

низкая степень гомогенности поверхности образцов, регистрируемая экспериментальной установкой для стали 55X20Г9АН4 в ходе исследований.

1. Жарин, А.Л. Контроль свойств поверхности металлических образцов с использованием зондовой электрометрии / А.Л. Жарин, А.Г. Анисович, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский,

А. И. Свистун // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. Материалы 4-й международной научно-технической конференции (Могилев, 26-27 сентября 2012 г.). – Могилев: ГУ ВПО «Белорусско-российский университет». – 2012. – С. 137-139.

УДК 681

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

Билоконь С.А.¹, Антониук В.С.², Свиридова О.В.³

¹Черкасский государственный технологический университет, Черкассы, Украина

²Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина

³Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова, Одесса, Украина

Наноиндентирование – относительно новая отрасль науки, которая изучает разнообразные характеристики материалов, в том числе – диэлектрических. На сегодняшний день наука и техника стремится к уменьшению компонентов и систем вплоть до нанометрических размеров, поэтому данное направление исследования механических поверхностных свойств материалов набирает всё большую популярность. Большое количество разработанных в последние годы методов обработки первичных данных с применением метода атомно-силовой микроскопии (АСМ) позволяет определять более десятков разнообразных характеристик материалов (микротвердость, износостойкость, трибологические свойства и т.п.) и делает наноиндентирование гораздо более информативным [1].

Согласно международному стандарту ISO 14577, выделяют три диапазона измерений: макро ($2 \text{ Н} \leq P \leq 30000 \text{ Н}$), микро ($P \leq 2 \text{ Н}$, $h > 20 \text{ нм}$) и нано ($h \leq 20 \text{ нм}$). Здесь P – сила вдавливания индентора, h – глубина отпечатка. Такой метод дает возможность рационально исследовать пленочные покрытия, микро- и нано-электромеханические системы и электронные компоненты в нанометровом диапазоне размеров, вплоть до атомарного уровня [2].

Приборы, осуществляющие процесс наноиндентирования устроены сходным образом. Они содержат узел нагрузки и датчик для регистрации перемещения индентора, контроллерный блок и компьютер с пакетом программ для управления всеми рабочими циклами прибора. Обратную связь между датчиком перемещения и силовой ячейкой позволяют значительно расширить набор методов нагрузки и обработки сигналов. В последних версиях измерительный датчик позволяет регистрировать не только смещение по вертикальной оси z , но и вдоль латерального

направления u , что при известной поперечной жесткости подвески S_y дает возможность измерять латеральные силы F_l , а следовательно и коэффициент трения $f = F_l/F_N$ (здесь F_N – нормальная сила, приложенная в данный момент к индентору). Для выбора места укола служит оптический микроскоп, а для позиционирования и перемещения образца – многокоординатный столик. Наличие моторизованного столика позволяет существенно расширить набор опций, в частности, осуществлять автоматизированное картирование механических свойств поверхности, измерять коэффициент трения, регистрировать микропрофиль вдоль заданной траектории [3].

Возможность применения метода АСМ для исследования микротвердости диэлектрических поверхностей заключается в том, что принцип работы нанотвердомера и атомно-силового микроскопа аналогичны, что позволяет их объединить в одном комплексе, чем значительно расширить возможности зондовых методов и сделать их одними из наиболее востребованных методов метрологического исследования в нанотехнологиях. Помимо тех преимуществ, что были уже перечислены, данный метод обладает также такими преимуществами [4]:

1. Возможность проведения сканирования образца с выбором места внедрения индентора непосредственно перед процессом наноиндентирования, что позволяет учесть и избежать резких перепадов микрорельефа, а также инородных включений.
2. Проведение повторного сканирования исследуемой области, что позволяет визуализировать навалы в местах индентирования и, как следствие, получать более качественные данные по микротвердости поверхности.

3. Поскольку исследование проходит в одном цикле сканирования, упругое восстановление поверхности отпечатка после снятия нагрузки не существенно.
4. Возможность одновременного проведения исследования и контролирования геометрии поверхности индентора, что позволяет определять многие механические свойства поверхностей.

При этом основной проблемой активного применения данного метода для исследования диэлектрических материалов является правильный выбор зонда для АСМ. Обычно для сканирования образца используют кремниевый зонд, а для наноиндентирования – алмазный. Для сканирования и индентирования в одном цикле не подходит ни один из них, поскольку кремниевый зонд слишком хрупкий для проведения наноиндентирования, а применение алмазного зонда для сканирования диэлектрических материалов не рационально через его дороговизну и высокую твердость, что приводит к разрушению мягких образцов и, в итоге, искажению результатов сканирования. Повысить прочность кремниевого зонда возможно путем модификации его тонким углеродным покрытием. При этом, эффективным методом нанесения покрытий является метод термического испарения в вакууме [5].

Поэтому перспективным и актуальным остается вопрос применения кремниевых зондов для атомно-силовой микроскопии, которые были модифицированы ультратонким (менее 15 нм) углеродным покрытием для измерения в одном цикле исследования микротвердости поверхностей диэлектриков.

В основе такого модифицирования лежит процесс формирования ультратонких углеродных покрытий термическим осаждением в вакууме порядка $(5...6) \cdot 10^{-3}$ Па, согласно методики, описанной в [5]. Предыдущие исследования, проводимые в работе [6] показали высокую прочность, твердость и износостойкость таких покрытий.

Испытания микротвердости диэлектрических поверхностей проводились на атомно-силовом микроскопе NT-206 (ТДВ «Микротестмашины», Беларусь). В качестве исследуемых материалов были взяты образцы, представляющие собою плоскопараллельные пластины $20 \times 20 \times 2$ мм из материалов, которые нашли широкое применение в изделиях современной наноэлектроники, микрооптомеханики и микрооптики, а именно: кремния Кр0, пьезоэлектрической керамики ЦТС-19 и оптического стекла К8.

В результате проведенных экспериментов, можно отметить, что использованные кремниевые зонды, модифицированные тонкими углеродными покрытиями возможно применять не только для качественного сканирования рельефа,

но и проводить наноиндентирование отдельных элементов диэлектрических поверхностей в одном цикле сканирования. Также показана возможность применения метода АСМ с использованием кремниевых зондов CSC-18 модифицированных тонкими углеродными покрытиями, что позволила проводить комбинированные измерения микрорельефа и физико-механических свойств (на примере микротвердости) плоских диэлектрических поверхностей, а именно, кремния Кр0, пьезоэлектрической керамики ЦТС-19 и оптического стекла К8.

Установлено значение микротвердости поверхности кремния, пьезоэлектрической керамики ЦТС-19 и оптического стекла К8, измеренные предлагаемым методом и которое, соответственно, составляет 17,78 ГПа, 7,09 ГПа, 4,77 ГПа что хорошо коррелирует со значениями, полученными методом микроиндентирования на приборе DuraScan-10/20 (соответственно, 17,07; 8,1; 4,56 ГПа).

Установлены границы применения метода наноиндентирования диэлектрических поверхностей зондами АСМ, модифицированными тонкими углеродными покрытиями, который ограничивается материалами твердостью меньше 10 МПа и материалами твердость которых больше 25 ГПа.

1. Измерение твердости конструкционных материалов методами индентирования и склерометрии на субмикронном и нанометровом масштабах: Дисс. ... канд. техн. наук: 01.04.07 / Усеинов С.С. – Москва, 2010. – 127 с.
2. W.C. Oliver, G.M. Pharr. J. Mater. Res. 7, 1564 (1992).
3. Головин, Ю.И. Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, приповерхностных слоях и пленках / Ю.И. Головин // Физика твердого тела. – 2008. – Том 50. – Вып. 12. – С. 2113-2142.
4. Кузнецова, Т.А. Оценка пластичности тонких защитных покрытий исследованием отпечатков микротвердости методом атомно-силовой микроскопии / Т.А. Кузнецова, М.А. Андреев, Л.В. Маркова // 6-й Белорусский семинар по сканирующей зондовой микроскопии: Сборник докладов. Минск, 12–15 октября 2004 г. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2004. – С. 54-59.
5. Антонюк, В.С. Дослідження тонких зносостійких вуглецевих покриттів і структур, сформованих термічних випаруванням у вакуумі на п'єзоелектричних матеріалах / В.С. Антонюк, М.О. Бондаренко,

Ю.Ю. Бондаренко // Сверхтвердые материалы. – 2012. - №4. – С. 45-55.

6. Черепанов В.А., Золкин А.С., Колесов Б.А., Мурзахметов К.Т., Семёнов В.И.

Алмазоподобные гранулированные плёнки на кремнии, полученные при горении ацетиленна.

УДК 621.833

СИСТЕМА НОРМИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОЧНОСТИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Боханко И.А.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

На сегодняшний день цилиндрические зубчатые колеса и передачи редко являются самостоятельной продукцией и выпускаются, в основном, как комплектующие узлов. Изготовителей интересуют не просто показатели качества отдельно взятых зубчатых колес, а фактические выходные характеристики зубчатой передачи, как функционального устройства. При этом установленные стандартами значения показателей точности зубчатых колес, после монтажа не всегда соответствуют реальным значениям. Это происходит из-за противоречий в нормировании. Было установлено, что существует два варианта нормирования точности зубчатых передач:

- нормирование точности непосредственно зубчатой передачи;

- нормирование точности зубчатой передачи через точность зубчатых колес.

Первый вариант используется в случае, если возможен контроль зубчатой передачи в сборе, что представляет собой достаточно сложную задачу, требующую дорогостоящего оборудования и привлечения специалистов высокой квалификации. Также данный вариант используется, если имеется большой опыт изготовления однотипных зубчатых передач. В этом случае отлаженный и выверенный «методом проб и ошибок» процесс позволяет получать зубчатые передачи необходимой точности. Необходимо отметить, что при использовании данного варианта нормирования у изготовителя отсутствует возможность оперативного влияния на конечный результат.

Второй вариант нормирования применяется, если изготовителем используются средства измерений и приборы для контроля отдельных показателей, а также при использовании оригинальной схемы зубчатой передачи.

Данный вариант нормирования позволяет оперативно влиять на конечный результат и характеризуется относительной простотой контроля параметров зубчатых колес в передаче. Основным недостатком нормирования точности зубчатой передачи через точность зубчатых колес является неизвестность фактической точности зубчатой передачи до ее сборки.

В стандартах, содержащих требования к точности зубчатых колес и передач, варианты нормирования точности не разделяются. При установлении требований в них не учитывается тот факт, что суммарное отклонение от точности зубчатых колес, входящих в передачу, не равно отклонению от точности зубчатой передачи, которое включает в себя еще ряд составляющих. Формирование точности зубчатой передачи представлено на рисунке 1.

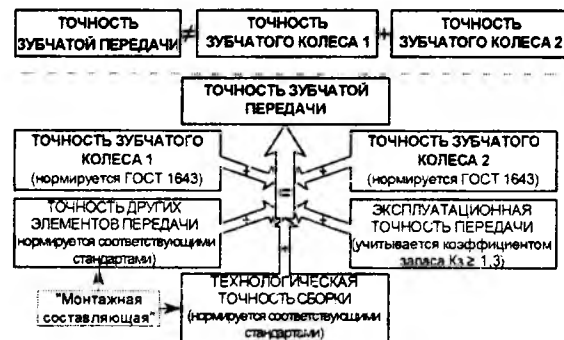


Рисунок 1 - Формирование точности зубчатых передач

Возникает ситуация, когда ужесточение степени точности колес по той или иной норме не влияет на выходные характеристики зубчатой передачи. Показатели оказываются «нечувствительными» к уменьшению числовых значений допусков, в то время, как достижение заданной точности зачастую требует значительных финансовых затрат и существенных изменений технологического процесса.

Для разрешения возникающего противоречия в нормировании до момента разработки гармонизированного государственного стандарта, устанавливающего требования к допускам цилиндрических зубчатых колес, предлагается использовать проектирование норм точности для определения степеней точности зубчатых колес в передаче с учетом погрешностей изготовления и монтажа деталей.

Предлагаемый подход основан на принципах проектирования норм точности и позволит применять существующие нормативные документы, учитывая переход от значений показате-