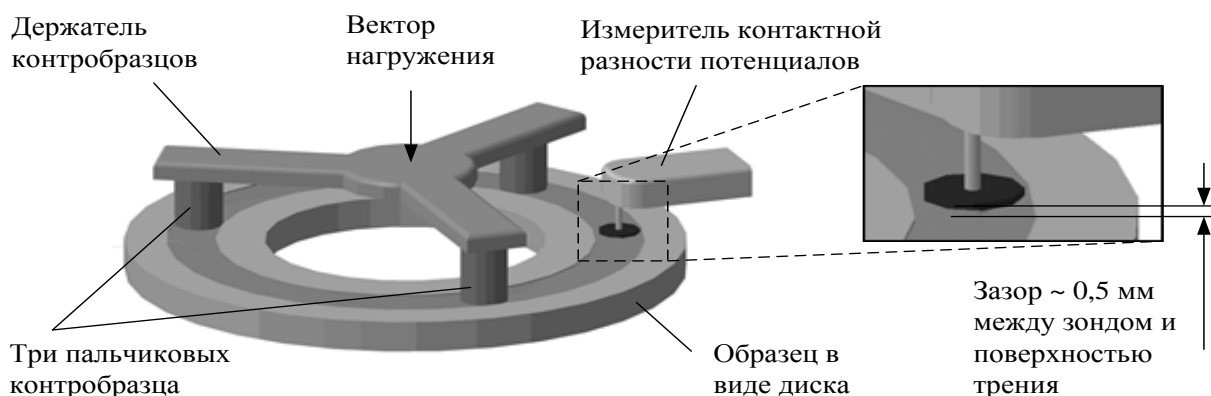


Рисунок 2 – Кинематическая схема узла трения при измерении работы выхода электрона трущейся поверхности

Периодические изменения РВЭ трущейся поверхности

С использованием метода непрерывного неразрушающего контроля РВЭ трущейся поверхности были экспериментально обнаружены периодические изменения РВЭ трущейся поверхности [2].

На рисунке 3 показаны зависимости интегрального значения РВЭ от времени сухого трения. Общим для приведенных кривых является резкое понижение работы выхода в начальные моменты трения относительно исходного значения. Это, по всей вероятности, объясняется удалением с поверхности исходного окисного слоя. Далее РВЭ монотонно повышается до установившегося значения. Отсюда можно точно определить момент перехода от этапа приработки к установившемуся режиму трения.

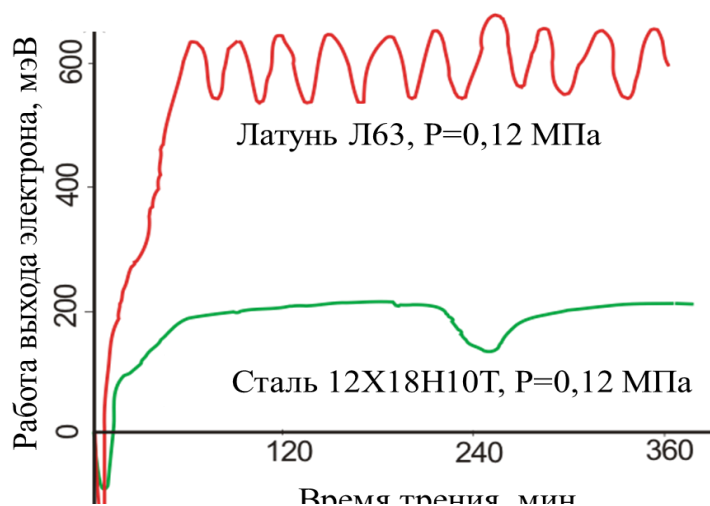


Рисунок 3 – Зависимость интегрального значения работы выхода электрона трущейся поверхности от времени трения

Исследование РВЭ в установившемся режиме трения показало, что для широкого ряда исследуемых материалов после процесса приработки наблюдаются периодические изменения РВЭ (рисунок 3) [2]. Для медных сплавов изменения РВЭ имеют форму близкую к синусоидальной (латунь Л63 на рисунке 3), а для сплавов на основе железа изменения РВЭ характеризуются пилообразной формой – РВЭ относительно медленно повышается и затем происходит ее быстрое понижение (нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, рисунок 3).

Из числа исследуемых материалов наиболее отчетливо периодические изменения РВЭ наблюдались в случае трения латуни Л63. На рисунке 5 приведена кинетика изменений РВЭ при установившемся режиме трения латуни Л63 в паре с бронзой БрОФ6,5-0,15. Испытания проведены в течение 8 часов при нормальной нагрузке 0,17 МПа и скорости скольжения 0,12 м/с. Из рисунка 4 видно, что амплитуда периодических изменений РВЭ трущейся поверхности латуни превосходит 100 мэВ, а период составляет более 30 минут, т.е. на несколько порядков больше периода вращения образца ($0,42 \text{ с}^{-1}$). Следует отметить, что на величину амплитуды и длительности периода РВЭ значительное влияние оказывают режимные факторы трения (с увеличением нормального давления амплитуда периодических изменений РВЭ возрастает, а длительность уменьшается).

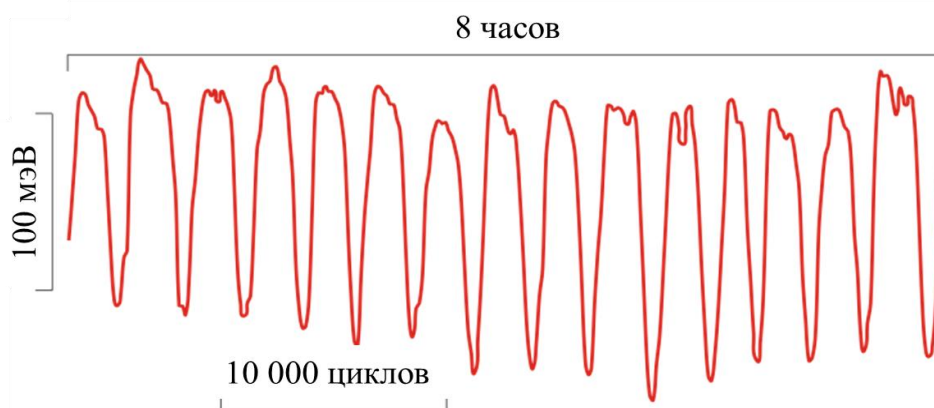


Рисунок 4 – Регистрация периодических изменений работы выхода электрона трущейся поверхности образца латуни марки Л63

Результаты исследования статистической закономерности периодических изменений РВЭ проводились в режиме сухого трения пары латунь Л63 бронзы БрОФ6,5-0,15 в тождественных условиях с увеличением длительности трения (~ 300 часов) показали, что они являются статистически устойчивыми и не затухающими. Кроме того, периодические изменения РВЭ сохраняют фазу периода после остановки и последующего возобновления процесса трения, что позволяет останавливать процесс трения в требуемых точках периода изменения РВЭ и исследовать состояние поверхности различными методами физического материаловедения.

Исследование периодических изменений РВЭ комплексом независимых методов

С целью выяснения природы периодических изменений РВЭ трущейся поверхности было проведено исследование состояния поверхностных и подповерхностных слоев материала в четырех характерных точках по периоду изменения работы выхода электрона [15]. В качестве таких точек выбраны: положительный и отрицательный экстремумы (рисунок 5, *a* и *c*) и середины участков возрастания и уменьшения РВЭ (рисунок 5, *b* и *d*). Для этого, при достижении интересующей точки, процесс трения прерывался, образцы препарировались и проводилось исследование с помощью доступных методов физического материаловедения.

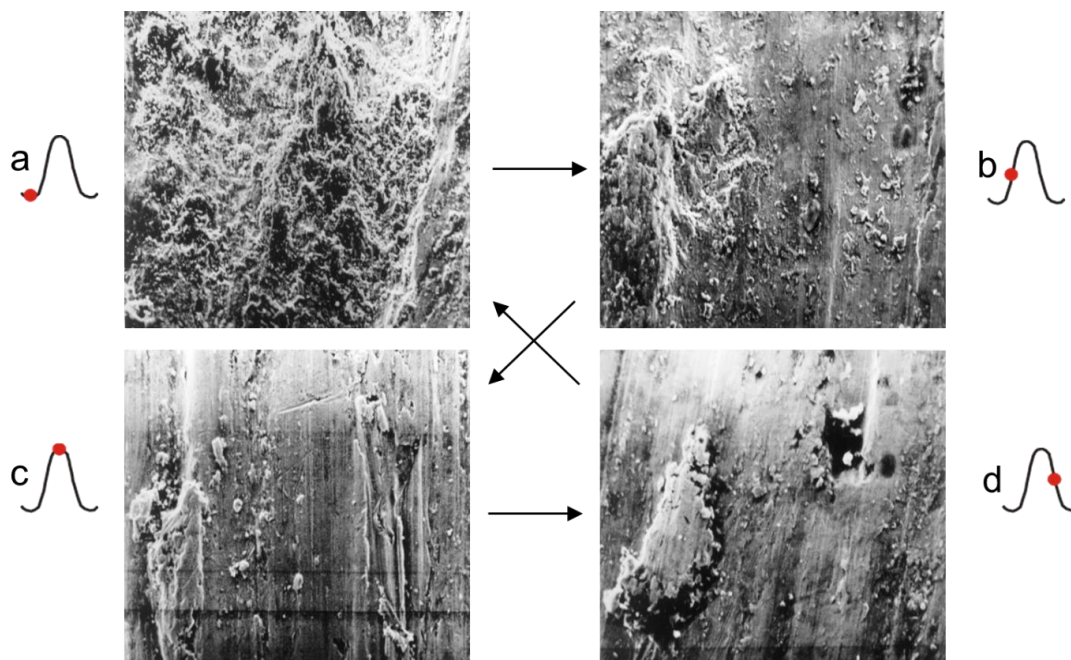


Рисунок 5 – Микрофотографии изношенной поверхности латуни марки Л63 в четырех характеристических точках по периоду изменения работы выхода электрона

Исследования методом растровой электронной микроскопии показали существенное отличие вида поверхности трения в указанных выше точках (рисунок 5). Из рисунка 5 видно, что наибольшую дефектность поверхность имеет в точке отрицательного экстремума (точка *a*). Далее с временем трения поверхность сглаживается. На середине участка возрастания РВЭ (рисунок 5, *b*) наблюдаются только отдельные места, содержащие макродефекты. Наиболее гладкая поверхность была в точке положительного экстремума (рисунок 5, *c*). Далее на поверхности трения появляются отдельные места разрушения (рисунок 5, *d*), и, при достижении работой выхода электрона отрицательного экстремума, поверхность трения опять приобретает вид близкий к приведенному на рисунке 5, *a*. Это, очевидно, соответствует расширению мест разрушения на большую часть поверхности трения.

Таким образом, представленные выше результаты показали, что периодичность РВЭ трущейся поверхности связана с периодически повторяющимися процессами разрушения поверхностного слоя. Причем на участке понижения РВЭ идет процесс разрушения поверхности трения, а на участке возрастания – процесс выглаживания поверхности трения контртелом.

Исследование шлифов материала, перпендикулярных поверхности трения, показало наличие трещин и отдельных мест разрушения только на образцах, соответствующих середине участка понижения РВЭ (точка *d* по периоду изменения РВЭ), т.е. на стадии предразрушения поверхностного слоя (рисунок 6). На шлифах образцов, соответствующих другим фазам по периоду РВЭ, трещин и отдельных мест разрушения не наблюдалось. При этом трещины в материале располагались преимущественно в направлении скольжения. Расстояние от поверхности трения до места залегания трещин, а также глубина разрушенного слоя поверхности трения, были относительно большими (~ 40 мкм). Таким образом, на участке уменьшения РВЭ идут процессы зарождения и распространения трещин, параллельных поверхности, с последующим отделением слоя материала, лежащего между поверхностью трения и трещиной.

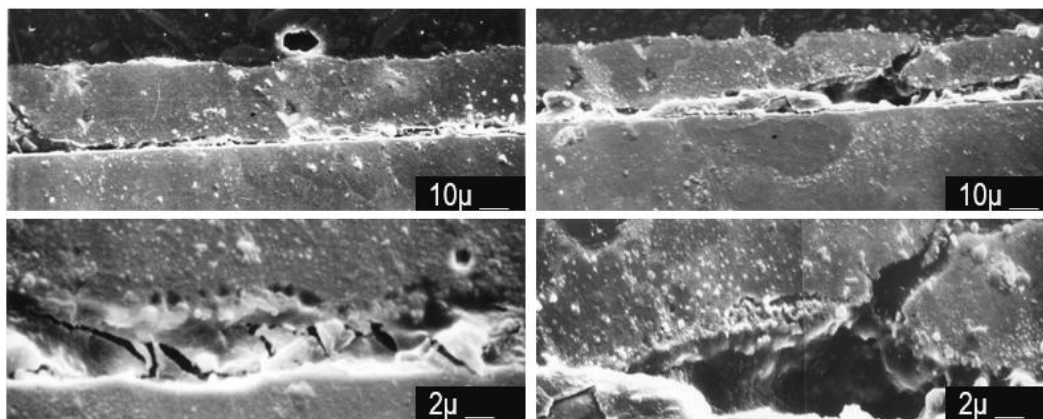


Рисунок 6 – Микрофотографии поперечных сечений изношенной поверхности на стадии предразрушения (точка *d* по периоду изменения работы выхода электрона)

С целью определения распределения микродефектов в поверхностном слое материала, а также с целью выяснения причины преимущественного распространения трещин параллельно поверхности трения исследовалось распределение микротвердости материала у поверхности трения образцов, соответствующих описанным выше четырем характерным точкам. Исследования проводились на шлифах, расположенных под небольшими углами к поверхности трения при нагрузке на алмазную пирамидку 10 грамм и времени приложения нагрузки 10 секунд. Расстояние между отпечатками выбиралось не менее удвоенной диагонали отпечатка. Исследуемые шлифы приготавливались механической полировкой с помощью алмазной пасты. Для устранения влияния наклепа поверхности при механической полировке серии отсчетов с одного ряда нормировались на микротвердость в объеме образца, измеренную при большой нагрузке на алмазную пирамидку (500 грамм). Затем результаты серий отсчетов по одному и тому же образцу обрабатывались по методу наименьших квадратов в логарифмических координатах и из них исключались выпадающие точки. Измерения микротвердости образцов, соответствующих середине участка уменьшения РВЭ, производились в местах, свободных от трещин.

Обработанные вышеописанным образом результаты по распределению микротвердости у поверхности трения представлены на рисунке 7. Из них видно, что минимальное упрочнение подповерхностных слоев наблюдается в точке отрицательного экстремума по РВЭ (точка *a*). При дальнейшем скольжении

упрочнение подповерхностных слоев увеличивается. Причем форма кривой распределения микротвердости остается неизменной и аппроксимируется степенной кривой вида:

$$Hv = aS^b, \quad (7)$$

где S – расстояние от поверхности; a и b – параметры кривой.

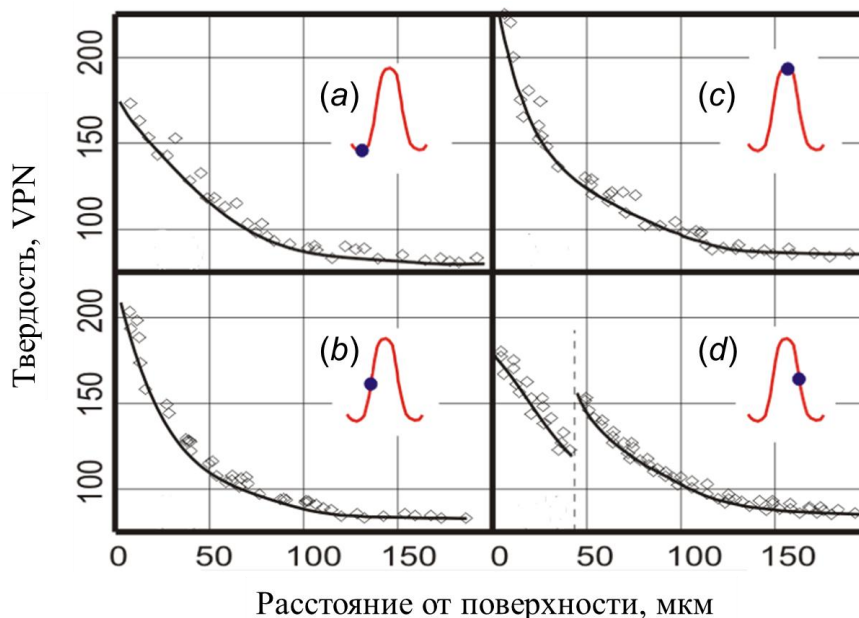


Рисунок 7 – Распределение микротвердости у поверхности трения в четырех характерных точках по периоду изменения работы выхода электрона

У образцов, соответствующих середине участка уменьшения РВЭ (точка d), форма кривой распределения микротвердости изменяется кардинально. На зависимости появляется точка разрыва (в математическом смысле), лежащая на расстоянии ~ 40 мкм от поверхности трения, т.е. на той же глубине, где наблюдались подповерхностные трещины (рисунок 6). На глубинах более 50 мкм распределение микротвердости описывается кривой вида (7), т.е. вид распределения остается таким же, как для ранее описанных случаев. В области глубин до 40 мкм микротвердость распределена по линейному закону, причем своего максимального значения она достигает у поверхности трения. Авторами работы [16] показано, что упрочнение подповерхностных слоев в меди при трении происходит вследствие повышения концентрации дислокаций. По аналогии здесь также будем считать, что наблюдаемое упрочнение обусловлено повышением концентрации дислокаций. Тогда, качественно, картина процесса разрушения поверхностного слоя выглядит следующим образом. При достижении концентрацией дислокаций некоторой критической величины отдельные дислокации в подповерхностном слое коалесцируют с образованием микропор и микротрещин [17], что вызывает разупрочнение материала в поверхностном слое и изменение вида распределения микротвердости (рисунок 7, d). Далее, на границе раздела между материалами, обогащенной, с одной стороны, дислокациями, а с другой стороны – микротрещинами и микропорами, происходит развитие магистральной трещины, параллельной поверхности трения. При достижении магистральной трещиной критической величины слой материала, обогащенный микропорами и микротрещинами, отделяется, т.е. образуется частица износа. Далее поверхностью трения становится одна из поверхностей магистральной трещины (рисунок 7, a), и описанный выше процесс повторяется.

Проведено также исследование распределения компонентов сплава в подповерхностных слоях. Исследование проводилось на шлифах, перпендикулярных поверхности трения образцов, соответствующих описанному ранее четырем характерным точкам по периоду РВЭ, с помощью микрорентгеноспектрального анализатора.

Концентрационные неоднородности компонентов сплава обнаружены только на образцах, соответствующих середине участка уменьшения РВЭ (точка *d*). Кривые (а) на рисунке 8 получены при измерении в месте залегания подповерхностной трещины. Трещина выявилась одновременным понижением концентрации обоих компонентов сплава. В местах, свободных от подповерхностных трещин, на той же глубине, где они наблюдались (~ 40 мкм), обнаружено повышение концентрации цинка за счет уменьшения концентрации меди. Как видно из рисунка 8, б и в, концентрации цинка увеличена на значительную величину, достигающую до 8%. Наличие перераспределения компонентов сплава подтверждается также фотографией подповерхностной трещины в характеристическом излучении цинка (рисунок 8). Учитывая, что испытания на трение проводились при низкой скорости скольжения, и, что повышение концентрации цинка наблюдалось на довольно большом расстоянии от поверхности трения, можно утверждать, что такое перераспределение компонентов сплава не связано с тепловыми эффектами в поверхностных слоях. Наиболее вероятным объяснением такого перераспределения компонентов сплава является перенос атомов цинка дефектами кристаллической решетки в зону скопления последних. Как известно, дефекты кристаллической решетки могут повышать скорость диффузии компонентов сплава за счет вакансионного механизма и за счет образования атмосфер из атомов диффундирующего компонента на дислокациях и миграции их вместе с дислокациями. При использовании любого из этих механизмов диффузии, из полученных результатов следует, что максимальная концентрация дефектов кристаллической решетки образуется не на поверхности трения, а на некотором расстоянии от нее, в данном случае, на расстоянии ~ 40 мкм.

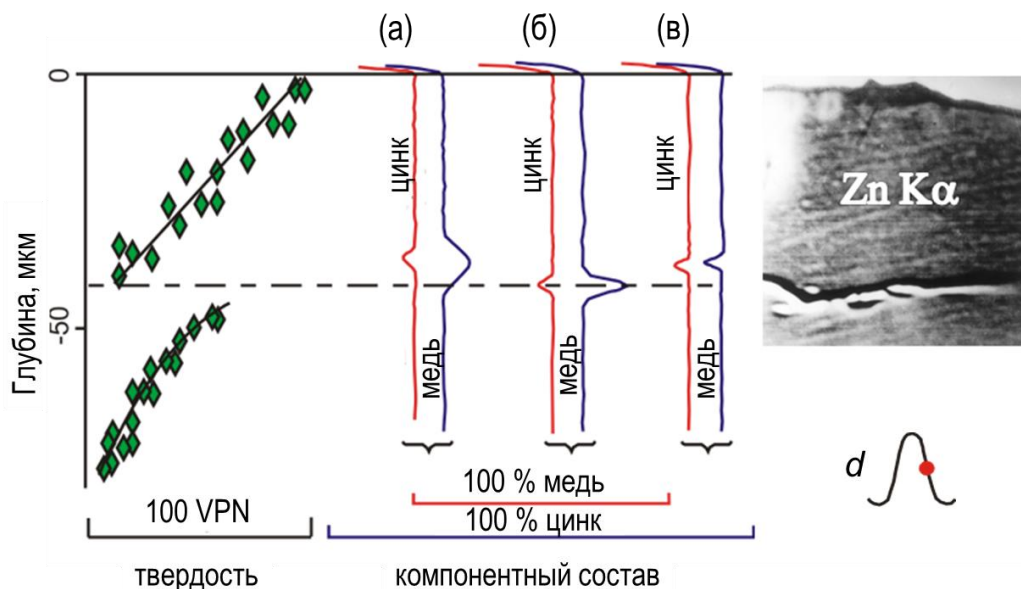


Рисунок 8 – Распределения микротвердости и компонентов латуни Л63 под поверхностью трения образцов в точке *d* по периоду РВЭ трущейся поверхности: а – в месте залегания подповерхностной трещины; б и в – в местах свободных от трещин

Отсюда следует, что после отделения изношенного слоя, непосредственно на поверхности трения будет появляться слой, обогащенный цинком, т.е. на поверхности

трения будет периодически изменяться концентрация компонентов сплава. Для объяснения этого может быть применен описанный в настоящей работе механизм.

Таким образом, исследования периодичности изменений РВЭ электрона трущейся поверхности независимыми методами показали, что оно вызвано периодическим накоплением дефектов кристаллической решетки в подповерхностных слоях с последующим разрушением поверхностного слоя. При этом, преимущественно, разрушение начинается не на поверхности трения, а на некотором расстоянии от нее. Периодичность изменения РВЭ трущейся поверхности объясняется сопутствующими такому разрушению периодическими изменениями концентрации дефектов и концентрации компонентов сплава непосредственно на поверхности трения. Такая схема разрушения поверхности трения характерна для усталостных процессов.

Периодические изменения параметров трения фрагментарно наблюдались рядом авторов. Для их объяснения привлекались различные механизмы. Однако большинство из механизмов включали процессы накопления или роста (дефектов, вторичных структур, пленок и т.д.) и последующего разрушения, т.е. они содержали отличительные особенности процессов усталости. Эти результаты и результаты исследования периодичности РВЭ трущейся поверхности дают нам основание рассматривать известные из литературы случаи наблюдения периодических изменений параметров процесса трения с позиций усталостного разрушения.

Следует подчеркнуть методологическое значение описанных выше результатов. Из них следует, что состояние поверхностных и подповерхностных слоев поверхности трения сильно изменяется с изменением фазы периода разрушения. Поэтому, при исследовании поверхности трения различными физическими методами, очевидно, трудно получить воспроизводимые результаты без фиксации момента измерений по фазе изменений РВЭ.

Как было показано ранее, периодические изменения РВЭ трущейся поверхности, как интегральной характеристики процесса трения, являются статистически устойчивыми и не затухающими. Также результаты проверки периодических изменений РВЭ на примере латуни Л63 подтвердили, что они имеют усталостную природу, и показали, что состояние поверхностных и подповерхностных слоев материала значительно отличается в четырех характерных точках по периоду изменения РВЭ и особенно интересно на этапе предразрушения. В развитие этого были проведены аналогичные исследования со специально приготовленными модельными медно-оловянными сплавами: $\text{Cu} + 6\% \text{ Sn}$ (БрО6) и $\text{Cu} + 8\%$ (БрО8). Следует отметить, что в соответствии с диаграммой состояния медь-олово, первый сплав относится к α -твердым растворам, а второй содержит включения δ -фазы.

Так же, как и в случае латуни Л63, в этих материалах наблюдались трещины, параллельные поверхности трения, причем глубина залегания подповерхностных трещин для БрО6 составляла 35–40 мкм, а для БрО8 – 70–75 мкм. На рисунке 9 представлены микрофотографии (увеличение 200 крат) шлифов, перпендикулярных поверхности трения (БрО6 – рисунок 9, а и б, БрО8 – рисунок 9, в). Из представленных фотографий видно, что подповерхностные трещины имеют значительную величину. В некоторых случаях они распространялись практически на всю ширину дорожки трения (8 мм). Причем, если в направлении, перпендикулярном скольжению, сплошность слоя материала между поверхностью трения и трещиной практически не нарушается, то в направлении вдоль дорожки трения слой материала характеризуется значительными разрывами (рисунок 10).

Полученные результаты показывают, что в тяжелых режимах сухого трения медных сплавов процессы усталостного разрушения могут протекать в

подповерхностных слоях материала, т.е. в слоях, намного превышающих по толщине уровень шероховатостей.

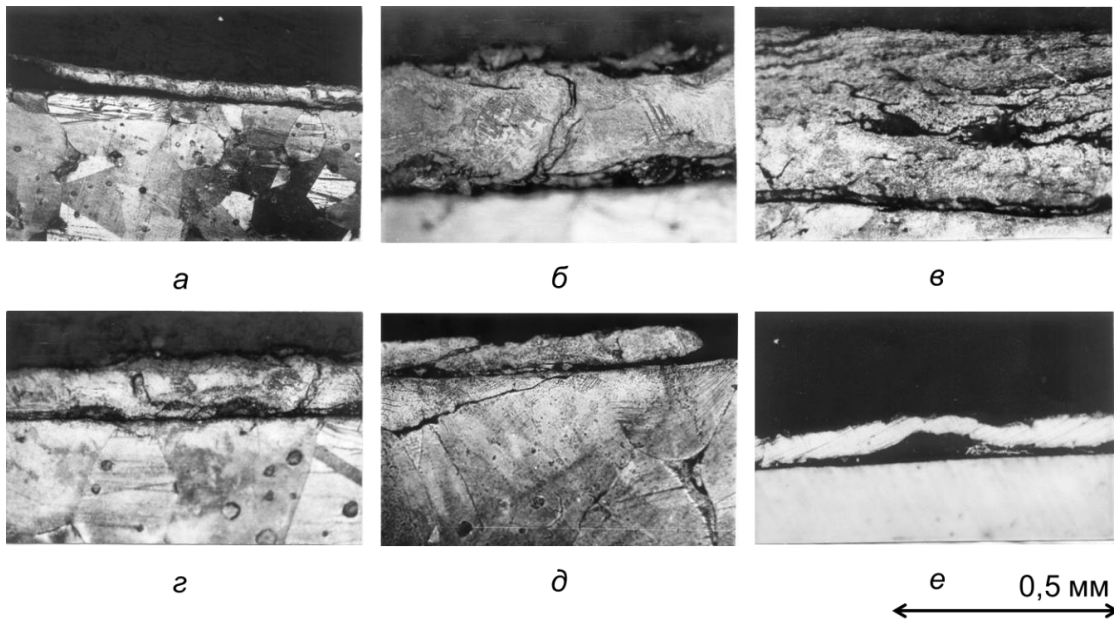


Рисунок 9 – Микрофотографии шлифов образцов в плоскости перпендикулярной скольжению (а, б – БрО6, в – БрО8), а также некоторые характерные схемы разрушения поверхностного слоя (с – выдавливание сегмента на поверхность, д – заплзание одного участка слоя на другой, е – выдавливание слоя)

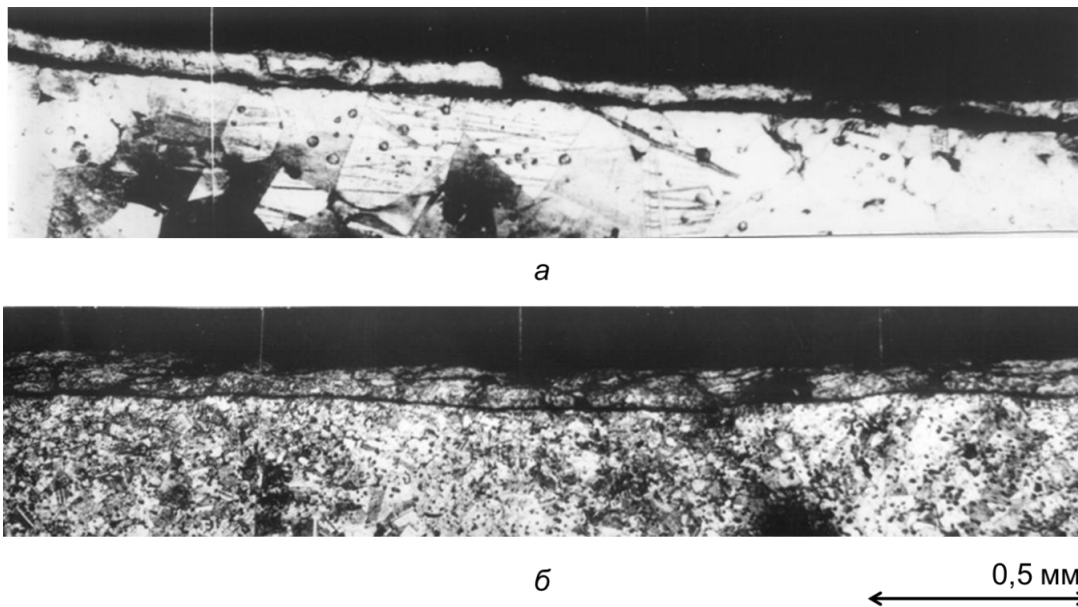


Рисунок 10 – Микрофотографии шлифов образцов вдоль дорожки трения: а – БрО6, б – БрО8

Остается открытым вопрос о процессах, контролирующих усталостное разрушение, и связанных с ними причинах возникновения столь больших подповерхностных трещин. По-нашему мнению, при подповерхностной усталости основными контролирующими процессами являются процессы зарождения и накопления дефектов при сравнительно низкой роли процессов распространения трещин. Это может происходить вследствие того, что поверхностный слой материала

при трении подвергается значительному перенаклепу. Если классические испытания на объемную усталость прекращаются при появлении первой трещины критической величины, приводящей к разрушению образца, то при трении материал продолжает циклически нагружаться. При этом поверхностный слой материала подвергается значительным изменениям.

Можно предположить, что циклическое нагружение приводит к созданию дефектов (дислокаций) в поверхностных слоях материала. Со временем скольжения плотность дислокаций повышается, что подтверждается увеличением наклепа подповерхностных слоев материала. При достижении плотностью дислокаций некоторой критической величины дислокации одного знака могут собираться в стенки, что энергетически более выгодно. В результате дальнейшего скольжения на поверхности трения образуется слой материала в микрокристаллическом субзеренном состоянии. Косвенным подтверждением этого может служить изменение хода кривой распределения микротвердости (рисунок 7). Кроме того, из рисунка 9, а и б видно, что в поверхностном слое не выявляется зеренная структура, что дополнительно подтверждает его микрокристаллическое субзеренное состояние. Сформировавшийся на поверхности трения субзеренный слой может передавать нагрузку, не образуя дислокаций внутри субзерен, т.е. в самом слое условия для протекания процессов усталостного разрушения будут затруднены. Однако, такой слой будет передавать нагрузку вглубь материала, где под действием циклической нагрузки будет происходить образование и накопление дислокаций леса.

Из сказанного выше можно предположить, что в нашем случае дальнейшее циклическое нагружение поверхности трения приводит к созданию из дислокаций леса плоских дислокационных скоплений с последующим образованием микропор. Разрядка большого числа дислокаций на образовавшихся микропорах, а также создание все новых микропор, приводит к их росту и слиянию в пустоты значительной величины, расположенные под слоем микрокристаллических субзерен.

Определяющая роль порообразования в процессах разрушения подтверждается также видом излома поверхности трения непосредственно после отделения листообразной частицы износа (рисунок 6, а), для которого характерен ямочный рельеф [18], и перераспределением компонентов сплава под поверхностью. Выше было показано, что при использовании практически любых известных механизмов диффузии, из полученных результатов следует, что в зоне развития условий для усталостного разрушения происходит интенсивная разрядка дефектов, что подтверждает определяющую роль порообразования. При дальнейшем скольжении в сформированном слое могут развиваться условия для его окончательного разрушения. Выявленные характерные схемы разрушения поверхностного слоя представлены на рисунке 9, а–е. В случае фотографии на рисунке 9, а происходит формирование дополнительных трещин (в данном случае по границам исходного зерна) и выдавливание образовавшегося сегмента на поверхность. Рисунок 9, б соответствует случаю, когда образуется косая трещина и слои, расширяясь вдоль поверхности, заходят друг на друга. На рисунке 9, в показан случай, когда вследствие боковых напряжений в слое материал выдавливается в виде пузырька.

Учитывая, что глубина слоя материала, вносящего вклад в изменение РВЭ, приблизительно равна межатомному расстоянию, требует пояснения вопрос о том, как процессы, происходящие в подповерхностных слоях, отражаются на регистрируемой величине. Рассмотрим динамику процессов, происходящих на поверхности трения с точки зрения описанных выше процессов подповерхностного усталостного разрушения. В начальные моменты трения происходит выглаживание поверхности контртелом за счет поверхностных механизмов износа и деформирования, что приводит к формированию рабочего слоя с определенными физическими свойствами и, соответственно, с некоторым определенным значением РВЭ. Параллельно этому, в подповерхностных слоях материала идет процесс зарождения и накопления дефектов с дальнейшим образованием субмикрокристаллического слоя, а также микро- и макропор. Разрастающиеся и объединяющиеся поры под субмикрокристаллическим

слоем приводят к нарушению сплошности материала, однако, субмикрокристаллический слой продолжает удерживаться на поверхности подложки в отдельных местах. При этом прочностные свойства слоя и его толщина достаточны для сохранения сплошности.

Другими словами, отрыв сформировавшегося сравнительно толстого слоя материала от подложки в некоторых местах не приводит к немедленному отделению частицы износа, а некоторое время происходит его дальнейший отрыв на значительной части поверхности трения. При этом создаются как бы неравновесные условия, когда еще работает сравнительно толстый слой материала, уже оторванный от подложки, но сохраняющий свою сплошность. Причем на его рабочей поверхности плотность дефектов может оставаться относительно не высокой, например, вследствие разрядки дислокаций на свободной поверхности.

Такие неравновесные условия приводят к тому, что разрушение и удаление одного и/или нескольких слабых звеньев такого оторванного слоя приводит к увеличению нагрузки на остальные его участки и дальнейший процесс разрушения протекает лавинно, что синхронизирует разрушение на большей части поверхности трения. Здесь уместна аналогия с известным из оптики когерентным излучением, где создание неравновесной инверсной заселенности электронных уровней в веществе приводит к лавинному переходу электронов в основное состояние.

После разрушения субмикрокристаллического слоя поверхностью трения становится одна из стенок системы подповерхностных пор, т.е. выглаженная поверхность заменяется сильно дефектной поверхностью с резко отличающимися свойствами и, соответственно, с пониженным значением РВЭ (известно, что дефекты поверхности приводят к понижению ее работы выхода электрона). После выхода такой поверхности она опять начинает выглаживаться контртелом, ее работа выхода электрона начинает повышаться, а параллельно с этим начинают накапливаться в подповерхностных слоях условия для последующего цикла подповерхностного усталостного разрушения. К моменту следующего цикла усталостного разрушения поверхность успевает достаточно изменить свои физические свойства, чтобы разность РВЭ поверхностей непосредственно перед разрушением и после него имела существенную для регистрации величину. По-нашему мнению, таким образом процессы, происходящие в подповерхностных слоях, отражаются на регистрируемой величине, т.е. на интегральном значении РВЭ.

Иллюстрацией описанного механизма могут служить приведенные ранее микрофотографии поверхности трения латуни Л63 (рисунок 5). Следует отметить присутствие приподнятого участка (рисунок 5, *d*), в котором, по всей вероятности, идут процессы выдавливания пузырька или сегмента (рисунок 9, *z* и *e*).

Таким образом, на основе результатов исследования природы периодических изменений РВЭ трущейся поверхности предложена модель подповерхностного усталостного разрушения при тяжелых режимах трения, в соответствии с которой процессы усталостного разрушения могут протекать не только на шероховатостях поверхности, как это описывается теорией Крагельского, но и в подповерхностных слоях на глубине, превосходящей среднестатистический размер шероховатостей [19].

Гармонический анализ периодических изменений работы выхода электрона трущейся поверхности

В случае трения многофазных твердых растворов кинетика изменений РВЭ является результатом наложения периодических изменений различной длительности и амплитуды. Отсюда можно предположить, что в материалах со сложным фазовым составом кроме основного процесса накопления усталостных повреждений протекают дополнительные процессы накопления повреждений (на вторых фазах, твердых включениях и т.д.). Данный вывод подтверждается также микрофотографиями шлифов перпендикулярных поверхности трения, на этапе предразрушения для БрО6 (рисунок 9, *a* и *b*) и для БрО8 (рисунок 9, *в*). Из рисунка 9, в видно, что в случае многофазного

материала в подповерхностном слое, лежащем между поверхностью трения и зоной разрушения, наблюдается множество мелких трещин, что не наблюдается в случае однофазного материала. Это может служить подтверждением наличия нескольких, одновременно действующих механизмов усталостного разрушения в подповерхностных слоях многофазных материалов при трении.

Результаты регистрации РВЭ трущейся поверхности могут быть представлены в виде временных рядов, поэтому для исследования таких дополнительных процессов усталостного разрушения может быть применен гармонический (спектральный) анализ. Наиболее удобным [20] методом обработки результатов испытаний на фрикционную усталость, является метод вычисления спектральной плотности по оценкам автокорреляционной функции (метод Блекмана–Тьюки). Метод Блекмана–Тьюки основан на дискретном преобразовании Фурье:

$$G(f) = 2\Delta t(R_{xx}(0) + 2 \sum_{k=1}^{L-1} R_{xx}(k) \omega(k) \cos(2\pi f k \Delta t)), \quad (0 < f < \frac{1}{2\Delta t}), \quad (1)$$

где $G(f)$ – спектральная функция; $R_{xx}(k)$ – ковариационная функция; $R_{xx}(0)$ – дисперсия; $\omega(k)$ – весовая функция; f – частота; Δt – интервал дискретизации.

По периодическим изменениям РВЭ трущихся поверхностей однофазного (БрО6) и двухфазного (БрО8) материалов рассчитывались их спектры в функции периода. На рисунке 11 представлены периодические изменения РВЭ трущихся поверхностей и их спектры для этих бронз. Отсюда видно, что однофазный материал проявляет строго периодические изменения РВЭ и их спектр имеет один максимум. В случае трения двухфазного материала периодические изменения содержат дополнительные гармоники и наблюдается дополнительный максимум в их спектре. На рисунке 12 представлены примеры рассчитанных спектров периодических изменений РВЭ трущейся поверхности некоторых материалов.

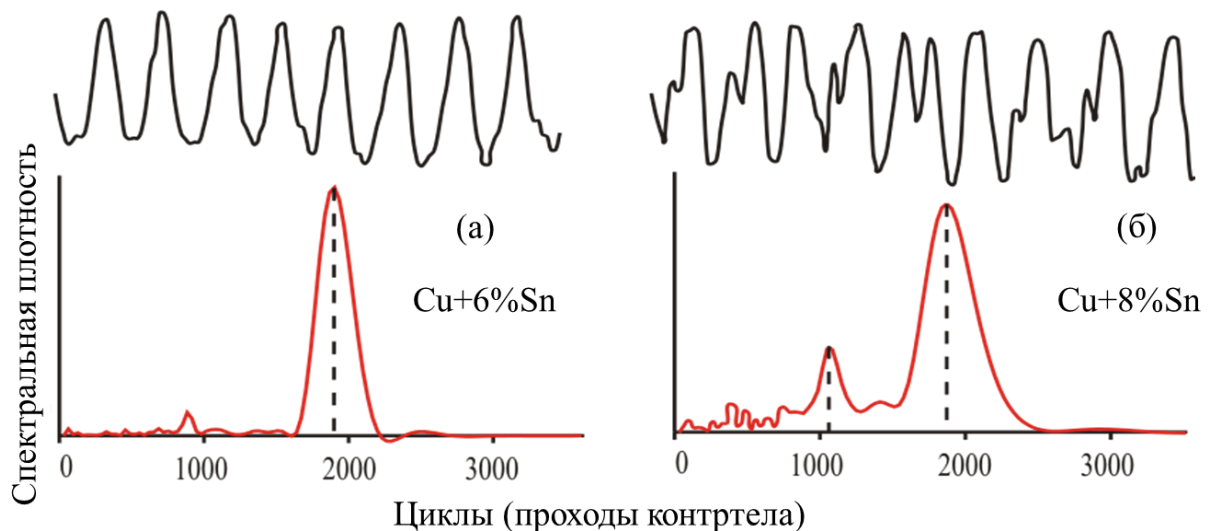


Рисунок 11 – Периодические изменения работы выхода электрона трущихся поверхностей однофазной (а) и двухфазной (б) бронз и их спектры

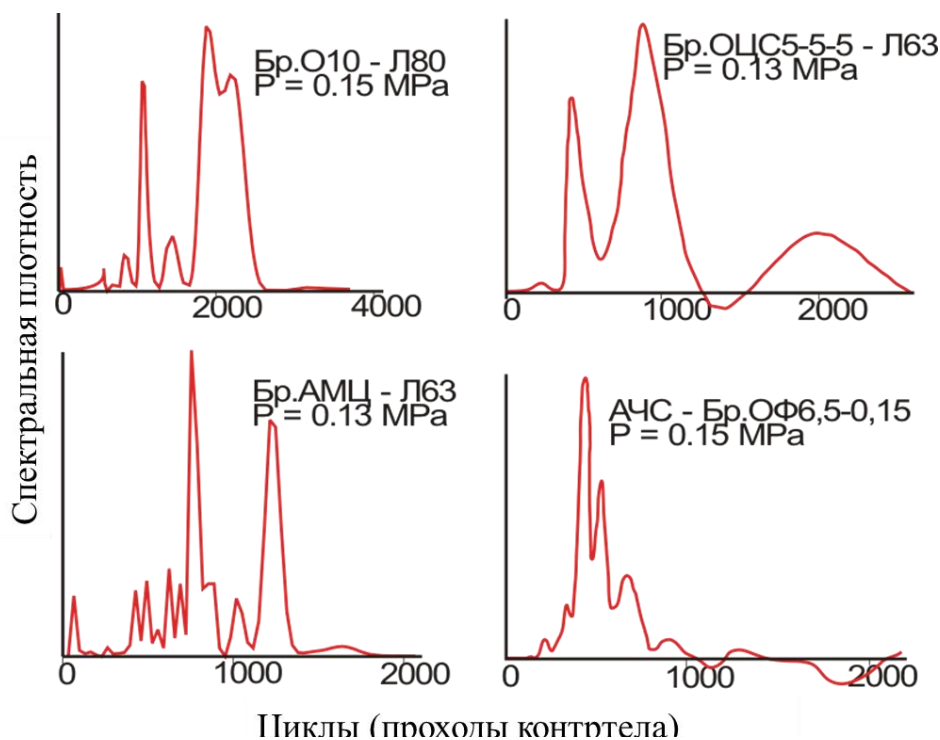


Рисунок 12 – Примеры спектров периодических изменений работы выхода электрона трущихся поверхностей для некоторых материалов

Появление дополнительных максимумов для многофазных материалов, очевидно, связан с работой дополнительных механизмов усталостного разрушения. Поэтому исследование спектральных характеристик периодических изменений РВЭ поверхности в зависимости от металлофизических свойств материалов и условий трения позволит получить качественно новую информацию о характере протекания усталостных процессов.

Основной сложностью спектрального анализа в целом является физическая интерпретация численных характеристик спектра. Как известно [21], для описания спектральных кривых приемлема методика описания вероятностных распределений. В работе [21] отмечалось, что из-за сложности интерпретации и неопределённости в вычислениях спектров амплитуда исследуемой функции, либо другая зависящая от амплитуды величина, в абсолютном смысле не имеют большого значения в спектре. В тоже время, частота (период), соответствующий особенностям спектра (пикам, впадинам, наклонным участкам), обладает намного большей информативностью, и поэтому эти параметры употребляются при описании спектров как самостоятельные (абсолютные) величины. Ордината же, в основном, употребляется только при сравнительных описаниях спектров. Максимумы и минимумы спектров, обычно, интерпретируются, как проявления, соответственно, конструктивной и деструктивной интерференции различных периодических процессов. В подобных случаях изучаются частоты, соответствующие этим максимумам и минимумам, а не фактическая высота спектральной кривой в экстремальных точках.

Рассмотрим некоторые параметры спектра периодических изменений РВЭ, которые могут быть достаточно просто интерпретированы при испытаниях на фрикционную усталость и, в первую очередь, число циклов нагружения соответствующее максимуму спектра.

Как было показано выше, один период (в единицах прохода контртела по поверхности) изменения РВЭ трущейся поверхности соответствует числу циклов нагружения, необходимых для разрушения поверхностного слоя при усталостном

изнашивании материала. Следовательно, число циклов нагружения, соответствующее максимуму спектра, будет определять статистически усредненное число циклов до разрушения трущейся поверхности.

Предполагая, что вероятность разрушения трущейся поверхности P в исследуемом диапазоне числа циклов до разрушения равна 1, из свойства вероятности события (вероятность любого события определяется как сумма вероятностей всех элементарных событий, составляющих событие), следует, что относительная спектральная плотность может быть интерпретирована как функция вероятности разрушения трущейся поверхности, отнесенная к единичному интервалу, т.е. как плотность функции вероятности. Тогда, относительная спектральная плотность имеет смысл функции вероятности разрушения трущейся поверхности при некотором числе циклов нагружения и её можно считать функцией плотности распределения.

Соппротивление поверхностных слоёв материалов фрикционной усталости характеризуется циклической долговечностью, т.е. количеством циклов повторного деформирования при контактных напряжениях, превышающих предел текучести, необходимых для образования микротрещин и/или отделения продуктов изнашивания.

Как для объёмной усталости, так и для фрикционной, циклическая долговечность материала изменяется в некоторых пределах, причем верхняя и нижняя границы долговечности могут значительно отличаться от наиболее вероятного ее значения. В практике испытаний на объёмную усталость принято считать, что усталостная долговечность имеет некоторое распределение в интервале от нижней до верхней границы.

Как показано ранее, относительная спектральная плотность имеет смысл функции вероятности разрушения трущейся поверхности на некотором числе циклов нагружения и её можно считать функцией плотности распределения. Следовательно, циклическая долговечность может быть определена по изменению относительной спектральной плотности периодических изменений РВЭ трущейся поверхности. Известно, что математическое ожидание (среднее значение) некоторой величины $x(k)$ имеющей плотность распределения вероятности $p(x)$, вычисляется с помощью соответствующего предельного перехода в сумме произведений значений величины $x(k)$ на вероятность наступления этих событий:

$$E[x(k)] = \sum_{x=-\infty}^{\infty} x^* p(x) = \mu_x. \quad (2)$$

Из (2) следует, что среднее значения циклической долговечности может быть определено следующим образом:

$$N_c = \sum_{N=0}^{N_m} N^* f(N) = E(N). \quad (3)$$

Циклическая долговечность характеризуется некоторой величиной вероятности, которую можно определить с помощью выражения:

$$P(N_1 < N < N_2) = \sum_{N=N_1}^{N_2} f(N), \quad (4)$$

где $P(N_1 < N < N_2)$ - вероятность разрушения трущейся поверхности материала в некоторых пределах от N_1 до N_2 .

В случае $N_1 = N_2$, величина $P(N)$ будет описывать вероятность разрушения трущейся поверхности при числе циклов N . Выражение (4) позволяет достаточно просто определить наиболее вероятное значения циклической долговечности материала, а также вероятность разрушения в некотором диапазоне около данного значения циклической долговечности, т.е. доверительные интервалы циклической долговечности материала.

Таким образом, для исследования дополнительных процессов усталостного разрушения предложены принципы исследования спектральных характеристик

периодических изменений интегрального значения РВЭ трущейся поверхности, позволяющие определять вероятность разрушения при заданном значении числа циклов до разрушения, границы усталостной долговечности и другие вероятностные характеристики усталостной долговечности материалов.

Построение кривых усталости по периодам работы выхода электрона трущейся поверхности

Исходя из усталостной природы периодических изменений интегрального значения РВЭ трущейся поверхности, можно предположить, что они должны коррелировать с известными положениями теории объемного усталостного разрушения. Поэтому нами сделана попытка построения кривых аналогичных по смыслу кривым усталости при объемном нагружении (кривым Вёллера). В случае объемных испытаний материалов на усталость кривые усталости являются основной формой представления результатов испытаний и представляют собой график зависимости между напряжением и числом циклов нагружения до разрушения. Они используются для определения предела выносливости материалов, который представляет собой некоторое значение напряжений, ниже которого даже после большого числа циклов нагружения не происходит разрушение материала.

Учитывая, что в случае фрикционной усталости разрушение вносит вклад в износ материалов, нами сделана попытка найти корреляцию величины износа с характеристиками фрикционной усталости по периодическим изменениям РВЭ. Для пары Л63-Бр08 по периодическим изменениям РВЭ трущейся поверхности латуни построена кривая фрикционной усталости и зависимость усредненной величины износа за период изменения РВЭ. Результаты таких исследований представлены на рисунке 13 в нормальных (а) и логарифмических (б) координатах. Отсюда видно, что зависимость износа полностью повторяет ход кривой фрикционной усталости.

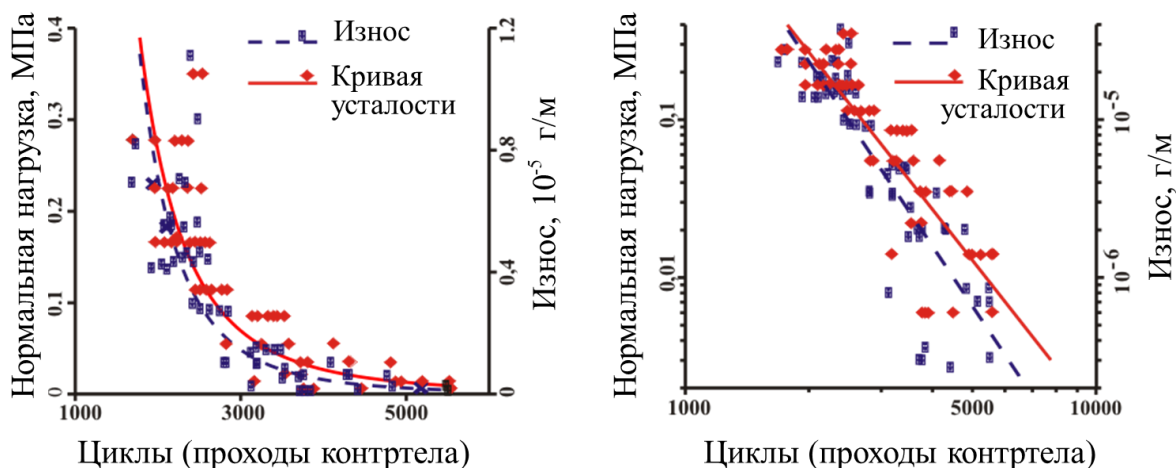


Рисунок 13 – Кривая фрикционной усталости и зависимость величины износа за период изменения работы выхода электрона для пары трения Л63–Бр08 в нормальных (а) и логарифмических (б) координатах

Следует отметить, что параметры фрикционной усталости в значительной мере зависят не только от свойств материала образца, но и от свойств контртела. Отсюда следует, что в случае фрикционной усталости усталостные характеристики материала следует рассматривать во взаимосвязи с прочими характеристиками процесса трения, т.е. применять системный подход [1].

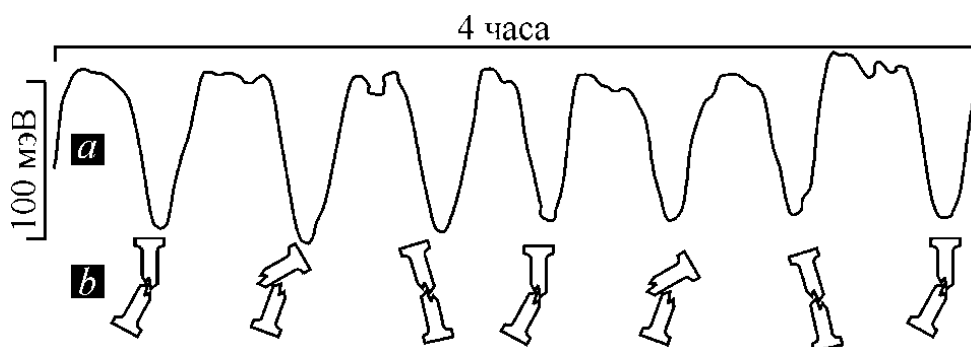


Рисунок 14 – Периодические изменения РВЭ трущейся поверхности (а) и схематичное сравнение периодических изменений РВЭ трущейся поверхности с испытаниями на объемную усталость (b)

В соответствие с проведенными исследованиями один цикл периодических изменений РВЭ трущейся поверхности соответствует сломанному образцу при классических усталостных испытаниях (рисунок 14). С учетом того, что регистрация РВЭ производится интегрально по всей дорожке трения, то один цикл периодических изменений РВЭ будет соответствовать статистически обработанной серии результатов классических испытаний на усталость [20].

Заключение

С использованием непрерывного неразрушающего контроля трущейся поверхности методом Кельвина экспериментально обнаружены периодические изменения ее работы выхода электрона (РВЭ). Проверка независимыми методами показала, что периодичность изменений работы выхода электрона трущейся поверхности обусловлена периодически идущими усталостными процессами в относительно толстых поверхностных слоях материала при трении. Проведенный статистический анализ периодических изменений РВЭ трущейся поверхности показал, что они являются воспроизводимыми и незатухающими, следовательно, могут применяться для анализа кинетики процессов усталостного разрушения при трении.

В зависимости от металлофизических особенностей материалов, в спектрах периодических изменений работы выхода электрона трущейся поверхности могут появляться дополнительные гармоники, свидетельствующие о работе дополнительных механизмов протекания усталостных процессов. Для исследования дополнительных процессов усталостного разрушения на базе дискретного преобразования Фурье разработаны принципы исследования спектральных характеристик периодических изменений интегрального значения работы выхода электрона трущейся поверхности, позволяющие определять вероятность разрушения при заданном значении числа циклов до разрушения, границы усталостной долговечности и другие вероятностные характеристики усталостной долговечности материалов.

С учетом общности закономерностей объемного и поверхностного деформирования, один цикл периодических изменений РВЭ трущейся поверхности будет соответствовать сломанному образцу при классических усталостных испытаниях, а с учетом того, что регистрация РВЭ производится интегрально по дорожке трения, то один цикл периодических изменений соответствует статистически обработанной серии результатов классических испытаний на усталость. Поэтому, поиск корреляции между результатами испытаний на объемную усталость и установленными периодическими изменениями РВЭ при трении может привести к созданию ряда экспрессных методов испытания материалов на объемную усталость.

Список литературы:

1. Ибатуллин, И. Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография / И. Д. Ибатуллин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.
2. Zharin, A. L. Periodic Surface Destruction under Severe Dry Friction Condition and its Detection by the Kelvin Probe Technique / A. L. Zharin, N. A. Shipitsa // Proc. STLE Annual Meeting-Cleveland, Ohio. – 2008.
3. Жарин, А. Л. О связи периодических изменений работы выхода электрона трущейся поверхности с усталостным разрушением / А. Л. Жарин, В. А. Генкин, О. В. Роман // Трение и износ. – 1986. – Т. 7. – № 2. – С. 330–341.
4. Zharin, A. L. Application of the Contact Potential Difference Technique for On-Line Rubbing Surface Monitoring (Review) / A. L. Zharin, D. Rigney // Tribology Letters. – 1998. – V. 4. – P. 205–213.
5. Пантелеев, К. В. Диагностика локальных изменений пластической деформации по работе выхода электрона / К. В. Пантелеев, А. И. Свистун, А. Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2015. – № 1 (10). – С. 56–63.
6. Жарин, А. Л. Исследование локальных деформаций материалов методами зондовой электрометрии при различных видах нагружения / А. Л. Жарин, К. В. Пантелеев, А. И. Свистун // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборн. научн. трудов: в 3 кн., Минск, 16–18 сентября 2015 г.; Физ. техн. ин-т НАН Беларуси; ред. кол. С. А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – Кн. 1. – С. 39–46.
7. T Kasai, XY Fu, DA Rigney, AL Zharin Applications of a non-contacting Kelvin probe during sliding // Wear. – 1999. V. 225. – p. 1186–1204.
8. Zharin, A. L. Macroscopic effects of delamination wear / A. L. Zharin, G. P. Shpenkov // Wear. – 1979. – V. 56. – P. 309–313.
9. Pantsialeueu, K. U. Charge sensitive techniques in control of the homogeneity of optical metallic surfaces / K. Pantsialeueu, A. Zharin, K. Kierczynski // Przegląd Elektrotechniczny. – 2016. – R. 92, №8. – P. 190–193.
10. Charge sensitive techniques in tribology studies / K. Pantsialeueu, A. Zharin, M. Opielak, P. Rogalski // Przegląd Elektrotechniczny. – 2016. – R. 92, № 11. – P. 239–243.
11. Жарин, А. Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии / А. Л. Жарин. – Минск : Бестпринт, 1996. – 235 с.
12. Пантелеев, К. В. Построение измерителей контактной разности потенциалов / К. В. Пантелеев, В. А. Микитевич, А. Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 1. – С. 7–15.
13. Пантелеев, К. В. Методы измерений работы выхода электрона для контроля состояния поверхностей в процессе трения / К. В. Пантелеев, А. И. Свистун, А. Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 2(9). – С. 107–113.
14. Halas, S. Is work function a surface or a bulk property? / S. Halas, T. Durakiewicz // Vacuum. – 2010. – Vol. 85. – P. 486–488.
15. Zharin, A. L. Contact Potential Difference Techniques As Probing Tools in Tribology and Surface Mapping // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and

Nanotechnology / A. L. Zharin ; ed.: V. Bhushan. – Heidelberg: Springer–Verlag, 2010. – P. 687–720.

16. Савицкий, К. Б. Определение плотности дислокаций на поверхности трения медных образцов / К. Б. Савицкий, М. И. Загребенщикова // Изв. ВУЗов, Физика, 1961. – № 5. – С. 149–152.

17. Роль дислокаций в упрочнении и разрушении металлов / В. С. Иванова, Л. К. Гордиенко, В. Н. Геминев и др. – М. : Наука, 1965. – 180 с.

18. Григорьев, А. Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей / А.Я. Григорьев. – Минск : Беларуская навука, 2016.

19. Жарин, А. Л. Некоторые особенности усталостных процессов при трении скольжения / А. Л. Жарин, Н. А. Шипица, Е. И. Фишбейн // Трение и износ, 1993. –Т. 14. – № 4. – С. 645–657.

20. Жарин, А. Л. Определение характеристик усталостного разрушения материалов при трении скольжения. Часть 3. Статистический анализ и физическая интерпретация результатов / А. Л. Жарин, Н. А. Шипица, Д. И. Сарока // Трение и износ. – 2001. – Т. 22. – № 6. – С. 638–643.

21. Бат, М. Спектральный анализ в геофизике / М. Бат. – М. : Недра, 1980. – 405 с.