

УДК 531.7

## ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧАМ ТРИБОЛОГИИ И МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

© 2011 г.

*А.А. Федотов*

Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского, Москва

afed83@gmail.com

*Поступила в редакцию 15.06.2011*

Рассматривается круг вопросов, связанных с измерением и последующим анализом шероховатости поверхностей твердых тел, применительно к таким задачам механики твердого деформируемого тела, как трение и контакт, разрушение. Показано, что для учета многомасштабности шероховатости поверхности необходимо организовывать измерения на различных длинах. Далее, необходимо применять цифровой спектральный анализ, позволяющий построить универсальную характеристику шероховатости на различных масштабах – спектр мощности шероховатости (спектр мощности пропорционален квадрату Фурье-образа профиля/рельефа шероховатости, но чаще его вводят как Фурье-образ корреляционной функции этого профиля/рельефа). Приведены примеры применимости развиваемой методологии для математического моделирования в задачах трибологии и механики разрушения в ее фрактографическом аспекте. Изложены результаты исследований шероховатости поверхности резины на разных стадиях ее износа и поверхности износа детали авиадвигателя. Показаны перспективы развиваемого подхода в других областях механики материалов.

*Ключевые слова:* шероховатость поверхности, спектр мощности, износ, поверхность разрушения.

Шероховатость поверхности твердых тел является одной из фундаментальных характеристик поверхностей реальных тел и оказывает существенное влияние на их служебные свойства. Достаточно широкий круг прикладных задач вызывает необходимость изучения данной характеристики: контроль качества обработки и состояния обрабатывающего оборудования, рассеяние излучения на поверхности, контактные явления (задачи механики материалов с учетом роли процессов переноса электричества и тепла), течение жидкостей. Рассмотрены вопросы измерения и анализа шероховатости применительно к задачам трибологии и фрактографии, а также перспективы применения рассматриваемой методологии в других областях механики материалов.

### **Методология исследования шероховатости**

Шероховатость поверхности реальных тел устроена сложно и имеет широкий диапазон масштабов от сотен микрометров до долей нанометров. Методология исследования шероховатости естественным образом включает две части: методика измерений шероховатости и методика обработки результатов измерений.

Основной вопрос измерений: как измерить многомасштабную шероховатость? Одним из от-

ветов на этот вопрос является предложение проводить измерения в одних и тех же намеченных для исследования участках поверхности на различных масштабных уровнях. Отмечается, что различные масштабные уровни можно получать при изменении базы измерений (длины/размера области измерений). Показана важность обеспечения при проведении измерений правильной градации масштабов для того, чтобы спектры мощности профилей разного масштаба имели пересечения по частотным областям (достаточно, чтобы они были в пределах 10–20%). Это нужно для обеспечения в дальнейшем возможности построения единой многомасштабной характеристики шероховатости – спектра мощности. При этом сам выбор масштабов измерений во многом определяется характером шероховатости

Общепринятый метод обработки результатов измерений шероховатости состоит в получении некоторых средних величин, в основном характеризующих амплитудное значение шероховатости (например,  $R_a$ ,  $R_q$ ). Данный подход не является удовлетворительным (см. например, [1, 2]), в связи с чем приобрел распространение другой рассматриваемый в настоящем исследовании подход, в рамках которого профили/рельефы шероховатости представляются как реализации случайного процесса/поля и к их анализу привлекаются

такие инструменты, как корреляционные функции, структурные функции, спектральный анализ, вейвлет-анализ и др. [1, 2]. Показана, перспективность применения метода обработки с использованием цифрового спектрального анализа, в результате чего получается оценка спектра мощности шероховатости. Показано, что, хотя в большинстве практических работ по исследованию шероховатости получило широкое распространение применение метода классической периодограммы с прямоугольным окном (см., например, [2]), для небольших ансамблей профилей/рельефов шероховатости лучше (в целях понижения:  $a$  – дисперсии,  $b$  – искажения высокочастотной части спектра) использовать оценку, даваемую методом Уэлша [3]. Отмечено существование связи спектра мощности с рядом важных для приложений характеристик профилей шероховатости – таких, как распределение локальных углов наклонов, среднеквадратичное отклонение и т.п. [1, 2], а также приведена связь с фрактальными свойствами профиля шероховатости [2]. Подчеркнуто, что при обработке результатов измерений важной методологической особенностью является построение единого спектра мощности для разных масштабов шероховатости. Продемонстрировано, как с этой целью спектры, полученные для измеренных ансамблей профилей разного масштаба, подвергаются «сшивке», т.е. соответствующие кривые соединяются в областях частотного пересечения, и получается единая характеристика многомасштабной шероховатости.

Приведенные выше методологические положения иллюстрируются примером из результатов проведенных автором исследований шероховатости поверхности эндопротезов. Основные положения данного раздела подробнее освещены в [4].

### О применениях в задачах механики

Отмечено, что хотя многие задачи механики деформируемого твердого тела имеют дело с фактом сложно устроенной шероховатости поверхностей, зачастую в моделировании реальная шероховатость заменяется грубой моделью, характеризующейся только одним числом (величинами типа средних).

Показано, что лучшее соответствие моделей реальности может обеспечить применение спектра мощности в качестве характеристики шероховатости в самой модели явления, как, например, в модели контакта тел с шероховатыми границами Persson'a [2]. Далее отмечено, что спектр мощности является достаточно индивидуальным (в отличие от средних величин) «отпечатком» про-

цесса, формировавшего данную шероховатость поверхности, тем самым он несет в себе важную информацию о самом процессе – к примеру, процессе разрушения, технологической обработки и т.п. Подчеркнуто, что путем создания эмпирической базы данных подобных отпечатков для различного течения изучаемого процесса (различных его параметров) можно решить задачу об его идентификации по соответствующей шероховатости поверхности.

Приведена конкретизация выдвинутых выше идей на двух примерах.

1. Исследование эволюции спектра мощности шероховатости поверхности резины на различных стадиях ее износа. Приводимые результаты показывают, что износ на различных масштабах происходит с разной интенсивностью. Некоторые результаты этого исследования приведены в [5].

2. Исследование шероховатости поверхности излома детали авиадвигателя.

Исследование процесса разрушения по следам, оставленным им в материале, где он происходил, является одной из основных практических задач фрактографических исследований. При этом преобладают во многом качественные подходы к изучению поверхностей разрушения, поэтому актуально введение дополнительных количественных инструментов исследований. Показано, что перспективный путь введения подобного инструментария состоит в изучении микрогеометрии (особенно шероховатости) поверхности разрушения совместно с цифровым спектральным анализом полученных данных. Приведены результаты исследования шероховатости поверхности излома детали авиадвигателя, показывающие качественные и количественные различия в структуре шероховатости на различных этапах роста усталостной трещины.

Отмечено, что развиваемые идеи применения исследования шероховатости к задачам механики деформируемого твердого тела могут быть реализованы также и в исследованиях: геомеханики (влияние шероховатости берегов трещин в породе на течение флюидов), биомеханики (эндопротезы и стоматология) и др. При этом обсуждается перспектива соединения спектрального анализа и вейвлет-анализа.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №09-08-01148) и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.*

### Список литературы

1. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. Долгопрудный:

