

НАНОМЕТРОЛОГИЯ НА СЛУЖБЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Современную экономику невозможно представить без использования крупных промышленных объектов, значительную роль в обеспечении надежной и безопасной работы которых играет техническое диагностирование – информационная технология, позволяющая выявить структуру промышленного объекта и его дефекты и в настоящее время имеющая не меньшее значение, чем создание новых материалов и формирование из них технических объектов.

При создании современных конструкционных материалов используются методы и объекты нанотехнологии, которые оперируют со структурами, имеющими линейные размеры, лежащие в нанодиапазоне [1, 2]. По этой причине на всех этапах формирования наноструктур должна быть предусмотрена возможность контроля их параметров с предельной точностью до 1 нм, а при создании и эксплуатации промышленных объектов, использующих результаты нанотехнологической деятельности, контроль параметров промышленных объектов и обнаружение дефектов также должны осуществляться с такой же точностью.

НЕРАЗРУШАЮЩАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

На современном этапе развития промышленности вопросы обеспечения надежной работы комплектующих изделий, оборудования и энергоснабжения приобретают первостепенное значение. Особое внимание к проблеме обеспечения промышленной безопасности объясняется тем, что современные производственные объекты работают в условиях повышенной нагрузки; возрастают параметры рабочих сред (давление, температура, химическая и радиационная активность); повышаются мощность и производительность отдельных блоков.

Отказы в работе изделий, оборудования, коммуникаций, трубопроводов ведут к значительным экономическим потерям, в том числе и обусловленным нарушениями экологического баланса. Все это определяет необходимость системного подхода к оценке надежности работы производственных объектов, при котором на первое место выдвигаются методы технической диагностики и неразрушающего контроля. До последнего вре-

мени основной задачей большинства методов было обнаружение дефектов и сравнение их с известными (“эталонными”). Современные подходы и требования мониторинга состояния объекта заключаются в том, чтобы при его диагностике проводилось не только выявление дефекта как такового, но и измерение важнейших параметров и характеристик последнего, в том числе и в динамике развития, с целью аналитического расчета прочности объекта и его остаточного ресурса.

АКУСТОЭМИССИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Среди широкого спектра методов и средств неразрушающего контроля значительное место занимают акустические методы, к которым относятся ультразвуковая дефектоскопия и метод акустической эмиссии (АЭ). В акустических методах в качестве первичных преобразователей в большинстве случаев используются акустоэлектрические преобразователи, принцип действия которых основан на преобразовании механического (акустического) смещения поверхности в электрический сигнал.

Метод АЭ достаточно успешно применяется для диагностирования промышленных объектов: больших емкостей, металлических строительных конструкций, трубопроводов, мостов [3]. Он основан на регистрации акустических сигналов, излучаемых при локальной динамической перестройке структуры твердого тела. Простейшим бытовым примером АЭ является треск, слышимый ухом при разрушении любого твердого объекта (ветка дерева, палка, строительная конструкция). Основными макроисточниками такой эмиссии в твердом теле выступают фазовые превращения, образование и рост дефектов. Микромеханизмом АЭ является динамический разрыв атомных связей.

¹ Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума.

² Научно-технический центр по безопасности в промышленности.

³ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Таблица 1. Параметры сигналов для некоторых источников акустической эмиссии

Источник акустической эмиссии	Амплитуда или энергия импульса АЭ	Длительность сигнала, мкс	Ширина спектра сигнала, МГц
Дислокационный источник Франка-Рида	$(10^{-7}-10^{-8})G$, Па	$5-50 \cdot 10^3$	≤ 1
Аннигиляция дислокаций длиной 10–1000 нм	$4 \cdot (10^{-18}-10^{-16})$, Дж	$5 \cdot 10^{-5}$	Сотни
Образование микротрещины	$10^{-10}-10^{-12}$ Дж	$10^{-3}-10^{-2}$	≤ 50
Исчезновение двойника размером ~ 1 мм ³	$10^{-2}-10^{-3}$ Дж	10^4	–
Пластическая деформация объема со стороной 0,1 мм	10^{-4} Дж	$\leq 10^4$	$\leq 0,5$
Энергия тепловых шумов	$4,22 \cdot 10^{-21}$ Дж/Гц	–	Равномерный спектр до 10^{13}

Примечание. G – модуль сдвига.

Метод АЭ – одно из наиболее мощных средств в системе обеспечения безаварийной эксплуатации оборудования опасных производственных объектов. Основное достоинство метода – возможность с его помощью выявлять и классифицировать развивающиеся дефекты не по размерам, а по степени их опасности для контролируемого объекта.

Возможность работы в реальном времени делает метод АЭ незаменимым при исследовании механизмов перестройки

структуры твердого тела и контроле промышленных объектов. Кроме того, метод АЭ обладает рекордно высокой чувствительностью по сравнению с другими методами неразрушающего контроля. Документом, регламентирующим применение метода АЭ в промышленности, является ПБ 03-593-03 “Правила организации и проведения акусто-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов”.

Теоретически предельная чувствительность метода АЭ ограничивается температурными флуктуациями в твердом теле, в идеальной кристаллической решетке которого атомы расположены в узлах и совершают тепловые колебания около своего центрального положения. Тепловое движение атомов создает акустический шум, энергия которого распределена в частотном диапазоне от долей герца до 10^{13} Гц. При комнатной температуре энергия тепловых шумов ΔE_n в единичном частотном диапазоне составляет:

$$\Delta E_n / \Delta f = 4 \cdot 10^{-21} \text{ Дж/Гц.}$$

В случае образования пары “вакансия кристаллической решетки – атом внедрения” (или при аннигиляции этой пары) имеем дело с источником АЭ, энергия которого для металлов составляет $\sim 10^{-19}$ Дж. Существенно большая энергия излучается в решетку твердого тела при образовании и перемещении



Рис.1 Моноблок оптической части лазерного интерферометрического измерителя

дислокаций и тем более при возникновении и развитии трещин. Значения параметров некоторых источников акустической эмиссии в твердом теле приведены в табл.1.

Чувствительность используемых в промышленности приборов АЭ, в которых для преобразования акустического сигнала в электрический используется пьезоэлектрическая керамика типа ЦТС 19, позволяет выявлять образование трещины площадью $1 \times 1 \text{ мкм}^2$. Для обнаружения дефектов меньших размеров необходимо использовать более совершенные методики выделения сигналов из шумов и более чувствительные пьезоматериалы для преобразователей АЭ.

К основным параметрам и техническим характеристикам акустических преобразователей относятся коэффициент преобразования «смещение – электрический сигнал», амплитудно-частотная характеристика, коэффициент затухания импульсной характеристики.

Существует два подхода к измерениям основных параметров преобразователей АЭ. Первый основан на определении амплитудно-частотной характеристики посредством подачи на вход преобразователя гармонических механических колебаний калиброванной амплитуды с перестраиваемой в требуемом диапазоне частотой [4]. Эта методика выполнения измерений при калибровке (поверке) преобразователей АЭ реализована и проводится в соответствии с МИ 1787-87 «ГСИ. Основные параметры приемных преобразователей акустической эмиссии. Методика выполнения измерений» и МИ 2030-89 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений. Амплитуды ультразвукового смещения, колебательной скорости частиц поверхности твердого тела и коэффициентов электроакустического преобразования в диапазоне частот 0,001–50 МГц».

Второй подход предполагает возбуждение преобразователя импульсным сигналом и определение основных параметров из импульсной характеристики в соответствии с методикой ASTM E1106-86 «Стандартный метод первичной калибровки сенсоров акустической эмиссии» ("Standard method for primary calibration of acoustic emission sensors").

При определении параметров акустического преобразователя необходимо использовать средства, позволяющие измерять абсолютные смещения поверхности объекта в широком

динамическом диапазоне (1–1000 нм) с чувствительностью лучше 0,1 нм в полосе рабочих частот $10^4\text{--}2 \cdot 10^6$ Гц.

Одним из перспективных решений проблемы является создание и внедрение в практику технической диагностики методов и средств лазерной интерферометрии-фазометрии, опирающихся на фундаментальные константы и обеспечивающих единство измерений в микро- и нанодиапазонах с прослеживаемостью передачи размера от Первичного эталона длины – метра к рабочему средству измерений.

ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ НАНОПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Наиболее перспективными измерителями наноперемещений являются бесконтактные оптические методы лазерной интерферометрии, обеспечивающие высокую чувствительность ($<10^{-3}$ нм) к смещению объекта, линейность в широком динамическом диапазоне, высокую локальность, абсолютный характер калибровки измерений в долях длины волны лазерного излучения, возможность автоматизации получения и обработки измерительной информации.

Для решения этой задачи был создан лазерный интерференционный измеритель наноперемещений (ЛИИН), обеспечивающий измерение линейных перемещений, а также калибровку (поверку) средств задания и измерения перемещений в нанометровом диапазоне. В ЛИИН использован гетеродинный метод с преобразованием частоты лазерного излучения и фазовой обработкой информации в радиодиапазоне. Измерительная информация при этом выражается через длину волны излучения или связанной непосредственно с ней величиной, называемой углом фазового сдвига – УФС.

Объединение возможностей оптической интерферометрии с техникой фазометрии радиодиапазона дало возможность создать не только высокоточные измерительные системы, но и заложить основы для обеспечения единства линейных измерений в микро- и нанометровом диапазонах.

Конструктивно ЛИИН выполнен в виде оптического моноблока (рис.1), связанного с исполнительным механизмом системы прецизионного позиционирования, соединенного электрическими кабелями с электронной фазометрической системой, сопряженной с компьютером. Источник излучения – He-Ne-лазер российского производства типа ЛГН-304.

Преобразование частоты излучения стабилизированного одночастотного гелий-неонового лазера осуществляется с ис-

Таблица 2. Технические характеристики лазерного интерференционного измерителя наноперемещений

Диапазон линейных перемещений	1 нм–10 мм
Дискретность отсчета	0,1 нм
Погрешность измерений перемещений	0,5–3 нм
Диапазон допустимых скоростей перемещений объекта	0–3 мм/с
Время преобразования	10 мкс
Масса оптико-механического блока	7,5 кг
Масса электронно-фазометрической системы	3,0 кг

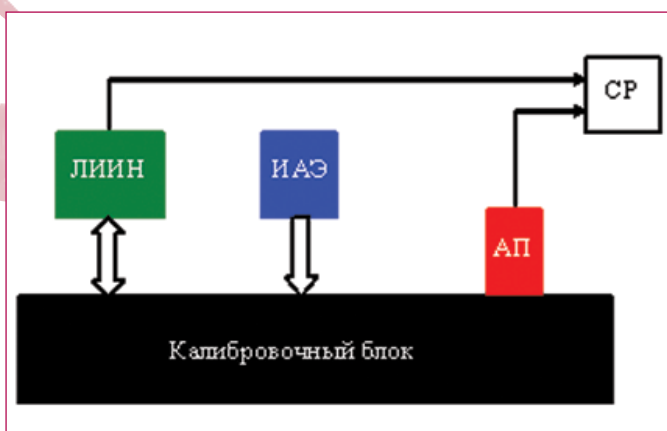


Рис.2 ЛИИН – лазерный интерференционный измеритель наноперемещений; ИАЭ – источник акустической эмиссии; АП – калибруемый акустический преобразователь; СР – система регистрации

пользованием акустооптических модуляторов. В результате формируются два пучка, амплитудно-модулированных слегка различающимися частотами. В результате интерференции таких пучков возникает нестационарная интерференционная картина, детектируемая фотоприемным устройством. Обработка полученной информации производится в специализированной электронно-фазометрической системе (ЭФС). Базовое программное обеспечение устанавливает связь ЭФС с компьютером и позволяет в режиме диалога осуществлять сбор, обработку и представление измерительных данных в удобном для пользования виде.

Работа ЭФС заключается в измерении и обработке значений УФС в цифровом виде. Для этого проводится масштабно-временное преобразование оптического сигнала непрерывного лазерного излучения с последующим выделением в радиодиапазоне информативного параметра – значения угла фазового сдвига, измеряемого ЭФС. Сигналы разностной и опорной частот подаются на дискриминатор фазы и умножитель дискретности, где формируется временной интервал, пропорциональный УФС. Полученный сигнал в ЭФС проходит функциональное преобразование типа “интервал времени – цифровой код”. Такое измерение проводится для каждого периода разностной частоты. При работе в буферизированном режиме данные хранятся в буфере до пересылки в компьютер, обеспечивающий управление процессом измерений. Более подробное описание конструкции и работы ЛИИН представлено в [5].

На практике для научных и производственно-технических работ наиболее широко используются лазерные цифровые фазометры [6]. Это связано с тем, что гелий-неоновые лазеры являются наиболее широко распространенными источниками излучения со стабильными и хорошо воспроизводимыми параметрами.

В табл.2 представлены основные технические характеристики лазерного интерференционного измерителя наноперемещений на основе методов лазерной интерферометрии-фазометрии.



Рис.3 Серийно выпускаемые в России преобразователи акустической эмиссии типа GT200

Экспериментальные исследования продемонстрировали возможность использования ЛИИН для метрологического обеспечения измерителей наносмещения поверхности объекта – первичных преобразователей АЭ, используемых в акустоэмиссионных системах технической диагностики и неразрушающего контроля.

КАЛИБРОВКА ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

На рис.2 представлена схема калибровки испытуемого акустоэлектрического преобразователя. Источник акустической эмиссии возбуждает калибровочный блок, колебания которого регистрируются калибруемым акустическим преобразователем и лазерным интерференционным измерителем наноперемещений. Система регистрации обрабатывает получаемую от АП и лазерного интерферометра информацию и формирует величину коэффициента преобразования “смещение – электрический сигнал”. Меняя частоту ИАЭ, удастся получить амплитудно-частотную характеристику АП.

Для примера приведем параметры калибровки одного из серийно выпускаемых в России преобразователей АЭ типа GT200 (рис.3). На рис.4 приведена амплитудно-частотная характеристика такого преобразователя.

Максимальный коэффициент электроакустического преобразования составляет 0,017 В/нм на частоте 175 кГц, что позволяет с его помощью регистрировать возникновение и развитие дефектов в конструкциях на первых этапах их образования, когда размеры дефектов соизмеримы с расстояниями между атомами в твердом теле. На метод калибровки АП получен патент [7], а сам метод аттестован [8].

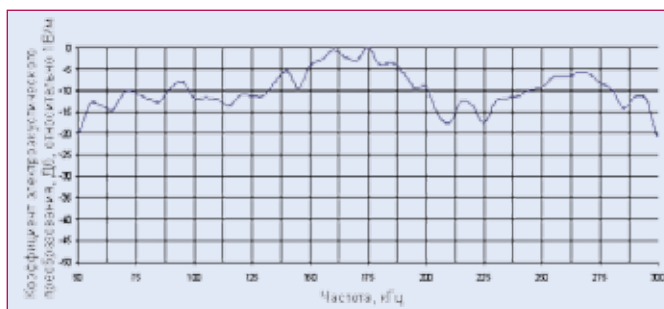


Рис.4 Амплитудно-частотная характеристика серийно выпускаемого преобразователя АЭ типа GT200, измеренная по описанному методу



Рис.5 Схема передачи размера единицы длины в нанодиапазон для систем сканирования и позиционирования

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АКУСТО-ЭМИССИОННОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

Метрологическое обеспечение измерений АЭ основано на концепции метрологии линейных измерений нанометрового диапазона для систем сканирования и позиционирования, обеспечивающей единство линейных измерений в нанометровом диапазоне в России. Она отличается от концепции [9] для систем измерения линейных размеров в нанодиапазоне и включает в себя:

- материальный носитель Первичного эталона длины – метр;
- измеритель наноперемещений на основе лазерного интерферометра-фазометра;
- аттестованные методики калибровки приборов, расположенных у потребителя.

Структурная схема передачи размера единицы длины в нанодиапазон для систем сканирования и позиционирования, представленная на рис.5, демонстрирует связи отдельных элементов концепции друг с другом.

В основе этой схемы лежит Первичный эталон единицы длины – метр. Материальный носитель такого эталона – длина волны излучения He-Ne/I₂-лазера, стабилизированного по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде. Параметры его излучения составляют:

$$\nu = 473612214705 \text{ кГц}, \quad \gamma = 632,99139822 \text{ нм.}$$

Первичный эталон, реализующий этот физический принцип, обеспечивает воспроизведение единицы длины – метра с абсолютной погрешностью 0,02 нм.

Связь лазерного интерференционного измерителя наноперемещений с первичным эталоном осуществляется тем, что ЛИИН создан на основе He-Ne-лазера, являющегося материальным носителем эталона длины – метра.

Объектом измерения, расположенным у потребителя, является АП, калибровка которого осуществляется в соответствии с аттестованной методикой [8].

В целом следует подчеркнуть, что представленная система калибровки акустоэмиссионных датчиков, основанная на применении последних достижений нанометрологии, позволяет проводить неразрушающую диагностику сложных технических объектов в процессе их эксплуатации. Это в свою очередь обеспечивает техническую и экологическую безопасность работы таких объектов. Система получила широкое распространение (рис.6).



Рис.6 Расположение предприятий-заказчиков поверки (калибровки) систем неразрушающего контроля на территории России и ближнего зарубежья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валиев К.А. Исследования в области квантовых технологий в информатике и метрологии. – Вестник РАН, 2003, т. 73, № 5, с. 400–405.
2. Лякишев Н.П. Нанокристаллические структуры – новое направление развития конструкционных материалов. – Вестник РАН, 2003, т. 73, № 5, с. 422–425.
3. Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. В кн.: Неразрушающий контроль. Справочник. / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005, т. 7, кн. 1.
4. Клюев В.В., Матвеев В.И. Современные возможности нанодиагностики. – Контроль. Диагностика, 2009, № 4, с. 18–20.
5. Дарзбек С.А., Желкобаев Ж., Календин В.В., Новиков Ю.А. Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений. – Труды ИОФАН, 2006, т. 62, с. 14–35.
6. Григорьев В.А., Желкобаев Ж., Календин В.В., Кухтевич В.И., Супьян В.Я., Фролов Г.Ф., Троцишин И.В. Фазометр оптического диапазона. // Авторское свидетельство № 1411572, 1988 г.
7. Владимиров Б.Г., Желкобаев Ж., Календин В.В., Несмеянов С.С., Тодуа П.А. Способ калибровки преобразователей акустической эмиссии и устройство для его реализации. // Патент № 2321849. 2008 г.
8. РД 03-300-99 “Требования к преобразователям акустической эмиссии, используемым для контроля опасных производственных объектов”, 1999.
9. Гавриленко В.П., Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Реализация нанометры в России. – Наноиндустрия, 2009, № 4, с. 36–42.