

# КОНФОКАЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ МИКРО- И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МАТЕРИАЛОВ

М.Вебер

sam@lec-instruments.ru

Один из ключевых моментов современного материаловедения – получение подробной информации о структуре поверхности. Для производственного контроля уже недостаточно двухмерной профилометрии на основе параметров шероховатости – требуется комплексное трехмерное описание топографии, включающее нестатистические характеристики. В этой связи конфокальная микроскопия (КМ) имеет большие преимущества при бесконтактном и оперативном получении таких параметров. Именно этот метод обеспечивает описание детерминированных и недетерминированных структур поверхности.

С учетом высокой скорости получения и больших объемов данных наиболее жизнеспособное решение обеспечивают оптические измерительные системы. Однако при их использовании приходится сталкиваться с такими явлениями, как крутые скосы или переменные отражения, которые при измерении поверхностей зачастую могут давать ложные изображения.

Трехмерная КМ позволяет решать эту задачу. В отличие от полосового или интерферометрического изображения этот метод обеспечивает надежные данные измерений технических поверхностей, которые можно сопоставить с результатами использования наиболее точных тактильных приборов.

Цель представленной работы:

- дать общее представление о трехмерной КМ;
- продемонстрировать достигаемый уровень разрешения и точность системы;
- обозначить основные области применения КМ.

В работе рассматриваются физические основы оптической КМ и применение принципа NanoFocus. Достигаемые уровни разрешения и точности измерений продемонстрированы на примере сравнения результатов исследования стандарта глубины и металлической подложки с применением контактного профилометра. В статье также описано применение метода для получения характеристик поверх-

ности в промышленности (изучение функциональных поверхностей в блоках цилиндров и контроль качества поверхности листового металла).

## Основы метода КМ

Основной принцип КМ, базирующийся на увеличенном разрешении захвата глубины обычного оптического микроскопа с помощью специальных отверстий (рис.1), был предложен М.Мински в 1957 году [1].

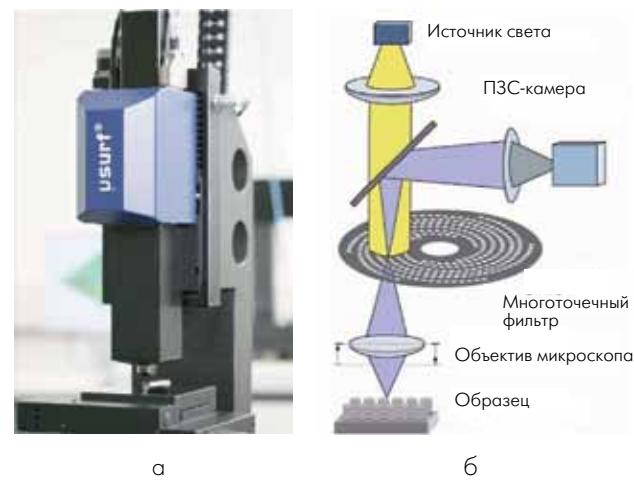


Рис.1. Микроскоп NanoFocus (а), принцип КМ (б)

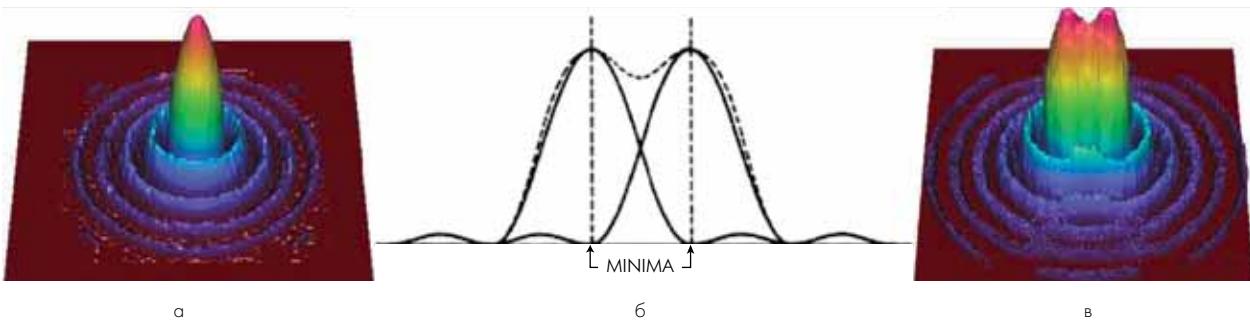


Рис.2. Трехмерная картина Эйри (а); критерий Рэлея (графическое изображение) (б); трехмерное изображение критерия Рэлея (в)

В промежуточной плоскости конфокального микроскопа NanoFocus для одновременного обзора всей поверхности используется вращающийся диск (MP disk) с большим количеством расположенных по спирали отверстий.

Источник света отделяется от ПЗС-датчика с помощью оптического разделителя, причем во временной развертке фокальная плоскость сканируется по образцу с помощью пьезопривода, а диапазон измерений и разрешение зависят от оптических характеристик объектива микроскопа. Чем больше оптическое увеличение, тем выше разрешение, поскольку разрешение по оси z (глубине) тоже возрастает.

### Разрешение по плоскости, картина Эйри

Максимальная интенсивность отраженного света измеряется, когда образец находится в фокусе микроскопа, а расфокусировка ведет к снижению интенсивности сигнала. Интенсивность  $I(z)$  на датчике с расстоянием  $z$  до фокальной плоскости вычисляется по формуле:

$$I(z) = \left( \frac{\sin(kz(1 - \cos \alpha))}{kz(1 - \cos \alpha)} \right)^2 I_0,$$

где  $\alpha$  – угол числовой апертуры объектива и  $k$  – волновое число света [2]. Полная ширина кривой распределения на уровне полумаксимума (FWHM) конфокального пика – характеристический параметр для распределения интенсивности:

$$\text{FWHM} = \frac{0,443 \cdot \lambda}{1 - \cos \alpha}.$$

Разрешение по плоскости оптического датчика обычно ограничено дифракцией. Фокусировка светового пятна на экране создает дифракционную картину концентрических окружностей. Так называемая картина Эйри – это центральный максимум, который равен примерно 85% от полной интенсивности и имеет диаметр  $d_{\text{airy}}$ :

$$d_{\text{airy}} = 1,22 \frac{\lambda}{\text{NA}}.$$

Диаметр картины зависит от длины световой волны  $\lambda$  и числовой апертуры NA объектива микроскопа. С помощью критерия разрешения Рэлея, определяющего минимальное угловое расстояние между точками, можно вычислить теоретическое оптическое разрешение по плоскости. Определяются две точки, когда максимум интенсивности картины Эйри находится на первом минимуме интенсивности второй световой точки.

Интенсивность в локальном минимуме между двумя основными максимумами сокращается до 74% от максимальной (рис.2). Критерием Рэлея определяется минимальное расстояние  $d_{\text{Rayleigh}}$  между двумя точками, которое можно измерить:

$$d_{\text{Rayleigh}} = 1,22 \frac{\lambda}{2\text{NA}} = 0,61 \frac{\lambda}{\text{NA}}.$$

Расчеты показывают, что разрешающая способность конфокального микроскопа достаточна для измерения горизонтальных структур с разрешением менее 1 мкм. В результате удается получить наноскопическую трехмерную топографию образца с разрешением по вертикали всего несколько нанометров.

### Воспроизводимость и разрешение

Точность и воспроизводимость результатов измерений можно проверить, используя стандарты ISO. Чтобы определить точность воспроизведения КМ, использовался стандарт глубины A2 (ISO 5436-1), сертифицированный Физико-техническим федеральным ведомством Германии. На рис.3 показаны результаты, полученные с оптическим модулем 320s (объектив 50x0.8 NA). Средняя высота измерений до 1,246 мкм в пределах  $1,240 \pm 0,012$  мкм. Стандартное отклонение результатов – менее 7 нм.

Ярким примером возможностей нанометрового разрешения КМ является измерение топографии поверхности подложки (рис.4), отшлифованной с обратной стороны. Результаты механического шлифования можно проанализировать на уровне нанометров ( $R_a = 5$  нм).

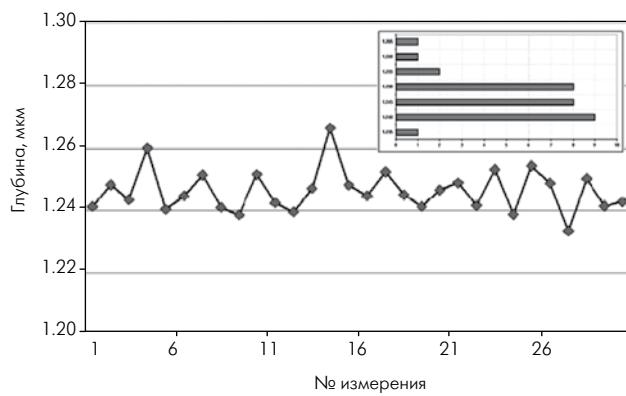


Рис.3. Воспроизводимость измерений

### Сравнение результатов с измерениями контактного профилометра

На рис. 5 показано сравнение результатов измерений топографии пули с помощью контактного профилометра и КМ, проводившееся в Национальном институте стандартов и технологий (NIST) [3]. Для измерения отпечатка на стандартной пуле используется контактный профилометр со щупом с алмазным наконечником радиусом 2 мкм. Номинальная контактная сила равна 1 мН, а скорость 0,5 мм/с. Уровень вертикального квантования 0,01 мкм, интервал горизонтальной выборки 0,25 мкм. Все профили проходят полосовую фильтрацию с длинным срезом 250 мкм и коротким срезом 2,5 мкм. Один из шести профилей показан на рис.5а. На рис.5б показаны измерения, проведенные с использованием КМ.

Чтобы покрыть длину отпечатка пули, были объединены восемь измерений топографии. Максимальный показатель взаимной корреляции составляет 99,0% по сравнению с контактным измерением.

### Функциональная топография поверхностей при производстве двигателей

Характеристика поверхностей блоков цилиндров определяет срок их службы и удельную мощность двигателя автомобиля, причем разная топография поверхности изделий из одного и того же матери-

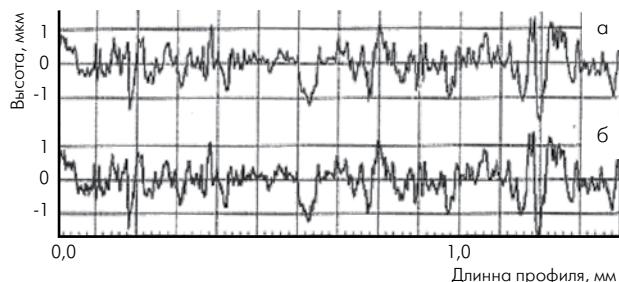


Рис.5. Сравнение полученных результатов:  
а – контактный профилометр;  
б – измерения с использованием КМ [9]

ала может привести к различному распределению смазки. В этой связи для унификации параметров отверстия в блоке цилиндров двигателей из серого чугуна растачиваются, а затем хонингуются, с помощью чего удается добиться точного диаметра отверстий, причем шероховатость поверхности также определяется текстурой хонингования. Характеристический результат данной методики – бороздки с двумя различными углами ориентации (рис.6а). (Такие критерии, как углы хонингования, глубина шероховатости и ориентация бороздок или их пологие участки важны для контроля качества.)

В последнее время четко прослеживается тенденция к производству облегченных двигателей на основе алюминия. Контактная поверхность отверстия блока цилиндров в них изготовлена из материала ALUSIL, в основном состоящего из алюминия и износостойких частиц кремния. На рис.6б показаны типичные трехмерные структуры таких частиц, обнаруживаемые после химического травления. Частицы кремния (красный цвет) на 600 нм выше алюминиевой матрицы (желтый цвет). На высоких частицах заметны следы обработки, имеющие вид бороздок глубиной около 30 нм. Наблюдаются также несколько углублений диаметром около 1,5 мкм и глубиной 200 нм [4, 5]. Такие углубления накапливаются в алюминиевой матрице в результате травления, применяющегося для обнаружения на поверхности частиц кремния. При использовании специальных смазок по-

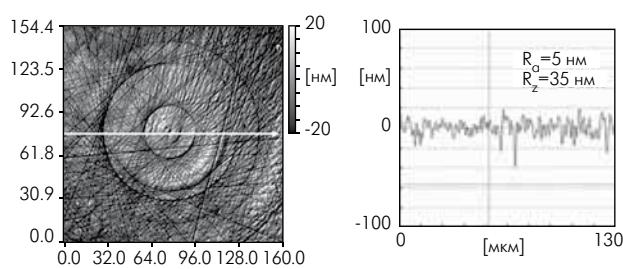


Рис.4. Измерения с помощью КМ  
(шлифование обратной стороны)

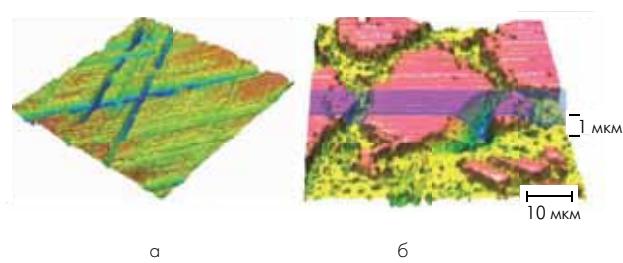


Рис.6. Исследование цилиндра двигателя:  
а – хонингованная структура,  
б – вид конфокальной поверхности материала ALUSIL

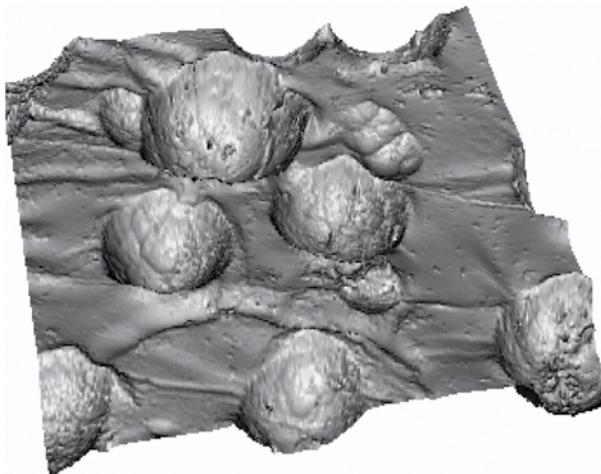


Рис.7. Топография поверхности листового металла после чистовой прокатки валками Topochrom

dobnye nanoeskopicheskie xarakteristiki mogut obespechit' snizhenie treniya i iznosa.

Создаваемые небольшие углубления могут повысить клейкость пленки смазки, а также обеспечить увеличение термического контакта с алюминием с помощью более обширных поверхностей.

#### Листовой металл: контроль качества структуры поверхности

Производство листовых изделий из металла – одна из отраслей, где четко определенные текстуры часто используются для получения желаемых свойств поверхности и повышения качества конечной продукции. Например, процесс Topochrom дает однородное распределение твердых хромированных полусфер разных размеров на текстурирующих валах. Во время прокатки эта структура переносится на поверхность металлического листа и может быть измерена как негативное изображение текстуры вала. На рис.7 показаны результаты измерения текстуры такого листа металла с размером изображения 160x160 мкм<sup>2</sup>. На поверхности можно легко различить куполообразные отпечатки глубиной до 5 мкм и диаметром до 40 мкм, которые могут работать как накопители смазки, что обеспечивает снижение расхода масла и трения между инструментом и листом.

Этот эффект обеспечивает улучшение свойств при формировании листа. Как следствие, возможно использование более тонких листов материала, что позволяет снизить массу изделия. Подобная топография поверхности также может снизить риск появления трещин и складок (смятия) изделия после его формования [6–8].

#### Характеристические параметры

С помощью подобных измерений можно провести анализ основных 3D-параметров (объ-

ем пустот, средний пик, коэффициенты) материала с высокой воспроизводимостью [9]. Существует возможность увеличения интересующих исследователя областей и получения двухмерных профилей, с использованием которых можно определить, например, скосы и глубину структур. Дополнительно исследуются характеристические параметры, демонстрирующие функциональные зависимости между топографией поверхности и качеством продукта.

Влияние таких характеристик на свойства формованного изделия особенно важно для металлургии. Применяя заказные решения как прибор для исследования блока цилиндров или мобильных измерительных систем, можно провести надежное изучение ряда нюансов при контроле качества изделий.

Быстро действующие системы семейства КМ и программное обеспечение (ПО) к ним дают специалистам широкие возможности при исследовании топографии поверхностей и трехмерных измерений, а также при вычислении характеристических параметров для решения сложных задач. ПО также легко интегрирует различные нестандартные алгоритмы для вычисления новых параметров, что позволяет создавать широкие возможности в будущем.

#### Литература

1. Minsky M. Microscopy Apparatus, U.S. Patent 3013467 (19 Dec. 1961, filed 7 November 1957).
2. Jordan H.-J. et al. Quality assurance of HARMS and MOEMS surface structures using confocal white light microscopy, SPIE Proceedings 4440 (2001), 51–58.
3. Song J., Vorburger T. et al. Correlation of topography measurement of NIST SRM 2460 standard bullets by four techniques, Measurement Science and Technology 17 (2006), 500–503.
4. Weber M.A. et al. Optische 3D-Messung von Zylinderlauflächen, QZ, 51.Jg, 5/2006, 90–92.
5. Siegert K. et al. PRETEX® Aluminiumblech, Forschungsbericht 207, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. D-30167 Hannover.
6. Weber M.A. et al. Konfokale 3D-Mikroskopie zur Mikrotopographie- und Geometriemessung technischer Oberflächen, VDI-Berichte 1808 (2003) p.199–204.
7. Staevens J. et al. Surface qualification in the sheet metal domain, Proceedings of the 6th International Conference on Sheet Metal, University of Twente, The Netherlands (1998).
8. Popp U. et al. Surface Characterization with Regard to the Tribological Behaviour of Sheet Metal in Forming Processes, Proceedings of the 7th International Conference on Sheet Metal, Erlangen (1999), 303–310.
9. Kagerer B. et al. 3D-confocal microscopy for surface analysis of microstructured materials, SPIE Proceedings 4773 (2002), 52–62.