



«Новые методы определения твёрдости материалов»

Лекция 40

Lec_40_metod_opr_tverd_3MC_LNA_18_03_2016

Приборы для измерения нанотвёрдости и других физико-механических свойств поверхности твердых тел на микро- и нанометровом масштабе

**Профессор Мощенок В.И.
Доцент Лалазарова Н.А.**

Содержание



40.1. Техника инструментального индентирования



40.2. Конструктивные решения, применяемые для реализации метода инструментального индентирования.



40.3. Нанотвердомеры



Список литературы



Контрольные вопросы



Задания для самостоятельной работы

40.1. Техника инструментального наноиндентирования

В последние годы разработано много методов обработки первичных данных индентирования и их очистки от паразитных эффектов. Это позволяет извлекать из первичных данных более двух десятков разнообразных характеристик материала и делает **НИ гораздо более информативным средством испытания, чем традиционное одноосное растяжение/сжатие.**

Кроме того, эти методы дают возможность исследовать физико-механические свойства в наномасштабе и даже на атомарном уровне, что недоступно обычным технологиям механических испытаний.

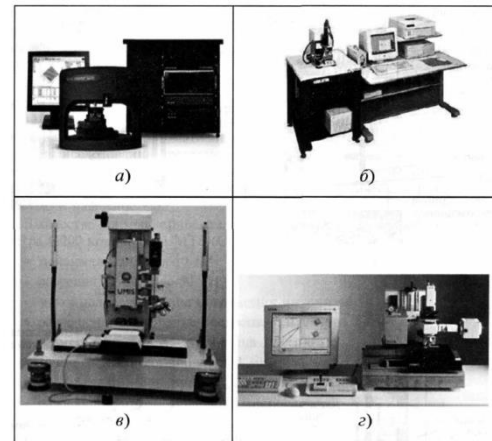


Рис. 1.12. Современные зарубежные приборы для силового нанотестинга поверхности твердых тел:
а – NanoIndenter G200 (MTS, США); б – ENT-1100 (Elionix Inc., Япония); в – UMIS-2000 (CRISO Inc., Австралия); г – H100C (Fischerscope Inc., Германия)

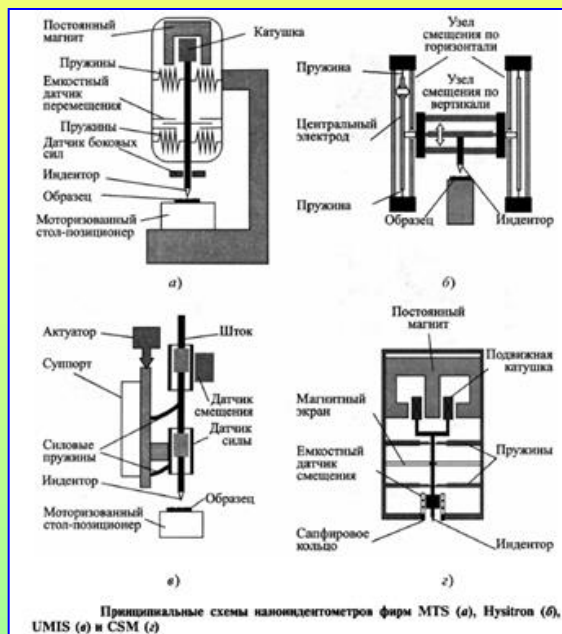
Несмотря на то что идея метода непрерывной регистрации силы и глубины внедрения была предложена и развивалась сначала только в СССР,

первые полноценные приборы, реализующие его, были построены в Оксфорде (Великобритания) и Оукридже (США).

Основы техники наноиндентирования

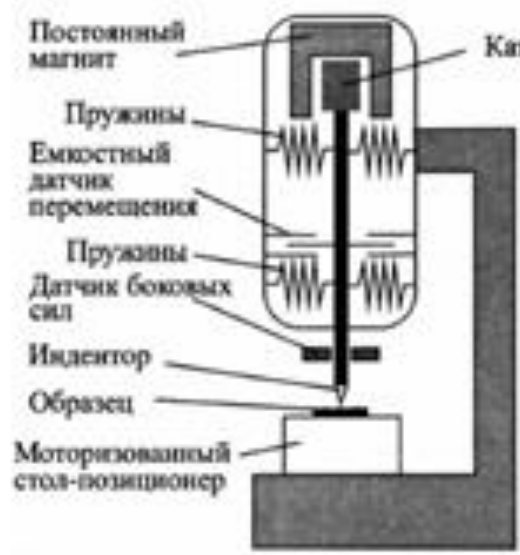
С начала 90-х годов прошлого века в США, Японии, Великобритании, Германии, Швейцарии, Австралии наноиндентометры серийно выпускаются ведущими фирмами, специализирующимися в области создания прецизионной измерительной техники.

На рис. приведены схемы измерительных головок нанотестеров фирм MTS (США), Hysitron (США), UMIS (Австралия) и CSM (Швейцария).



Система силового привода для штока с индентором обычно бывает либо электромагнитной, либо электростатической (в инструментах от Hysitron).

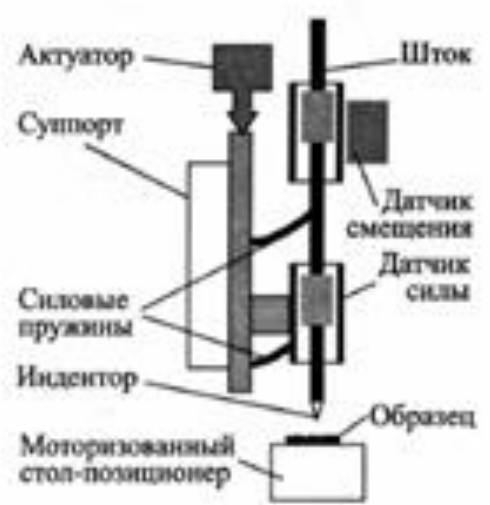
Первый способ обеспечивает нагрузку на индентор от единиц микролютон до тысяч миллиньютон с дискретностью до десятков наноньютон, а второй - от долей микроньютон до десятков миллиньютон с дискретностью от долей или единиц наноньютон.



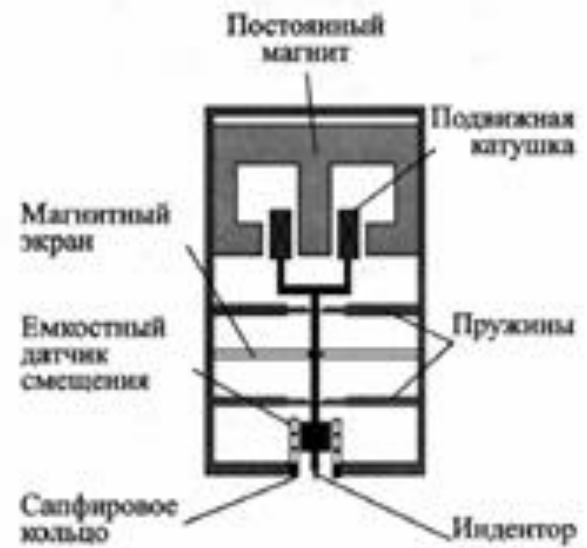
a)



б)



в)



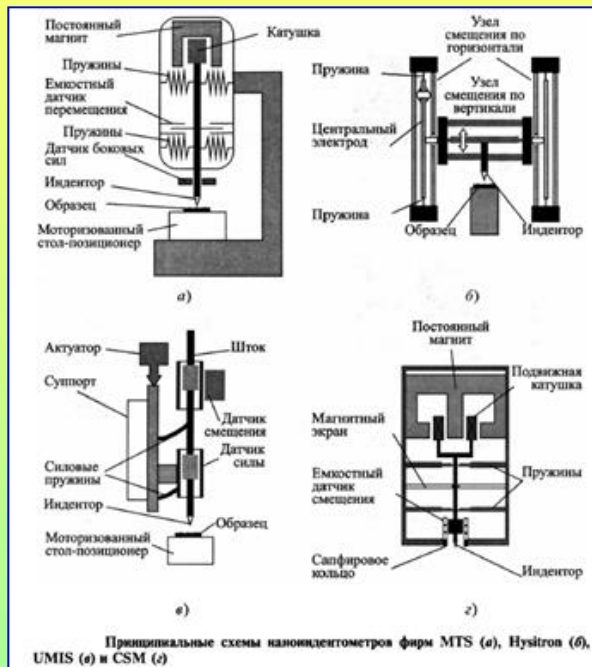
г)

Принципиальные схемы наноиндентометров фирм MTS (a), Hysitron (б), UMIS (в) и CSM (г)

Основы техники наноиндентирования

О величине нагрузки судят по величине приложенного напряжения или тока, протекающего через катушку электромагнитного генератора силы, и только в нанотестере UMIS ее измеряют непосредственно.

Величину смещения штока определяют, как правило, с помощью дифференциального емкостного датчика, используя линейную зависимость емкости плоского конденсатора от расстояния между его обкладками.



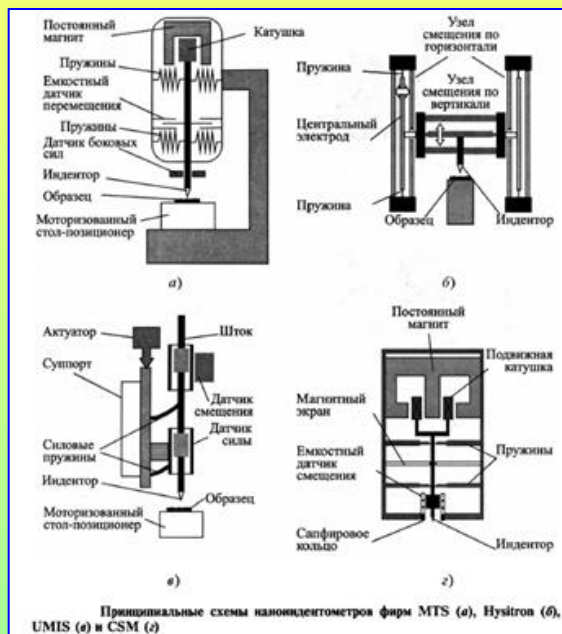
Разрешающая способность таких систем достигает $10^{-12} \dots 10^{-13}$ м, хотя на практике ограничивается величиной порядка 0,1 нм вследствие действия помех в виде электронных шумов и низкочастотных механических вибраций.

Позиционирование образца в трех плоскостях осуществляется либо приводом на шаговых двигателях, либо пьезосканером с точностью порядка 1 мкм. Наконец, весь цикл измерения и обработки информации в таких устройствах полностью автоматизирован и выполняется с помощью компьютера.

Основы техники наноиндентирования

Для исследования достаточно установить образец, выбрать на его поверхности область тестирования и ввести в протокол испытания параметры нагружения. Все остальные приборы делают автоматически с высокими точностью и надежностью.

В большинстве современных нанотестеров индентор сближается с образцом и осуществляет поиск поверхности в автоматическом режиме.



В качестве критериев касания индентором поверхности образца обычно используют снижение уровня шума или специально возбуждаемых малоамплитудных

колебаний (1 ... 2 нм) в канале регистрации перемещения в заданное число раз или рост жесткости в приводе индентора из-за добавления к жесткости пружин подвески жесткости контакта индентора с образцом (тоже в заданное число раз).

Основы техники наноиндентирования

После достижения установленных в программе критериев касания происходит активация цикла нагружения. Схематически последовательность операций и перемещений индентора изображена на рис. 1, а подаваемых на силовую ячейку сигналов - на рис. 2.

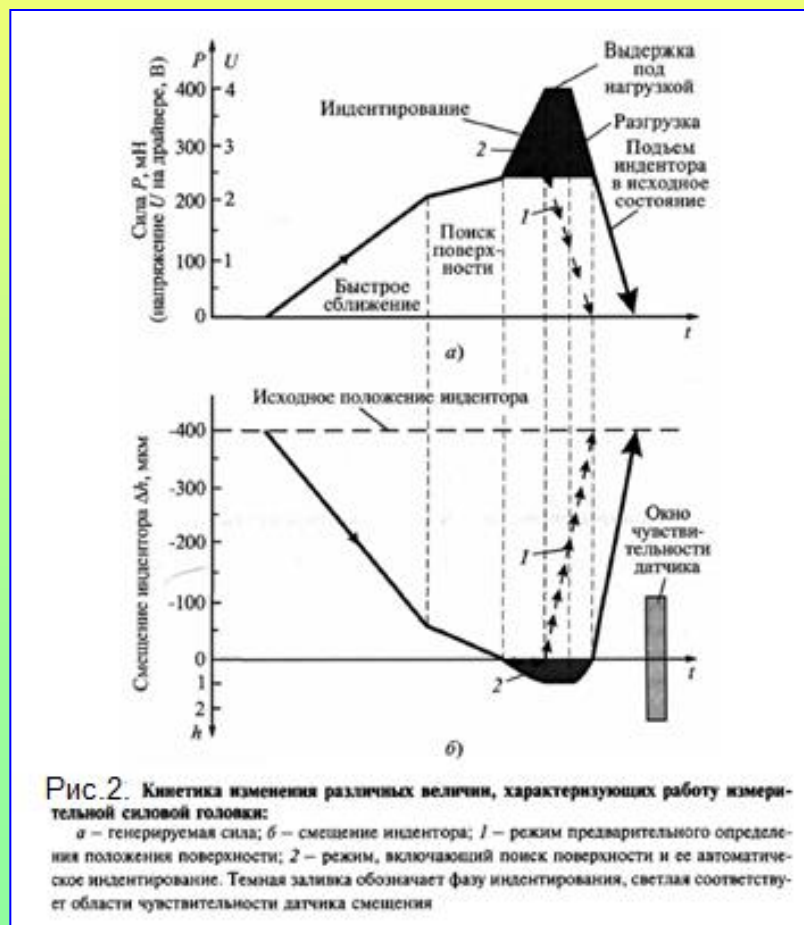




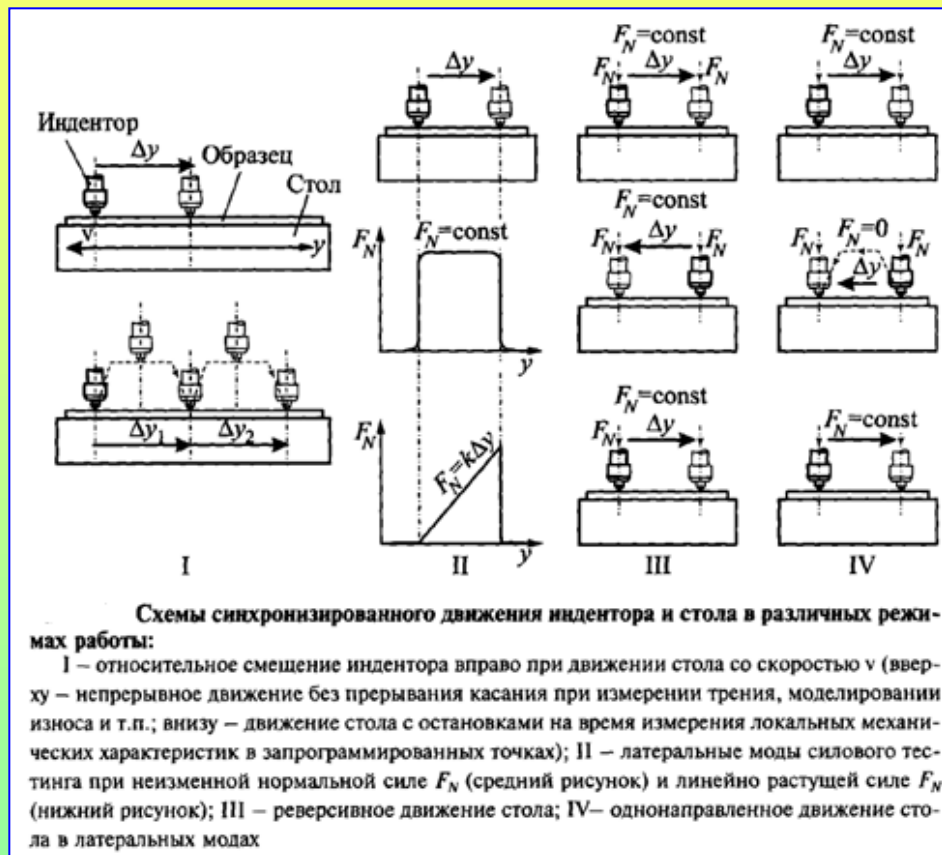
Рис.2. Кинетика изменения различных величин, характеризующих работу измерительной силовой головки:

a – генерируемая сила; b – смещение индентора; 1 – режим предварительного определения положения поверхности; 2 – режим, включающий поиск поверхности и ее автоматическое индентирование. Темная заливка обозначает фазу индентирования, светлая соответствует области чувствительности датчика смещения

Основы техники наноиндентирования

При наличии компьютеризированного столика возможна организация различных перемещений образца в процессе функционирования измерительной головки.

Это позволяет организовать различные типы испытания, включающие микропрофилометрию поверхности;

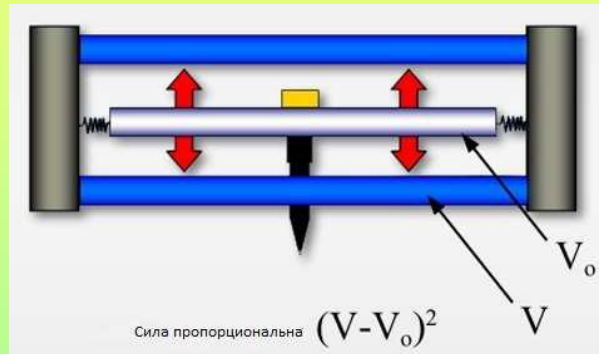


составление карт твердости, модуля Юнга и др.; царапанье; многоцикловую усталость; износ; фреттинг и т.п.

40.1. Конструктивные решения, применяемые для реализации метода инструментального индентирования.

Для реализации метода инструментального индентирования используются нанотвердомеры, важным элементом которых является датчик деформации.

Датчиком называют средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме,



Общий вид емкостного датчика фирмы Hysitron.

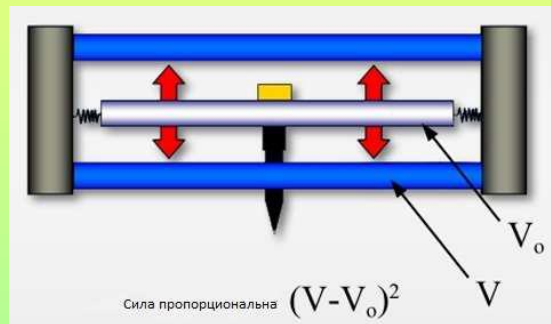
удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

Типы датчиков, реализующих метод измерительного индентирования:
емкостные, электромагнитные актюаторы с емкостными преобразователями перемещения, пьезоактюаторы с емкостными датчиками силы/перемещения, кантеливеры и др.

Емкостные датчики.

Датчик емкостного типа используется в приборах фирмы **Hysitron**, предназначенных для измерения наномеханических свойств. Он состоит из трех параллельно расположенных проводящих пластин. Верхняя и нижняя пластины жестко закреплены, а средняя пластина, на которой закреплен штифт с индентором, соединяется пружинами с боковыми стенками датчика и перемещается свободно по оси z.

В данном типе датчика прикладываемая нагрузка пропорциональна электростатической силе,



Общий вид емкостного датчика фирмы Hysitron.

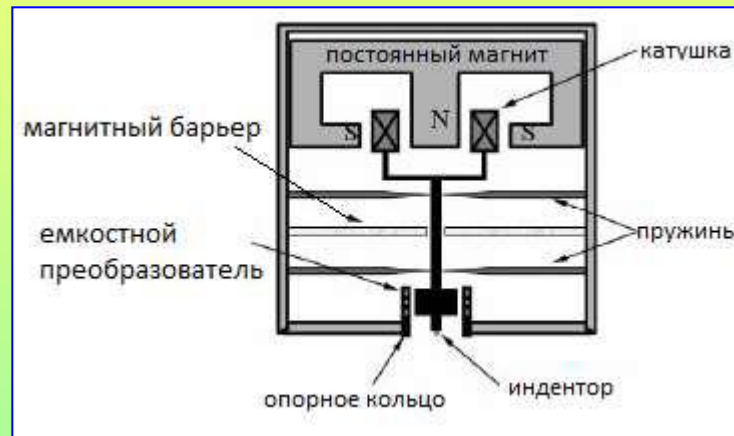
а перемещение измеряется пропорционально изменению его емкости.

Емкостные датчики просты в изготовлении, имеют малые габариты и вес, для перемещения подвижной части емкостного датчика необходимы малые усилия.

Электромагнитные актюаторы с емкостными преобразователями перемещения

Электромагнитный актюатор – это устройство, передающее воздействие с управляющего устройства на объект управления под воздействием электромагнитного поля.

Существует два вида устройства – соленоиды и линейные электромагнитные двигатели,



которые похожи по принципу действия, но отличаются конструкцией.

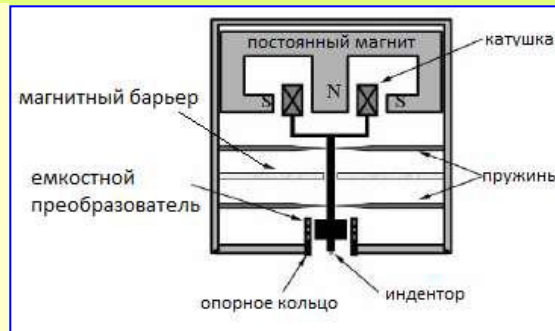
Общий вид датчика фирмы CSM-technologies.

Устройство обеспечивает движение свободно движущегося сердечника или обмотки под действием магнитного поля, созданного за счет протекания тока по проволоочной катушке.

Электромагнитные актюаторы с емкостными преобразователями перемещения

Датчики на основе электромагнитных актюаторов используются в наноинденторах фирмы **CSM-instruments**. Датчик состоит из системы с постоянным магнитом, закрепленным в верхней части блока, катушек, присоединенных к валу с индентором, двух рядов пружин, емкостного преобразователя и опорного кольца.

Опорное кольцо служит детектором поверхности, при контакте кольца с поверхностью образца начинается процесс индентирования.



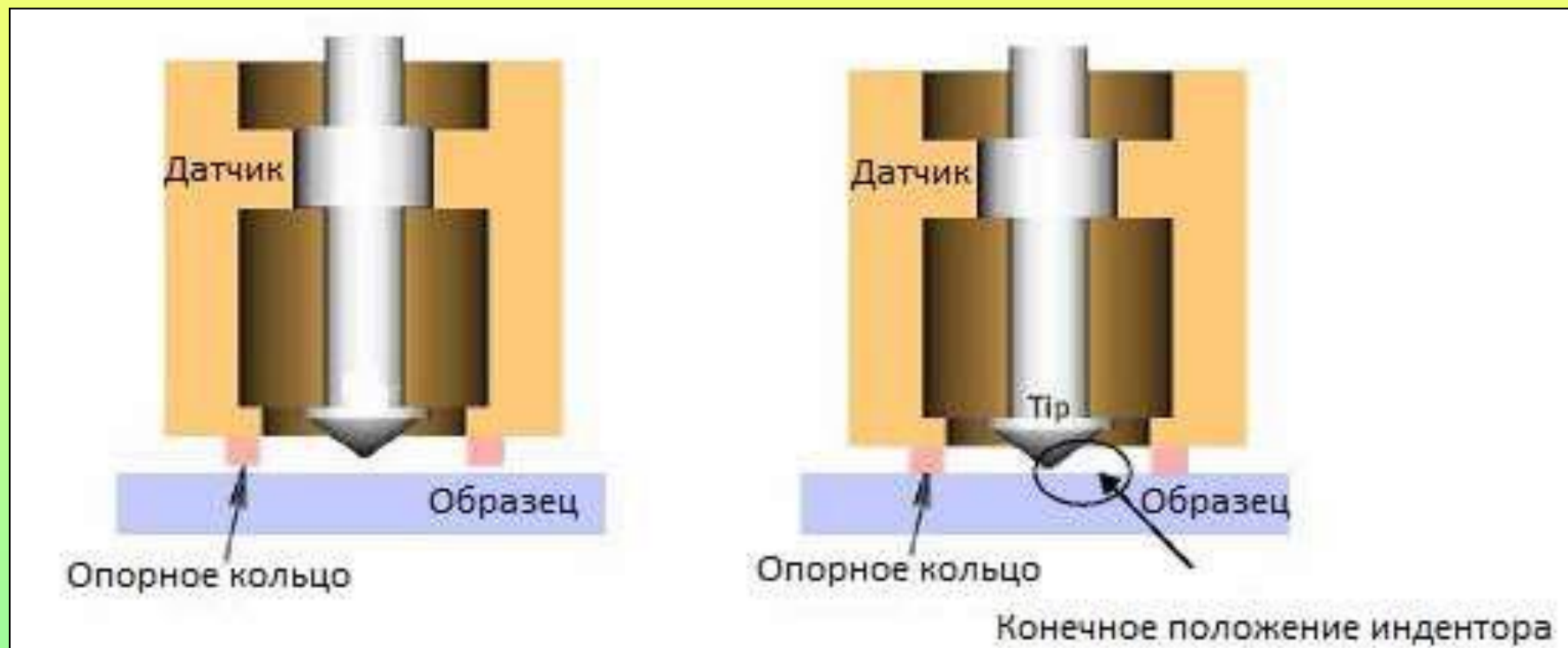
Общий вид датчика фирмы CSM-technologies.

Нагрузка сообщается приводом смещения, состоящим из электромагнитных катушек и постоянного магнита.

Катушки жестко соединены с валом, на котором закреплен индентор. Два ряда пружин не допускают отклонение вала индентора от вертикального состояния, магнитный барьер изолирует образец и индентор от влияния электромагнитного поля. Перемещение вала контролируется датчиком перемещения. Емкостной датчик, расположенный на валу, определяет вертикальное перемещение индентора в процессе индентирования.

Электромагнитные актюаторы с емкостными преобразователями перемещения

Данная конструкция обеспечивает быстрый подвод датчика к образцу, так как опорное кольцо защищает индентор от повреждения.

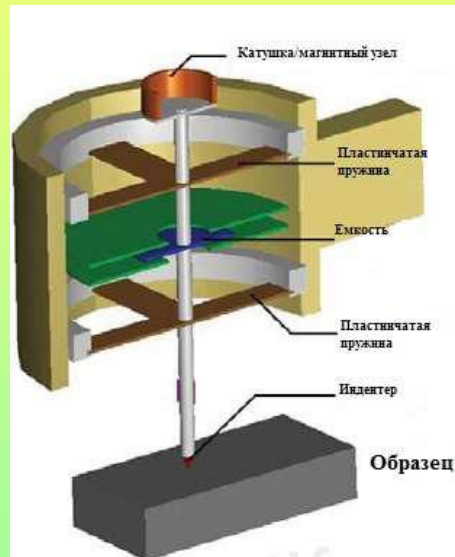


Процесс индентирования с использованием прибора фирмы CSM-instruments

Электромагнитные актюаторы с емкостными преобразователями перемещения

В компании **Agilent Technology** используют другую конструкцию: индентор приводится в действие с помощью электромагнитного актюатора, состоящего из трех пластин, который обеспечивает большой динамический диапазон как по силе, так и по смещению.

Такая конструкция позволяет исключить боковое смещение. Использование данного актюатора обеспечивает высокую точность позиционирования образца в плоскости,



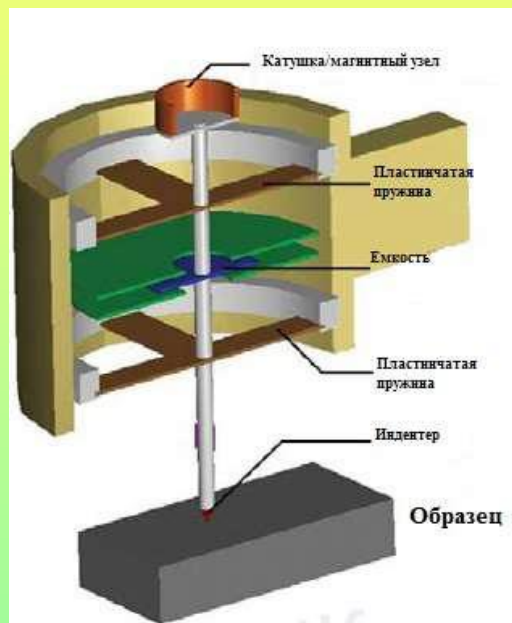
легкость определения координат образца и его рабочей поверхности, удобство регулировки образца по высоте.

Стандартная конфигурация системы обеспечена индентирующей головкой, которая предоставляет разрешающую способность по смещению не более 0,01 нм и максимальную глубину индентирования не менее 500 мкм.

Электромагнитные актюаторы с емкостными преобразователями перемещения

Эффективная масса составляет 150 мг и позволяет минимизировать инерцию, таким образом повышая скорость измерений, системная резонансная частота составляет 110 Гц, что позволяет добиться малой шумности

Стандартная конфигурация системы обеспечена индентирующей головкой, которая предоставляет разрешающую способность по



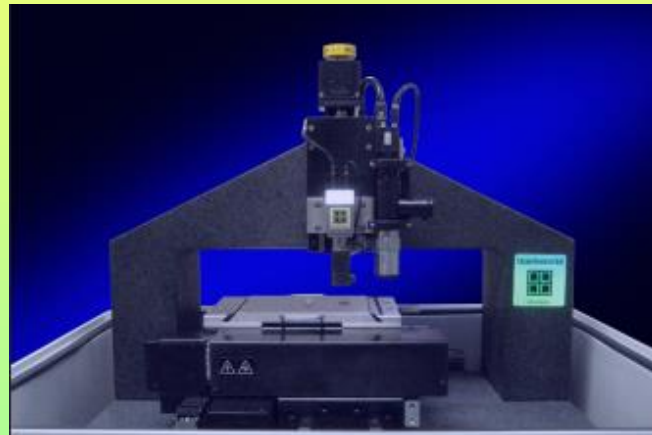
смещению не более 0,01 нм и максимальную глубину индентирования не менее 500 мкм.

Эффективная масса составляет 150 мг и позволяет минимизировать инерцию, таким образом повышая скорость измерений, системная резонансная частота составляет 110 Гц, что позволяет добиться малой шумности.

40.3. Нанотвердомеры

Приборы для измерения механических свойств называются **наноинденторами** или **нанотвердомерами**. В мире существует довольно большое количество компаний, занимающихся разработкой таких приборов. На сегодняшний день лидером в производстве такого оборудования являются Соединенные Штаты Америки.

Наиболее распространенными по числу упоминаний в научных статьях и по количеству оснащенных лабораторий в мире, являются наноинденторы компаний TI 900 TriboIndenter Hysitron (США),



TI 900 TriboIndenter
Nanomechanical test instrument

Nanoindenter G200
Agilent Technologies
(бывшая MTS
Systems) (США),
NanoHardness Tester
CSM-Instruments
(Швейцария) ,

Micro Photonics (США), Micro Materials Ltd. (Великобритания), Fisherscope HM2000 и Picoindenter HM500 компания Fischer Messtechnik и динамические микротвердомеры DUH-211/211S компании SHIMADZU.



Внешний вид приборов Agilent Technologies, Hysitron и CSM-Instruments.

Нанотвердомеры

Большинство из перечисленных приборов проводит измерения твердости исключительно методом наноиндентирования. Нанотвердомеры [CSM Instruments](#) (Швейцария) предназначены для инструментального индентирования (измерение глубины внедрения индентора) для определения твердости и модуля упругости поверхности.

Можно проводить тестирование поверхностного покрытия автомобильных транспортных средств, полупроводниковых пластин,



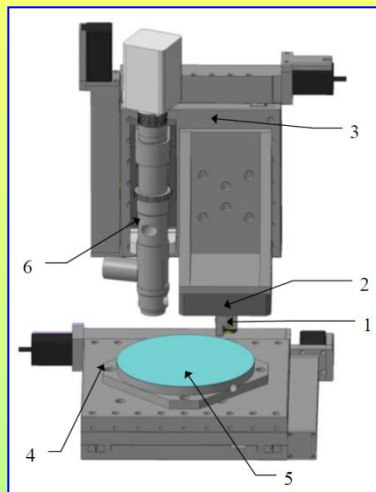
контактных площадок и проводников интегральных схем, поверхностей разделителей аккумуляторных батарей, а также компонентов, применяемых в аэрокосмической промышленности.

- Вертикальная нагрузка: от 0.1 до 500 мН
- Разрешение по нагрузке: 40 нН
- Скорость нагружения: до 10000 мН/мин
- Максимальная глубина индентирования: 20 мкм (200 мкм опционально).

Сканирующий нанотвердомер

Недостатком описанных выше конструкций является ограниченная область поверхности образца, доступной для исследования, что не позволяет исследовать образцы большого размера и массы.

Этих недостатков лишён
большепольный сканирующий нанотвердомер.



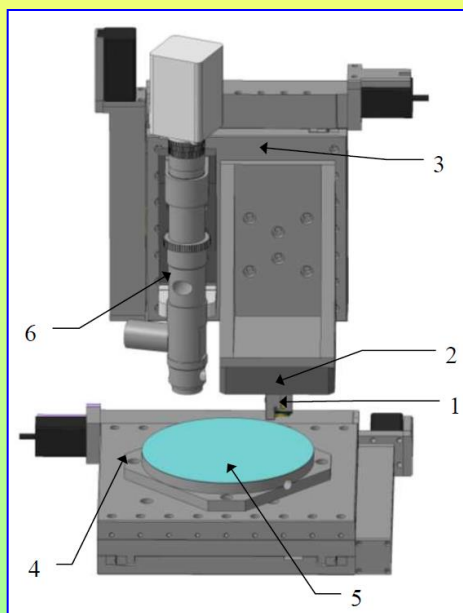
Нанотвердомер, содержащий зонд с наконечником, закрепленный в измерительной головке, и 3-х координатный пьезосканер, который установлен на устройстве для его перемещения,

содержит предметнокоординатный стол, выполненный с возможностью перемещения по двум взаимно перпендикулярным осям в горизонтальной плоскости, сканер установлен на устройстве для перемещения зонда, а зонд закреплен на сканере, при этом сканер установлен на устройстве для перемещения зонда с возможностью его перемещения по вертикали и по горизонтали по двум взаимно-перпендикулярным осям, при этом направление одной из осей перемещения устройства для перемещения зонда перпендикулярно плоскости предметно-координатного стола, а другой совпадает с одной из осей перемещения предметно-координатного стола.

Сканирующий нанотвердомер

Большепольный сканирующий нанотвердомер содержит зонд 1 с наконечником, сканер 2, устройство 3 для перемещения зонда, предметно-координатный стол 4 для установки на нем исследуемого образца 5 и оптический микроскоп 6. Зонд 1 с наконечником расположен над предметно-координатным столом 4.

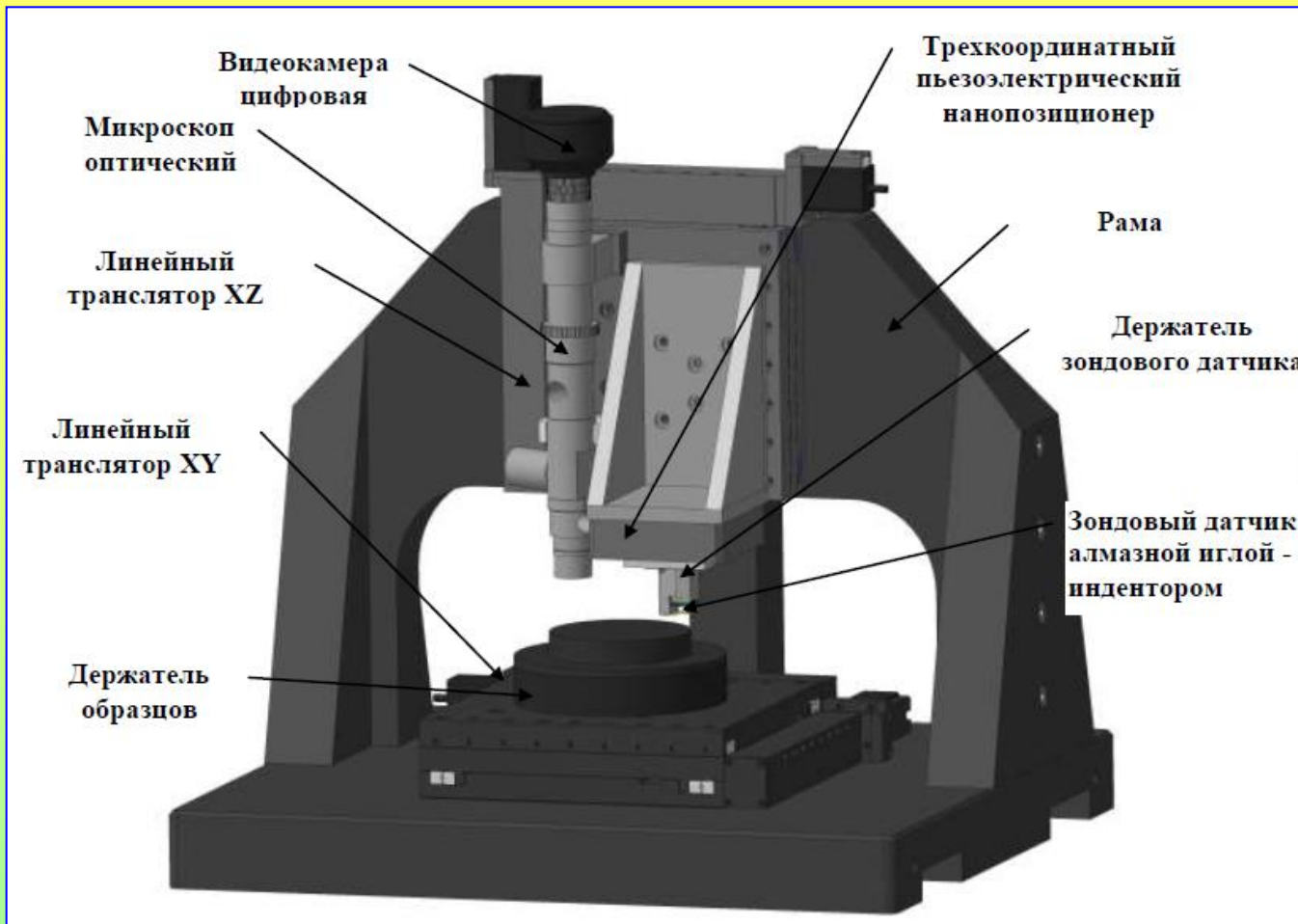
Предметно-координатный стол 4 выполнен с возможностью его перемещения по двум взаимно перпендикулярным осям X и Y в горизонтальной плоскости.



Представленная модель позволяет расширить функциональные возможности устройства за счет возможности исследования образцов большого размера,

Принцип конструкции

большой исследуемой площади и веса для исследования рельефа поверхности и измерения механических свойств на субмикронном и нанометровом масштабе без значительного увеличения размеров устройства.

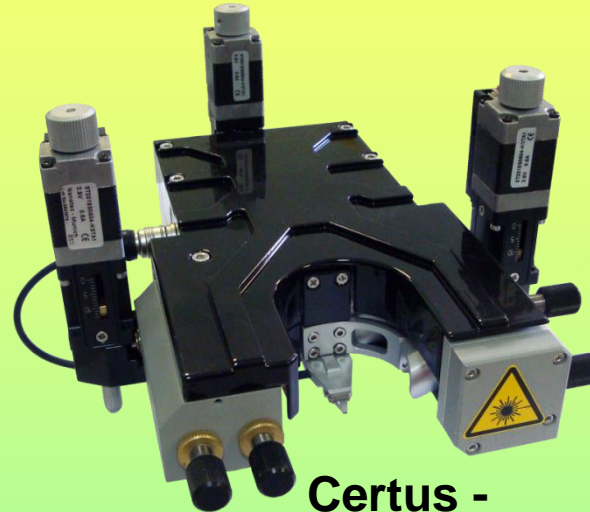


**Общий вид и схема расположения основных узлов
большепольного сканирующего нанотвердомера**

Нанотвердомеры

К нанотвердомерам могут предлагаться отдельно модули для сканирования поверхности. Большинство зарубежных приборов допускает установку на рабочую платформу сканирующих зондовых микроскопов, как правило,

это стандартные СЗМ сторонних производителей или свои собственные модели, адаптированные к работе в составе наноконкомплекса.



**Certus -
Сканирующий
зондовый микроскоп**

Такое решение приводит к существенному усложнению конструкции и удорожанию прибора.

Другой вариант – установка сканеров на предметно-координатный стол под измерительной головкой. При этом и сканирование осуществляется образцом, контакт наконечника с поверхностью поддерживается с помощью обратной связи, контролирующей сигнал датчика силы.

Нанотвердомеры и СЗМ

Как уже говорилось выше для измерения твёрдости часто используют приборы, которые совмещают сканирующие зондовые микроскопы (СЗМ) и нанотвердомеры. На этих приборах можно измерять твёрдость по восстановленному отпечатку и методом индентирования.

Широкое применение находят **СЗМ (АСМ)**, которые позволяют исследовать любые материалы, и в том числе те, которые не проводят электрический ток.

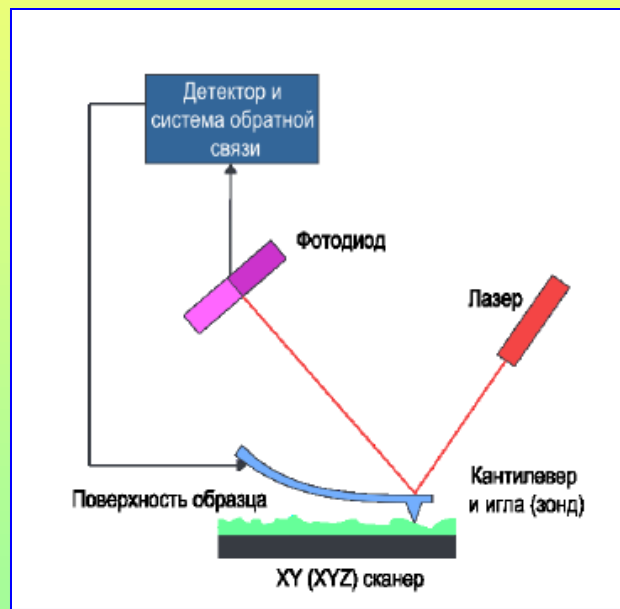


Схема работы АСМ

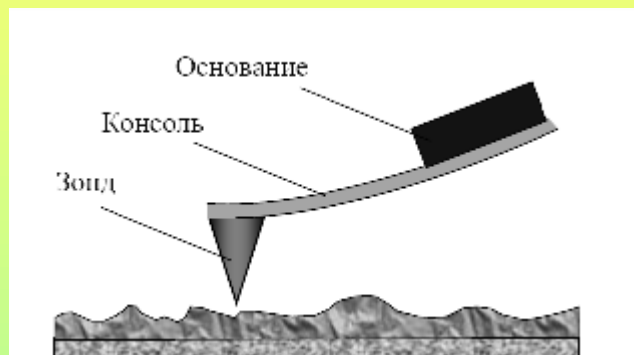
Основным элементом датчика является тонкая упругая балка — **кантилевер**, один конец которого был жёстко закреплён,

а на другом сформировано острие из твёрдого материала. Сила взаимодействия острия с поверхностью контролируется по изгибу кантилевера.

Нанотвердомеры и СЗМ

Датчики изготавливаются методами фотолитографии и травления из кремниевых пластин. Упругие консоли формируются, в основном, из тонких слоев легированного кремния или нитрида кремния.

На конце кантилевера формируется пирамидальный зонд.



Схематическое изображение зондового датчика АСМ

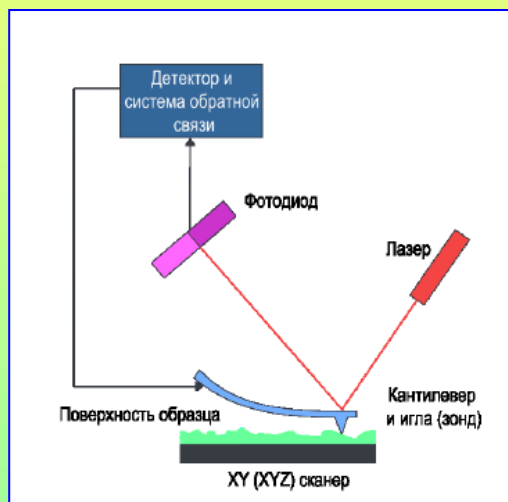
Радиус закругления современных АСМ зондов составляет 1-50 нм в зависимости от типа зондов и технологии их изготовления.

Принцип действия силового датчика основан на использовании сил атомных связей, действующих между атомами вещества. Совершенно аналогичные силы действуют и между любыми сближающимися телами.

Атомно-силовой микроскоп

В атомно-силовом микроскопе такими телами служат исследуемая поверхность и скользящее над ней остриё. При изменении силы, действующей между поверхностью и остриём, кантилевер, на котором оно закреплено, отклоняется от положения равновесия, и такое отклонение регистрируется датчиком положения кантилевера.

Таким образом, атомно-силовой сенсор представляет собой механический зонд, аналогичный обычному зонду механического профилометра.



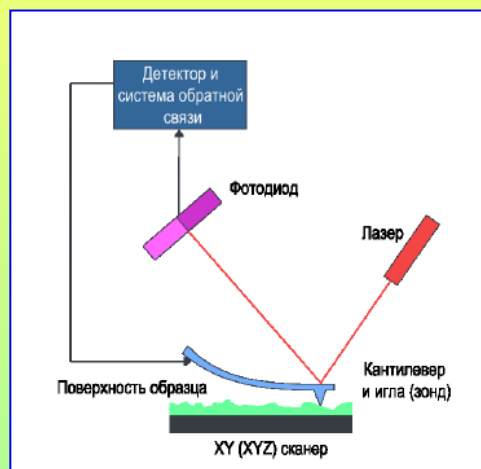
Однако его чувствительность настолько высока, что позволяет регистрировать силы взаимодействия между отдельными атомами.

Отличительной особенностью атомно-силового микроскопа по сравнению с профилометром является наличие системы обратной связи, позволяющей управлять силой взаимодействия между зондом и образцом.

Атомно-силовой микроскоп

Взаимодействие зонда с образцом имеет сложный характер — зонд АСМ испытывает притяжение со стороны образца на больших расстояниях и отталкивание на малых. При перемещении зонда вдоль поверхности образца происходит изменение параметра взаимодействия, обусловленное рельефом поверхности.

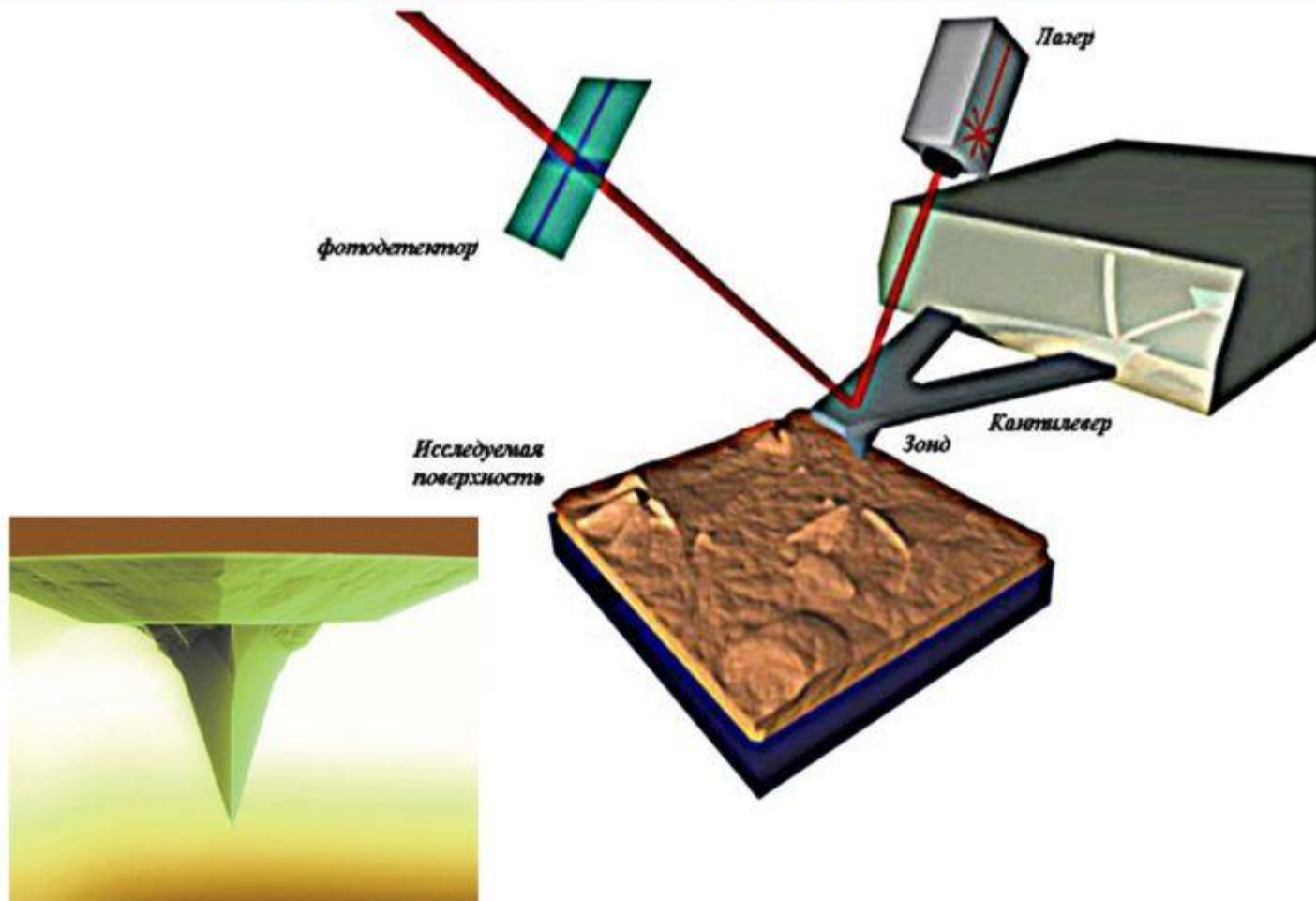
Система обратной связи обрабатывает эти изменения, так что при перемещении зонда в плоскости XU сигнал на исполнительном элементе оказывается пропорциональным рельефу поверхности.



Записанный при сканировании сигнал обратной связи обрабатывается компьютером, и затем СЗМ-изображение рельефа поверхности $Z = f(x, y)$ строится с помощью средств компьютерной графики.

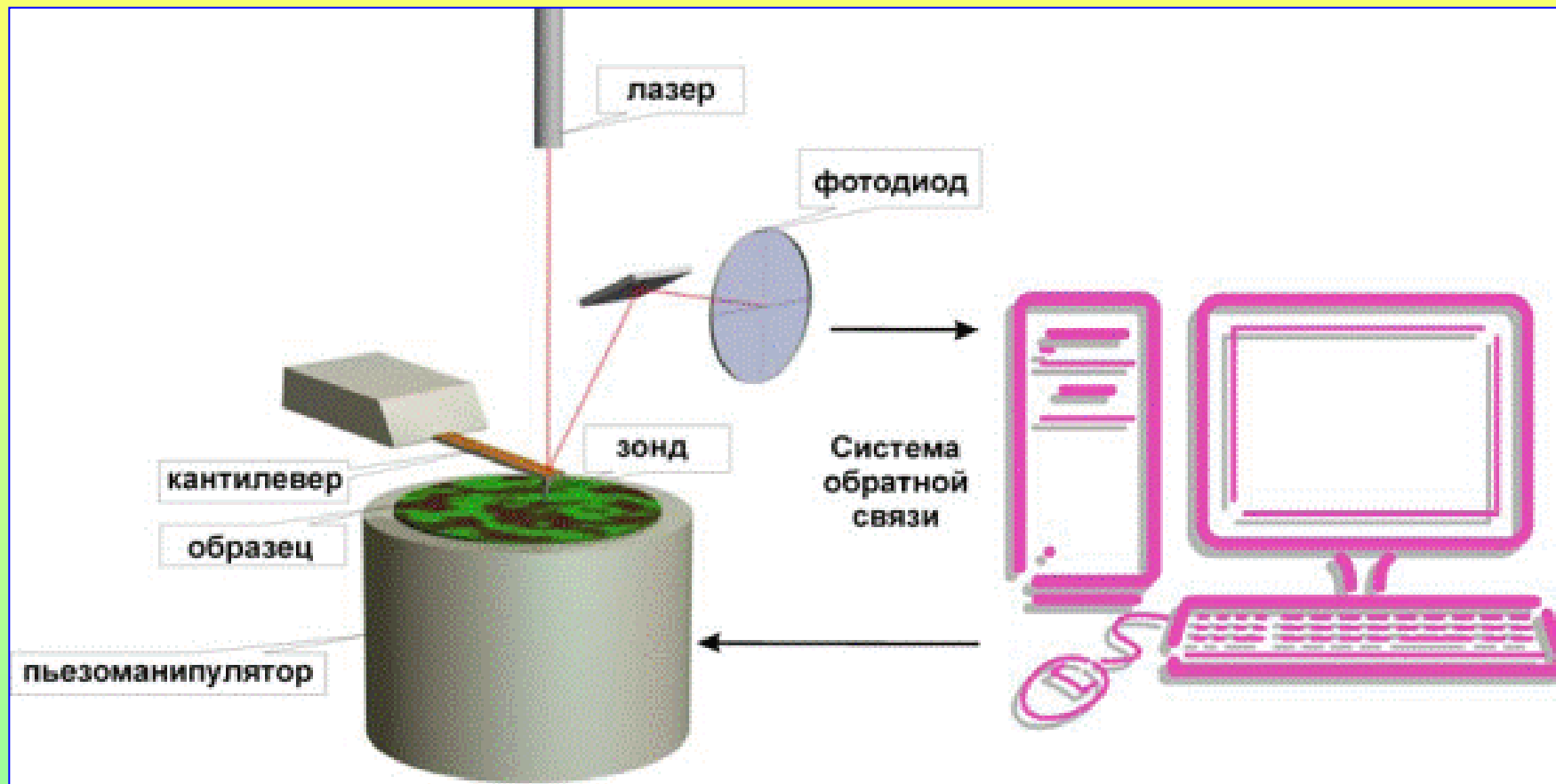
СЗМ обладают рядом **недостатков**: небольшое поле сканирования (несколько сотен мкм) и малый максимально допустимый перепад высот на образце (несколько десятков мкм), большая длительность процесса сканирования. Другая проблема связана с формой наконечника, его геометрией и радиусом закругления острия. Наличие острых выступов или впадин приводит к неправильному отображению рельефа поверхности при сканировании.

Атомный силовой микроскоп



Остриё шипа и принцип работы сканирующего зондового микроскопа. Пунктиром показан ход луча лазера.

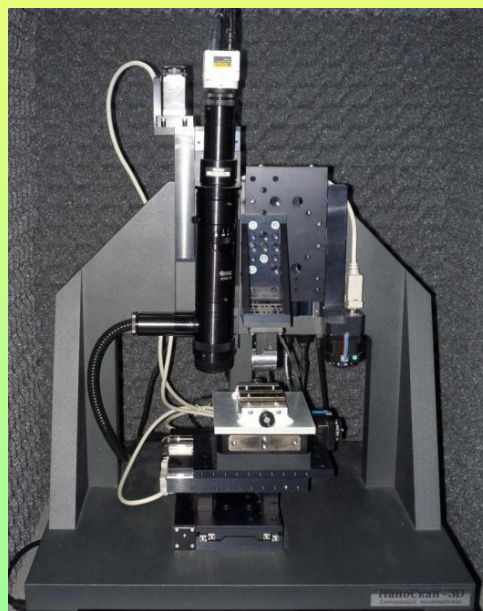
Схема атомно-силового микроскопа.



Сканирующий нанотвердомер

Сканирующий нанотвердомер «НаноСкан-3D». Сканирующий зондовый микроскоп-нанотвердомер «НаноСкан-3D» — многофункциональное аналитическое оборудование, предназначенное для исследования рельефа поверхности, механических и электрических свойств.

В приборе реализованы методы изучения рельефа и структуры поверхностей на субмикронном и нанометровом масштабе при помощи СЗМ,

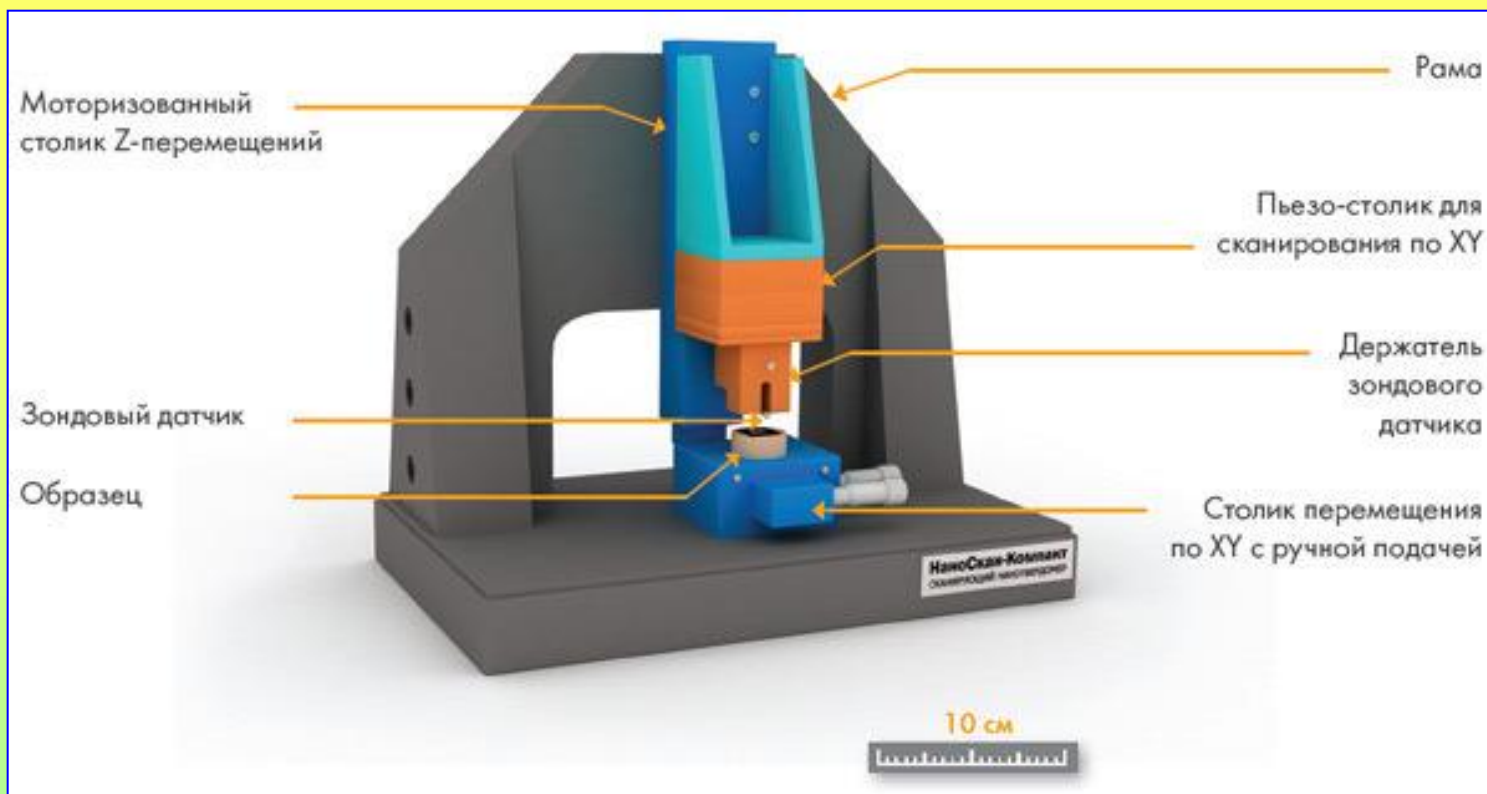


«НаноСкан-3D»

измерение твердости методами наноиндентирования, склерометрии и микроиндентирования, измерение модуля упругости методами наноиндентирования и силовой спектроскопии,

измерение трещиностойкости методами индентирования и склерометрии, износостойкости и трения методом склерометрии и т.д.

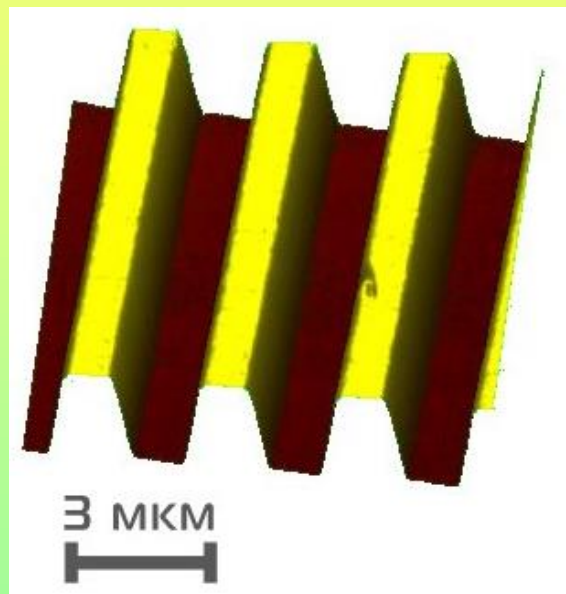
НаноСкан-компакт



Сканирующий нанотвердомер

Сканирующий нанотвердомер «НаноСкан-3D» позволяет получать изображения трехмерного рельефа поверхности методом СЗМ. Сканирование производится построчно в полуконтактном режиме алмазным наконечником, закрепленным на пьезокерамическом зонде.

Колебательный режим работы зонда позволяет получать кроме изображения рельефа дополнительную информацию о структуре и механических свойствах исследуемых образцов.



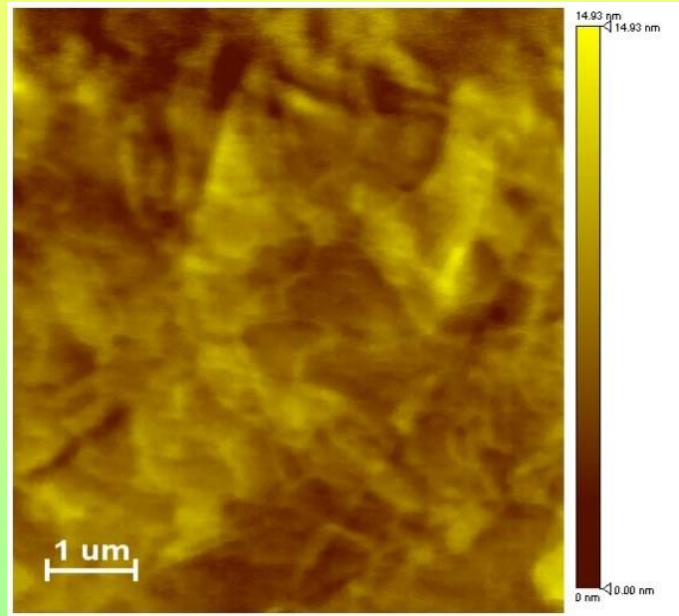
СЗМ-изображение

Получаемое изображение представляет собой карту распределения вязкоупругих свойств по поверхности, что позволяет изучать структуру многофазных материалов,

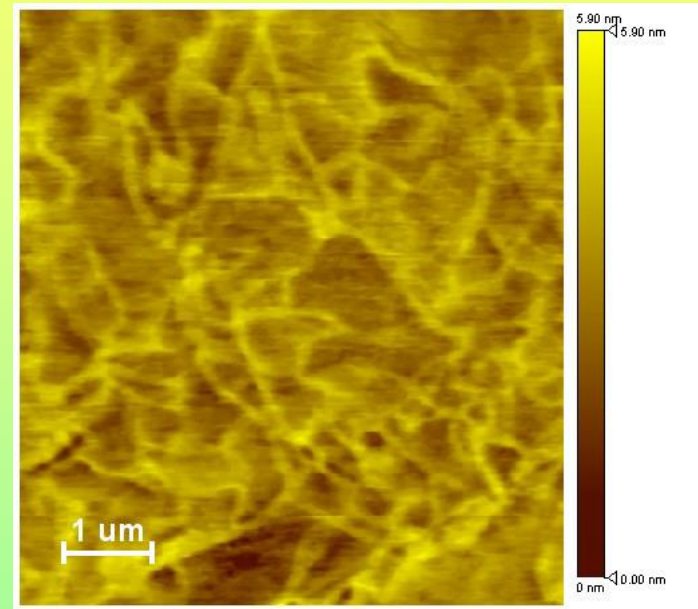
а также распределение механических неоднородностей по поверхности.

Сканирующий нанотвердомер

На рисунке представлены изображение рельефа поверхности и карта модуля упругости поликристаллического высокочистого ниобия. Карта упругого модуля более информативна, чем топография рельефа и позволяет однозначно определить границы зёрен и их размер.



а



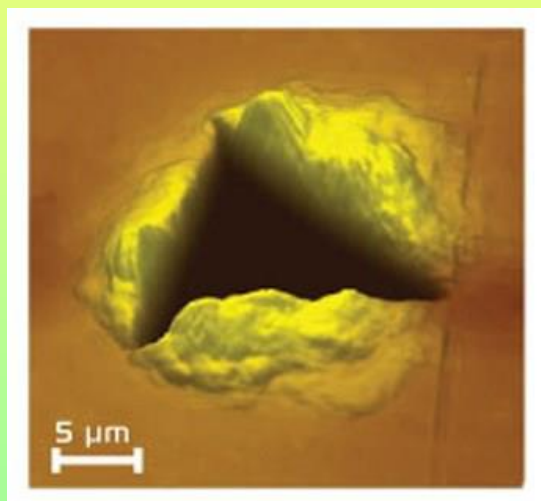
б

Поликристаллический высокочистый ниобий, полированная поверхность: а - рельеф поверхности; б - карта упругого модуля

Измерение твёрдости по изображению восстановленного отпечатка

Метод аналогичен классическому методу микроиндентирования, в котором твердость определяется из анализа оптического изображения восстановленного отпечатка. Измерение площади отпечатка на субмикро- и нанометровом масштабах ограничивается разрешающей способностью оптических микроскопов.

В этом случае весьма эффективным способом является применение методов СЗМ, позволяющих получать



трехмерные изображения восстановленных отпечатков с нанометровым пространственным разрешением.

Изображение отпечатка на поверхности стали У10, нагрузка — 50 мН; а — СЗМ-изображение рельефа

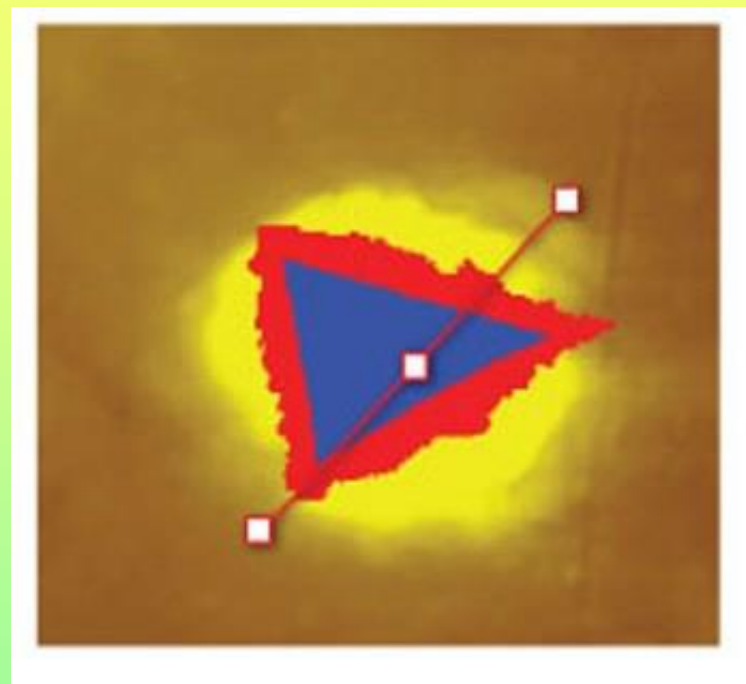
Анализ трехмерного СЗМ-изображения позволяет выявить и затем учесть особенности деформации материала при индентировании (образование навалов, трещин, упругое восстановление).

Измерение твёрдости по изображению восстановленного отпечатка

Значение твердости в методе рассчитывается по формуле Мейера с учетом поправки на площадь образовавшихся навалов:

$$H = \frac{P_{max}}{A_{\text{проекция отпечатка}} + A_{\text{площадь навалов}}}$$

и представляет собой отношение максимальной приложенной к индентору нагрузки к площади проекции отпечатка, измеренной по его СЗМ-изображению.



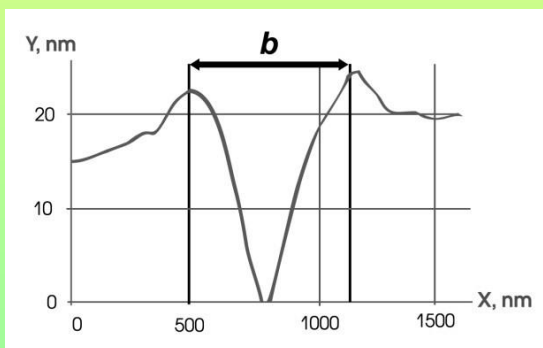
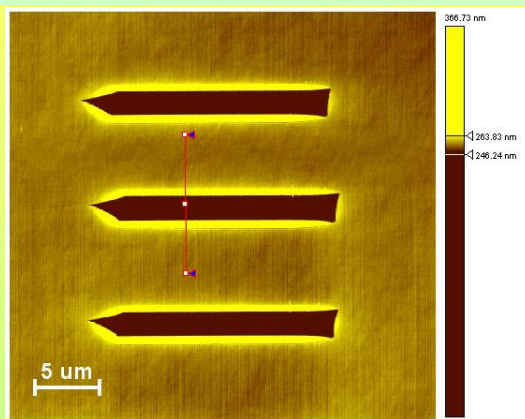
Изображение отпечатка на поверхности стали У10, нагрузка — 50мН;
выделение площади проекции отпечатка (синим) и площади навалов
по его периметру (красным)

Измерение твёрдости методом склерометрии

Измерение твердости методом склерометрии заключается в нанесении царапин на поверхности образца с последующим ее сканированием и анализом полученного изображения.

Значение твёрдости исследуемого материала определяют по формуле:

$$H = k \cdot \frac{P}{b^2}$$



где P — нормальное усилие, с которым была нанесена царапина, выраженное в Ньютонах; b — среднеарифметическое значение ширины царапины, выраженное в метрах; k — коэффициент формы индентора для данной ширины царапины.

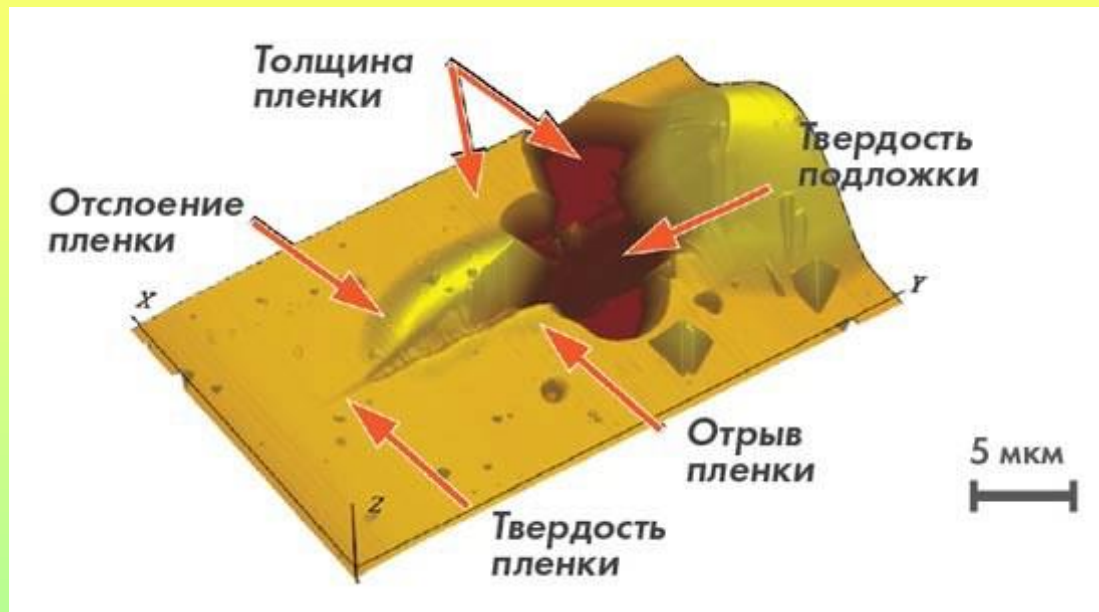
Измерение твердости методом склерометрии; а) СЗМ-изображение царапины; б) схема определения ширины царапины

Измерение твёрдости методом склерометрии

Коэффициент формы индентора определяют, нанося царапины на меру (материал с известной твёрдостью), и рассчитывают по формуле:

$$k = \frac{H_3 \cdot b^2}{P}$$

где — значение твёрдости меры, калиброванной независимым способом.



Метод склерометрии также применим для определения некоторых параметров тонких плёнок. Нанесение царапин с переменной нагрузкой и дальнейшая визуализация его следа дает возможность определить сразу несколько параметров пленки в рамках одной измерительной процедуры: область упругого взаимодействия, пороговую нагрузку, при которой начинается пластическая деформация (появляется видимый след на поверхности), нагрузку отслоения или начала хрупкого разрушения тонкой пленки и её толщину.

Силовая спектроскопия

Измерение модуля упругости методом силовой спектроскопии заключается в измерении частоты колебаний зонда с закреплённой на конце иглой, при вдавливании иглы в поверхность образца. Когда игла касается поверхности, резонансная частота изменяется вследствие действия сил упругого отталкивания

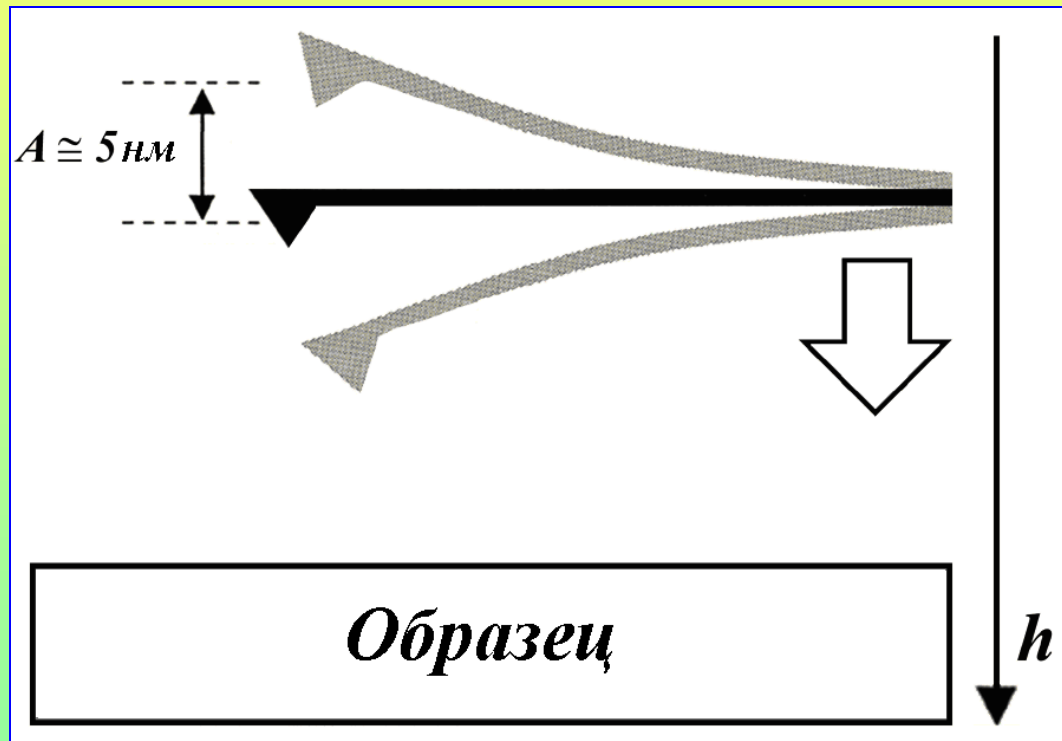


Схема проведения измерений методом силовой спектроскопии

Нанотвердомеры

Нанотвердомеры компании Micro Materials Ltd. (Англия) модели NanoTest 600 позволяют определять методом наноиндентирования механические свойства широкого спектра материалов на наноуровне.

Измерительный комплекс NanoTest 600 имеет теоретическое разрешение по деформации 0.001 нм и



позволяет определять на образцах и покрытиях толщиной от 20 нм следующие характеристики:

твёрдость и модуль Юнга в зависимости от деформации, адгезию тонких плёнок, скретч-тест и износостойкость поверхности и др. Нанотвердомеры компании Micro Materials Ltd. (Англия) имеют широкие возможности — определение свойств методом наноиндентирования, царапания, сканирования и трения.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС NANOTEST 600 ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НАНОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ (Micro Materials Ltd., Англия)

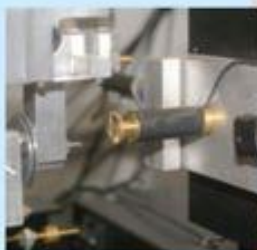
Микро-
маятник



Объективы
микроскопа



Нано-
маятник



Опция для проведения
динамических испытаний



Нагревательное
устройство



Подложка для крепления нано-
и микро- размерных образцов

Нанотвердомеры

Нанотвердомеры ННТ (Швейцария) предназначены для измерений твердости металлов и сплавов по шкалам Виккерса (по параметрам восстановленного отпечатка).

Принцип действия нанотвердомеров основан на статическом вдавливании наконечника - алмазной пирамиды Виккерса, с последующим измерением длин диагоналей восстановленного отпечатка. Затем, значения длин диагоналей пересчитываются в значения твердости по Виккерсу (HV).



Пределы нагрузок: 0,0098 Н - 0,491 Н.
Диапазон твердости: HV0,001 - HV0,05.
Нанотвердомер может использоваться с АСМ.

Список литературы к лекции 40

1) ИСО 14577-(1-4):2002.

2) W.C. Oliver, G.M. Pharr, An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, J. Mater., 1992, Res. 7, p. 1572.

3) Усеинов С.С., Соловьев В.В., Гоголинский К.В. и др., Особенности применения метода наноиндентирования для измерения твердости на наномасштабе, Нанотехника, №1(13).-2008. -С.111-115.

4) Дуб С. Н. Испытания твердых тел на нанотвердость / С. Н. Дуб, Н. В. Новиков // Сверхтвердые материалы. - 2004. - № 6. - С. 16-33.

5) Азаренков Н.А., Верёвкин А.А., Ковтун Г.П. Основы нанотехнологий и наноматериалов: учебное пособие.-Х.: Изд-во ХНГУ им. В.Н. Каразина, 2009.- 66 с.

6) Балоян Б.М., Колмаков А.Г., Алымов М.И., Кротов А.М. наноматериалы. Учебное пособие.-М., 2007.-124 с.



Контрольные вопросы

1) Приборы для оценки нанотвёрдости.

2) Виды датчиков, которые используются в нанотвердомерах.

3) Какое устройство имеют сканирующие зондовые микроскопы?

4) Какие существуют типы нанотвердомеров?

5) Как выполняют оценку нанотвёрдости по параметрам восстановленного отпечатка?

Задания для самостоятельной работы

1. Изучить типы приборов для оценки нанотвёрдости, которые выпускают в США и Швейцарии.



Кафедра технології металлов и матеріалознавства

г. Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ, КАФЕДРА ТМ и М
Tel.(8-057)707-37-92

