



XXI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

28 ФЕВРАЛЯ - 2 МАРТА 2017



СБОРНИК ТРУДОВ

Целью выполнения работ является выявление несоответствий состояния СМЗ требованиям проектной и нормативно-технической документации, в том числе – введенной за период эксплуатации объектов, ранжирование их по степени опасности и разработка мероприятий по их устранению.

Для планирования устранения несоответствий предложено проводить их классификацию по двум критериям:

- критичность влияния несоответствия на электробезопасность объекта;
- причина возникновения несоответствия.

Классификация по первому критерию требуется в связи с необходимостью определения сроков устранения несоответствий. Классификация по второму критерию требуется для выявления причин появления несоответствий и принятия мер для их исключения в дальнейшем.

По первому и второму критериям выделено по три группы несоответствий. В рамках этих групп несоответствия ранжированы и построен интегральный критерий для сравнения систем заземления и молниезащиты объектов и построения плана мероприятий по устранению несоответствий.

Проведенный анализ позволяет обоснованно назначать сроки устранения несоответствий СМЗ требованиям проектной и нормативно-технической документации, своевременно выявлять несоответствия и планировать их устранение, совершенствовать требования к качеству строительства и эксплуатации объектов магистральных нефтепродуктопроводов, тем самым повышая эксплуатационную надежность промышленно опасных объектов

ИЗМЕРЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТОДОМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ. МЕТОДИЧЕСКИЕ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ. ОЦЕНКА ФУНКЦИИ ФОРМЫ ИНДЕНТОРА

Сясько В. А., Уманский А. С., Кондратьев А. В.

(ООО «Константа», Санкт-Петербург, Россия)

Введение

Измерение механических свойств на масштабе от десятков микрометров до единиц нанометров представляет серьезную научно-техническую проблему. В настоящее время подобные измерения переходят из области научных исследований в сферу технологического контроля. Наибольшее развитие в этом направлении получил метод инструментального индентирования. В 2012 г. в Российской Федерации принят стандарт на метод измерения (ГОСТ Р 8.748–2011), а в 2015 г. утвержден Государственный первичный эталон твердости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования (ГЭТ 211–2014). Однако, измерения механических свойств тонких покрытий, пленок и

модифицированных слоев осложнены влиянием большого количества независимых источников неопределенности результатов измерений.

Особенности метода инструментального индентирования

В основе метода лежит непрерывное измерение нагрузки и перемещения индентора в процессе индентирования и построение зависимости приложенной силы от внедрения – диаграммы нагрузка-внедрение.

Основными величинами, измеряемыми методом инструментального индентирования являются модуль упругости E и твердость H по шкалам Мартенса и индентирования.

Вычисление E и H по методу инструментального индентирования осложнено наличием большого количества источников неопределенности результатов измерений, которые можно условно разделить на три категории:

- 1) аппаратные, связанные непосредственно с измерительной установкой и параметрами ее калибровки;
- 2) методические, связанные с допущениями в используемой методике расчета;
- 3) связанные с физико-механическими свойствами исследуемого материала и внешними факторами.

Влияние большинства источников неопределенности, связанных с получением калибровочных коэффициентов или вариацией параметров внешней среды, можно минимизировать при калибровке установки или модернизацией аппаратной части и подготовкой образцов.

Одним из основных источников неопределенности результатов измерений является неидеальностью геометрии индентора. При этом корректность определения функции формы индентора $A(h)$ определяет точность расчета значений E и H материала, так как любой реальный индентор по мере изменения масштаба наблюдения (уменьшения глубины его внедрения) следует рассматривать как пирамиду, затем сферу и затем как плоский штамп. Для минимизации неопределенности результатов измерений на малых глубинах индентирования необходимо тщательно подходить к оценке $A(h)$.

Уменьшить влияние независимых источников неопределенности результатов измерений можно осуществляя калибровку твердомеров и косвенную оценку $A(h)$ на стандартных образцах свойств, для которых должно быть обеспечено постоянство механических свойств вне зависимости от h во всем диапазоне измерений E и H в рамках класса материалов, свойства которых предполагается измерять.

Метод косвенной оценки $A(h)$ не требует получения изображения индентора или его отпечатков, и заключается в проведении серии измерений по методу инструментального индентирования на стандартном образце свойств.

Первым шагом является проведение серии индентирований в эталонный материал (стандартный образец свойств) в рабочем диапазоне нагрузок,

после чего проводится обсчет этой серии и построение $A(h)$ по результатам решения обратной задачи, задаваясь параметрами эталонного материала.

Получаемая зависимость аппроксимируется любой монотонной непрерывной функцией, после чего с использованием графического анализа определяется, как отличается полученная $A(h)$ от идеальной вида

$$A(h) = Ah^2 + C. \quad (1)$$

Если большую часть $A(h)$ удастся описать уравнением вида (1), то параметры A и C необходимо верифицировать методом наименьших квадратов. Как правило, данный участок соответствует области больших нагрузок, вызывающих большее внедрение индентора. Область меньших нагрузок можно аппроксимировать иной зависимостью, например функцией формы сферы, с соблюдением указанных выше условий.

Для экспериментального подтверждения работоспособности данного подхода была произведена серия индентов в эталонный материал (плавленый кварц $H = 9,5 \pm 0,5$ ГПа и $E = 72 \pm 2$ ГПа) в диапазоне нагрузок от 1 до 150 мН, с шестью индентами на каждое значение нагрузки. Затем был проведен обсчет этой серии и построена $A(h)$. Получившаяся зависимость была аппроксимирована кусочно-непрерывной функцией с точкой склейки на $h = 300$ нм.

Для верификации была проведена серия измерений E и H с применением скорректированной $A(h)$ на образце кремния Si(100) и образце плавленого кварца. Результаты измерений приведены в табл. 1 и на рис. 1 и 2.

1. Результаты измерений E и H

Материал	H , ГПа	СКО	E , ГПа	СКО
Плавленый кварц	9,3	0,4	70,2	3,1
Si(100)	12,8	0,7	160,9	7,2

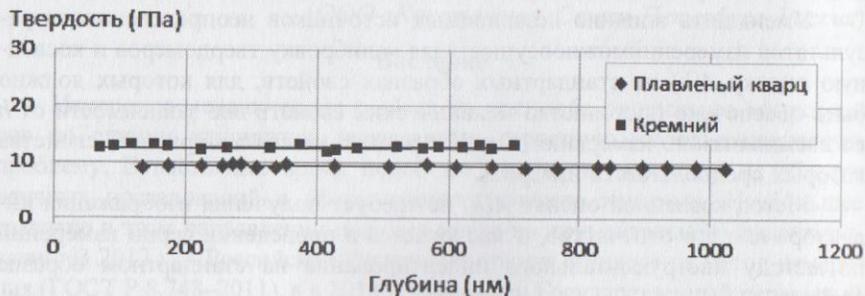


Рис. 1. Зависимость результатов измерения H от глубины индентирования после корректировки $A(h)$

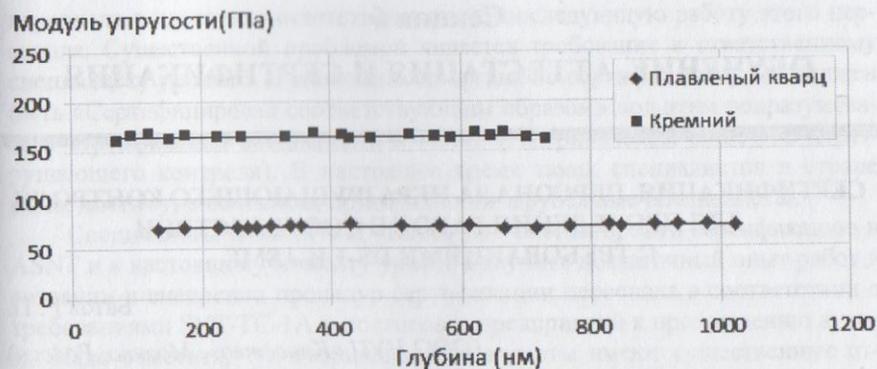


Рис. 2. Зависимость результатов измерения E от глубины индентирования после корректировки $A(h)$

Вывод

Выполнение процедуры коррекции формы индентора по предложенному алгоритму позволяет учесть отклонение геометрии индентора от идеальной пирамиды Берковича (наличие закругления при вершине), и обеспечить практическую независимость результатов измерения механических свойств материалов методом инструментального индентирования в диапазоне h от десятков нанометров до 1 мкм, что подтверждается полученными в ходе эксперимента результатами (рис. 1 и 2), и позволяет проводить измерения твердости покрытий и модифицированных слоев в диапазоне $h < 300$ мкм.