

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»»

Саровский физико-технический институт -
филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»»
(СарФТИ НИЯУ МИФИ)

Физико-технический факультет
Кафедра общетехнических дисциплин и электроники (ОТДиЭ)

М.Э. БУЗОВЕРЯ

**АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ В ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА
КОНСТРУКЦИОННЫХ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Практикум по атомно-силовой микроскопии

Часть 1

Учебно-методическое пособие

*Рекомендовано Научно-методическим советом
Саровского физико-технического института (СарФТИ) НИЯУ МИФИ
в качестве учебного пособия для студентов вузов*

Саров 2023

УДК 539.211
Б90

Бузоверя М.Э.

Атомно-силовая микроскопия в оценке качества конструкционных и функциональных материалов. Практикум по атомно-силовой микроскопии. Часть 1 : учебно-методическое пособие. – Саров: СарФТИ НИЯУ МИФИ, 2023. – 18 с.: ил.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, нанотехнология, качество поверхности, шероховатость, фрактальность, обработка АСМ-сканов.

Учебно-методическое пособие предназначено для подготовки и проведения практических занятий по курсам «Материалы и методы нанотехнологии», «Материалы электронной техники», «Материаловедение и технология конструкционных материалов».

В пособии рассмотрены характеристики и параметры качества поверхности материалов, описаны классические и современные методы исследования микрорельефа и свойств поверхности. Дано обоснование системы метрических, пространственных и фрактальных параметров для анализа шероховатости и локальной структуры поверхности в сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), а также приведена практическая часть исследования морфологии образцов различных материалов. Изложение материала систематизировано, иллюстрировано схемами, рисунками, таблицами.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям:

11.03.04 «Электроника и микроэлектроника»,

14.05.04 «Электроника и автоматика физических установок»,

15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» и др.

Бузоверя Марина Эдуардовна, в.н.с. Института ядерной и радиационной физики (ИЯРФ) РФЯЦ-ВНИИЭФ, доцент кафедры ОТДиЭ Саровского физико-технического института (СарФТИ) НИЯУ МИФИ, к.т.н.

Рецензент: доцент кафедры ОТДиЭ Саровского физико-технического института (СарФТИ) НИЯУ МИФИ, к.т.н. **Писецкий Вадим Владимирович.**

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс «Материаловедение» изучается студентами большинства специальностей технических вузов как общепрофессиональная дисциплина. Курс закладывает основы профессиональных знаний и умений, позволяющих решать производственные, конструкторские и технологические задачи, связанные с оптимизацией выбора материалов и технологий изготовления изделий различного назначения.

Роль данной дисциплины в подготовке инженеров различных специальностей может заметно отличаться. Однако любой выпускник технического вуза, независимо от специальности, должен иметь базовые представления о строении и свойствах как основных промышленных, так и специальных материалов, о методах их исследования и контроля.

Изучение курсов по электронному материаловедению должно дать студентам знания о закономерностях, определяющих структуру и свойства материалов, основных эксплуатационных характеристиках материалов. Курс делится на два модуля: модуль 1 - Основы материаловедения; модуль 2 - Материалы электронной техники. Объектом изучения дисциплины являются конструкционные и функциональные материалы электронной техники.

Цель практикума – закрепить знания теоретических основ материаловедения и привить студентам навыки экспериментальной работы. В данном учебном пособии рассматриваются некоторые современные методы анализа материалов, а также приборы для выполнения этих методов в лаборатории и для контроля в заводской практике.

В Части 1 предлагаемого читателю пособия рассматриваются методики атомно-силовой микроскопии по исследованию микрорельефа поверхности.

В настоящее время, учитывая возрастающую роль в учебном процессе научных исследований, в практикуме описаны работы, сделанные на базе сканирующего зондового микроскопа СЗМ Solver Next (разработан компанией «НТ МДТ», г. Зеленоград, Россия), применяемого в научных исследованиях кафедры общетехнических дисциплин и электроники (ОТДиЭ) СарФТИ НИЯУ МИФИ. По методическим разработкам к этим работам могут быть выполнены задания как чисто учебного, так и учебно-исследовательского характера. Новые лабораторные работы, включенные в практикум, относятся к таким интенсивно развивающимся разделам материаловедения как компьютерная микроскопия и наноструктурное материаловедение.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Раздел 1. Сканирующая зондовая микроскопия. Принцип работы атомно-силовой микроскопии.....	5
Раздел 2. Система параметров для анализа качества поверхности материалов в сканирующей зондовой микроскопии.....	11
2.1. Метрические параметры.....	11
2.2. Пространственные параметры.....	12
2.3. Фрактальные параметры.....	12
Раздел 3. Экспериментальная часть.....	13
3.1. Программное обеспечение для проведения исследований параметров поверхности образцов на базе СЗМ Solver Next.....	13
3.2. Обработка АСМ-изображения.....	13
Раздел 4. Журнал практической части. Отчёт по практической части	16
Список источников.....	18

Введение

Определение и оценка состояния поверхностного слоя материала, деталей машин и других объектов является важнейшим этапом в формировании эксплуатационных свойств в целом. Современные технологические методы обработки поверхностей (плазменное напыление, CVD-процессы и др.) формируют новые свойства поверхности. Новые свойства заключаются в том, что образующийся на поверхности слой толщиной в субмикро- и нано- диапазонах представляет собой структуру, геометрические характеристики которой определяют физические свойства поверхности. В связи с этим необходимо и важно адекватно оценивать качество поверхности с высоким пространственным разрешением.

Традиционные методы исследования поверхности, такие как рентгеновская дифракция, электронная спектроскопия и др., позволяют получать интегральную по поверхности образца картину расположения атомов. Все эти методы работают в вакууме и позволяют разрешать детали нанометрового размера, но при этом возможно повреждение образца высокоэнергетическим пучком. Кроме того, они не дают информацию о высоте поверхностных деталей.

Экстремально малые размеры объектов, которыми оперируют современные технологии / нанотехнологии, делают крайне затруднительной визуализацию объектов и процессов, протекающих с их участием. В распоряжении исследователя в настоящее время имеется достаточно богатый арсенал приборов, которые обеспечивают изображение исследуемой поверхности с нанометровым разрешением. К ним относятся: просвечивающий и сканирующий электронный, ближнепольный оптический, атомно-силовой и туннельный зондовые микроскопы. Из них наиболее доступным методом исследования, обеспечивающим при этом наивысшее разрешение (от ангстрема - у простых приборов до сотых долей ангстрема - у прецизионных микроскопов) является **метод сканирующей зондовой микроскопии**.

Область сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) включает в себя несколько методик исследования поверхности. Одной из главных отличительных особенностей СЗМ является возможность получения информации о топографии, механических, электрических, магнитных свойствах поверхности с пространственным разрешением вплоть до атомного. В настоящее время СЗМ используется во многих научных направлениях и прикладных современных технологических разработках, являясь сегодня одним из самых распространенных в области исследования физики поверхности.

Раздел 1.

Сканирующая зондовая микроскопия Принцип работы атомно-силовой микроскопии

К наиболее распространенным методам сканирующей зондовой микроскопии можно отнести сканирующую туннельную микроскопию и атомно-силовую микроскопию. В данном пособии рассматриваются методики атомно-силовой микроскопии.

Принцип атомно-силовой микроскопии

Атомно-силовой микроскоп (АСМ) был изобретен в 1986 году швейцарскими учеными Гердом Биннигом, Кэлвином Куэйттом и Кристофером Гербером. В основе

работы АСМ лежит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью. Для регистрации силового взаимодействия используются специальные зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль (также «балка» или «кантилевер» – от англ. cantilever) с острым зондом на конце (Рис. 1) [1]. Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью. В общем случае данная сила имеет как нормальную к поверхности, так и латеральную (лежащую в плоскости поверхности образца) составляющие. Основные черты взаимодействия зонда с образцом: зонд АСМ испытывает притяжение со стороны образца на больших расстояниях и отталкивание на малых.

Получение АСМ изображений рельефа поверхности связано с регистрацией малых изгибов упругой консоли зондового датчика. В атомно-силовой микроскопии для этой цели широко используются оптические методы (Рис. 1). Оптическая система АСМ юстируется таким образом, чтобы излучение полупроводникового лазера фокусировалось на консоли зондового датчика, а отраженный пучок попадал в центр фоточувствительной области фотоприемника. В качестве позиционно-чувствительных фотоприемников применяются четырехсекционные фотодиоды.

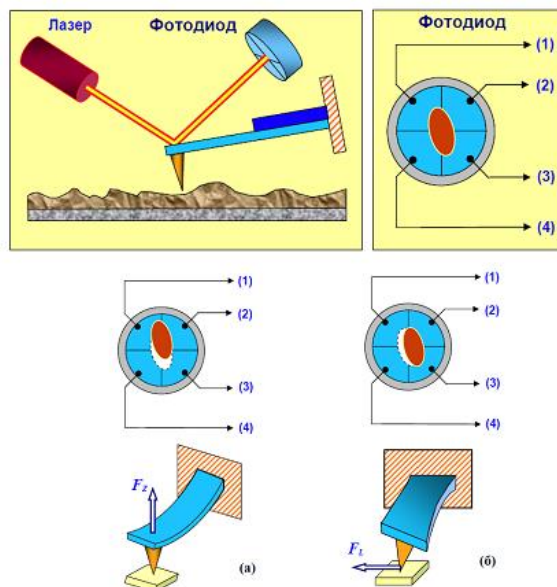


Рис. 1. Схема оптической регистрации изгиба кантилевера зондового датчика АСМ. Соответствие между типом изгибных деформаций кантилевера и изменении положения пятна засветки на четырехсекционном фотодиоде

Основные регистрируемые оптической системой параметры – это деформации изгиба консоли под действием Z-компонент сил притяжения или отталкивания (F_z) и деформации кручения консоли под действием латеральных компонент сил (F_L) взаимодействия зонда с поверхностью.

В случае контактных методик сканирования величина DFL используется в качестве входного параметра в петле обратной связи атомно-силового микроскопа. Система обратной связи обеспечивает DFL равным заданной оператором величине Set point с помощью пьезоэлектрического исполнительного элемента, который перемещает образец относительно зонда. Тем самым при сканировании поддерживает постоянным изгиб консоли ΔZ .

Зондовые датчики для АСМ (Рис. 2) изготавливаются методами фотолитографии и травления из кремниевых пластин. Упругие консоли формируются в основном из тонких слоев легированного кремния - SiO₂ или Si₃N₄. Один конец кантилевера жестко закреплен на кремниевом основании - держателе. На другом конце консоли располагается собственно зонд в виде острой иглы. Радиус закругления современных АСМ зондов составляет 1 ÷ 50 нм в зависимости от типа зондов и технологии их изготовления. Угол при вершине зонда – 10 ÷ 20°. Силу взаимодействия зонда с поверхностью F можно оценить следующим образом:

$F = k \cdot \Delta Z$, где k – жесткость кантилевера; ΔZ – величина, характеризующая его изгиб.

Коэффициенты жесткости кантилеверов k варьируются в диапазоне 10-3 ÷ 100 Н/м в зависимости от используемых при их изготовлении материалов и геометрических размеров. При работе зондовых АСМ датчиков в колебательных режимах важны резонансные свойства кантилеверов, в частности, резонансная частота.

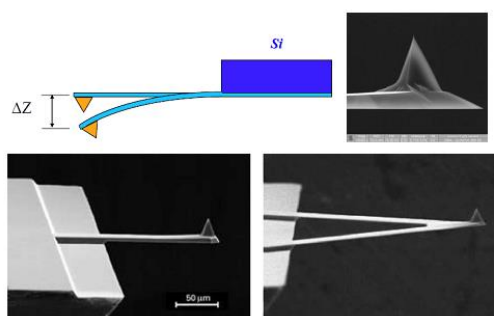


Рис. 2. Схематичное изображение зондового датчика АСМ и снимки, полученные с помощью электронного микроскопа: контактного кантилевера CSG01 из монокристаллического кремния Si, допированного сурьмой Sb; I-образного кантилевера; V-образного кантилевера

Основные методики атомно-силовой микроскопии

Условно методы получения информации о рельефе и свойствах поверхности с помощью АСМ можно разбить на две большие группы: **контактные квазистатические** и **бесконтактные (и полуконтактные) колебательные**.

В **контактных квазистатических методиках** острие зонда находится в непосредственном соприкосновении с поверхностью, при этом силы притяжения и отталкивания, действующие со стороны образца, уравниваются силой упругости консоли. При работе АСМ в таких режимах используются кантилеверы с относительно малыми коэффициентами жесткости, что позволяет обеспечить высокую чувствительность и избежать нежелательного чрезмерного воздействия зонда на образец.

В квазистатическом режиме АСМ изображение рельефа исследуемой поверхности формируется либо при постоянной силе взаимодействия зонда с поверхностью (сила притяжения или отталкивания), либо при постоянном среднем расстоянии между основанием зондового датчика и поверхностью образца. При сканировании образца в режиме $F_z = \text{const}$ система обратной связи поддерживает постоянной величину изгиба

кантилевера DFL = Set Point, а следовательно, и силу взаимодействия зонда с образцом (Рис. 3). При этом управляющее напряжение в петле обратной связи, подающееся на Z-электрод сканера, будет пропорционально сигналу рассогласования $Error = (DFL - Set Point)$ и рельефу поверхности образца (Рис. 4).

При исследовании образцов с малыми (порядка единиц ангстрем) перепадами высот рельефа часто применяется режим сканирования при постоянном среднем расстоянии между основанием зондового датчика и поверхностью ($Z = const$). В этом случае зондовый датчик движется на некоторой средней высоте $Z_{ср}$ над образцом, при этом в каждой точке регистрируется изгиб консоли ΔZ , пропорциональный силе, действующей на зонд со стороны поверхности. АСМ изображение в этом случае характеризует пространственное распределение силы взаимодействия зонда с поверхностью.

Недостаток контактных АСМ методик - непосредственное механическое взаимодействие зонда с поверхностью. Это часто приводит к поломке зондов и разрушению поверхности образцов в процессе сканирования. Кроме того, контактные методики практически не пригодны для исследования образцов, обладающих малой механической жесткостью, таких как структуры на основе органических материалов и биологические объекты. На таких объектах часто возникает ситуация, когда игла удерживается силами прилипания настолько сильно, что сканирование практически делается невозможным (**игла «залипает»**).

Из-за влияния инструмента исследования на объект информация, получаемая в контактном режиме, может неадекватно отображать реальные особенности поверхности и приводить к наблюдению артефактов. Так, типичными артефактами АСМ изображений являются «занижение высот» (из-за деформации образца зондом при сканировании) и «уширение профиля» (при значительных размерах зонда в сравнении с масштабом изучаемого рельефа и смены области касания зонда при сканировании разных участков поверхности приходится учитывать форму зонда).

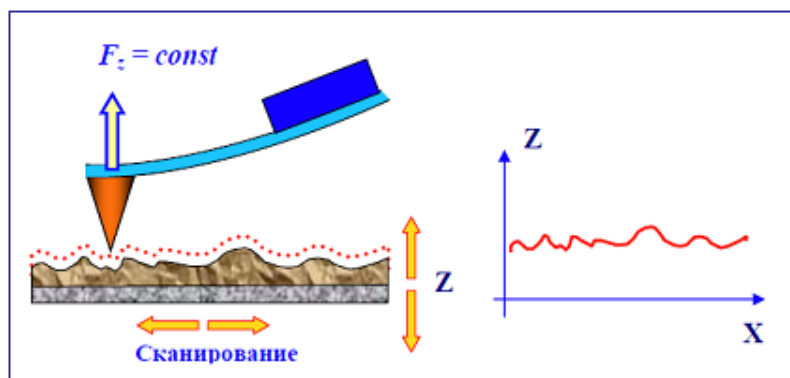


Рис. 3. Формирование АСМ изображения при постоянной силе взаимодействия зонда с образцом

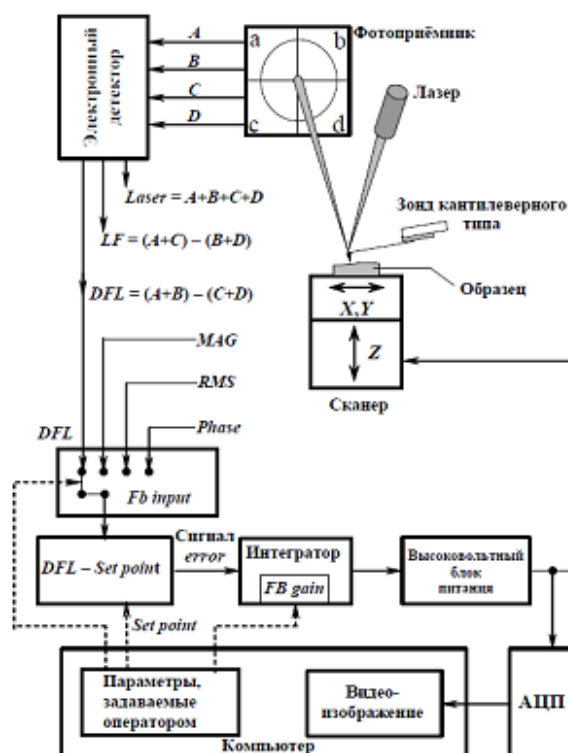


Рис. 4. Схема работы АСМ в контактном режиме

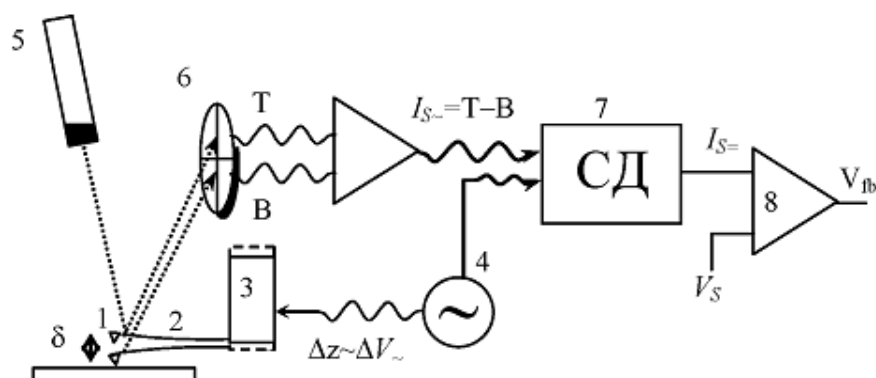


Рис. 5. Схема работы АСМ по колебательной методике

Обозначения: 1 – зонд; 2 – кантилевер; 3 – пьезодрайвер; 4 – генератор переменного напряжения; 5 – лазер; 6 – четырехсекционный фотодетектор; 7 – синхронный детектор; 8 – компаратор, вырабатывающий выходной сигнал цепи обратной связи V_{fb} , подаваемой на исполнительный элемент (в блок питания пьезосканера)

В полуконтактном и бесконтактном режимах силы притяжения и их градиенты слабее отталкивающих контактных сил, поэтому для их детектирования обычно используется **модуляционная (колебательная) методика**. Для этого с помощью пьезодрайвера возбуждаются колебания кантилевера (Рис. 5) с частотой ω , близкой к его собственной частоте ω_0 (обычно порядка 100 кГц). С приближением к поверхности на кантилевер начинают действовать дополнительные силы со стороны поверхности, что приводит к уменьшению собственной частоты его колебаний, т.е. к изменению амплитуды и фазы его колебаний (по сравнению с актюатором).

Лазерный луч регистрирующей системы отражается от колеблющегося в вертикальном направлении кантилевера и вызывает осциллирующее движение лазерного пятна относительно верхней и нижней половины фотодиода. Это приводит к появлению на выходе регистрирующей системы переменного электрического сигнала на частоте ω , амплитуда которого пропорциональна амплитуде колебаний острия кантилевера.

Далее с помощью синхронного детектора выделяется медленно изменяющийся сигнал MAG, соответствующий амплитуде переменной составляющей сигнала DFL на частоте модуляции ω . Компаратор сравнивает текущий сигнал MAG в цепи сенсора с изначально заданным Set Point (характеризует уровень, на котором зонд удерживается от поверхности образца) и, при его отклонении, вырабатывает в цепи обратной связи корректирующий сигнал Vfb, подаваемый на исполнительный элемент для перемещения образца относительно зонда. Таким образом, **постоянным поддерживается сигнал MAG = Set Point**, связанный с **амплитудой колебаний кантилевера**.

Согласно экспериментальному опыту фаза колебаний зонда по сравнению с амплитудой является более чувствительной к резким изменениям взаимодействия зонда и поверхности. Получение изображения смещения фазы колебаний кантилевера (сигнал Phase) параллельно с топографическим изображением поверхности позволяют получить дополнительную информацию об изменении различных свойств поверхности образца (в частности, связанных с изменением диссипации энергии колебаний кантилевера от одной точки поверхности к другой). Данная методика получила название **метод фазового контраста**.

Основные преимущества колебательных методик по сравнению с контактными:

- 1) уменьшение сил взаимодействия, в том числе боковых, зонда с поверхностью, поэтому этот режим более подходит для сканирования с высоким разрешением мягких и «липких» образцов (полимеров) или слишком твердых образцов;
- 2) использование резонансных свойств системы позволяет существенно повысить чувствительность в сравнении со статическими измерениями;
- 3) уменьшение величины шумов с частотной зависимостью $1/f$ за счет переноса спектра сигнала в область высоких частот f .

В бесконтактном режиме кантилевер совершает вынужденные колебания с малой амплитудой порядка 1 нм. При приближении зонда к поверхности на кантилевер начинает действовать дополнительная сила со стороны образца. При ван-дер-ваальсовом взаимодействии это соответствует области расстояний между зондом и образцом, где действует сила притяжения.

Регистрация изменения амплитуды колебаний кантилевера и выработка управляющего сигнала в бесконтактном режиме требуют высокой чувствительности и устойчивости работы обратной связи. На практике чаще используется так называемый **полуконтактный режим** колебаний кантилевера (эта методика также часто называется «tapping mode» от английского to tap – постукивать). При работе в этом режиме возбуждаются вынужденные колебания кантилевера вблизи резонанса с амплитудой порядка 10 – 100 нм. При достаточно большой амплитуде колебаний кантилевер разрывает установившуюся связь с образцом на каждом периоде, что исключает влияние сил трения и капиллярного залипания.

Кантилевер подводится к поверхности так, чтобы в нижнем полупериоде колебаний происходило касание поверхности образца. В полуконтактном режиме амплитуда колебаний кантилевера ограничивается расстоянием до поверхности образца и начинает гораздо сильнее спадать с расстоянием, чем вдали от поверхности. Взаимодействие кантилевера с поверхностью в полуконтактном режиме состоит из слабого притяжения (ван-дер-ваальсово взаимодействие), к которому в момент касания добавляется отталкивающая упругая сила.

Раздел 2.

Система параметров для анализа качества поверхности материалов в сканирующей зондовой микроскопии

Качество поверхности – это совокупность всех служебных свойств (коррозионная, радиационная стойкость, износоустойчивость и т.д.). Качество поверхности оценивают двумя группами характеристик: геометрическими и физическими.

Геометрические характеристики качества поверхности – параметры отклонения поверхности от идеальной формы (шероховатость). К физическим характеристикам качества относятся микроструктура, микротвердость, адгезия и др. [2]

Для анализа поверхности твердых тел методом СЗМ используют систему параметров, которая достаточно всесторонне характеризует не только шероховатость поверхности, но и ее морфологические особенности [3]. Параметры разделены на метрические, пространственные и фрактальные. Они определены в терминах классической статистики, спектрального анализа и фрактальной геометрии. Для оценки анизотропии поверхности по данным АСМ используют методы расчета пространственных параметров поверхности по данным измерений трансформант Фурье и двумерных корреляционных функций шероховатости.

2.1. Метрические параметры

Метрический параметр – основной термин, применяющийся для описания измерений профиля поверхности, взятого в перпендикулярном направлении к номинальному профилю. Для представления измеренного профиля поверхности от точки к точке используется цифровая функция высоты профиля - $Z(k,j)$, выражающаяся как расстояние между измеренным профилем и средней плоскостью профиля поверхности. Перечислим их.

1) Амплитудные параметры:

Δh - размах высот (peak to peak value), нм.

$$\Delta h = |Z_{\max}| + |Z_{\min}| \quad (1)$$

Определяется как сумма высот наибольшего выступа и наибольшей впадины.

2) **S_a** - средняя арифметическая шероховатость (average roughness), нм. (2)

Параметр S_a определяет шероховатость поверхности в виде двумерного среднего арифметического значения (т.е. первого начального момента μ_1) и центр распределения.

3) **S_q** - средняя квадратическая шероховатость (root mean square roughness), нм. (3)

Параметр S_q (второй центральный момент μ_2) является определяющей характеристикой шероховатости.

4) **S_z** - десять точек по высоте (ten point height), нм. (4)

Параметр S_z выражает шероховатость поверхности (по аналогии с методом max-min) по выбранным пяти координатам максимальных высот и впадин по формуле:
 $S_z = 1/5 (z_{\max 1} + z_{\max 2} + z_{\max 3} + z_{\max 4} + z_{\max 5} - z_{\min 1} - z_{\min 2} - z_{\min 3} - z_{\min 4} - z_{\min 5})$.

5) **Ssk** - асимметрия (surface skewness), нм. (5)

Параметр **Ssk** (третий центральный момент μ_3) характеризует скошенность распределения профиля, когда один спад крутой, а другой - пологий. Для симметричных (относительно центра) распределений профиля $Ssk = 0$. Этот параметр имеет размерность куба случайной величины, поэтому для относительной характеристики асимметрии используют безразмерный коэффициент асимметрии, равный третьему моменту, деленному на куб среднеквадратического отклонения.

6) **Sku** - эксцесс (surface kurtosis), нм. (6)

Параметр **Sku** (четвертый центральный момент μ_4) характеризует протяженность распределения профиля, а отнюдь не остроту его вершины, как это часто ошибочно указывается. Его относительное значение μ_4/s^4 называют эксцессом распределения.

7) **Skku** - контрэксцесс (function of kurtosis), $1/\text{нм}$. (7)

Величину эксцесса удобнее нормировать, введя другую функцию от эксцесса, а именно, $Skku = 1/\sqrt{Ssk}$, изменяющуюся для любых распределений профиля лишь в пределах от 0 до 1.

Приведенные выше амплитудные параметры, определяемые через моменты на основе статистики сканирования, характеризуют симметрию распределения профиля относительно его среднего значения и протяженность распределения профиля и не содержат информации о равномерности рельефа поверхности.

2.2. Пространственные параметры

Эта группа параметров ориентирована на использование массива цифровых данных изображения поверхности, подвергнутых дискретному преобразованию Фурье. Они позволяют определить анизотропию поверхности и периодичность структуры. К ним относятся:

- 1) **Srwi** - индекс направления радиальной длины волны (radial wavelength index);
- 2) **Std** - направление текстуры (texture direction), град;
- 3) **Stdi** - индекс направления текстуры (texture direction);
- 4) **Srw** - радиальная длина волны (параметр периодичности структуры) (radial wavelength), нм.

2.3. Фрактальные параметры

Фрактальные измерения в отличие от физических и технических имеют своей целью количественно оценить структуру поверхности, определить масштабную инвариантность и самоподобие формы, фрактальную размерность носителя меры, меру хаотичности структуры, выявить асимметрию структуры и особенности кинетики роста и т.п. В настоящее время предложено несколько методов фрактального анализа изображений в СЗМ: область – периметр, вариационный и структурной функции [3]. Общая идея, лежащая в основе этих методов, базируется либо на размерности Хаусдорфа-Безиковича DF , либо на спектре фрактальных размерностей Dq . Фрактальная размерность не является метрической и выражается безразмерным дробным числом, которое для поверхности в СЗМ лежит между числами 2 и 3. Суждение о качестве поверхности при

использовании фрактального размера DF делается на основании того, насколько близко значение DF к числу 2: чем оно ближе к значению 2, тем лучше поверхность.

Раздел 3. Экспериментальная часть

3.1. Программное обеспечение для проведения исследований параметров поверхности образцов на базе СЗМ Solver Next

Программный пакет Image Analysis P9 (IA) разработан компанией «НТ МДТ» (г. Зеленоград, Россия) [4]. Главное окно программы состоит из следующих элементов (Рис. 6):

- главное меню содержит команды для работы с файлами данных;
- инструменты масштабирования, перемещения;
- панель настройки метода, содержит список всех методов по обработке и анализу АСМ-данных;
- контейнер изображений, служит для отображения АСМ-данных.

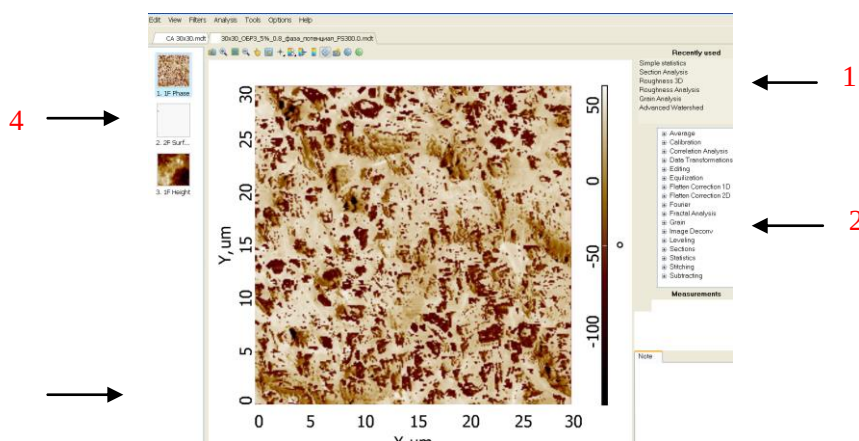


Рис. 6. Окно программы IA: 1 - главное меню; 2 – инструменты масштабирования, перемещения; 3 – панель настройки метода; 4 – окно просмотра АСМ-данных

Загрузка АСМ-данных в контейнер производится стандартным образом:

File $\Rightarrow$ Open $\Rightarrow$ Выбор файла АСМ-данных $\Rightarrow$ Выбор требуемого АСМ-фрейма в файле.

Методы обработки и анализа АСМ-изображений объединены в четыре группы:

- Image Analysis (объединяет методы, связанные с анализом 2D-данных);
- Curve Analysis (методы анализа 1D-данных);
- Transform (методы преобразования 2D и 1D-данных);
- Filters (преобразования типа «фильтрации»).

Выбор методов производится в главном меню.

3.2. Обработка АСМ-изображений

Для запуска программного модуля обработки изображений Image Analysis необходимо выполнить следующие действия:

- 1) запустить программу управления ИА;
- 2) открыть окно Data, выбрав на панели основных операций закладку (Рис. 6.1) закладку Data;
- 3) загрузить файл с расширением *.mdt;
- 4) открыть файл *.mdt;
- 5) загрузить в контейнер АСМ-изображение;
- 6) выбрать программу обработки (Рис. 6.3).

Для оценки шероховатости поверхности образцов используют модуль Roughness Analysis. В методе Roughness Analysis вычисляются основные статистические параметры для объекта и строится гистограмма распределения значений. В результате действия Roughness Analysis получаем таблицу статистических параметров и гистограмму распределения.

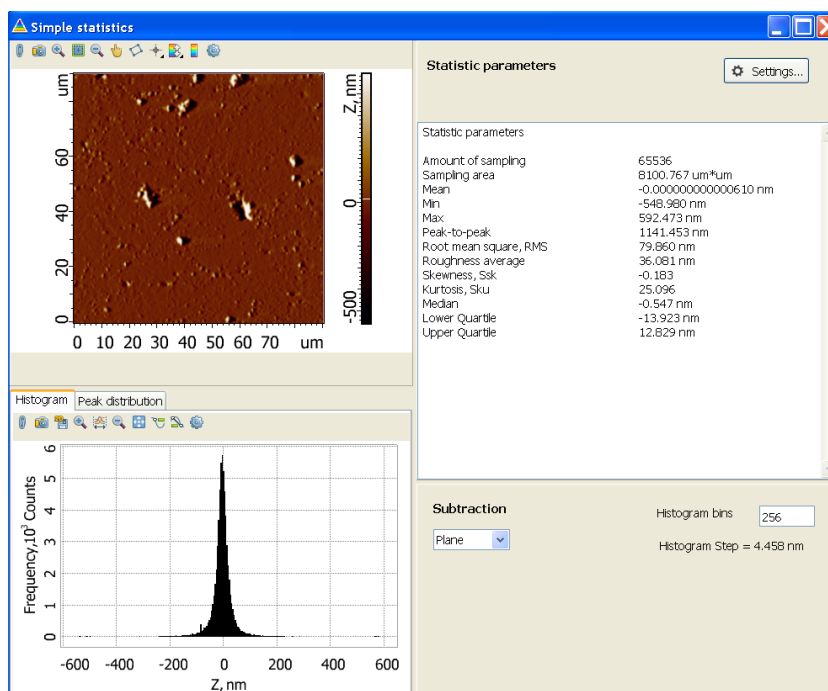


Рис. 7. Результат действия Roughness Analysis

Некоторые параметры, определяемые программой Roughness Analysis, приведены в Таблице 1.

Обозначение	Название параметра (стандарт)	Определение параметра
Параметры высоты		
Sq	Root meansquare (rms) roughness (ASMEB46.1)	Средняя квадратическая шероховатость: $S_q = \sqrt{\frac{1}{N \cdot \Delta x \Delta y} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M Z_{ij}^2}$ где $Z(x_i, y_j)$ отсчитывается от средней поверхности
	Root mean square height of the scale-limited surface (ISO25178-2)	
Sa	Average roughness (ASME B46.1)	Средняя шероховатость: $S_a = \frac{1}{N \cdot \Delta x \Delta y} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M Z_{ij} $ где $Z(x_i, y_j)$ отсчитывается от средней поверхности
	Arithmetical mean height of the scale-limited surface (ISO25178-2)	
Sp	Maximum areapeak height (ASME B46.1)	Максимальная высота, отсчитываемая от средней поверхности
	Maximum peak height of the scale-limited surface (ISO 25178-2)	
Sv	Maximum areavalley depth (ASME B46.1)	Максимальная глубина, отсчитываемая от средней поверхности
	Maximum pitheight of the scale-limited surface (ISO25178-2)	

Таблица 1. Статистические параметры, вычисляемые в методе Roughness Analysis [3]

При отсутствии выделения какой-либо области на скане статистические параметры определяются для всего изображения. Если необходимо получить профиль сечения вдоль заданного направления, то используют метод Section Analysis.

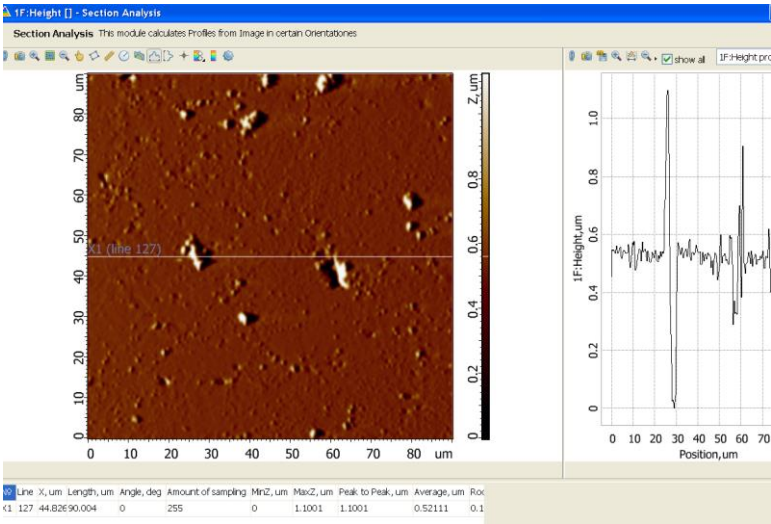


Рис. 8. Применение метода Section Analysis
Справа – АСМ-скан с профилем сечения; внизу – параметры рельефа

Вычисление фрактальных размерностей осуществляется в специальном модуле Fractal (Рис. 9).

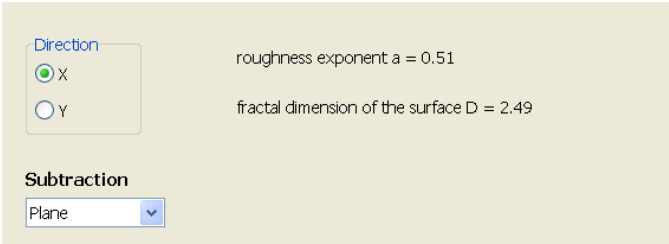


Рис. 9. Результат обработки модулем Fractal

Программное обеспечение микроскопа Solver Next позволяет получать Фурье-трансформанту сканирующей поверхности. На Рис. 10 приведено АСМ-изображение поверхности прессованного бериллия и соответствующая Фурье-трансформанта. В этом случае анализ позволяет более точно определить параметры периодичности структуры.

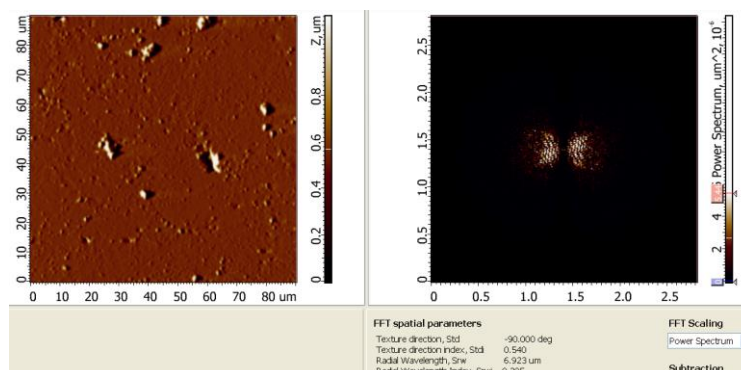


Рис. 10. АСМ-изображение образца бериллия и результат обработки модулем Fourier

Раздел 4. Журнал практической части [2] Отчёт по практической части

Студент	Группа	№ варианта задания

1. Общая информация о АСМ-скане

Название файла	Scan point size	Размер скана

2. Информация о качестве поверхности, нм

2.1. Метрические оценки

Геометрические характеристики всей области поверхности скана								
max		min		h		Sa		Sq
Геометрические характеристики выделенной области поверхности скана								
Параметры области				Геометрические характеристики				
X	Y	Dx	Dy	max	min	h	Sa	Sq
Геометрические характеристики поверхности скана в сечении заданной длины и ориентации								
Параметры сечения				Геометрические характеристики				
X	Y	Length	angle	max	min	h	Sa	Sq
Геометрические характеристики поверхности скана в сечении по оси X								
Параметры сечения линии X				Геометрические характеристики				
Line X				max	min	h	Sa	Sq

Геометрические характеристики поверхности скана в сечении по оси Y								
Параметры сечения линии X				Геометрические характеристики				
Line Y				max	min	h	Sa	Sq

2.2. Фрактальная размерность

Индекс Херста		Фрактальная размерность по осям	
α_x	α_y	Dx	Dy

2.3. Пространственные параметры

<i>Std</i>	<i>Stdi</i>	<i>Srw</i>	<i>Srwi</i>

Srwi - индекс направления радиальной длины волны (radial wavelength index);

Std - направление текстуры (texture direction), град;

Stdi - индекс направления текстуры (texture direction);

Srw - радиальная длина волны (параметр периодичности структуры) (radial wavelength), нм.

3. Заключение по результатам работы

1) Интегральная оценка качества поверхности

2) Оценка качества поверхности по сечениям

3) Комплексная оценка

Дата выполнения	Подпись студента	Работа выполнена	Работа защищена

Список использованных источников

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии : учебное пособие для студентов старших курсов вузов / В.Л. Миронов. - Нижний Новгород: ИФМ РАН, 2004. - 114 с.: ил.
2. Арутюнов П.А. Система параметров для анализа шероховатости и микрорельефа поверхности материалов в сканирующей зондовой микроскопии / П.А. Арутюнов, А.Л. Толстихина, В.Н. Демидов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1999. № 9, том 65. С. 27-37.
3. Модуль обработки изображений «ImageAnalysisP9» : справочное руководство. – Зеленоград, 2019. - 528 с.: ил.
4. Бавыкин О.Б. Современные методы оценки качества поверхности деталей машин : учебное пособие / О.Б. Бавыкин, О.Ф. Вячеславова. - М.: МГМУ «МАМИ», 2010. – 74 с.: ил.

Бузова Марина Эдуардовна

**Атомно-силовая микроскопия в оценке качества
конструкционных и функциональных материалов**

**Практикум по АСМ
Часть 1**

Учебно-методическое пособие