

тральным составляющим ЭМС. Выделенные на рис. 1 стрелками частоты являются определяющими для выявления местоположения дефекта. Изменение размеров дефекта при неизменных размерах образца приводит к появлению высокочастотных спектральных составляющих ЭМС.

Таким образом, в результате математического и физического моделирования установлено соответствие амплитуд электромагнитных откликов на определенное расчетным путем распределение во времени и пространстве механических напряжений, возникающих в дефектной системе при распространении акустического импульса. Показано, что параметры электромагнитных сигналов отображают распределение параметров возбуждающего акустического импульса в разных частях объема контролируемого образца, на которое оказывает влияние соотношение акустического импеданса материалов образца и дефекта. Кроме того, по спектрам ЭМС возможно определение местонахождения диэлектрического дефекта в диэлектрическом материале. Приложение электрического поля существенно улучшает соотношение амплитуды ЭМС/шум.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант 19-19-00178.

Список литературы

1. Клюев В. В. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. М.: Машиностроение, 2008.
2. Bepalko A.A., Shtirts V.A., Fedotov P.I. et al. Modelling of Infrared Glow in Rock Holes // Journal of Nondestructive Evaluation. 2019. 38: 31. URL: <https://doi.org/10.1007/s10921-019-0570-0>

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОРТАТИВНЫХ ТВЕРДОМЕРОВ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ

Аширова А.Д.¹, Гоголинский К.В.¹, Никазов А.А.²

¹Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,

²ООО «КОНСТАНТА», Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: nanoscan@yandex.ru

Введение

Создание современных высокоэффективных машин и механизмов неразрывно связано с появлением новых конструкционных материалов и технологий их получения, в том числе технологий нанесения покрытий и модификации поверхностных слоев для достижения новых функциональных возможностей. Одной из ключевых задач современного материаловедения

дения остается повышение стойкости к изнашиванию. Для повышения износостойкости металлических сплавов используют различные методы модификации контактных поверхностей и нанесение покрытий.

Одним из ключевых параметров защитных покрытий и упрочняющих поверхностных слоев являются механические свойства, в т.ч. упругие и пластические характеристики, а также параметры твердости. Классические методы определения основных механических параметров твердых тел на основе экспериментальной зависимости напряжение-деформация неприменимы для покрытий и упрочненных приповерхностных слоев, т.к. требует изготовления специальных образцов для проведения испытаний. Для контроля локальных механических свойств поверхности материалов и изделий традиционно применяются статические методы измерения твердости (Бринелля, Виккерса и Роквелла), которые в силу своих особенностей неприменимы при измерении свойств покрытий и приповерхностных слоев в труднодоступных местах, на поверхности крупногабаритных деталей и деталей сложной геометрии. Эти ограничения привели к распространению различных портативных твердомеров [1].

Особенности измерения твердости покрытий

При измерении твердости тонких покрытий и приповерхностных слоев требуется учитывать 2 фактора: 1. Влияние основания под покрытием или исходного материала под упрочненным слоем на результат измерения. 2. Вероятность внедрения индентора до подложки и, как следствие, нарушение целостности покрытия. Влияние основания связано с тем, что пластическая деформация материала под индентором распространяется на расстояние, существенно большее глубины внедрения индентора. В соответствии с большинством известных расчетно-аналитических моделей контактной механики для внедрения жесткого индентора в упруго-пластическое полупространство [2] размер пластически деформированной области под индентором зависит от формы индентора, соотношении диаметра контакта и глубины внедрения, а также соотношения модуля Юнга и предела текучести материала при сжатии. На распространение упруго-пластических деформаций под индентором в покрытии, лежащем на основании, влияет также соотношение их механических свойств (мягкое основание/твердое покрытие или твердое основание/мягкое покрытие).

Таким образом, естественными ограничениями на допустимую толщину измеряемого покрытия являются его твердость (чем она выше, тем более тонкое покрытие может быть измерено) и нагрузка на индентор (чем она меньше, тем меньше внедрение в поверхность). Поэтому для измерения твердости тонких покрытий в лабораторных условиях используется метод микротвердости по Виккерсу [3], нагрузки в котором лежат в диапазоне от 10 до 200 г. Однако использование малых нагрузок приводит к большому

разбросу показаний на шероховатых поверхностях. Это еще в большей степени относится к портативным приборам, т.к. на их показания, кроме качества поверхности, критически влияют условия испытания и квалификация оператора. Для недопущения влияния основания на результат измерения твердости покрытия в научной литературе и стандартах на методы измерения твердости рекомендуется соблюдать эмпирическое правило: глубина внедрения индентора в твердое покрытие на мягком основании не должна превышать $1/10$ толщины покрытия, однако в некоторых источниках допускается соотношение $1/3$. Для большинства распространенных типов инденторов данное требование можно переформулировать так: размер отпечатка (диаметр для шара/конуса или диагональ для пирамиды) не должны превышать толщины покрытия.

Результаты сравнения различных типов преобразователей

Были проанализированы возможности измерения твердости покрытий портативными твердомерами с разными принципами действия [1]: динамические твердомеры по шкалам Либа, ультразвуковые твердомеры, основанные на методе контактного импеданса и портативные твердомеры Роквелла.

1. В стандартах на **метод динамической твердости Либа** [4] установлены требования к минимальной массе и толщине стенок изделия. Для преобразователей по шкале С с наименьшей из стандартизованных шкал энергией боя минимальные масса и толщина образца, закрепленного (притертого) на жесткой массивной опоре, составляет 0,5 кг и 1 мм. По тем же данным минимальный диаметр отпечатка для шкалы С на самых твердых металлах превышает 300 мкм, что не позволяет рекомендовать этот тип приборов для контроля свойств покрытий.

2. **Ультразвуковой метод контактного импеданса (UCI)** [5] также имеет ограничение по толщине и массе образца (3 мм и 300 г для закрепленных образцов). Минимальная нагрузка для серийных твердомеров составляет 10 Н. В качестве индентора, как правило, используется пирамида Виккерса.

3. **В портативном твердомере Роквелла (Portable Rockwell)** [6] преднапряжение составляет 1 кг, основная нагрузка – 5 кг. В качестве индентора используется алмазный конус с углом 110 градусов.

На основании приведенных данных был произведен расчет размеров отпечатков для твердомеров UCI и PortableRockwell для образцов с твердостью 500, 800 1000 единиц по шкале Виккерса (HV). Расчет размеров отпечатков был произведен исходя из соотношения среднего контактного давления под индентором p и значения твердости HV $p = 1,07HV$ [2] и площади проекции контакта индентора с поверхностью $S = F/p$, где F – прикладываемая нагрузка (табл. 1).

1. Расчет параметров отпечатка и оценка минимальной требуемой толщины покрытия

Тип преобразователя	Прикладываемая нагрузка F , Н	Числа твердости, HV	Площадь отпечатка S , мкм ²	Диагональ/ диаметр отпечатка, мкм	Глубина внедрения h , мкм	Минимальная толщина покрытия, мкм
Ультразвуковой (UCI)	10	500	$1,87 \cdot 10^3$	61	8,7	60
		800	$1,17 \cdot 10^3$	48	6,9	50
		1000	$0,94 \cdot 10^3$	43	6,2	40
Портативный Роквелл (PR)	60	500	$11,21 \cdot 10^3$	119	50,1	150
		800	$7,01 \cdot 10^3$	94	39,6	120
		1000	$5,61 \cdot 10^3$	84	35,5	100

Выводы

Приведена оценка минимальных значений толщин покрытий, твердость которых может быть измерена портативными твердомерами без влияния свойств основания (подложки) на результат измерений. Данная оценка является весьма приближительной, реальные значения зависят от свойств контролируемых образцов и условий испытаний и требуют численного моделирования или экспериментальной проверки. Однако полученные результаты подтверждают возможность применения портативных твердомеров для контроля защитных покрытий, в том числе гальванических на основе хрома, химически осажденного никеля, а также различных керамических и твердосплавных покрытий.

Список литературы

1. Gogolinskii K., Syasko V., Umanskii A., Nikazov A., Bobkova T. Mechanical properties measurements with portable hardness testers: advantages, limitations, prospects // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1384:012012.
2. Fischer-Cripps A. C. Introduction to Contact Mechanics. 2nd ed. US: Springer, 2007. 226 p.
3. ГОСТ 9450–76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников
4. ISO 16859-1:2015(E). Metallic materials – Leeb hardness test. Part 1: Test method.
5. ASTM A1038-19, Standard Test Method for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method.
6. DIN 50157-1. Metallic materials – Hardness testing with portable measuring instruments operating with mechanical penetration depth. Part 1: Test method.