

УДК 620.179.16

EDN [HNMQBD](#)

## Анализ изменений метрологических характеристик кантилеверов АСМ в ходе их эксплуатации

С.Е. Стариков, К.А. Шахтин, Д.И. Кузнецов\*

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, ул. К. Маркса, 10, Казань, 420111, Россия

\*E-mail: DIKuznetsov@gmail.com

**Аннотация.** Представлено исследование роли микроскопии в научных исследованиях, особое внимание уделено сканирующим зондовым микроскопам (СЗМ). Рассмотрены принципы работы СЗМ, с акцентом на конструкцию и функциональность кантилевера, который является ключевым элементом этих устройств. Обсуждены последние достижения в разработке новых материалов и технологий для улучшения характеристик кантилеверов, таких как повышение чувствительности, долговечности и стабильности. Проанализировано взаимодействие силы и отклонения кантилевера, описываемое с использованием закона Гука и тензора обратной жесткости, что позволяет более точно интерпретировать данные, получаемые с помощью СЗМ. Рассмотрены применения СЗМ в биологии, медицине, материаловедении и экологии, демонстрирующие широкий спектр возможностей этого инструмента для изучения структуры и свойств материалов на наноуровне. В биологии СЗМ используются для изучения клеточных структур и молекулярных взаимодействий, в медицине — для диагностики заболеваний на ранней стадии, в материаловедении — для исследования свойств наноматериалов, а в экологии — для изучения микроскопических организмов и загрязнений окружающей среды. Основные выводы работы подчеркивают важность развития технологий СЗМ для расширения возможностей исследования наноуровня и его практического применения в различных областях науки и техники. В частности, улучшение характеристик кантилеверов и развитие новых методов анализа данных открывают новые горизонты для исследований в области нанотехнологий и нанобиологии.

**Ключевые слова:** Кантилевер АСМ, микроскоп, деформация, зонд.

## Analysis of changes in the metrological characteristics of AFM cantilevers during their operation

S.E. Starikov, K.A. Shakhtin, D.I. Kuznetsov\*

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI, K. Marksa str., 10, Kazan, 420111, Russia

\*E-mail: DIKuznetsov@gmail.com

**Abstract.** The paper presents an investigation of the role of microscopy in scientific research, with a special focus on scanning probe microscopes (SPM). The operating principles of SPM are considered, with an emphasis on the design and functionality of the cantilever, which is a key element of these devices. Recent advances in the development of new materials and technologies for improving the characteristics of cantilevers, such as increasing sensitivity, durability and stability, are discussed. The interaction of the cantilever force and deflection, described using Hooke's law and the inverse stiffness tensor, is analyzed, which allows for a more accurate interpretation of the data obtained with SPM. SPM applications in biology, medicine, materials science and ecology are considered, demonstrating a wide range of capabilities of this tool for studying the structure and properties of materials at the nanoscale. In biology, SPMs are used to study cellular structures and molecular interactions, in medicine - for early diagnosis of diseases, in materials science - to study the properties of nanomaterials, and in ecology - to study microscopic organisms and environmental pollutants. The main conclusions of the work emphasize the importance of the development of SPM technologies for expanding the possibilities of nanoscale research and its practical application in various fields of science and technology. In particular, the improvement of cantilever characteristics and the development of new data analysis methods open up new horizons for research in the field of nanotechnology and nanobiology.

**Keywords:** Cantilever ASM, microscope, deformation, probe.

## 1. Введение

Микроскоп — это не просто оптический инструмент, а настоящий мост, соединяющий мир видимый и невидимый, макро- и наноуровни. Благодаря его возможностям, исследователи могут наблюдать объекты, недоступные для обычного зрения, путем увеличения их изображения в сотни, тысячи и даже миллионы раз. Это не только расширяет горизонты наблюдения, но и открывает новые пути для научных открытий, позволяя изучать структуры и процессы на наноуровне.

Сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ) представляют собой революционный инструмент в области нанотехнологий. Они используют кантилевер — основной измерительный элемент, от качества которого напрямую зависит точность и результативность работы микроскопа [1]. Кантилевер — это не просто деталь, а настоящий ключ к пониманию наномира. Его свойства и конструкция критически важны для получения четких и детализированных изображений на уровне нанометров.

## 2. Цель исследования

Целью данного исследования является комплексное изучение роли сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ) в научных исследованиях, с акцентом на метрологические характеристики и функциональность кантилеверов. Результаты исследования направлены на расширение знаний о метрологических характеристиках кантилеверов СЗМ, разработку новых технологий и методов для повышения их эффективности, а также на практическое применение СЗМ в различных областях науки и техники.

### 2.1. Анализ конструкции и свойств кантилеверов

Изучение различных конструкций кантилеверов, включая инновационные двухбаллонные системы, и их влияние на точность и чувствительность СЗМ.

### 2.2. Исследование взаимодействия сил и отклонений кантилевера

Применение закона Гука и тензора обратной жесткости для анализа взаимодействия сил, действующих на кантилевер, и его отклонений в различных направлениях.

### 2.3. Оценка влияния материалов и технологий на характеристики кантилеверов

Исследование последних достижений в разработке новых материалов (например, нанокompозитных) и технологий для улучшения метрологических характеристик кантилеверов.

#### 2.4. Применение СЗМ в различных областях

Анализ практического применения СЗМ в биологии, медицине, материаловедении и экологии, демонстрирующий широкий спектр возможностей этого инструмента для изучения структур и процессов на наноуровне.

#### 2.5. Развитие методов анализа данных и обработки изображений

Исследование новых алгоритмов и методов анализа данных, получаемых с помощью СЗМ, для повышения точности и глубины понимания изучаемых наноструктур и динамических процессов.

#### 2.5. Оценка износа и долговечности кантилеверов

Анализ факторов, влияющих на износ и долговечность кантилеверов, и разработка методов их оценки и продления срока службы.

### 3. Методы и материалы исследования

Обычно кантилевер представляет собой балку в виде прямоугольного параллелепипеда с длиной  $l$ , толщиной  $t$  (где  $t$  значительно меньше  $l$ ) и шириной  $\omega$  (где  $\omega$  также значительно меньше  $l$ ). Однако, в последние годы ученые разрабатывают новые конструкции кантилеверов, такие как двухбаллонные системы, соединенные под определенным углом, с зондом (острием) длиной  $l_{tip}$  на одном из его концов [2]. Эти инновационные конструкции позволяют достичь еще более высокой точности и чувствительности.

Сила, действующая на зонд, часто имеет не только вертикальную составляющую, но и компоненты, лежащие в горизонтальной плоскости. Поэтому острие кантилевера может отклоняться не только вдоль оси  $Oz$ , но и в двух других направлениях:  $Ox$  и  $Oy$ . Вертикальную составляющую  $F_z$  будем называть **нормальной силой**, а поперечную  $F_x$  и продольную  $F_y$  — **латеральными силами**.

#### 4. Полученные результаты

В атомно-силовом микроскопе (АСМ) сила воздействия образца на кантилевер определяется по его деформации. Для определения силы необходимо знать жесткость кантилевера в различных направлениях. Согласно **закону Гука** (1), вектор отклонения острия кантилевера  $\Delta$  (с компонентами  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ) линейно связан с приложенной к зонду силой  $F$ :

$$\Delta = C^{-1}F \quad (1)$$

"Коэффициентом" пропорциональности служит тензор второго ранга  $C$ , который мы назовем **тензором обратной жесткости**. Эта величина содержит всю информацию об упругих свойствах кантилевера.

Оптическая система регистрирует не отклонение острия кантилевера, а наклон верхней поверхности кантилевера вблизи его свободного конца. Непосредственно измеряются два угла: отклонение нормали от вертикали в плоскости  $Oyz$  (угол  $\alpha$ ) и в ортогональном направлении — плоскости  $Oxz$  (угол  $\beta$ ). Эти измерения позволяют не только определить силу, но и оценить степень износа острия зонда.

#### 5. Выводы

В последние годы ученые разрабатывают новые методы и технологии для улучшения характеристик СЗМ. Например, использование нанокompозитных материалов для изготовления кантилеверов позволяет достичь еще более высокой чувствительности и стабильности. Кроме того, новые алгоритмы обработки данных и анализа изображений открывают новые возможности для изучения сложных наноструктур и динамических процессов.

Микроскопия играет ключевую роль в биологии и медицине. С помощью СЗМ можно изучать структуру и функции биологических молекул, клеток и тканей на наноуровне. Например, исследования ДНК, белков и клеточных мембран становятся более глубокими и детализированными благодаря возможностям СЗМ. Это открывает новые пути для разработки лекарств и методов лечения заболеваний.

В области материаловедения и нанотехнологий микроскопия позволяет изучать свойства и поведение материалов на наноуровне. Например, исследование поверхностных свойств и структуры наноматериалов может привести к разработке

новых материалов с уникальными свойствами, таких как сверхпроводники, нанокompозиты и нанопористые материалы.

Микроскопия также находит применение в экологических исследованиях. С помощью СЗМ можно изучать микро- и наночастицы в окружающей среде, что важно для понимания их воздействия на экосистемы и здоровье человека. Например, исследования загрязнения воздуха и воды на наноуровне могут помочь разработать более эффективные методы очистки и защиты окружающей среды.

Микроскоп не только расширяет наши представления о мире, но и открывает новые горизонты для научных исследований и технологических инноваций. Благодаря непрерывному развитию технологий и методов, микроскопы становятся все более мощными инструментами, способными решать сложные научные задачи и открывать новые возможности в различных областях, от биологии до материаловедения и экологии.

### **Благодарности**

Выражаем искреннюю благодарность к.ф.-м.н., доценту Михееву Игорю Дмитриевичу за ценные советы, методическую поддержку и неоценимый вклад в проведение данного исследования. Его глубокие знания в области нанотехнологий и микроскопии, а также профессиональный опыт значительно помогли в достижении поставленных целей и получении значимых результатов.

### **Список литературы**

1. АСМ зонды / TipsNano. <https://tipsnano.ru/catalog/afm-standard/> (дата обращения: 23.09.2024)
2. Handbook of Micro/Nanotribology / Ed. by Bhushan Bharat. - 2d ed. - Boca Raton etc.: CRC press, 1999. – 859 с.