

# СПЕКТР МОЩНОСТИ КАК ХАРАКТЕРИСТИКА ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

А.Федотов, МАТИ–РГТУ им. К.Э.Циолковского; afed83@gmail.com

В практике оптических измерений для описания шероховатости поверхности обычно применяют усредненные характеристики. Иной подход к измерению многомасштабной шероховатости связан с использованием достаточно универсальной характеристики многомасштабной шероховатости твердых тел – спектра мощности профиля шероховатости, вводимой аналогично характеристике радиосигналов. Это позволяет при фракталографических исследованиях поверхностей разрушения перейти от качественных методов измерений к количественным.

Потребность современной техники в прецизионных изделиях предъявляет чрезвычайно высокие требования к точности их изготовления и качеству обработки рабочих поверхностей. Развитие современных измерительных систем и приборов предоставило возможность измерения многомасштабной шероховатости поверхностей инженерных изделий различного назначения, вплоть до наномасштабов. Для описания шероховатости поверхностей на практике используются усредненные характеристики шероховатости ( $R_a$ ,  $R_q$  и т.п.), алгоритмы определения которых и типовые значения закреплены в ГОСТ РФ и государственных и международных стандартных зарубежных стран [1]. Однако этот подход нельзя признать вполне удовлетворительным, так как при этом не удается получить четкой функциональной зависимости между средними характеристиками шероховатости поверхностей и функциональными свойствами таких поверхностей. Этот факт связан, в конечном счете, с недостаточностью указанного усреднения как такового, так как одним и тем же средним величинам могут соответствовать кардинально различные (в том числе и

функционально) типы шероховатости. Стремительное развитие вычислительной техники и ее широкое внедрение в практику сделало возможной реализацию иного подхода. В рамках этого подхода профили шероховатости рассматриваются как реализации случайного процесса (поля), и к их анализу привлекаются такие инструменты, как корреляционные функции, структурные функции, спектральный анализ, вэйвлет-анализ [2]. В данной работе, как и в работе [3], в качестве характеристики шероховатости поверхности, более тонкой, чем традиционно используемые простые средние характеристики, и вместе с тем макроскопической, используется, как это предложено в работах [4, 5], спектр мощности.

## СПЕКТР МОЩНОСТИ И ЕГО СВЯЗЬ С ПАРАМЕТРАМИ ШЕРОХОВАТОСТИ

Цифровой спектральный анализ является мощным современным методом обработки сигналов. В его основании лежит оценка и изучение спектра мощности сигнала, принимаемого за некоторый случайный процесс [6]. Сам спектр мощности пропорционален квадрату Фурье-образа сигнала (метод Кули-Тьюки [6]), но

чаще его вводят как Фурье-образ корреляционной функции. В нашем случае сигнал отождествляется с профилем шероховатости.

В большинстве практических работ по исследованию шероховатости получило широкое распространение применение метода классической периодограммы с прямоугольным окном [4, 5]. Этот выбор связан с простотой его реализации и его достаточной эффективностью при условии усреднения полученных оценок спектра мощности по ансамблю профилей шероховатости. Согласно этому методу спектр мощности определяется так:

$$P(\omega) = \frac{1}{l} \left| \int_0^l h(x) \exp(i\omega x) dx \right|^2, \quad (1)$$

где  $\omega$  – пространственная частота,  $l$  – длина профиля,  $h(x)$  – высота профиля. У данной оценки существует два недостатка: искажение высокочастотного хвоста и большая дисперсия («изрезанность»). С целью устранения этих недостатков предложен ряд усовершенствований этой оценки, например, метод Уэлша [6].

Существует связь спектра мощности с рядом важных для приложений характеристик про-

филей шероховатости – таких как распределение локальных углов наклонов, среднеквадратичное отклонение и других [5]. Приведем подобную связь для популярной в различных приложениях характеристики – среднеквадратичного отклонения  $R_q$ :

$$R_q = \sqrt{\int_{\omega_1}^{\omega_2} P(\omega) d\omega}, \quad (2)$$

где  $\omega_1 = 1/l$ , а  $\omega_2$  – максимальная частота, наблюдаемая в сигнале, так называемая частота Найквиста, она обратно пропорциональна шагу дискретизации профиля шероховатости.

Рассмотрим связь спектра мощности с фрактальными свойствами профиля шероховатости [4, 5]. Фрактальный профиль шероховатости обладает следующим свойством: на различных уровнях увеличения он выглядит сходным образом, т.е. статистические свойства поверхности масштабно инвариантны. Естественно, для реальной повер-

хности это свойство существует в ограниченном диапазоне масштабов (или пространственных частот). Вышеупомянутая связь выражается формулой [4, 5]:

$$P(\omega) = \frac{C}{\omega^{5-2D}}, \quad (3)$$

где  $C$  – скэйлинговая константа, зависящая от амплитуды шероховатости,  $D$  – фрактальная размерность профиля ( $1 < D < 2$ ).

### СПЕКТР МОЩНОСТИ МНОГОМАСШТАБНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ

Методология изучения многомасштабной шероховатости естественным образом разделена на две части: методика измерений шероховатости и методика обработки результатов измерений. Основной вопрос – как измерить именно многомасштабную шероховатость? Первое решение – это проводить измерения в одних и тех же намеченных для исследования участках поверхности на различных мас-

штабных уровнях. Отметим, что различные масштабные уровни мы можем получать при изменении базы измерений (длины/размера области измерений). Реализовать это можно двумя способами: 1) применять профилометр, позволяющий менять базу измерений; 2) проводить совместные измерения на профилометрах с различной базой измерений.

Второй подход во многих ситуациях может оказаться предпочтительней, потому что при этом можно использовать профилометры, реализующие разные принципы измерений (контактный, бесконтактный и т.п.). Это повышает точность измерений, так как каждый из приборов проверяется отдельно. При проведении подобных измерений важно обеспечить правильную градуацию масштабов, а именно обеспечить, чтобы их «частотные» характеристики, говоря в терминах Фурье-преобразования, имели пересечения (достаточно, чтобы они были в пределах 10–20%).

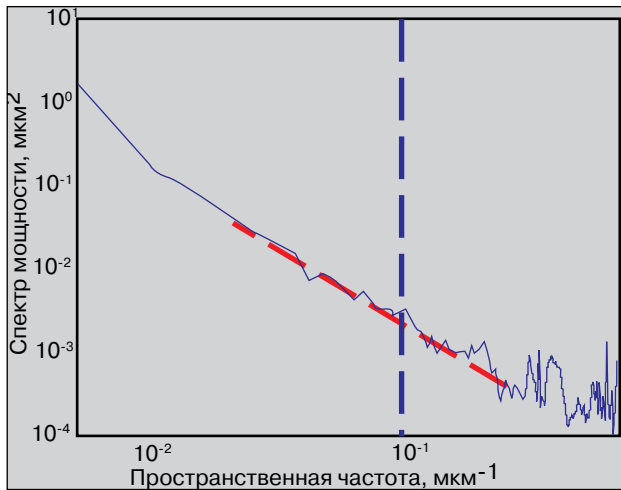


Рис.1. Средний спектр по профилям ножки эндопротеза по данным контактной профилометрии (в логарифмических координатах)

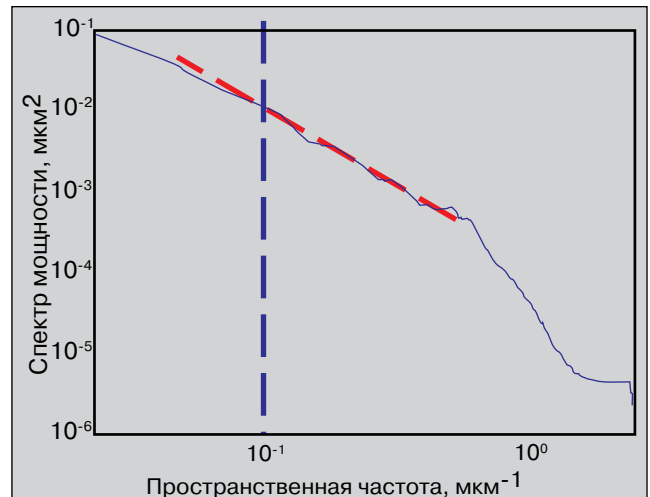


Рис.2. Средний спектр по профилям ножки эндопротеза по данным оптической профилометрии (в логарифмических координатах)

Это необходимо для того, чтобы в дальнейшем обеспечить построение единой многомасштабной характеристики шероховатости – спектра мощности. При этом характер шероховатости определяет выбор масштабов измерений.

При последующей обработке результатов измерений важной методологической особенностью является построение единого спектра мощности для разных масштабов шероховатости. Для этого спектры, полученные для измеренных ансамблей профилей разного масштаба, подвергаются «сшивке», т.е. соответствующие кривые соединяются в областях частотного пересечения. Тем самым получается единая характеристика многомасштабной шероховатости. Проиллюстрируем этот момент примером из нашей практики исследования шероховатости.

Объектом изучения являлись рабочие элементы протеза бедренного сустава человека – плоские «ножки», которые предоставила для исследований кафедра «Материаловедение и ТОМ», МАТИ-РГТУ им. К.Э.Циолковского. Для измерения шероховатости рабочих поверхностей ножек и головок применялись два устройства: контактный профилометр Hommel Tester T500 фирмы Hommelwerke и автоматизированный интерференционный микропрофилометр – АИМ, разработанный во ВНИИОФИ [7]. При проведении исследования полированной ножки были получены три профилог-

раммы (длиной 1,5 мм) с помощью Hommel T500 и ансамбль из 100 параллельных профилей (длиной 145 мкм), расположенный в той же области ножки, измеренный микропрофилометром АИМ. На рис.1 и 2 приведены спектры мощности, полученные методом Уэлша и усредненные по соответствующим ансамблям. Красными линиями выделены предлагаемые аппроксимации на высокочастотных хвостах спектра, причем наклон прямых достаточно близок друг к другу (этот вывод получен путем наложения прямой с одинаковым наклоном (штриховая линия)). Имело смысл осуществить «сшивку» спектров примерно по частоте  $0,1 \text{ мкм}^{-1}$  (синяя линия на рисунках) – к спектру с рис.1 присоединить более гладкую и достоверную высокочастотную часть от спектра с рис.2. Тем самым получилась достаточно гладкая характеристика шероховатости вдоль выделенного направления на двух масштабных уровнях.

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Спектр мощности шероховатости, в зависимости от поставленных задач исследования, позволяет проводить многие процедуры. Во-первых, проводить классификацию типов шероховатости: спектр мощности является уникальной характеристикой каждого типа шероховатости. Во-вторых, диагностировать состояние поверхности: для этого создается база данных спектров

мощности шероховатой поверхности в исходном состоянии и в состояниях после различного рода воздействий. Спектр мощности шероховатости, измеренной в случае интересующего практического воздействия на объект, сравнивается с библиотекой спектров мощности шероховатых поверхностей, и по результатам сравнения выявляют тип оказанного на изучаемую поверхность воздействия. В-третьих, метод позволяет вычислять на различных масштабных уровнях характеристики шероховатости, утвержденные ГОСТ.

Далее, для выявления периодических структур на поверхности следует рассмотреть наличие отдельных, ярко выраженных пиков. Подобный пик соответствует некоторой пространственной частоте, обратная величина которой определит масштаб возникших периодических структур (например, системы бороздок износа). А для выявления самоподобных (в том числе и фрактальных) свойств на различных масштабных уровнях следует рассмотреть возможность аппроксимации в логарифмических координатах отдельных участков спектра прямой – что можно интерпретировать как проявление свойств самоподобия (3) на соответствующих масштабных уровнях.

Спектр мощности шероховатости применяется в исследовательских задачах в различных областях техники: трение и износ, контактные задачи, адгезия

(в том числе покрытий к субстрату), рассеяние излучения на поверхности, течение жидкостей вблизи стенок и др. [1, 3, 4]. Особого внимания заслуживает такое перспективное направление приложения рассматриваемой методологии, как фрактография. Исследование процесса разрушения по следам, оставленным им в материале, где он происходил, является одной из основных практических задач фрактографических исследований. Общепринятыми методами проведения такого исследования являются рентгеноструктурные методы, а также методы оптической и растровой микроскопии. При этом преобладают во многом качественные подходы к изучению поверхностей разрушения. Введение дополнительных количественных инструментов исследования является актуальной задачей. Перспективный путь введения подобного инструментария состоит в изучении микрогеометрии (особенно шероховатости) поверхности разрушения совместно с цифровым спектральным анализом полученных данных. На основе этого подхода можно применить для использования во фрактог-

рафических исследованиях дополнительный количественный инструмент – спектр мощности шероховатости поверхности.

У такого подхода есть свои достоинства: сравнительная простота, надежность и распространность цифрового спектрального анализа; широкое распространение и дешевизна профилометров (по сравнению с электронной, атомно-силовой и зондовой микроскопией); возможность охватить обширный диапазон масштабов длины, в том числе значительно превышающих обычно задействованные во фрактографических исследованиях масштабы от сотых долей до единиц микрон; существующая связь спектра мощности с фрактальными характеристиками, что особенно важно для поверхностей разрушения металлов, имеющих во многих случаях фрактальный характер.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, а также при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 09-08-01148).

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Уайтхауз Д.** Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. – Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2009.
2. **Jiang X., Scott P. J., Whitehouse D. J., Blunt L.** Paradigm shifts in surface metrology. Part I. Historical philosophy. Part II. The current shift. – Proc. R. Soc. A, 2007, v.463.
3. **Федотов А., Мохель А., Салганик Р.** Измерение, анализ и компьютерное моделирование шероховатости поверхности субстрата как этап решения задачи оценки качества покрытий. – Научные труды МАТИ им. К.Э.Циолковского, 2007, №12.
4. **Persson B., Albohr O.** et al. On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion. – J. of Physics: Condensed Matter, 2005, v.17.
5. **Majumdar A., Bhushan B.** Characterization and modeling of surface roughness and contact mechanics. – Handbook of Micro/Nanotribology, 1999, Chapter 4.
6. **Марпл-мл.С.** Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М: Мир, 1990.
7. Руководство по эксплуатации компьютерного фазового микроскопа. – М.: ВНИИОФИ, 2002.



## СВЕТОТЕХНИЧЕСКАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

Ежегодно в Мордовском государственном университете им. Н.П.Огарева на базе светотехнического факультета проходит Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники и энергетики». В ноябре 2010 года уже в восьмой раз она собрала ведущих специалистов в области электротехники, светотехники, энергетики и метрологии из Москвы, Казани, Ульяновска, Ардатова, Тернополя и Харькова.

Пленарное заседание открыло выступление Л.В.Абрамовой «Становление и развитие вузовской светотехники Мордовии» (МГУ им.Н.П.Огарева), вопросам некоммерческого партнерства, его целям, задачам и характеру деятельности был посвящен до-

клад Е.В.Долина (Российское некоммерческое партнерство производителей светодиодов и систем на их основе) «Российское некоммерческое партнерство производителей светодиодов и систем на их основе». От Министерства экономики республики выступила М.П.Дружинкина с докладом «Тенденции и перспективы экономики Республики Мордовия». Метрологические проблемы осветили в своем докладе «Современные достижения и проблемы в области измерения пульсаций потока излучения осветительных устройств» Р.Х.Тукшаитов и А.Н.Константинов (Казанский государственный энергетический университет). Повышение эффективности облучательных светотехнических установок рас-

смотрел О.Ю.Коваленко (МГУ им. Н.П.Огарева).

Другие вопросы, более 80 докладов прошли обсуждения на секциях: светодиодная светотехника; высокоэффективные и ресурсосберегающие источники оптического излучения; техника освещения; метрология и сертификация; перспективные электротехнические устройства: компьютерное моделирование и разработка; экономика предприятия и эффективность управления. На конференции были созданы условия для научных контактов и обмена опытом, необходимых при совместном практическом внедрении научных разработок.

*А.Ашрыатов, к.т.н., член оргкомитета; ashryatov@rambler.ru*