

## ОСОБЕННОСТИ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ИЗНОСА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТНОЙ АКТИВАЦИИ

*Акинин Д.В.<sup>1</sup>, Прохоров В.Ю.<sup>2</sup>, Токарева О.В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Мытищинский филиал, Мытищи;*

<sup>2</sup>*Академия государственной противопожарной службы МЧС России, Москва*

**Ключевые слова:** износ деталей, линейный износ, поверхностная активация, тарировочный график, гамма-излучение, скорость счета.

**Аннотация.** Обеспечение надежной работы деталей, механизмов машин и материалов является одним из путей повышения качества и экономичности машин. Авторами предлагается один из наиболее эффективных современных методов исследования износа деталей машин – метод поверхностной активации. Данный метод определения износа имеет ряд преимуществ: возможность исследования износа поверхностей сложной конфигурации; проведение ускоренных износных испытаний при малых скоростях изнашивания исследуемых деталей; возможность непрерывного дистанционного контроля износа без остановки и разборки механизма и др.

## FEATURES OF THE WEAR MEASUREMENT TECHNIQUE USING SURFACE ACTIVATION

*Akinin D.V.<sup>1</sup>, Prokhorov V.Yu.<sup>2</sup>, Tokareva O.V.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Federal state budgetary institution of higher professional education Bauman Moscow State Technical University, Mytischki;*

<sup>2</sup>*State Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow*

**Keywords:** wear of parts, linear wear, surface activation, calibration schedule, gamma radiation, counting rate.

**Abstract.** Ensuring reliable operation of machine parts, mechanisms and materials is one of the ways to improve the quality and efficiency of machines. The authors propose one of the most effective modern methods of studying the wear of machine parts – the method of surface activation. This method of determining wear has a number of advantages: the possibility of studying the wear of surfaces of complex configuration; conducting accelerated wear tests at low wear rates of the studied parts; the possibility of continuous remote monitoring of wear without stopping and disassembling the mechanism, etc.

Ресурс и предельное состояние машин в значительной степени регламентированы износом деталей. Обеспечение их надежной работы является одним из путей повышения качества и экономичности машин [1]. Усложнение конструкции машин также снижает их надежность, которая в значительной степени зависит от износостойкости узлов трения [2]. Вопросам исследования износа деталей, механизмов машин и материалов посвящено большое количество работ и статей [3-8].

Одним из наиболее эффективных современных методов исследования износа деталей машин является метод поверхностной активации.

Сущность его заключается в следующем. На рабочей поверхности исследуемой детали выбирается наиболее типичный для данной поверхности участок (пятно диаметром 5...8 мм), который при бомбардировке ускоренными заряженными частицами активируется на заданную глубину. Глубина активации должна несколько (на 10...15%) превышать ожидаемую величину износа за весь период износных испытаний.

Активация участка поверхности ускоренными заряженными частицами позволяет получать на поверхности радиоактивное пятно. Жесткая составляющая гамма-излучения наведенной активности проникает через корпус механизма и регистрируется радиометрической аппаратурой в виде статистически распределенных во времени электрических импульсов, следующих с некоторой средней частотой – скоростью счета. Вследствие износа активированного пятна происходит непрерывное уменьшение скорости счета, что позволяет без остановки и разборки машины непрерывно и дистанционно вести наблюдение за износом. В качестве критерия оценки износа принята относительная скорость счета – отношение скорости счета в момент замера к начальной.

При определении износа детали в линейных единицах в работы по подготовке к испытаниям включают моделирование износа, которое обычно выполняется способом истирания плоскопараллельных активированных образцов. В процессе этой работы систематически измеряется толщина снятого слоя образцов и соответствующая относительная скорость счета. По данным моделирования строится тарифовочный график, устанавливающий функциональную зависимость между относительной скоростью счета и линейным износом.

Отсюда следует, что этот метод является сложным физическим методом косвенного определения износа, эффективность которого в значительной степени зависит от правильно выбранной методики измерения и измерительной аппаратуры. Поэтому при планировании и проведении износных испытаний следует учитывать некоторые особенности применения такого метода.

Первая особенность состоит в том, что при разработке методики испытаний прежде всего определяются необходимые и достаточные критерии оценки износа: абсолютные значения линейного износа или относительные единицы. При этом следует учитывать, что в случае возможности характеризовать износ в относительных единицах отпадает необходимость моделирования износа на облученных образцах, и как следствие, упрощается проведение испытаний.

Вторая особенность связана с конфигурацией исследуемой поверхности. В случае измерения износа сложных поверхностей, получаемых движением образующих по траекториям 2-го и 3-го порядка, для построения тарифовочного графика моделирование износа выполняется на деталях. При этом истирается непосредственно активированная и сопрягаемая с нею деталь.

Моделирование на деталях значительно сложнее, чем на плоских образцах, так как требует специальной оснастки. Поэтому в некоторых случаях вместо моделирования на деталях может быть рассчитана специальная поправка на профиль поверхности. Введение этой поправки при обработке результатов измерения износа сложных поверхностей позволяет с некоторым приближением использовать тарифовочный график, полученный на плоскопараллельных образцах.

Необходимость введения этой поправки обусловлена способом активации. Траектории частиц при активации выведенным с циклотрона пучком можно считать параллельными. При бомбардировке криволинейного участка поверхности частицы попадают на поверхность детали под различными углами и, следовательно, при одинаковом пробеге в данном материале активируют поверхность в пределах пятна на различные глубины. Это приводит к тому, что относительная скорость счета при равномерном износе поверхности исследуемой детали уменьшается быстрее, чем при моделировании на плоских образцах, и износ, определенный без учета поправки на профиль, оказывается больше фактического. Погрешность на профиль возрастает с увеличением кривизны поверхности и с увеличением размеров активируемого пятна. Третья особенность связана с выбором аппаратуры, который определяется величиной износа и продолжительностью испытаний.

При измерениях малых износов и длительных испытаниях требуется определение поправки на распад, а также учет влияния фактора времени на интегральный тарировочный график. Естественный распад различных изотопов радиоактивного пятна приводит к изменению тарировочного графика и приближает экспериментальную кривую моделирования, полученную для смеси различных радиоактивных изотопов, к кривой распределения по глубине наиболее долгоживущих изотопов. Это вызывает погрешность при определении линейного износа, величина которой для деталей из чугуна и низколегированных сталей при продолжительности испытаний в 5...6 месяцев составляет + 2-3%, а в 1-2 месяца 1-1,5%.

Изменение тарировочного графика во времени может быть исключено при наблюдении за активностью одного выбранного из смеси изотопа, поскольку распределение его по глубине со временем не меняется. При этом также предельно упрощается введение поправки на распад. Это достигается селекцией регистрируемых импульсов по амплитуде способом интегральной или дифференциальной дискриминации при использовании сцинтилляционных счетчиков, у которых амплитуда импульса на выходе датчика пропорциональна энергии гамма-кванта, вызвавшего импульс. Селекция импульсов отсекает также шумовые импульсы фотоумножителей, энергетический эквивалент которых не превышает 50 кэВ, и уменьшает влияние вторичного излучения, что существенно повышает точность измерений.

Однако в случае применения дифференциальной дискриминации снижается скорость счета. Это приводит к увеличению продолжительности каждого замера и к возрастанию общей погрешности измерений за счет нестабильности аппаратуры. В связи с этим измерения с использованием дифференциальной дискриминации рекомендуются в случае необходимости проведения точных измерений малых износов при длительных испытаниях (5 месяцев и более). При продолжительности износных испытаний в 1-2 месяца можно ограничиться применением лишь интегральной дискриминации. Причем выбор оптимального порога дискриминации в некоторых случаях позволяет получить эффект, близкий к дифференциальной дискриминации. Так, например, при измерении износа деталей из чугуна и низколегированных сталей, облученных дейтонами, порог дискриминации в 1 мэВ позволяет регистрировать практически гамма-излучение

только одного изотопа – кобальта-56 по линии в 1,24 мэв. В других случаях необходим тщательный анализ изотопного состава смеси.

При отработке методики измерений в каждом конкретном случае необходимо тщательно анализировать также условия измерения активности, к которым относятся внешние (температура, влажность, наличие вибрации, стабильность питания и другие факторы) и геометрические условия измерения, определяемые кинематикой и характером работы деталей механизма.

В зависимости от кинематики механизма и геометрии детали различают измерения 3-х категорий:

- измерения с постоянным телесным углом между чувствительным окном датчика и активированным пятном (пятно неподвижно, например, на гильзе цилиндра);
- измерения с закономерным изменением телесного угла (пятно подвижно, например, при вращении детали с постоянной скоростью);
- условия незакономерного изменения телесного угла.

Высокая точность результатов непрерывных измерений может быть обеспечена в первых двух случаях. Необходимо отметить, что на скорость счета значительно влияют толщина и материал экранирующей стенки между пятном и кристаллом, а также масса металла в районе зоны, за которой ведется радиометрическое наблюдение. Поэтому необходимо, чтобы влияние этих факторов было постоянным и, по возможности, минимальным. При отсутствии возможности обеспечить постоянство массы металла и толщины экранирующих стенок необходимо определить их влияние и предусмотреть возможность исключения из общей скорости счета переменных составляющих.

Внешние факторы, воздействующие на детектор излучения и радиометрическую аппаратуру, вносят свои особенности в методику измерения. Так, в случае колебаний этих факторов в широких пределах методически правильно производить замеры в то время, когда дестабилизирующее влияние этих факторов имеет наиболее часто повторяющееся постоянное и наименьшее значение. Если исключить воздействие дестабилизирующих факторов в момент измерения активности невозможно, то необходимо выполнять эталонирование измерений и вводить соответствующие поправки методом сравнения с эталоном.

Метод поверхностной активации не исключает применения ранее известных методов, но у него есть преимущества: возможность непрерывного дистанционного контроля износа без остановки и разборки механизма; высокая чувствительность, позволяющая регистрировать износ до 0,1 мкм, и безопасность, позволяющая применять его в производственных условиях без специальных мер защиты.

В результате сопоставления этого метода с известными ранее, выявлены основные области наиболее эффективного применения его по целевому принципу:

- исследование динамики процессов износа для изучения закономерностей изнашивания деталей машин;
- исследование износа поверхностей сложной конфигурации (поверхности трения в червячных передачах, рабочие поверхности прокатных валков, рабочие кромки матриц, пуансонов и т. п.);

– проведение ускоренных износных испытаний при малых скоростях изнашивания исследуемых деталей (прецизионные подшипники, направляющие станков и т. п.);

– в тех случаях, когда применение других методов не решает задачу исследования (например, при изучении процессов износа продолжительностью в несколько секунд).

С учетом особенностей этого метода в ЦНИИМЭ были проведены износные испытания автомобильного двигателя ЯМЗ-236 для исследования влияния условий пуска на износ гильзы цилиндра. Участок верхней максимально изнашивающейся зоны рабочей поверхности гильзы цилиндра активировался на циклотроне пучком дейтонов энергией 12,5 мэВ. Испытания проводились в летних и зимних условиях. Анализ условий измерения и рациональный выбор методики позволили применить простейший комплекс радиометрической аппаратуры, состоящий из сцинтилляционного счетчика на базе фотоумножителя ФЭУ-16Б с кристаллом NaI (Т1) 30×20 мм и пересчетного прибора ПС-1000 (с интегральным дискриминатором).

Отсутствие дифференциальной дискриминации, а следовательно, некоторое снижение точности получаемых результатов, обосновано также экономическими соображениями, поскольку применение дифференциальной дискриминации, как правило, приводит к существенному (в 5-6 раз) возрастанию стоимости основных средств на обеспечение испытаний необходимой аппаратурой. При этом величина погрешности определения линейного износа, вызываемая изменением тарировочного графика вследствие перераспределения изотопов по глубине активированного слоя, при износах в несколько микрон незначительна и не выходит за пределы допускаемой ошибки измерения, обусловленной нестабильностью аппаратуры.

На основании анализа конкретных условий испытаний, а также предварительных данных измерения активности была принята методика измерения активности на остановленном и охлажденном двигателе при постоянном положении поршня в цилиндре. При этом определяли и, в случае необходимости, учитывали или предотвращали влияние внешних условий на стабильность показаний аппаратуры (колебания напряжения, постоянство геометрических условий, изменение влажности и т.д.). Для исключения влияния случайных погрешностей аппаратуры, обусловленных различными не учитываемыми факторами, предусматривалось многократное повторение замеров в процессе определения активности до или после каждого цикла испытаний.

В связи с тем, что в задачу исследования входило получение сравнительных данных о скорости изнашивания гильзы при различных способах предпусковой подготовки двигателя, результаты измерения могли быть представлены в виде уменьшения относительной скорости счета. Для снижения погрешности результатов измерения, вызываемых изменением во времени величины поправки на распад, предусматривали чередование различных циклов сравнительных испытаний при выполнении их в течение непродолжительного времени.

Принятая методика позволила существенно повысить точность получаемых результатов измерения активности при минимальных затратах времени и средств на испытание.

В проведенных исследованиях определяли также линейный износ с целью получения сравнительных данных о точности метода поверхностной активации. Результаты измерения износа сравнивали с результатами, полученными методом лунок. Так, для летних испытаний износ гильзы, измеренный методом поверхностной активации, составил 4,7 мкм, а по лункам 4,0 мкм.

### **Заключение и рекомендации**

1. Метод поверхностной активации позволяет решать вопросы, связанные с изнашиванием различных деталей машин, и исследовать износы, которые в ряде случаев не могут быть определены другими методами.

2. Высокая чувствительность и точность метода поверхностной активации при исследовании износа могут быть обеспечены лишь в случае тщательного анализа условий и задач исследования с последующим выбором рациональной методики измерений.

3. Применение метода поверхностной активации экономически целесообразно при проведении непрерывных измерений в процессе ускоренных износных испытаний.

### **Список литературы**

1. Быков В.В., Окладников Л.В., Прохоров В.Ю. Новые материалы и покрытия для узлов трения навесного оборудования // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2, № 2-2(7-2). – С. 21-27.
2. Прохоров В.Ю. Исследование физико-химических и трибологических характеристик углерод-углеродных композиционных материалов // Техника и оборудование для села. – 2014. – № 4(202). – С. 20-23.
3. Прохоров В.Ю., Быков В.В. Повышение долговечности и износостойкости подшипников скольжения навесного технологического оборудования // Техника и оборудование для села. – 2017. – № 8(242). – С. 36-39.
4. Быков В.В., Прохоров В.Ю. Пути повышения долговечности и износостойкости подшипника скольжения навесного технологического оборудования // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2017. – Т. 1. – С. 77-79.
5. Прохоров В.Ю. Повышение износостойкости шарнирных сопряжений манипуляторов лесозаготовительных машин // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 2. – С. 198-199.
6. Прохоров В.Ю. Пути реализации эффекта безызносности шарнирных сопряжений // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 43-46.
7. Лаптев А.В., Прохоров В.Ю. Результаты исследований трибологических характеристик УУКМ для тяжело нагруженных узлов трения машин манипуляторного типа // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2014. – Т. 18., № S2. – С. 166-168.
8. Прохоров В.Ю. Исследование трибологических характеристик конструкционных материалов на противозадирные свойства смазок // Техника и оборудование для села. – 2018. – № 1(247). – С. 38-41.

### Сведения об авторах:

*Акинин Дмитрий Вячеславович* – к.т.н., доцент кафедры колесных и гусеничных машин;

*Прохоров Виктор Юрьевич* – к.т.н., доцент, профессор кафедры механики и инженерной графики;

*Токарева Ольга Владимировна* – доцент кафедры механики и инженерной графики.