

Федеральное агентство  
по техническому регулированию и метрологии

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ

«ВНИИМС»

# СВИДЕТЕЛЬСТВО

об аттестации МВИ

№ 702/02-09

Методика измерений шероховатости поверхности образцов  
при необходимости указывают объект и метод измерения

разработанная Учреждением Российской Академии Наук Институтом физики твердого тела РАН  
наименование организации (предприятия) разработавшей МВИ

и регламентированная в Методика измерений шероховатости поверхности образцов методом атомно-силовой микроскопии. Шифр методики SOLVER  
обозначение и наименование документа

Аттестована в соответствии с ГОСТ Р 8.563 «ГСИ. Методики выполнения измерений»,  
аттестация осуществлена по результатам Метрологической экспертизы материалов по разработке МВИ в соответствии с п.6.4 ГОСТ Р 8.563  
теоретическое или экспериментальное исследование МВИ и другие виды работ

В результате аттестации МВИ установлено, что МВИ соответствует предъявляемым к ней метрологическим требованиям и обладает следующими основными метрологическими характеристиками, приведенными в Приложении настоящего свидетельства  
Диапазон измерений, характеристики погрешности измерений (неопределенность измерений)

и (или) характеристики составляющих погрешности (при необходимости нормативы контроля)

Зам. директора ФГУП «ВНИИМС»

В.Н. Яншин

Начальник отдела 702 ФГУП «ВНИИМС»

Д.В. Корнеев



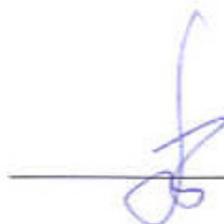
«10» ноября 2009 г.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

к свидетельству об аттестации № 702/02-09

Измеряемая величина	Пределы измерений, нм	Пределы абсолютной погрешности измерений, нм
Шероховатость (площадь сканирования 5x5 мкм)	0-20	$\pm 1$
Шероховатость (площадь сканирования 5x5 мкм)	20-100	$\pm 1.5$
Шероховатость (площадь сканирования 5x5 мкм)	100-500	$\pm 2$

Начальник отдела 702 ФГУП «ВНИИМС»



Д.В. Корнеев

«10» ноября 2009 г.

Российская Академия Наук

Учреждение Российской Академии Наук  
Институт физики твердого тела РАН

УТВЕРЖДАЮ



Руководитель РЦКП ИФТТ РАН  
Зам. директора ИФТТ РАН

С.И.Бредихин

Методика измерений шероховатости поверхности образцов  
методом атомно-силовой микроскопии

Шифр методики Solver

РАЗРАБОТЧИКИ:

н.с. ЛКТ, к. ф.-м. н.

А.А.Жуков

## Сведения о документе

Разработан:

Учреждение Российской академии наук

Институт физики твердого тела РАН

Научный сотрудник Лаборатории квантового транспорта, к.ф.-м.н. А.А.Жуков

«05» ноября 2009 г.

Методика измерений шероховатости поверхности образцов методом атомно-силовой микроскопии (Сканирующий зондовый микроскоп Solver P-47, NT-MDT) аттестована в соответствии с ГОСТ Р 8.563-96 и МИ 2336-95, ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002.

Настоящий документ не может быть тиражирован и распространен без разрешения Учреждения Российской Академии Наук Института физики твердого тела РАН

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ	4
2. НАЗНАЧЕНИЕ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ	5
3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ, ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА	5
3.1. Средство измерения	5
3.2. Вспомогательное оборудование	5
3.3. Вспомогательные материалы	5
3.4. Источники приборных погрешностей.	5
4. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ	6
4.1. Принцип работы метода.	6
4.2. Теоретическая оценка погрешности.	6
4.3. Диапазон измерений, точность метода	7
5. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ.	7
6. ТРЕБОВАНИЯ К КВАЛИФИКАЦИИ ОПЕРАТОРОВ	8
7. УСЛОВИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ	8
7.1. Требования к помещению.	8
7.2. Требования к образцу.	8
7.3. Требования к общему ходу выполнений измерений.	9
8. НЕОБХОДИМЫЕ КАЛИБРОВОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ.	9
8.1. Предварительное сканирование калибровочных решеток.	9
8.2. Установка образцов на рабочий столик микроскопа.	9
8.3. Выбор участка для сканирования.	9
9. ВЫПОЛНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ НА ИССЛЕДУЕМОМ ОБРАЗЦЕ	10
10. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ	10
10.1. Обработка полученных изображений топографии.	10
10.2. Статистическая обработка результатов эксперимента.	11
11. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ	12
12. КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ	12
ПРИЛОЖЕНИЕ	13

## 1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Метод атомно-силовой микроскопии является традиционным методом исследования рельефа поверхности материалов и широко используется в различных областях науки и техники. Принцип работы атомно-силового микроскопа (АСМ) основан на последовательном сканировании площади поверхности образца острой иглой. Сканирование поверхности осуществляется при помощи пьезосканера, который осуществляет точное перемещение образца относительно острия. В каждой сканируемой точке поверхности система обратной связи при помощи пьезосканера перемещает образец относительно зонда по нормали к поверхности таким образом, чтобы вернуть значение параметра взаимодействия между зондом и поверхностью образца к изначально установленной величине. Одновременно величина перемещения зонда по отношению к образцу в направлении нормали к поверхности записывается в память компьютера и интерпретируется как рельеф образца.

Методом атомно-силовой микроскопии исследуются поверхности монокристаллов, пленок, одномерные объекты типа трубок и проволок. В последнее время исследуются также и органические соединения. В результате сканирования АСМ получается изображение топографии поверхности образца. В отличие от сканирующей туннельной микроскопии проводимость образца не требуется.



Рис.1. Пьезомеханический блок (виброзащитная система, блок сканера и измерительная головка) сканирующего зондового микроскопа Solver P47

Сканирующий зондовый микроскоп Solver P-47 (пьезомеханический блок прибора изображена на рис.1) является прибором широкого спектра применения. С помощью данного микроскопа можно получать изображения топографии образца с последующей обработкой данных с целью характеристики шероховатости образца, проводить исследования распределения электрического потенциала на поверхности методом зонда Кельвина и измерять локальную дифференциальную ёмкость зонд-образец. Присутствует возможность проведения сканирующей туннельной спектроскопии.

## 2. НАЗНАЧЕНИЕ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Настоящая методика с применением сканирующего зондового микроскопа Solver P47 предназначена для решения следующих задач:

- Получение изображения рельефа поверхности образца
- Определение шероховатости образца на основании полученных данных топографии

Площадь сканирования в данной методике ограничена размерами 5x5 мкм и максимальным перепадом высот 500 нм.

## 3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ, ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ СРЕДСТВА

Для реализации методики необходимо как основное средство измерения (сканирующий зондовый микроскоп Solver P47, производитель NT-MDT), набор кантилеверов (стандартные кантилеверы для контактного (CSG 11) или полуконтактного (NSG 11) сканирования с радиусом скругления острия менее 10 нм, производитель NT-MDT), так и набор вспомогательных средств и оборудования.

### 3.1. Средство измерения

Сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) Solver P47 представляет собой стационарный прибор. СЗМ Solver P47 состоит из виброзащитной системы, блока сканера, измерительных головок различных типов и блока электроники, подключаемого к ноутбуку или PC с помощью интерфейсной платы.

Характеристики СЗМ Solver P47 (NT-MDT):

Размер образца: 40x40x10mm

Сканеры: 14x14x2µm; 50x50x2.5µm (методика рассчитана на сканнер 50x50x2.5µm)

Мин. шаг сканирования: 0.002nm; 0.006nm

Тип: сканирования образцом

СЗМ головки АСМ и СТМ

В режиме СТМ: 30pA - 50nA (стандартный предусилитель)

10pA - 5nA (низковольтный предусилитель)

### 3.2. Вспомогательное оборудование

Вспомогательное оборудование включает в себя:

- набор решеток для калибровки пьезосканера сканирующего зондового микроскопа TGS 1 производства NT-MDT (Россия)
- ультразвуковую ванну, применяемую для очистки поверхности измеряемых образцов, если данная очистка необходима.
- бинокулярный микроскоп для позиционирования острия сканирующего зондового микроскопа на поверхности образца.

### 3.3. Вспомогательные материалы

К вспомогательным материалам, необходимым для проведения исследований следует отнести:

- ацетон ЧДА, ГОСТ 2603-79 (Россия)
- изопропиловый спирт ОСЧ, СТП ТУ КОМП 2-018-06 (Россия)
- дистиллированная вода

Данные материалы предназначены для проведения очистки поверхности образцов, если это необходимо.

### 3.4. Источники приборных погрешностей.

Погрешности при определении шероховатости поверхности определяются неточностями, связанными с определением топографии образца, которые в свою очередь разделяются на погрешности, определяемые зондом и пьезосканером.

3.4.1. Погрешности, связанные с зондом, возникают из-за неидеальности острия (см рис. 2), а именно его конечного радиуса и конечного угла острия (особенно существенно при сканировании топографии с резкими перепадами высот более 50 нм). (+ величины)

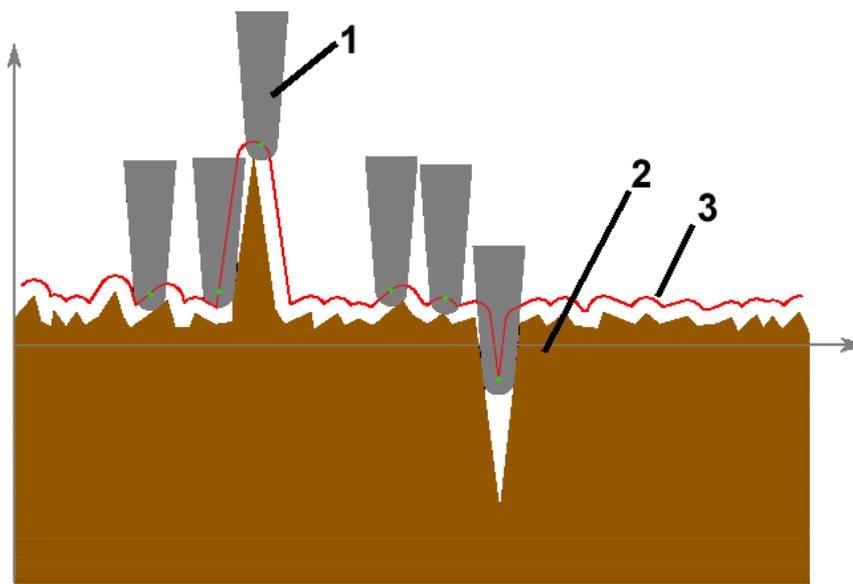


Рис. 2. 1 – Остриё АСМ с конечным радиусом скругления;  
2 – исследуемый образец;  
3 – результат сканирования топографии образца.

3.4.2. Погрешности, связанные с пьезосканером, а именно эффективное изменение высоты пьезотрубки при сканировании, которое связано с отклонением трубки от вертикального положения, и пропорционально квадрату данного отклонения. Кроме того к неточности сканирования может приводить крип пьезотрубки и общий дрейф системы. (+ величины)

## 4. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

### 4.1. Принцип работы метода.

Принцип работы атомно-силового микроскопа основан на последовательном сканировании площади поверхности образца острой иглой. Сканирование поверхности осуществляется при помощи пьезосканера, который осуществляет точное перемещение образца относительно острия. Острие находится на свободном конце кантилевера - гибкой пластины, закрепленной вторым концом на неподвижном держателе зонда головки атомно-силового микроскопа (см. рис. 3).

Острие взаимодействует с поверхностью, сила взаимодействия вызывает изменение механического состояния кантилевера. При сканировании величина изменения состояния кантилевера от начально установленного значения измеряется при помощи регистрирующей системы. Сигнал, пропорциональный отклонению, поступает в систему управления сканером. В каждой сканируемой точке поверхности система обратной связи при помощи пьезосканера перемещает образец относительно зонда по нормали к поверхности таким образом, чтобы вернуть значение параметра взаимодействия к начально установленной величине. Одновременно величина перемещения зонда по

отношению к образцу в направлении нормали к поверхности записывается в память компьютера и интерпретируется как рельеф образца.

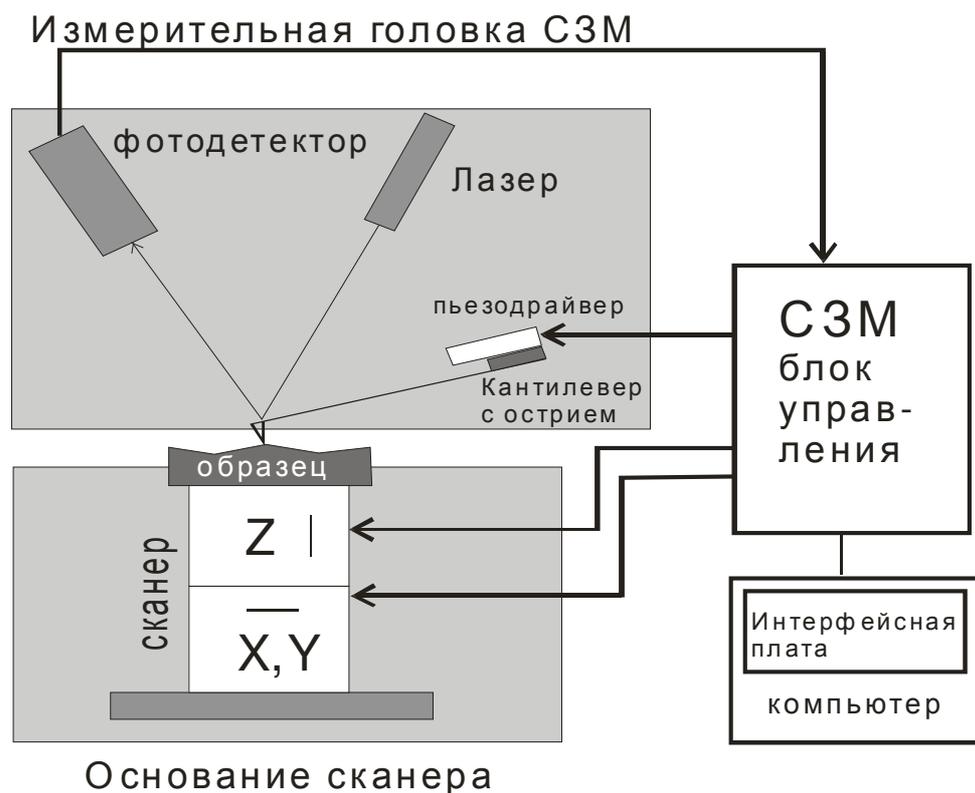


Рис. 3. принципиальная схема атомно-силового микроскопа.

#### 4.2. Теоретическая оценка погрешности.

Основная погрешность в эксперименте при сканировании малых площадей поверхности (5x5 мкм) связана с погрешностью калибровки пьезосканера определяется погрешностью изготовления калибровочных решеток TGS 1 (перепады высот TGZ1 – (19±)нм, TGZ2 – (104±1.5) нм, TGZ3 – (540±2) нм, период (3.00±0.05) мкм).

#### 4.3. Диапазон измерений, точность метода

Диапазон величин, получаемых при измерении и ошибка измерений приведены в таблице 1.

Измеряемая величина	Пределы измерений, нм	Пределы погрешности измерений, нм
Шероховатость (площадь сканирования (5x5) мкм)	0-20	± 1
Шероховатость (площадь сканирования (5x5) мкм)	20-100	± 1.5
Шероховатость (площадь сканирования (5x5) мкм)	100-500	± 2

## **5. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ.**

Источником опасного напряжения являются блок электронного управления микроскопом (напряжение свыше 300 В). Наличие лазера на головном блоке микроскопа также требует дополнительной осторожности.

- Перед началом работы следует убедиться, что прибор заземлен.
- Прибор содержит прецизионные электромеханические элементы, поэтому оберегайте его от ударных нагрузок и сильных механических воздействий.
- Оберегайте прибор от воздействия предельных температур, попадания жидкости.

## **6. ТРЕБОВАНИЯ К КВАЛИФИКАЦИИ ОПЕРАТОРОВ**

К эксплуатации микроскопа и проведению измерений допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний и прошедшие специальный инструктаж. В целом метод предназначен для использования опытными пользователями сканирующих электронных микроскопов.

## **7. УСЛОВИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ**

### **7.1. Требования к помещению.**

Помещение должно быть сухим и отапливаемым с естественным и искусственным освещением в соответствии с действующими нормами для лабораторных помещений.

В рабочей комнате должно быть как можно меньше приборов и устройств, способных вызывать механические вибрации и акустический шум. Так же комната должна быть по возможности защищена от внешнего акустического шума. Отрицательно влияют на работу микроскопа тепловые потоки, резкие изменения температурного фона и влажности.

Для качественной работы комплекс должен располагаться, по крайней мере, на двух столах. Стол, предназначенный для размещения измерительной головки, должен быть по возможности тяжелым и устойчивым. Желательно разместить монитор компьютера и микроскоп на некотором расстоянии друг от друга, чтобы избавиться от импульсных наводок от монитора. На работу прибора отрицательно влияют тепловые потоки, сквозняки, резкие изменения температурного фона и влажности.

Рекомендуется соблюдать следующие требования:

1. Допустимая температура воздуха в помещении  $-(25 \pm 10)^\circ\text{C}$ ;
2. Допустимая влажность в помещении  $< 80\%$ ;
3. Помещение должно быть обеспечено электрической сетью на от 90 В до 240 В, 50/60 Гц и качественным заземлением. Желательно иметь источник бесперебойного питания с подключением к силовому электрощиту.
4. Помещение должно быть защищено от внешнего акустического шума и механических вибраций.

### **7.2. Требования к образцу.**

Прибор позволяет исследовать образцы, имеющие линейные размеры в плоскости до (40-50) мм и толщину до 10 мм. Образцы, имеющие небольшие размеры (менее (10-12) мм) необходимо закреплять на специальной переходной подложке, а на столик держателя образца устанавливать уже переходную подложку с закрепленным на ней образцом.

Грязь на поверхности образца может приводить к существенной деградации острия микроскопа. Если образец сильно загрязнен, то его поверхность следует очистить при помощи соответствующих химических растворителей. Наиболее часто используются ацетон, изопропиловый спирт, дистиллированная вода.

Для исследования объектов субмикронных размеров - тонких пленок с дефектами, биологических объектов, пленок с внедренными в них объектами - в качестве подложек используются очень ровные поверхности. Для этой цели лучше всего подходят слоистые материалы – высокоориентированный пиролитический графит (HOPG), слюда. Из металлических подложек чаще всего используются золото и платина. Ровные поверхности для исследования и нанесения на них различных веществ получаются при напылении в вакууме золота или платины на другие подложки. Поверхность благородных металлов остается пригодной для работы значительное время.

### **7.3. Требования к общему ходу выполнения измерений.**

Перед сканированием исследуемого образца необходимо проводить тестовые сканирования калибровочных решеток как на предмет проверки правильности калибровки пьезосканера, так и для проверки качества острия зонда. После исследования топографии тестируемого образца следует провести повторное сканирование калибровочной решетки для проверки качества зонда. При его очевидной деградации зонд следует заменить на новый с последующим повторением измерений топографии исследуемого образца. Для дополнительной проверки качества острия зонда желательно также проведение сканирования структуры TGT1 (производитель NT-MDT) после каждого исследуемого образца.

## **8. НЕОБХОДИМЫЕ КАЛИБРОВОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ.**

### **8.1. Предварительное сканирование калибровочных решеток.**

Перед сканированием исследуемого образца необходимо проводить тестовые сканирования всех калибровочных решеток из набора TGS 1. Данное сканирование преследует цель как калибровки и проверки сканера, так и тестирование качества зонда. Кроме того данное сканирование позволяет провести подбор оптимальных параметров работы прибора.

Если после сканирования калибровочных решеток обнаружится, что измеренный перепад высот, а также расстояние между канавками не соответствуют норме, требуется перекалибровать прибор согласно прилагаемой к нему инструкции.

Следует обращать внимание на следующие возможные дефекты в полученных результатах сканирования:

1. Наличие двойников, дополнительных ступенек в рельефе или сглаженные кромки рельефа означает, что острие зонда разбито или загрязнено.
2. Наличие “шлейфа” в сканировании. Скорость сканирования излишне высока.
3. Возникновение дополнительных бугров или провалов в районе резкого перепада высот есть результат перерегулировки в цепи обратной связи. Следует уменьшить **gain** и снизить скорость сканирования.

Пункты 2 и 3 легче обнаружить если сравнивать результаты сканирования в прямом и обратном направлении. Результаты сканирования с быстрой координатой X и Y должны совпадать. Следует проверить правильность общей геометрии полученного изображения топографии.

На образце с калибровочной решеткой также необходимо провести измерение спектроскопии для правильного выбора параметров режима сканирования.

## **8.2. Установка образцов на рабочий столик микроскопа.**

Прибор позволяет исследовать образцы, имеющие линейные размеры в плоскости до 40-50 мм и толщину до 10 мм. Образцы, имеющие небольшие размеры (менее 10-12 мм) необходимо закреплять на специальной переходной подложке, а на столик держателя образца устанавливать уже переходную подложку с закрепленным на ней образцом. В качестве переходных подложек рекомендуется использовать стандартную подложку SU001, выпускаемую и поставляемую фирмой NT-MDT. Подложка изготовлена из поликристаллического сапфира и имеет размеры (24x19x0.5) мм. Можно также использовать в качестве переходной подложки и любую другую подобного типа. Для закрепления образцов на переходной подложке можно использовать двухстороннюю липкую ленту. В случае использования липкой ленты следует подождать один час перед первым сканированием с целью уменьшения дрейфа системы.

## **8.3. Выбор участка для сканирования.**

После установки образца на рабочем столике микроскопа следует с помощью бинокулярного микроскопа выбрать место сканирования свободное от загрязнений. Наличие пыли или других привнесенных загрязнений на поверхности образца существенно влияет на результат сканирования.

# **9. ВЫПОЛНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ НА ИССЛЕДУЕМОМ ОБРАЗЦЕ**

Получение изображений сканирования топографии при помощи микроскопа Solver P47 производится в соответствии с техническим руководством пользователя данного оборудования. На исследуемом образце необходимо провести измерение спектроскопии для правильного выбора параметров режима сканирования. Окно сканирования должно располагаться по центру. Для дополнительного контроля качества сканирования следует проводить сканирование с быстрыми направлениями как X, так и Y. Результаты сканирования должны совпадать. Необходимо правильно подобрать скорость сканирования, чтобы исключить проявление “шлейфов”, предпочтительная скорость должна составлять 0.5 Гц. Рекомендуется провести несколько измерений топографии образца.

Шаг сканирования, близкий к оптимальному, составляет 5 нм, что примерно в 2 раза меньше характерного радиуса скругления зонда АСМ. Разрешение изображения в данном случае будет ограничено качеством острия зонда, а не дискретностью его перемещения. Следует также провести сканирование с шагом 2 нм, чтобы убедиться, что все детали рельефа отражены на полученном изображении топографии с шагом 5 нм и уменьшение шага сканирования уже не приводит к улучшению детальности изображения рельефа. Следует отметить, что при сканировании с малым шагом возрастает влияние дрейфа на получаемый результат.

# **10. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ**

## **10.1. Обработка полученных изображений топографии.**

После завершения анализа производится предварительная и последующая обработка полученных результатов. Результаты представляются в виде изображений топографии образца. Все данные сохраняются, что позволяет позже проводить обработку экспериментальных данных различными методами. Величины, характеризующие шероховатость поверхности образца вычисляются по стандартным формулам базирующимся на рекомендациях ГОСТ 2789-73 п. 6 (стандарт соответствует СТ СЭВ 638-77 и международной рекомендации по стандартизации ISO 468:1982). Данный блок обработки результатов входит в математический пакет программ NOVA, прилагаемый к

сканирующему микроскопу. Как правило, перед началом обработки из полученных значений топографии вычитается среднее значение высоты.

В результате автоматической обработки можно получить следующие значения, характеризующие шероховатость поверхности:

1. Max. Наибольшая высота рельефа.
2. Min. Наименьшая высота рельефа.
3. Peak-to-peak (Sy). Разность значений Max и Min :  $S_y = \text{Max} - \text{Min}$ . Соответствует Rmax в ГОСТ 2789-73, п.6.
4. Ten point height (Sz). Высота неровности рельефа по 10 точкам, т.е. Сумма средних арифметических абсолютных отклонений точек пяти наибольших минимумов и пяти наибольших максимумов рельефа в пределах измеренного окна топографии:  $S_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 H_i \text{ max} + \sum_{i=1}^5 H_i \text{ min} \right)$ . Соответствует Rz в ГОСТ 2789-73, п.6.
5. Average Roughness (Sa). Среднеарифметическое отклонение рельефа:  $S_a = \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N H_i \right)$ . Соответствует Ra в ГОСТ 2789-73, п.6.
6. Root Mean Square (Sq). Среднеквадратичное отклонение:  $S_q = \sqrt{\frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N H_i^2 \right)}$
7. Surface skewness (Ssk). Асимметрия рельефа:  $S_{sk} = \frac{1}{NS_q^3} \left( \sum_{i=1}^N H_i^3 \right)$
8. Coefficient of kurtosis (Ska). Коэффициент эксцесса, т.е. мера остроты пика в распределении высот измеряемого рельефа:  $S_{ka} = \frac{1}{NS_q^4} \left( \sum_{i=1}^N H_i^4 \right)$

Обрабатывать можно как всю картинку топографии поверхности, так и выбранную её часть. Следует отметить одно отличие: в документе ГОСТ 2789-73 обрабатывается профиль, а в программе NOVA двумерное изображение рельефа.

Существует также возможность дополнительной обработки изображения рельефа с целью получения следующих значений, также характеризующих шероховатость поверхности (см ГОСТ 2789-73, п. 6):

1. Sm - Среднее значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины
2. S - Среднее значение шага местных выступов профиля в пределах базовой длины
3.  $\eta_p$  - Сумма длин отрезков в пределах базовой длины, отсекаемых на заданном уровне в материале профиля линией, эквидистантной средней линии. Числовые значения уровня сечения профиля p выбирают из ряда 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90% от Rmax (ГОСТ 2789-73, п.9).
4.  $t_p = \eta_p / l$ , относительная опорная длина профиля (l – базовая длина). Относительная опорная длина профиля  $t_p$ : (10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90) % (ГОСТ 2789-73, п.8.4).

## 10.2. Статистическая обработка результатов эксперимента.

В целях более точного определения шероховатости поверхности выбранной области можно производить несколько измерений её рельефа. Рекомендуется проводить 3-5 измерений в пределах выбранного места сканирования.

Для измерений, проведенных в пределах одного места сканирования можно найти среднее значение выбранного параметра шероховатости

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{i=1,n} x_i}{n},$$

где  $x_i$  –  $i$ -тое измеренное значение параметра шероховатости,  $n$  – количество измерений, а также стандартное отклонение сходимости:

$$S = \frac{\sqrt{\sum_{i=1,nm} (\bar{x} - x_i)^2}}{n_m}.$$

## 11. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты вносятся в таблицу и составляется Протокол измерений (см. Приложение). Приводится изображение топографии поверхности образца, кроме того в таблицу протокола вносятся требуемые характеристики шероховатости поверхности, определенные в результате обработки сканированного рельефа исследованных образцов. Если необходимо, то также указывается величина шероховатости согласно таблицам из ГОСТ 2789-73, пп. 8.1-8.4.

## 12. КОНТРОЛЬ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Контроль точности результатов измерений проводится с целью обеспечения требуемой точности результатов в процессе текущих измерений. Контроль точности результатов измерений предусматривает контроль повторяемости и воспроизводимости результатов измерений. В данной методике (методе) измерений контролируется повторяемость. В условиях повторяемости и воспроизводимости разница между результатами повторных измерений допускается не более 1% или не более значений величин, приведенных в Таблице 1.

При превышении норматива контроля повторяемости эксперимент вновь повторяют. При повторном превышении указанного предела, измерения приостанавливают, выясняют причины, приводящие к неудовлетворительным результатам контроля, и устраняют их. При установленном критерии повторяемости результатов абсолютная ошибка измерений будет определяться качеством изготовления калибровочных решеток.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Протокол измерений

1. Изображение топографии образца

2. Таблица измеренных значений шероховатости поверхности

Измеряемая величина	Измеренное значение	Значение по ГОСТ 2789-73
Max		
Min		
Peak-to-peak, $S_y$ (соотв. $R_{max}$ , ГОСТ 2789-73)		
Ten point height, $S_z$ (соотв. $R_z$ , ГОСТ 2789-73)		
Average		
Average Roughness, $S_a$ (соотв. $R_a$ , ГОСТ 2789-73)		
Root Mean Square, $S_q$		
Surface skewness, $S_{sk}$		
Coefficient of kurtosis, $S_{ka}$		

3. Имя файла:

Измерения выполнил

Результаты проверил