

---

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРО- И НАНОШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

**В.В. Копылов**

Кафедра технологии машиностроения,  
металлорежущих станков и инструментов  
Российский университет дружбы народов  
*Ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198*

В статье анализируется важность нормирования шероховатости поверхности и производится сравнение результатов определения микро- и нанощероховатости.

**Ключевые слова:** шероховатость, профиль поверхности, нанотехнологии, контактная жесткость, сканирующий микроскоп.

Технический уровень изделий машиностроения в значительной мере определяется качеством изготовления деталей, определяющим эксплуатационные характеристики узлов и изделия в сборе. Важными характеристиками являются макро- и микроотклонения деталей от заданных размеров. К макроотклонениям относят отклонения формы детали: конусность, бочкообразность, нецилиндричность и т.п. Микроотклонения определяются шероховатостью поверхности. В связи с повышением требований к точности изготовления деталей и изменением масштаба, развитием нанотехнологий, возникла необходимость нормирования и измерения качества поверхности на наноуровне, т.е. измерения нанощероховатости.

Одним из основных эксплуатационных свойств изделий является контактная жесткость стыков деталей. Контактная жесткость зависит от состояния рабочих поверхностей деталей, которое формируется главным образом на финишных операциях технологических процессов механической обработки и характеризуется совокупностью физико-механических и геометрических параметров качества. Наиболее распространенной финишной операцией является шлифование, позволяющее обеспечить высокие точность размеров и качество обрабатываемой поверхности. При этом заданные параметры качества шлифованных поверхностей, регламентирующие контактную жесткость, на практике определяются лишь частично и обеспечиваются, как правило, путем подбора условий обработки, которые не всегда оказываются достаточно производительными и экономичными. Технологи в настоящее время при проектировании операций шлифования зачастую не в состоянии выбрать необходимые методы и условия их реализации, которые бы обеспечили сразу несколько значений физико-механических и геометрических параметров качества обрабатываемых поверхностей, определяющих требуемое значение контактной жесткости.

Для решения данной задачи разработаны математические модели связи нормальной контактной жесткости стыка двух деталей с параметрами качества их поверхностного слоя [1; 2; 3] и модели процессов формирования геометрических и физико-механических параметров качества поверхности деталей машин, подвергаемых шлифованию [4].

Алгоритм функционирования реализуется двухступенчато посредством двух моделей: сначала устанавливаются параметры качества поверхностного слоя в зависимости от условий шлифования, а затем по найденным параметрам рассчитывается контактная жесткость.

Для реализации задачи первой ступени использовалась модель, описанная в [4]. Она отражает теоретическую концепцию формирования геометрических и физико-механических параметров качества поверхностного слоя (макроотклонения, волнистости, шероховатости и их формы; степени упрочнения), учитывающую весь комплекс взаимосвязанных факторов процесса абразивной обработки.

На второй ступени расчета использовались теоретические зависимости, представленные в [1; 2; 3]. По ним можно определить контактную жесткость стыка двух деталей при первой и повторных нагрузках с учетом микрогеометрии поверхностного слоя и его физико-механических параметров (свойств материала). На основе этих зависимостей получены формулы для нормализованного определения контактной жесткости с учетом только шероховатости.

Согласно определению ГОСТа 2789—73 шероховатость поверхности — это совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих рельеф поверхности. Шероховатость поверхности определяется по ее профилю, который представляет собой ломаную линию пересечения поверхности плоскостью, перпендикулярной направлению неровностей. Профиль рассматривается на длине базовой линии, в пределах которой оцениваются параметры шероховатости поверхности. В рекомендациях Международного комитета по стандартизации ИСО/Р-468 «Шероховатость поверхности» приняты две системы отсчета высот неровностей: системы *M* и *E*. В системе *M* отсчет высоты неровностей производится от средней линии профиля, а в системе *E* — от огибающей линии, лежащей вне контура шероховатости поверхности.

В Российской Федерации при стандартизации шероховатости поверхности в основу принята система отсчета *M*, в которой при определении параметров профиля отсчет высот неровностей производится от средней линии профиля. Средняя линия профиля — это базовая линия, имеющая форму номинального профиля и делающая реальный профиль так, что в пределах базовой длины сумма квадратов отклонений профиля от этой линии минимальна. Линия, эквидистантная средней линии и проходящая через высшую точку профиля в пределах базовой длины, называется линией выступов профиля. Линию, эквидистантную средней линии профиля и проходящую через низшую точку профиля в пределах базовой длины, принято называть линией впадин профиля.

Для оценки и нормирования шероховатости поверхности известно около 30 параметров. ГОСТ 2789—73 и ГОСТ 27964—88 регламентирует шероховатость поверхности шестью параметрами:

- 1) средним арифметическим отклонением профиля *Ra* — средним арифметическим абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины;
- 2) высотой неровностей профиля по десяти точкам *Rz* — суммой средних арифметических (абсолютных) отклонений точек пяти наибольших максимумов и пяти наибольших минимумов профиля в пределах базовой длины;

3) наибольшей высотой неровностей профиля  $R_{\max}$  — расстоянием между линией выступов профиля в пределах базовой точки;

4) средним шагом неровностей  $S_m$  — средним арифметическим значением шага неровностей профиля в пределах базовой длины;

5) средним шагом неровностей по вершинам  $S$  — средним арифметическим значением шагов местных выступов профиля (по вершинам) в пределах базовой длины;

6) относительной опорной длиной профиля  $tp$ , %, где  $p$  — числовое значение уровня сечения профиля, отношение опорной длины профиля  $lp$  к базовой длине  $l = 100\%$ .

Уровнем сечения профиля  $p$  называется относительное, выраженное в процентах расстояние между линией выступа профиля и линией, пересекающей профиль эквидистантно линии выступов. Числовые значения относительной опорной длины профиля  $tp$  выбирается из ряда (%): 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, а числовые значения уровня сечения профиля  $p$  из ряда (%): 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 от  $R_{\max}$ .

Кроме перечисленных выше шести стандартных параметров ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{\max}$ ,  $S_m$ ,  $S$ ,  $tp$ ) допускается использование дополнительных параметров, к числу которых можно отнести среднеквадратическое отклонение профиля  $R_q$  (часто указывается в зарубежных стандартах по системе исчисления  $E$ ), угол наклона боковых поверхностей профиля  $\beta_{пр}$ , радиус округления впадин  $r_d$ , радиус скругления выступов  $r_l$  и другие.

Между высотными параметрами  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{\max}$  установлены следующие корреляционные зависимости:

для лезвийной обработки  $R_z = 5 R_a$ ;  $R_{\max} = 6 R_a$ ;

для шлифования  $R_z = 5,5 R_a$ ;  $R_{\max} = 7 R_a$ ;

для полирования и притирки  $R_z = 4 R_a$ ;  $R_{\max} = 5 R_a$ .

При этом среднеквадратическое отклонение профиля  $R_q$  и параметр среднеарифметического отклонения  $R_a$  связаны между собой зависимостью  $R_a \approx 0,8R_q$ .

В нано- и микроэлектронике и в наноэлектромеханических системах, при создании продукции для атомной индустрии и космического приборостроения, а также в иных современных производствах, используются элементы, имеющие сверхгладкие участки поверхности, шероховатость которых по высоте не превышает 1 нм. Для таких элементов весьма важно достоверно количественно оценить параметры шероховатости поверхности, что определяет возможность их использования и, в свою очередь, качество конечной продукции [5; 6].

В целях расширения диапазона нормирования шероховатости для сверхгладких поверхностей разработан проект национального стандарта РФ «Государственная система обеспечения единства измерений. Эффективная шероховатость поверхности. Методика выполнения измерений с помощью сканирующего зондового измерительного микроскопа».

Разработка проекта стандарта проводится согласно «Программе разработки национальных стандартов РФ на 2008 год», шифр задания 2.0.441—1.008.07, по тематике ТК 441 «Нанотехнологии и наноматериалы».

Объектом стандартизации являются твердые тела, рельеф поверхности которых имеет высоты менее 1 нм. В проекте стандарта устанавливается методика выполнения измерений эффективной высоты шероховатости рельефа поверхности твердых тел в диапазоне высот от  $10^{-10}$  до  $10^{-9}$  м.

В качестве средства для измерения эффективной высоты шероховатости используется сканирующий зондовый атомно-силовой микроскоп. При разработке стандарта использован метод измерения эффективной высоты шероховатости поверхности, основанный на спектральном разложении функций рельефа, полученной посредством сканирования поверхности твердого тела зондовым атомно-силовым микроскопом. Методика измерений, регламентированная в стандарте, позволяет получить относительную погрешность результатов измерений эффективной высоты шероховатости не более 12% при доверительной вероятности 0,95.

Регламентация на национальном уровне методики измерений эффективной шероховатости поверхности твердых тел позволит повысить воспроизводимость и достоверность результатов таких измерений.

Методика выполнения измерений, установленная в стандарте, разработана на основе МВИ – 29ПВ (зарегистрирована ОАО «НИЦПВ» в 2005 г.), основные положения которой апробированы в период с 2005 по 2008 гг.

В разработке проекта стандарта принимали участие следующие организации:

- ОАО «Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума» (ОАО «НИЦПВ»);
- Федеральное государственное учреждение «Российский научный центр «Курчатовский институт» (РНЦ «Курчатовский институт»);
- Государственное учреждение Российской академии наук «Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова» (Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН);
- Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» (МФТИ).

Для метрологического обеспечения средств измерений в нанометровом диапазоне Научно-технический центр нанометрологии при Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д.И. Менделеева разработал комплект мер малой длины. Меры малой длины предназначены для обеспечения калибровки измерительных инструментов в субмикронном и нанометровом диапазоне, работающих в нанотехнологии, электронной промышленности и различных областях науки.

1. Периодические меры — 1D-решетки. Периодические меры — голографические дифракционные решетки — обеспечивают значение калибровки по периоду (шагу) в центре образца площадью  $5 \times 5$  мм. Точность (стандартная неопределенность) для периода 300 нм составляет 0,2 нм, для 500 нм — стандартная неопределенность — 0,3 нм и для периода 700 нм стандартная неопределенность составляет 0,5 нм. Меры предназначены для калибровки по координатам XY и измерения

нелинейности для сканирующих зондовых микроскопов (атомно-силовых и туннельных микроскопов), растровых электронных микроскопов и т.д. Единство измерений при калибровке решеток подтверждается «Предварительными международными ключевыми сличениями» (NANO-4, 1999). К каждому образцу прилагается сертификат с измеренным точным значением периода решетки. Периодическая мера — голографическая решетка с размерами  $5 \times 5$  мм — нанесена на кварцевую подложку с размерами  $12 \times 12 \times 3$  мм. Покрытие меры — слой алюминия или золота толщиной 70—100 нм. Профиль решетки — квазисинусоидальный с глубиной модуляции 20—40%. Мера имеет установочные линии и шкалы. Качество меры индивидуально контролируется с помощью атомно-силового микроскопа. Измеряется амплитуда и стандартная неопределенность для шероховатости поверхности меры. Амплитуда шероховатости для типичной решетки составляет порядка 2 нм, стандартная неопределенность — порядка 0,7 нм.

2. Меры высоты ступени (SHS). Меры высоты ступени обеспечивают калибровочное значение высоты ступени. Точность (стандартная неопределенность) для высоты ступени 8 нм (SHS-8) составляет 1,0 нм, для высоты 20 нм (SHS-20) — 1,0 нм, для высоты 70 нм (SHS-70) — 1,2 нм, 300 нм (SHS-300) — 1,5 нм, 700 нм (SHS-700) — 2,0 нм. Меры высоты ступени предназначены для калибровки по координате  $Z$  и измерения нелинейности в сканирующих зондовых микроскопах (атомно-силовых, сканирующего туннельного микроскопа), сканирующих электронных микроскопах и т.д. Единство измерений при калибровке мер высоты ступени подтверждается «Предварительными международными ключевыми сличениями» (NANO-2, 2002). Поверхность мер сделана проводящей и покрыта слоем хрома толщиной 80 нм. Три линии шириной 5 мкм, 30 мкм и 50 мкм представлены на мере. Для сканирующего зондового микроскопа и микроинтерферометра при калибровке мер (при международных сличениях) используется линия шириной 30 мкм. Высота ступени мер высоты ступени определяется на микроинтерферометре Майкельсона, который освещается плоскими волнами излучения аргонового или гелий-неонового лазера. Образец (мера) помещается в одно из плеч перпендикулярно падающему лазерному лучу. Во втором плече интерферометра помещается плоское зеркало под небольшим углом падения к лазерному лучу для того, чтобы получить 15—20 интерференционных полос в поле зрения окуляра оптического микроскопа и ССД-камеры (примерно на 100 мкм в передней фокальной плоскости микроскопа). Изображение меры фокусируется в передней фокальной плоскости микроскопа с помощью двух фотообъективов с высоким пространственным разрешением. Интерференционные полосы равного наклона ориентируются перпендикулярно границам (краям) ступени.

3. Меры ширины линии (LWS) обеспечивают калибровочное значение ширины линии. Точность (стандартная неопределенность) для линии шириной 1,0 мкм составляет 0,05 мкм, для линий шириной 2 мкм и выше — 0,03 мкм. Меры ширины линии предназначены для калибровки ширины линии в оптических микроскопах, сканирующих зондовых микроскопах (атомно-силовых, сканиру-

ющих туннельных), сканирующих электронных микроскопах и т.д. Каждая мера сопровождается паспортом с точным значением ширины линии. Мера ширины линии изготавливается на стекле путем нанесения слоя хрома с помощью обычного фотолитографического способа. Каждый образец меры индивидуально контролируется и сертифицируется. Ширина линии измеряется на оптическом цифровом микроскопе и на атомно-силовом микроскопе. Качество края линии и поверхности меры определяется на атомно-силовом микроскопе. Стандартное отклонение для неровности края линии составляет величину порядка 0,5 мкм. Шероховатость поверхности меры составляет величину около 1—2 нм (стандартное отклонение).

Для сравнения результатов измерения микро- и наношероховатости были проведены следующие эксперименты.

Образцы обрабатывались различными методами, и измерялась их шероховатость на приборе для измерения параметров шероховатости «SURFCORDER SE 1200» и сканирующем мультимикроскопе типа СММ-2000 в режиме сканирующей туннельной микроскопии. Образцы изготавливались из стали 45, размеры: длина 10 мм, ширина 8 мм, толщина 2 мм. Размеры образцов выбирались исходя из возможности их установки в сканирующий микроскоп. Были выбраны следующие методы обработки: лезвийная обработка (строгание широким резцом) и абразивная обработка, отличающаяся направлением следов абразива (шлифование и притирка). Вид и зернистость абразива при шлифовании и притирке выбирались одинаковыми.

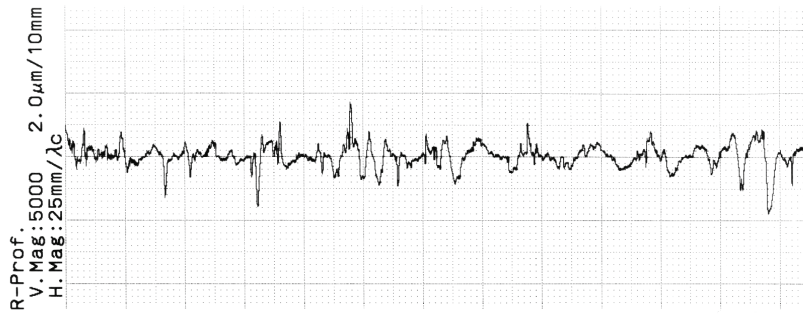
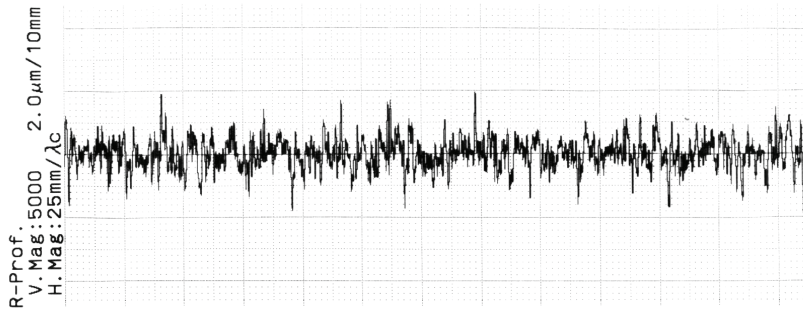
Шероховатость образца  $R_z$  после лезвийной обработки на профилометре «SURFCORDER SE 1200» составила 2,998 мкм вдоль следа обработки и 3,311 мкм поперек, что говорит о значительном влиянии качества режущей кромки. Образец после лезвийной обработки не может быть исследован на мультимикроскопе СММ-2000, так как полученные значения  $R_z$  превышают его диапазон измерений, равный 2 мкм.

Результаты определения шероховатости образцов с различным направлением следов обработки приведены в таблице.

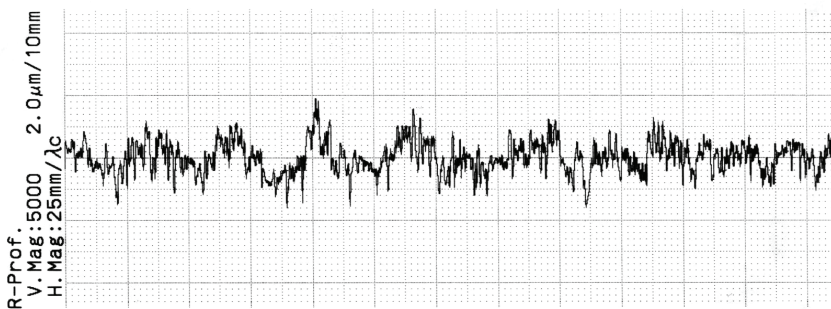
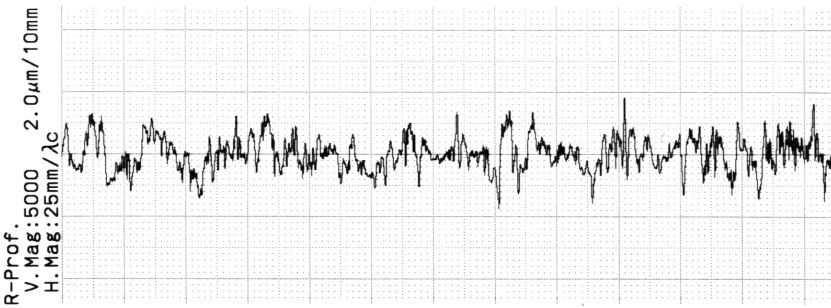
Таблица

Обработка	Направление измерения	Профилометр SURFCORDER SE 1200		Мультимикроскоп СММ-2000	
		$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	$R_a$ , нм	$R_z$ , нм
Шлифование	Вдоль	0,270	1,450	34,71	150,7
	Поперек	0,395	2,577	43,88	—
Доводка	Вдоль	0,410	2,120	39,31	149,5
	Поперек	0,431	2,152	57,38	—

На рис. 1 показаны профилограммы, полученные на приборе «SURFCORDER SE 1200», а на рис. 2 — примеры результатов, полученных на мультимикроскопе СММ-2000.



а)



б)

**Рис. 1.** Профилограммы поверхности образцов после шлифования (а) и доводки (б), верхняя профилограмма — поперечная шероховатость, нижняя профилограмма — продольная шероховатость

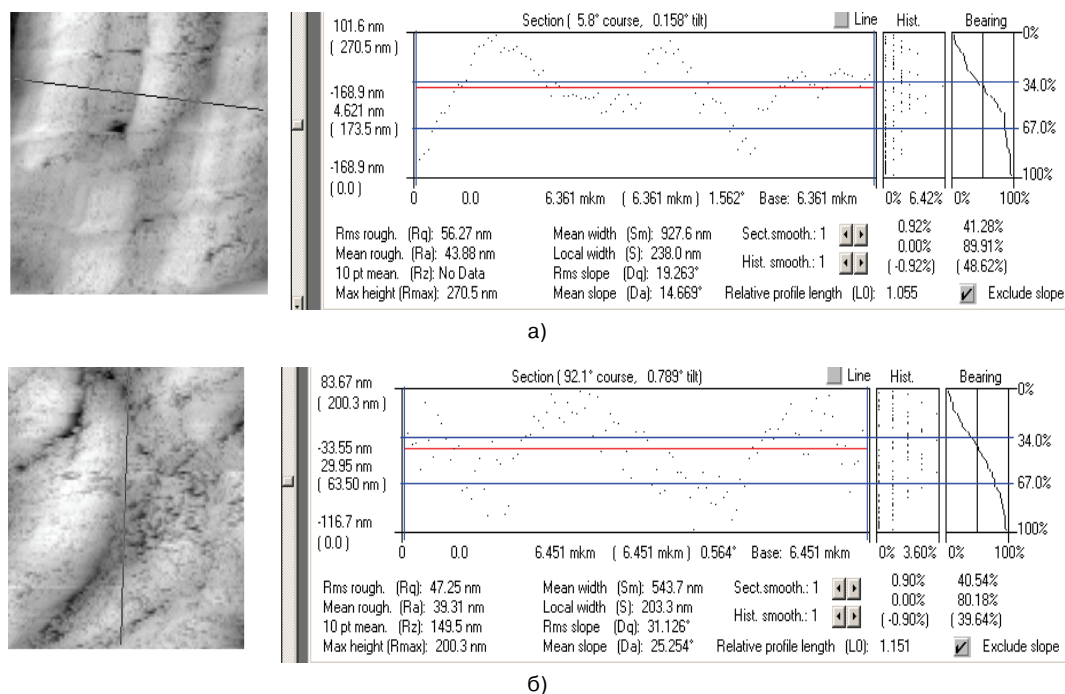


Рис. 2. Сканы поверхности (слева) и результатов обработки профилограмм (справа) для шлифования (а) и доводки (б)

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1) совпадение результатов исследования шероховатости поверхности различными приборами носит качественный характер, количественное сравнение невозможно, так как при определении наносероховатости измеряется один или несколько выступов на поверхности;

2) различие в направлениях следов обработки отражается при определении как микросероховатости, так и наносероховатости.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сулов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. — М.: Машиностроение, 1987.
- [2] Сулов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. — М.: Машиностроение, 2000.
- [3] Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. — М.: Машиностроение, 1979.
- [4] Бишутин С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании: монография. — М.: Машиностроение-1, 2004.
- [5] Zhanaveskin M.L., Grishchenko Yu.V., Tolstikhina A.L., Asadchikov V.E., Roshchin B.S., Azarova V.V. The surface roughness investigation by the atomic force microscopy, x-ray scattering and light scattering // SPIE. — 2006. — Vol. 6260. — P. 62601A-1 — 62601A-9.
- [6] Занавескин М.Л., Занавескина И.С., Роцин Б.С., Асадчиков В.Е., Кожевников И.В., Азарова В.В., Гриценко Ю.В., Толстихина А.Л. Исследование шероховатости поверхности методами атомно-силовой микроскопии, рентгеновского рассеяния и дифференциального рассеяния света // Вестник московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. — 2006. — 3. — С. 80—82.



## **RESEARCH MICRO-AND NANOROUGHNESSES OF THE SURFACE AFTER MACHINING**

**V.V. Kopylov**

Department of Internal Combustion Engines  
Peoples' Friendship University of Russia  
*Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198*

In clause importance of normalization of a roughness of a surface is analyzed and comparison of results of definition micro-and nanoroughnesses is made.

**Key words:** the roughness, structure of a surface, nanotechnologies, the contact rigidity, a scanning microscope.