

На правах рукописи

КОНДРАТЬЕВ Артем Витальевич



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА
ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ И
ПРОГРАМНО-АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ
ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ В
МИКРО- И НАНОМЕТРОВЫХ ДИАПАЗОНАХ**

*Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург - 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор

Потапов Анатолий Иванович

Официальные оппоненты:

Федоров Алексей Владимирович

доктор технических наук, Учреждение науки «Инженерно-конструкторский центр сопровождения эксплуатации космической техники», генеральный директор.

Алексеев Константин Владимирович

кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, кафедра контроля качества и испытаний вооружения, военной и специальной техники, заместитель начальника.

Ведущая организация -

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

Защита диссертации состоится 29 сентября 2017 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.07 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. №1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан «20» июля 2017 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Технологическое развитие в области машиностроения, металлообработки, энергетики, добывающей промышленности приводит к все более широкому применению упрочняющих и функциональных покрытий, тонких пленок, различных технологий модификации поверхности.

Широкий спектр существующих технологий нанесения покрытий и применяемых материалов обусловлен высокими требованиями, предъявляемыми к покрытиям.

Эффективность использования покрытий оценивается степенью защиты от воздействия циклических и кратковременных нагрузок, высоких и низких температур, агрессивных сред, представляющих комплекс функциональных свойств (стойкость к коррозии, износостойкость, коэффициент трения и т.д.), которые обеспечиваются при нанесении покрытия и подтверждаются средствами технологического контроля.

Одними из важнейших характеристик материалов являются их механические свойства, определяющие потребительские и эксплуатационные характеристики материалов и являющиеся косвенными показателями их качества. Обобщенной характеристикой механических свойств материалов является твердость. Измерения твердости широко распространены в промышленности при контроле технологических процессов, определении эксплуатационных характеристик изделий, выборе режимов механической обработки и типа режущего инструмента.

Совершенствование технологий нанесения покрытий и расширение спектра их применения приводит к все более частому использованию особо тонких покрытий, пленок и модифицированных слоев. Их толщина может составлять от десятков нанометров до единиц микрометров. Измерение и контроль механических свойств в микро- и нанометровом диапазоне толщин представляет серьезную научно-техническую проблему.

В последние годы был достигнут значительный прогресс в изучении механических свойств материалов в микро- и нанометровом диапазонах. Данные достижения стали возможными благодаря научно-техническому и методическому развитию средств твердометрии и возникновению метода инструментального индентирования, позволившего обеспечить проведение измерений в области микро- и нанометровых механических деформаций.

Значительный вклад в развитие метода инструментального индентирования внесли отечественные и зарубежные ученые и специалисты И. Снеддон, Н.А. Стилвел, Д. Табор, С.И. Булычев, В.П. Алехин, М.Х. Шорошов, М.Ф. Дорнер, В.Д. Никс, В.С. Оливер, Г.М. Фарр, Ю.И. Головин.

Анализ показывает, что для решения задач измерения твердости покрытий особо малой толщины, тонких пленок и модифицированных слоев представляется возможным использование метода инструментального индентирования, основанного на непрерывном измерении нагрузки и перемещения индентора в процессе индентирования, построения зависимости приложенной силы от внедрения, и анализа полученных данных для определения твердости и модуля упругости материалов при нагрузках от единиц микроньютон и более при глубинах внедрения индентора от единиц нанометров. Достоинством использования метода инструментального индентирования является высокая локальность и прецизионность измерений, отсутствие необходимости оценки размеров восстановленного отпечатка оптическими методами и возможность автоматизации процесса измерений.

Однако, не смотря на развитие метрологического обеспечения метода инструментального индентирования и активное совершенствование существующих моделей твердомеров, реализующих метод, существует ряд методических источников неопределенности результатов измерений механических свойств. Поэтому задача гарантированного обеспечения требуемой неопределенности результатов измерений механических свойств в рассматриваемых диапазонах по-прежнему остается актуальной.

Цель работы: повышение точности и информативности при измерении твердости и модуля упругости особо тонких покрытий и пленок в микро- и нанометровом диапазоне путем разработки и оптимизации методик измерений и обработки информации с учетом влияния мешающих параметров.

Идея работы: калибровка приборов, реализующих метод инструментального индентирования, на стандартных образцах свойств, а также проведение измерений с учетом корректировки функции формы индентора в микро- и нанометровом диапазоне позволяет эффективно осуществлять измерение твердости покрытий и тонких пленок с заданной точностью и учитывать влияние мешающих параметров.

Задачи исследований:

– Анализ существующих методик и программно-аппаратных средств приборов, реализующих метод инструментального индентирования и решающих задачи измерения твердости покрытий;

– Теоретическое обоснование применимости метода инструментального индентирования для решения рассматриваемых задач и проведение анализа контролируемых и мешающих параметров;

– Разработка алгоритма оценки функции формы индентора и методики проведения измерений с ее учетом для уменьшения неопределенности результатов измерения механических свойств покрытий в микро- и нанометровом диапазоне;

– Разработка предложений по корректировке поверочной схемы путем введения стандартных образцов свойств и методик их применения для улучшения метрологических характеристик твердомеров во всем диапазоне измерения механических свойств;

– Внедрение разработанных алгоритмов и методик калибровки твердомеров при производстве, их поверки и проведении измерений механических свойств покрытий на предприятиях.

Научная новизна работы:

1. Разработаны теоретические положения, на основании которых составлен алгоритм косвенной оценки функции формы индентора, позволяющий уменьшить влияние неидеальности геомет-

рии индентора при вершине на результаты измерений при микро- и нанометровых глубинах индентирования.

2. Выполнен теоретический и экспериментальный анализ измерения твердости покрытий и модуля упругости в микро- и нанометровом диапазоне с использованием методики калибровки на стандартных образцах свойств.

3. На основании теоретического анализа показана необходимость и возможность внесения стандартных образцов свойств в Государственную поверочную схему для средств измерений по шкалам Мартенса и шкалам индентирования, что обеспечит уменьшение неопределенности результатов измерений при калибровке, поверке и применении.

Методы исследования

Теоретические исследования построены на использовании основных положений механики контактного взаимодействия. используемый математический аппарат содержит элементы линейной алгебры и математической статистики. Экспериментальные исследования включали в себя натурные испытания на образцах различной структуры и твердости.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в разработке и апробации:

1. Методики калибровки твердомеров, реализующих метод инструментального индентирования в микро- и нанометровом диапазоне;

2. Алгоритма косвенной оценки функции формы индентора;

3. Линейки стандартных образцов свойств, обеспечивающих требуемую неопределенность результатов измерений в микро- и нанометровом диапазоне при косвенной оценке функции формы индентора;

4. Проекта поверочной схемы для средств измерений твердости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается теоретически и экспериментально обоснованными физико-математическими моделями, ис-

пользуемыми при расчетах измеряемых величин, и большим объемом экспериментальных данных.

Личный вклад автора:

- разработана методика поэлементной калибровки твердометров, реализующих метод инструментального индентирования;
- разработан алгоритм косвенной оценки функции формы индентора;
- предложена методика расчета расширенной неопределенности результатов измерений;
- предложен проект поверочной схемы для средств измерений твердости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования;
- проведены эксперименты, на основании которых разработан алгоритм косвенной оценки функции формы индентора и подтверждена необходимость внесения стандартных образцов свойств в поверочную схему для средств измерений твердости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы доложены на III-й Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.); IV-й Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.); XXI-й Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике (г. Москва, 2017 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ, 3 из них – в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем диссертации: 130 страниц печатного текста и список используемых источников из 66 наименований. В основной состав диссертации входят 10 таблиц и 61 рисунок.

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель, задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведен анализ типов покрытий и их параметров, а также методов контроля их твердости. На основании анализа для проведения исследования выбран метод инструментального индентирования, рассмотрены особенности приборов, реализующих метод инструментального индентирования. Сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе приведено обоснование метода инструментального индентирования и анализ контролируемых параметров и источников неопределенности результатов измерений.

В третьей главе представлен анализ методов оценки геометрии индентора. Предложен алгоритм косвенной оценки функции формы индентора и приведены результаты его экспериментальной реализации.

В четвертой главе приведен анализ метрологического обеспечения метода инструментального индентирования, рассмотрена идея перехода от стандартных мер твердости к стандартным образцам свойств. Предложен алгоритм поэлементной поверки твердомеров и расчета расширенной неопределенности результатов измерений.

В пятой главе приведены основные результаты экспериментов после применения алгоритма косвенной оценки функции формы индентора.

В заключении представлены обобщенные выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решенными задачами.

По результатам проведенных исследований на защиту выносятся следующие положения:

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Учет реальной формы индентора косвенными методами в микро- и нанометровых диапазонах с использованием гомогенных и изотропных стандартных образцов позволяет умень-

шить неопределенность результатов измерений физико-механических свойств металлических изделий и покрытий, вносимых геометрией индентора.

Метод косвенного определения $A_p(h)$ не требует получения изображения индентора или его отпечатков, и заключается в проведении серии измерений по методу инструментального индентирования на эталонном материале, в качестве таких материалов, как правило, используются поликарбонат, сапфир и плавленый кварц. Для реализации данного подхода важно точно знать E и коэффициенты Пуассона, а также твердость эталонного материала и индентора. Кроме того, должно выполняться требование изотропии, иными словами отсутствия зависимости H и E по глубине.

Первым шагом является проведение серии индентирований в эталонный материал в рабочем диапазоне нагрузок, после необходимо провести обсчет этой серии и построить для нее $A_p(h)$ по результатам решения обратной задачи, задавшись параметрами эталонного материала.

Получаемую зависимость следует аппроксимировать любой монотонной непрерывной функцией. Функция может быть кусочная, но в точке сшивки участков должны выполняться условия:

- обе функции формы принимают одинаковые значения;
- точка должна быть единственной в интервале $h_0 \in [0 \dots +\infty]$.

С использованием графического анализа определяется как отличается полученная $A_p(h)$ от идеального вида:

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

При этом допускается параллельный перенос оси A_p , обусловленный тем, что начало координат совпадает с вершиной пирамиды индентора.

Если большую часть $A_p(h)$ 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 за-

висимостью, например, функцией формы сферы, с соблюдением указанных выше условий.

В случае, если функцию невозможно описать функцией вида (1), ее можно заменить таблицей значений и соответствующим интерполяционным полиномом.

Для подтверждения работоспособности вышеизложенного алгоритма с использованием микро/нано твердомера «Константа МНТ» был произведен эксперимент в условиях:

- Нагрузка: 1, 2, 3, 5, 7, 9, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150 мН;

- Количество измерений на каждое значение нагрузки: 6;

- Температура окружающей среды: 24 ± 3 °С;

- Относительная влажность: 47 %;

- Испытуемый материал: плавленный кварц с параметрами $H = (9,5 \pm 0,5)$ ГПа и $E = (72 \pm 2)$ ГПа;

- Поверка испытуемого материала: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Германия.

Полученные после серии индентирований данные были рассчитаны с применением идеальной функции формы индентора Берковича $A_p = 23,96 \cdot h^2$, результаты представлены на графиках зависимости H и E от глубины индентирования (Рисунок 1, 2).

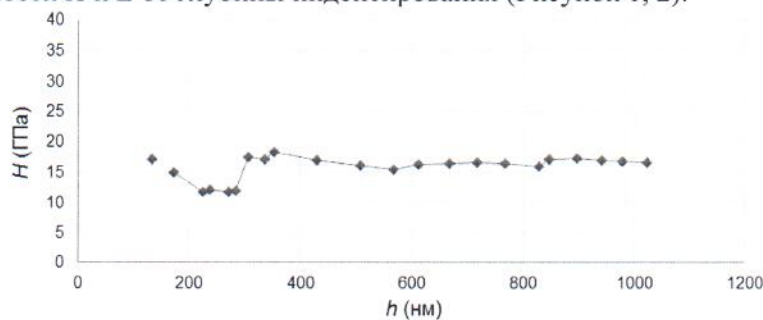


Рисунок 1 - Зависимость твердости от глубины индентирования до коррекции

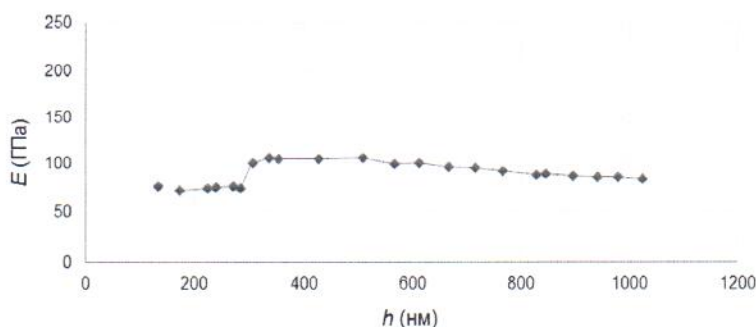


Рисунок 2 - Зависимость модуля упругости от глубины индентирования до коррекции

Как видно, значения H и E значительно завышены относительно параметров образца: 15,8 ГПа и 89 ГПа соответственно. В области $h = 0 \dots 300$ нм значения H и E отличаются от аналогичных на глубинах $h = 0 \dots 1050$ нм. Данный факт противоречит тому, что у плавленого кварца значения твердости и модуля упругости не меняются в зависимости от глубины индентирования. Все это говорит об отклонении геометрии индентора от идеальной.

Для визуализации отклонения в одной системе координат были построены две функции формы – идеального индентора Берковича и реального индентора (Рисунок 3). Как видно из графика, форма установленного индентора отличается от идеального индентора Берковича и имеет более тупой угол при вершине (площадь контакта реального индентора больше при одинаковых глубинах индентирования). Для учета отклонения, $A_p(h)$ была скорректирована согласно вышеизложенному алгоритму. Получившаяся зависимость была аппроксимирована кусочно-непрерывной функцией с точкой склейки на глубине 300 нм. После получения скорректированной $A_p(h)$ измерения повторили на образцах плавленого кварца. Результаты измерений приведены в таблице 1. Для полученных измерений были построены зависимости H и E от глубины индентирования (Рисунок 4, 5).

Таблица 1 - Результаты измерений с применением скорректированной $A_p(h)$

Материал	Твердость, ГПа	СКО	Модуль упругости, ГПа	СКО
Плавленый кварц	9,3	0,6	70,2	2,9

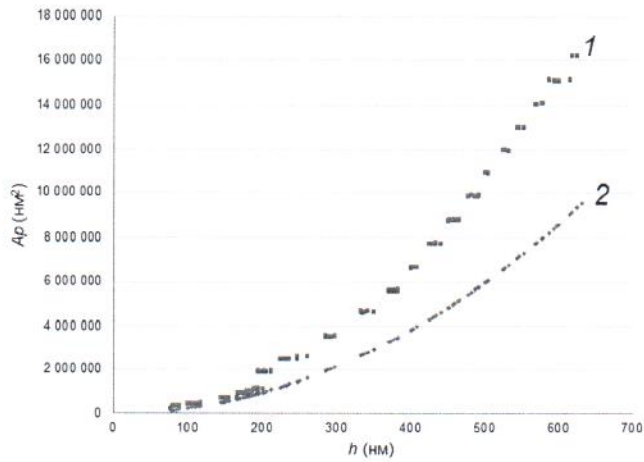


Рисунок 3 - Изображение функции формы реального индентора (1) и идеального индентора Берковича (2)

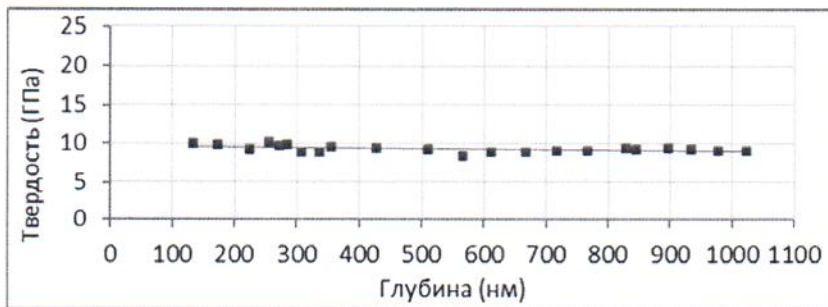


Рисунок 4 - Зависимость твердости от глубины индентирования

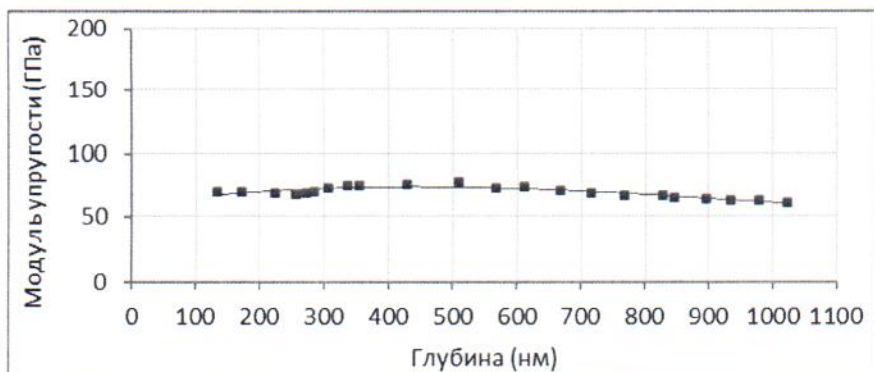


Рисунок 5 - Зависимость модуля упругости от глубины индентирования

В результате измерений физико-механических характеристик плавленого кварца и глубинах индентирования от $h_c = 130$ нм до $h_c = 1050$ нм после коррекции были получены значения твердости и модуля упругости, равные $H = (9,3 \pm 0,6)$ ГПа и $E = (70,2 \pm 3,9)$ ГПа во всем диапазоне глубин индентирования.

Полученные результаты измерений H и E , исходя из построенных зависимостей, не изменяются в зависимости от глубины индентирования при измерениях во всем диапазоне глубин индентирования, что говорит о возможности проведения измерений твердости покрытий и слоев в диапазоне $h_c < 1$ мкм. Выполнение процедуры коррекции формы индентора по предложенному алгоритму позволило учесть отклонение геометрии индентора и закругление индентора при вершине, и понизить влияние функции формы при вычислении физико-механических свойств материалов методом инструментального индентирования.

2. Введение в поверочную схему стандартных образцов свойств обеспечивают уменьшение неопределенности измерения физико-механических свойств покрытий, тонких пленок и модифицированных слоев в микро- и нанометровых диапазонах.

Неопределенность результатов измерений, вносимая методической составляющей и передающаяся по всей метрологической цепи от эталона к средствам измерений, а так же неопределенность вносимая геометрией индентора существенно влияют на результаты измерений методом инструментального индентирования, и при контроле образцов из металлов и сплавов на малых глубинах индентирования на установках, откалиброванных на мерах твердости материалов другого класса, значения твердости и модуля упругости существенно меняются в зависимости от нагрузки, а соответственно и глубины индентирования, что может быть вызвано, как размерными эффектами в области малых глубин индентирования, так и накоплением методической погрешности при определении h_c в процессе передачи единицы твердости от первичного эталона по шкалам Мартенса и шкалам индентирования к конечным средствам измерений.

Для иллюстрации данной закономерности была произведена серия индентирований в металлокерамическое покрытие AlMgB_{14} в диапазоне прикладываемых нагрузок от 1 до 150 мН, и в металлические покрытия TiN , TiAlN в диапазоне прикладываемых нагрузок от 1 до 15 мН. Покрытие AlMgB_{14} толщиной ~ 1100 нм нанесено на кремниевую подложку и закреплено на металлическом основании для увеличения жесткости контакта. Покрытия TiN и TiAlN имеют толщину ~ 800 нм и нанесены на массивное стальное основание.

Для последующих измерений был подготовлен стандартный образец свойств на основе аморфных магнитомягких лент АМАГ200. Для этого были подготовлены ~ 40 аморфных магнитомягких лент, толщиной 20 мкм затем спрессованы и залиты эпоксидной смолой. Полученный шлиф имеет аморфную фазу в зоне 19-22 пластины. Применение системы высокоточного позиционирования позволяет производить измерения в зоне, ограниченной толщиной каждой пластины. Наличие аморфной фазы в лентах позволяет использовать данный материал в качестве стандартного образца свойств металлов.

Для реализации алгоритма косвенной оценки функции формы индентора была проведена серия измерений в образец АМАГ200

со следующими параметрами. В качестве параметров материала, используемых для решения обратной задачи, были приняты значения твердости и модуля упругости, заявленные производителем:

$$H = (13,0 \pm 1,5) \text{ ГПа}, E = (27 \pm 4) \text{ ГПа}.$$

Измерения образцов покрытий AlMgB_{14} , TiN , TiAlN были проведены повторно с аналогичными параметрами сессии, указанными выше. Полученные зависимости твердости и модуля упругости от глубины индентирования покрытия AlMgB_{14} имеют линейный характер в диапазоне глубин от 60 до 450 нм, значения твердости и модуля упругости приведены в сводной таблице 1. Сравнение характеров зависимостей твердости и модуля упругости от глубины индентирования покрытия AlMgB_{14} приведены на рисунках 6 и 7.

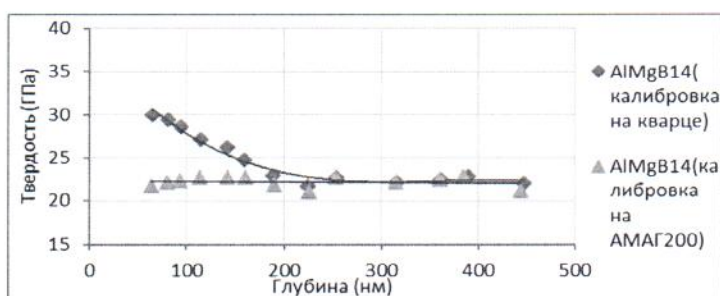


Рисунок 6 - Сравнение зависимостей твердости от глубины индентирования покрытия AlMgB_{14} после калибровки на плавленом кварце и АМАГ200

Зависимости твердости и модуля упругости от глубины индентирования, полученные на образцах покрытий TiN и TiAlN и имеют линейный характер в диапазоне глубин индентирования от 50 до 220 нм. Результаты измерений приведены в сводной таблице 1. Сравнение полученных результатов с результатами, полученными после калибровки на плавленом кварце представлены на рисунках 8 и 9.

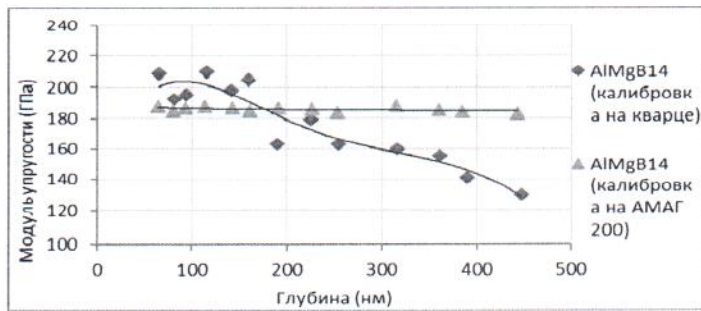


Рисунок 7 - Сравнение зависимостей модуля упругости от глубины инdentирования покрытия AlMgB14 после калибровки на плавленом кварце и АМАГ200

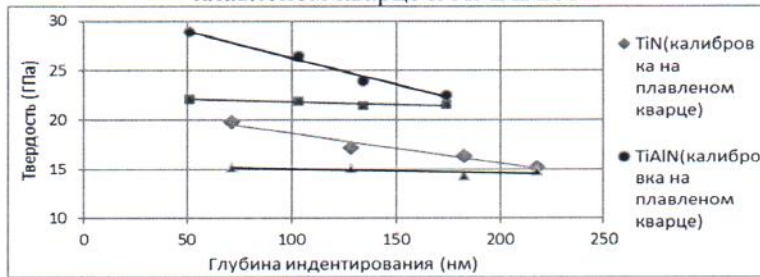


Рисунок 8 - Сравнение зависимостей твердости от глубины инdentирования покрытий TiN и TiAlN после калибровки на кварце и АМАГ200

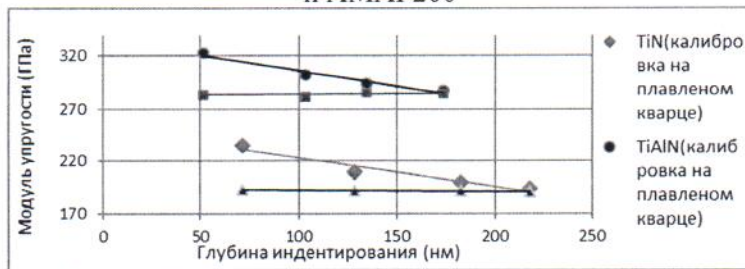


Рисунок 9 - Сравнение зависимостей модуля упругости от глубины инdentирования покрытий TiN и TiAlN после калибровки на кварце и АМАГ200

Полученные в ходе экспериментов значения твердости и модуля упругости приведены в сводной таблице 2.

Таблица 2 – Сводная таблица результатов измерений после калибровки на плавленом кварце и образце АМАГ200

Материал	Твердость, ГПа	СКО	Повторяемость, %	Модуль упругости, ГПа	СКО	Повторяемость, %
Плавленный кварц	9,3	0,5	5	70,2	3,9	5
Si(100)	12,8	0,6	4	160,9	7,5	4
AlMgB ₁₄ (калибровка на плавленом кварце)	23,02	3,6	15	180,5	26,9	15
TiN(калибровка на плавленом кварце)	17,7	1,95	11	208,9	18,02	8
TiAlN(калибровка на плавленом кварце)	25,5	2,8	11	301,5	15,7	5
АМАГ 200	13,4	0,5	3	27,3	0,8	3
AlMgB ₁₄ (калибровка на АМАГ 200)	22,1	1,1	5	185,8	2,9	2

Продолжение таблицы 2

TiN(калибровка на АМАГ 200)	14,9	0,4	3	191,8	5,1	3
TiAlN(калибровка на АМАГ 200)	21,8	0,8	4	283,5	7,3	3

Полученные результаты показали, что переход от использования мер твердости при калибровке и поверке приборов, реализующих метод инструментального индентирования к стандартным образцам свойств является эффективным средством устранения влияния методической составляющей неопределенности результатов измерения, позволяет повысить повторяемость и уменьшить неопределенность результатов измерений при контроле твердости и модуля упругости при малых глубинах индентирования, что особо важно при измерении механических свойств тонких покрытий, пленок и модифицированных слоев. Внесение стандартных образцов свойств в поверочную схему для средств измерений твердости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования может быть эффективным решением в целях обеспечения единства измерений механических свойств методом инструментального индентирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе на основе анализа существующих методов контроля твердости, выполненных теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача – уменьшение неопределенности результатов измерений при контроле твердости тонких покрытий, пленок и модифицированных слоев. На основании проведенных исследований получены следующие научные результаты работы:

1. Обоснована актуальность измерения твердости тонких покрытий, пленок и модифицированных слоев. Проведен анализ известных методов измерения твердости. Обоснована применимость метода инструментального индентирования для измерения твердости выбранного объекта контроля. На основе анализа сформулированы и поставлены задачи исследований.

2. Произведен анализ и структуризация источников неопределенности результатов измерений их взаимосвязь и способы их устранения.

3. Разработаны теоретические положения, на основании которых составлен алгоритм косвенной оценки функции формы индентора, позволяющий уменьшить влияние неидеальности геометрии индентора при вершине на результаты измерений при микро- и нанометровых глубинах индентирования.

4. Выполнен теоретический и экспериментальный анализ измерения твердости покрытий и модуля упругости в микро- и нанометровом диапазоне с использованием методики калибровки на стандартных образцах свойств.

5. Разработан проект поверочной схемы для средств измерений твердости по шкалам Мартенса и шкалам индентирования.

6. Разработан проект расчета расширенной неопределенности результатов измерений, учитывающий внесение стандартных образцов свойств в поверочную схему для средств измерений по шкалам Мартенса и шкалам индентирования.

7. На основании теоретического анализа показана необходимость внесения стандартных образцов свойств в Государственную поверочную схему для средств измерений по шкалам Мартенса и шкалам индентирования, обеспечивающее уменьшение неопределенности результатов измерений при калибровке, поверке и применении.

Список публикаций, в которых изложены основные результаты диссертационной работы

Статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК Министерства

1. Потапов А.И., Гоголинский К.В., Сясько В.А., Уманский А.С., Кондратьев А.В. Методические и метрологические аспекты измерения механических свойств материалов методом инструментального индентирования // Контроль. Диагностика, 2016. № 8. С. 16-21.

2. Потапов И.А., Кондратьев А.В. Дистанционный контроль трубопроводов с использованием телекоммуникационных технологий // Записки Горного института, 2014. Т. 209. С. 139-143.

3. Потапов А.И., Гоголинский, К.В., Кондратьев А.В., Уманский А.С. Косвенная оценка функции формы индентора для контроля физико-механических свойств методом инструментального индентирования // Контроль. Диагностика, 2017. № 2. С. 28-32.

Публикации в других изданиях:

4. Гоголинский К.В., Кондратьев А.В., Уманский А.С. Влияние специфики упруго-пластической и хрупкой деформации материалов на результаты измерений механических свойств методом инструментального индентирования // Сборник трудов III международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении». Секция «Приборостроение и методы контроля», 2015. Т. IV. С. 38-40.

5. Гоголинский К.В., Кондратьев А.В., Потапов А.И., Уманский А.С. Косвенная оценка функции формы индентора для расчета механических свойств изделий по методу инструментального индентирования // Сборник трудов IV международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении». Секция «Приборостроение и методы контроля», 2016. Т. IV. С. 42-44.

6. Сясько В.А., Уманский А.С., Кондратьев А.В. Измерение механических свойств методом инструментального индентирования. Методические и метрологические аспекты. Оценка функции формы индентора // XXI Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: сборник трудов, 2017. Т. I. С. 312-315.