

следовательно скорость вращения вала, может достигать нескольких сотен в секунду и ограничена возможными параметрами механизма формирования волн.

Двигатель может найти применение: в авиационной промышленности, например вертолетостроении, для оснащения беспилотных летательных аппаратов. В автомобилестроении – с передачей сил на вал и снижением выбросов до минимума. В газовой, нефтяной и других отраслях промышленности.

Двигатель конструктивно прост. Габаритные размеры могут быть от нескольких десятков миллиметров до размеров мощных стационарных установок. Содержит небольшое количество деталей. Технология изготовления не сложна. Допустимо серийное отечественное оборудование. Возможно применение новых материалов. Модульное исполнение позволяет легко создавать необходимые конфигурации. Волновой характер процессов воспламенения и горения легко управляем. Возможность полного сгорания топлива и расширение его за время нескольких оборотов вала способствует повышению экономичности. Два автономных потока повышают надежность. Предполагается снижение затрат на создание, изготовление и эксплуатацию. Полное сжигание топлива, а также, влияющее на звуковые параметры, выбрасывание в противофазе сопряженных газовых потоков, позволяет говорить и о положительном экологическом эффекте.

Г.С. ИВАСЬШИН

НАУЧНЫЕ ОТКРЫТИЯ В МИКРО- И НАНОТРИБОЛОГИИ И СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ. ВЛИЯНИЕ УПРУГОГО ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ НА ТРЕНД КАНТИЛЕВЕРА АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

Рассматривается влияние упругого последействия на тренд кантилевера атомно-силового микроскопа (AFM-Atomic Force Microscopy).

«... Открытия ... обязаны тому, что не может быть куплено, – именно остроте и силе наблюдательности, интуиции, непоколебимому энтузиазму до окончательного разрешения всех затруднений и противоречий, сопутствующих пионерской работе. Когда первоначальное открытие сделано, наблюдаемый эффект очень мал и требует целого ряда длительных опытов для получения достоверных результатов. Вот это стремление добиться большого эффекта, и стоит дорого ...» (П.Л. Капица, лауреат Нобелевской премии, 1978).

Исследование микро- и нанотрибологических процессов потребовало создания ряда приборов, имеющих н а н о м е т р о в о е разрешение [1, 2, 3, 4].

В 1986 г. К. Биннинг и Г. Рорер получили Нобелевскую премию за открытие сканирующего туннельного микроскопа (STM-Scanning Tunneling Microscopy).

Новые функциональные возможности для исследования поверхностей открыло появление атомно-силовой микроскопии (AFM- Atomic Force Microscopy), которая была изобретена К. Биннингом с коллегами через несколько лет после создания STM.

Принцип действия AFM заключается в регистрации положения зонда, расположенном на кантилевере (рис. 1). Силы (F_N – нормальная и F_t – тангенциальная, или латеральная), действующие между зондом, приведенным в контакт с поверхностью образца, приводят к изгибу и кручению консольной балочки с зондом.

Кантилевер – консоль, кронштейн – одна из основных частей сканирующего зондового микроскопа. С одной стороны, кантилевер – это всего лишь крошечная балка, толщина которой составляет от 0,1 до 5 мкм, ширина – от 10 до 40 мкм, а длина – от 100 до 200 мкм (рис. 1). С другой стороны, кантилевер является незаменимым помощником нанотехнолога. Только с его помощью ученые могут «ощупывать» поверхность и лежащие на ней отдельные молекулы, перемещать их, производить химические опыты со столь малыми количествами веществ, которые нельзя взвесить даже на самых точных лабораторных весах.

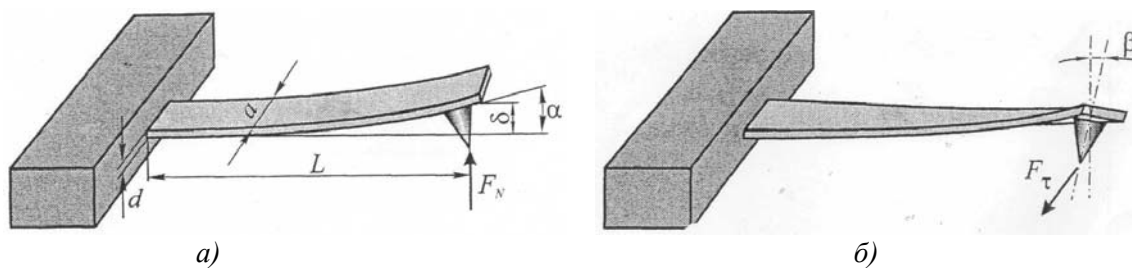


Рис. 1. Изгиб и кручение консольной балочки (кантилевера) с зондом на свободном конце под действием нормальной F_N (а) и латеральной F_τ (б) сил:
 a, d, L – ширина, толщина и длина кантилевера соответственно; α – угол изгиба, β – угол скручивания кантилевера

От длины, ширины, толщины, а также природы материала (динамической твердости, упругого последействия и др.), из которого сделан кантилевер, зависит его жесткость (в объемных частях и поверхностных слоях пар трения).

Упругое последействие инициирует тренд кантилевера при изгибе (рис. 2) под действием нормальной и латеральной (рис. 3) сил даже в том случае, если кантилевер изготовлен из монокристалла.

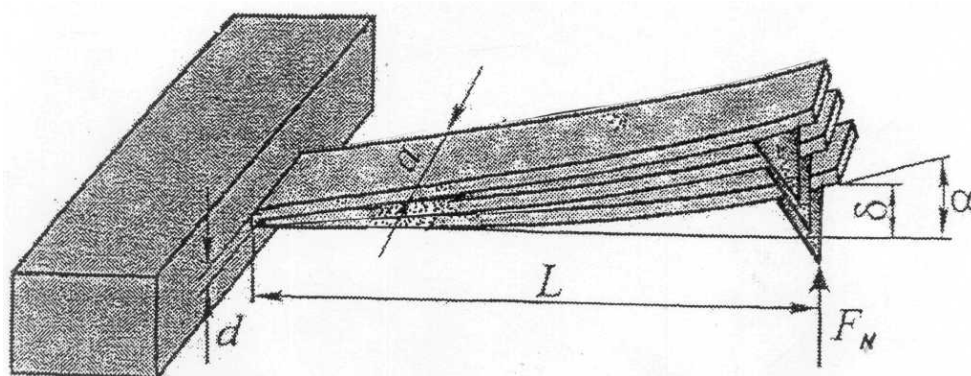


Рис. 2. Влияние упругого последействия материала на тренд кантилевера атомно-силового микроскопа при изгибе под действием нормальной силы F_N

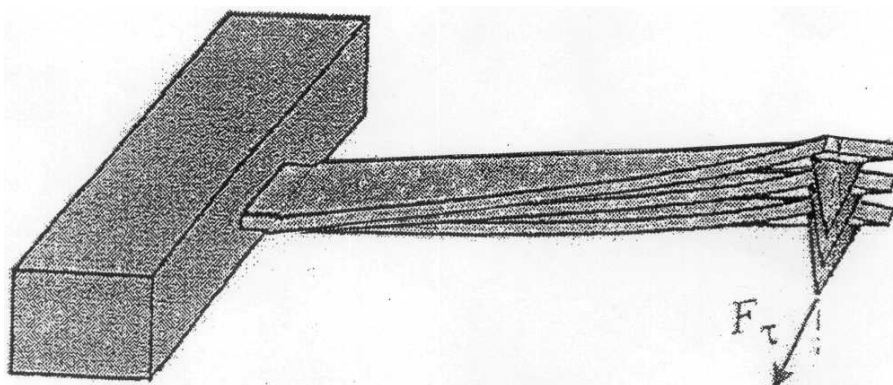


Рис. 3. Влияние упругого последействия материала на тренд кантилевера атомно-силового микроскопа под действием латеральной силы F_τ

Как отмечал М.Я. Леонов, «... структурные несовершенства (дислокации) всегда имеются в исходном состоянии твердого тела; их перемещение определяет неупругую деформацию» [5].

Согласно [5], «... нарушения в известном порядке расположения атомов называются структурными несовершенствами. Они наблюдаются во всех реальных твердых телах, в том числе и в монокристаллах (вакансии, дислокации).

В процессе деформации практически всегда происходят направленные перемещения структурных несовершенств за счет диффузионных процессов, обуславливаемых изменением поля напряжений.

Вызванные указанным перераспределением дефектов деформации, которые исчезают с течением времени после нагрузки, называются обратимыми. Процесс исчезновения таких деформаций называется упругим последствием».

Необходимо в тоже время отметить, что «... когда дислокация движется в совершенном кристалле, единственно возможными препятствиями являются существующие в нем фоновые и электронные волны» [6].

Чем кантилевер длиннее и тоньше, тем легче он гнется. Можно сделать такой мягкий кантилевер, что с его помощью возможно будет надавить на поверхность с силой в одну миллиардную долю ньютона. Это в тысячу раз меньше, чем сила, с которой пылинка давит на стол, на котором она лежит!

Такие маленькие силы нужны в первую очередь в сканирующих зондовых микроскопах, которые «ощупывают» поверхность и могут отличить даже лежащие на ней отдельные молекулы. В этих приборах используются кантилеверы, на кончике которых расположена микроскопическая и очень острая иголка – зонд (зачастую атомарно-острый), сканирующий поверхность с разрешением в доли ангстрема по всем трем координатам.

Если бы кантилевер не мог хорошо гнуться, то при подводе его к исследуемой поверхности с помощью системы нанопозиционирования, зонд просто повредил бы поверхность, воткнувшись в нее. Но кантилевер всегда подбирают настолько мягким, чтобы при подводе к поверхности происходил его изгиб, а поверхность оставалась в целости и сохранности. Величина отклонения или частота колебаний кантилевера определяется силой его взаимодействия с атомами или молекулами на поверхности исследуемого образца.

Промышленное производство кантилеверов основано на двух материалах – кремнии и нитриде кремния. Острия кантилеверов для атомно-силовой микроскопии (АСМ) также изготавливают из кремния, нитрида кремния или алмаза, а также используют покрытия TiN, W₂C, Pt, Au или магнитных материалов Fe-Ni/Cr, Co/Cr, CoSm/Cr. Для улучшения светоотражающих свойств обратную сторону зонда АСМ обычно покрывают алюминием или золотом с помощью термического напыления в вакууме. Покрытие кантилевера пьезоэлектрической керамикой на основе цирконата-титаната свинца (Pb[Zr_xTi_{1-x}]O₃, ЦТС или PZT) позволяет управлять движением кантилевера, прикладывая к контактам разность потенциалов, или непосредственно считывать частоту его свободных колебаний. Такие устройства находят сегодня широкое применение для разработки и создания наноэлектромеханических систем, систем нанопозиционирования, наноактюаторов, наносенсоров, нановесов и т.д.

Геометрия кантилевера определяет важные механические свойства (в первую очередь, жесткость и резонансную частоту) и варьируется в широких пределах. Ниже приведена формула, определяющая константу жесткости k :

$$k = \frac{Ead^3}{4L^3}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга материала кантилевера, a – ширина, d – толщина, а L – длина прямоугольного кантилевера.

Коэффициент жесткости кантилевера, в значительной мере определяющий чувствительность АФМ, может варьировать в широких пределах ($10^{-4} \div 10$ Н/м). Косвенно он также определяет и резонансную частоту ω_0 , и добротность колебаний кантилевера, которые имеют большое значение для реализации различных колебательных мод силовой микроскопии.

Собственные частоты изгибных колебаний консоли прямоугольного сечения на основной гармонике определяются следующим отношением:

$$\omega_0 = \frac{3,52}{L} \sqrt{\frac{EJ}{\rho S}}, \quad (2)$$

где L – длина консоли; E – модуль Юнга; J – момент инерции в поперечном сечении балочки S ; ρ – плотность материала.

Обычные значения ω_0 составляют сотни килогерц, но в отдельных случаях они достигают многих мегагерц. Добротность колебаний кантилевера в вакууме составляет $10^4 \dots 10^5$, а на воздухе $10^2 \dots 10^3$.

Одна из сторон балки является зеркальной, что позволяет использовать оптическую систему контроля изгиба кантилевера. На противоположной стороне балки на свободном конце находится игла, взаимодействующая с измеряемым образцом. Радиус острия иглы промышленных кантилеверов находится в пределах 5-50 нм, лабораторных – от 1 нм. Как правило, вся конструкция, за исключением, быть может, иглы, является кремниевым монокристаллом.

В основе работы АСМ лежит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью, для регистрации которого используются специальные зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль с острым зондом на конце (рис. 4). Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью.

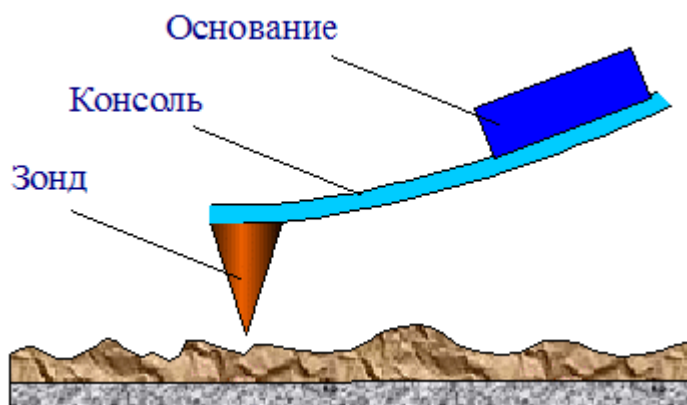


Рис. 4. Схематическое изображение зондового датчика АСМ

Получение АСМ изображений рельефа поверхности связано с регистрацией малых изгибов консоли зондового датчика.

АСМ позволяет получать изображение поверхности с очень высокой точностью (вплоть до ангстремов, $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$), превышающей точность сканирующих туннельных микроскопов [4].

Это объясняется тем, что в АСМ нет ограничений на близость острия зонда к исследуемой поверхности, так как АСМ применяют для изучения материалов-диэлектриков, в которых токи не возникают. Изобретение АСМ стало очень важной вехой в изучении атомарной структуры непроводящих материалов вообще.

Кроме этого, точность АСМ может быть повышена за счет улучшения характеристик материала кронштейна (плоской пружины). Возникающие в кронштейне слабые упругие напряжения регистрируются с достаточно высокой точностью (около 1 нН), что соответствует атомарному уровню разрешения для структуры. Информация о поверхности проводящих материалов, получаемая с помощью АСМ, может рассматриваться как дополнительная по отношению к результатам измерений сканирующим зондовым микроскопом, что создает дополнительные возможности для анализа и сравнения данных. В самое последнее время АСМ стали применять в экспериментах по измерению некоторых других характеристик поверхности (например, магнитных или электростатических сил, а также адсорбционных и иных параметров).

Особенности создания в сканирующей зондовой микроскопии пар трения (в объемных частях и поверхностных слоях), основанные на использовании научных открытий [7, 8, 9, 10], квантовой теории трения [11, 12, 13, 14], а также оригинальных технических решений [15, 16, 17, 18, 19] даст, на наш взгляд, определенные конкурентоспособные результаты.

В частности, представляется возможным создание механизма, нивелирующего влияние упругого последействия материала на тренд кантилевера атомно-силового микро-

скопа. Это техническое решение позволит расширить функциональные возможности сканирующей зондовой микроскопии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Springer Handbook of Nanotechnology / ed. By B. Bhushan. Berlin : Springer – Verlag, 2004. – 1222 p.
2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. – М. : Техносфера, 2004. –144 с.
3. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. – М. : Машиностроение, 2007. – 496 с.
4. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию. Перевод с японск. – 2-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 134 с.
5. Леонов М.Я. Механика деформаций и разрушения. Физико-математические основы теории. – Фрунзе: ИЛИМ, 1981. – 237 с.
6. Мезон У. Измерение низко- и высокоамплитудного внутреннего трения в твердых телах и их связь с движением несовершенств строения. В кн.: Микропластичность. Пер. с англ Е.К. Захарова, В.П. Калинина, Ю.А. Рахштадта. Под ред. В.Н. Геминова и А.Г. Рахштадта. – М. : Металлургия, 1972. – с. 236-301.
7. Научное открытие (Диплом № 258) // Закономерность аддитивности упругого последействия в объемных частях и поверхностных слоях пар трения / Г.С. Ивасышин. – М. : РАЕН, МААНОИИ, 2004.
8. Научное открытие (Диплом № 277) // Закономерность аддитивности магнитного последействия в объемных частях и поверхностных слоях пар трения из ферромагнитных материалов / Г.С. Ивасышин. – М. : РАЕН, МААНОИИ, 2005.
9. Научное открытие (Диплом № 289) // Закономерность аддитивности диффузионного магнитного последействия в объемных частях и поверхностных слоях пар трения из ферромагнитных материалов и сплавов / Г.С. Ивасышин. – М. : РАЕН МААНОИИ, 2005.
10. Научное открытие (Диплом № 302) // Закономерность аддитивности водородного магнитного последействия в объемных частях и поверхностных слоях пар трения из ферромагнитных материалов / Г.С. Ивасышин. – М. : РАЕН, МААНОИИ, 2006.
11. Ивасышин Г.С. Научные открытия в микро- и нанотрибологии и основы квантовой теории трения. Сообщение 1 // Материалы XV Международной научно-методической конференции. – т. 1. 15-16 февраля 2008 года, г. Санкт-Петербург, СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2008. – с. 223-225.
12. Ивасышин Г.С. Научные открытия в микро- и нанотрибологии и основы квантовой теории трения. Сообщение 2 // Материалы XV Международной научно-методической конференции. – т. 1. 15-16 февраля 2008 года, г. Санкт-Петербург, СПб. : Изд-во Политехнического университета, 2008. – с. 225-227.
13. Ивасышин Г.С. Ивасышин Г.С. Научные открытия в микро- и нанотрибологии. Основы квантовой теории и нанотехники. Сообщение 1 // Материалы 6-ой Международной научно-технической конференции «Проблемы качества машин и их конкурентоспособность. – Брянск : изд-во БГТУ, 2008. – с. 77-78.
14. Ивасышин Г.С. Научные открытия в микро- и нанотрибологии. Основы квантовой теории и нанотехники. Сообщение 2 // Материалы 6-ой Международной научно-технической конференции «Проблемы качества машин и их конкурентоспособность». – Брянск : изд-во БГТУ, 2008. – С. 79-80.
15. Способ определения коэффициента Пуассона. А.с. 848979, А1 МКИ G01 В 5/30, Бюлл. изобрет. 1981. №27 / Г.С. Ивасышин.
16. Способ определения модуля сдвига образцов материалов. А.с. 905717, МКИ G 01N 3/22, Бюлл. изобрет. 1982. № 6. / Г.С. Ивасышин.
17. Способ определения модуля упругости материала. А.с. СССР 905714, МКИ G 01N 3/20, Бюлл. изобрет. 1982. № 6. / Г.С. Ивасышин.
18. Способ определения динамической твердости. А.с. 1381367, А1 МКИ G01 N 3/48, Бюлл. изобрет. 1988. – №10. / Г.С. Ивасышин.
19. Способ определения упругого последействия материала. А.с. 1000839, А1 МКИ G01 N 3/08, Бюлл. изобрет. 1983. – №11. / Г.С. Ивасышин.

Г.С. ИВАСЫШИН, М.М. РАДКЕВИЧ, С.Г. ЧУЛКИН

ИЗМЕНЕНИЕ ЭНТРОПИИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассматриваются релаксационные процессы в зоне фрикционного контакта твердых тел. Все процессы релаксации – неравновесные процессы (физические процессы, включающие неравновесные состояния теплопроводности, диффузии, вязкого течения), сопровождающиеся возрастанием энтропии системы.

Триботехнические характеристики узлов трения наравне с конструкцией машин, качеством их изготовления, режимом эксплуатации и другими аспектами оказывают существенное влияние на многие экономические и экологические показатели работы машин, механизмов и технологического оборудования.

Потери от трения и износа в развитых государствах достигают 5...6% националь-