

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова  
Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора ИМЕТ РАН



д.т.н. Колмаков А.Г.

2016 г.

**ОТЗЫВ**

ведущей организации на диссертационную работу  
Масленикова Игоря Игоревича

«Физические модели работы сканирующих нанотвердомеров»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 01.04.07 – физика  
конденсированного состояния

Диссертационная работа Масленикова И.И. посвящена разработке и теоретическому обоснованию методов измерения физико-механических свойств материалов, реализуемых в приборах, совмещающих функции инструментального индентирования и сканирования.

**Актуальность**

Актуальность диссертации обусловлена важностью контроля и изучения свойств тонких функциональных покрытий, гетерогенных и наноструктурированных материалов. Расширение функций сканирующих нанотвердомеров, позволяющих проводить измерение механических свойств, а также сканировать рельеф поверхности, требует углубления модельных представлений о процессах, происходящих в области контакта осциллирующего индентора и рассмотрения их в совокупности с принципами и особенностями конкретных сканирующих нанотвердомеров. Решаемый в данной работе круг задач относится, прежде всего, к приборам, использующим пьезорезонансные зонды, и, в частности, к сканирующим нанотвердомерам семейства «НаноСкан». Тем не менее, область применимости полученных результатов включает широкий круг устройств:

по сути, это любые сканирующие твердомеры, имеющие резонансный датчик и обладающие возможностью контроля его резонансных характеристик.

### **Научная новизна**

Основные достижения соискателя достаточно полно сформулированы в положениях, выносимых на защиту. Перечислим их с небольшими комментариями.

1. Физические модели, связывающие между собой упругие свойства области контакта с резонансной частотой зонда, амплитудой его колебаний и силой прижима в полуконтактном режиме взаимодействия острия зонда с поверхностью.

До выполнения данной работы разработчикам «НаноСкан» приходилось использовать эмпирические и интуитивные предположения о данных механизмах, теперь есть возможность аналитического рассмотрения свойств прибора.

2. Физические модели, связывающие между собой упругие и пластические свойства области контакта с резонансной частотой зонда, амплитудой его колебаний и силой прижима в контактном режиме взаимодействия острия зонда с поверхностью.

Ключевой результат, позволивший обосновать возможность измерения твердости материалов в процессе сканирования. Увязка измеренного значения твердости с локальным значением модуля Юнга имеет не приборный, а физический характер и обусловлена особенностями поведения твердых тел при их деформировании.

3. Физические модели, связывающие между собой упругие, пластические и электрические свойства области контакта с резонансной частотой зонда, амплитудой колебаний, силой прижима и электрическим током в контактном и полуконтактном режиме взаимодействия острия зонда с поверхностью.

Количественная увязка измеряемых электрических и механических величин с удельной электропроводностью исследуемого материала открывает широкие возможности для совершенствования метрологических возможностей широкого круга приборов, используемых для измерения локальных электрических свойств гетерогенных материалов.

4. Теоретическое и экспериментальное подтверждение возможности картографирования модуля упругости в процессе сканирования поверхности пьезорезонансным зондом с датчиком силы.

Для пьезорезонансного зонда впервые было проведено целенаправленное сопоставление экспериментальных и расчетных данных с целью верификации методик и их теоретического обоснования.

5. Теоретическое и экспериментальное подтверждение возможности картографирования приведенного значения твердости ( $H/E^2$ ) в процессе сканирования поверхности пьезорезонансным зондом с датчиком силы.

Данная оригинальная методика и предложенный подход основаны на глубоком понимании физики конденсированного состояния и демонстрируют тот факт, что выяснение сути процесса всегда помогает более корректно и точно проводить измерения.

Таким образом, научная новизна целого ряда научных результатов, представленных в диссертации, не вызывает никаких сомнений. Безусловно, новым является и синергетический результат всей работы – комплексное описание широкого круга физических процессов, наблюдающихся при работе сканирующих нанотвердомеров.

Представленная работа соответствует первой части 6 пункта паспорта специальности 01.04.07: «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств материалов». Работа содержит физическое обоснование ряда измерительных методик, используемых в приборах семейства «НаноСкан» и ряда экспериментальных результатов, полученных с их использованием.

### **Достоверность**

Практически все полученные результаты получили экспериментальное подтверждение, в том числе и в независимых от соискателя исследованиях, и стали основой ряда методик измерений, реализованных в приборах семейства «НаноСкан». Основные результаты, подтверждающие положения, выносимые на защиту, были опубликованы в рецензируемых журналах, а также представлены на всероссийских и международных конференциях. Кроме того, часть подходов была использована при создании Государственных эталонов в области нанометрологии.

### **Значимость работы**

Выводы и положения, выносимые на защиту, обладают не только теоретической, но практической значимостью. В частности, важным является обоснование возможности количественного измерения локальных

механических и электрических свойств материалов резонансным зондом. Прделанная работа является востребованной при развитии сканирующих нанотвердомеров и, в частности, позволила осуществить заметное усовершенствование приборов семейства «НаноСкан».

### **Структура диссертации и результаты работы**

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Объем диссертации составляет 200 страниц. Работа включает 111 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 123 наименования.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, описана степень разработанности проблемы, сформулированы цели и задачи работы, определены предмет и объект, а также методологическая и теоретическая база исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Изложены основные научные положения, выносимые на защиту, указано соответствие диссертации паспорту специальности, а также достоверность и обоснованность полученных результатов. Кроме того, приведены сведения об апробации работы и список публикаций, указан личный вклад авторов и соавторов в работу.

В **первой главе** представлен обзор различных моделей взаимодействия индентора с поверхностью. В первую очередь представлены соотношения, описывающие чисто упругое взаимодействие зонда с поверхностью, рассмотрены адгезионные и вязкоупругие силы. Приведены основные соотношения, использующиеся в методе инструментального индентирования, учитывающие пластическую деформацию. Рассмотрены критерии перехода упругой деформации в пластическую и модели растекания слоя жидкости, который может присутствовать на поверхности образца. Также представлены соотношения, связывающие сдвиг частоты колебаний резонирующего элемента при его контакте с поверхностью для заданной зависимости силы от глубины погружения острия в образец.

**Вторая глава** также является обзорной и описывает приборную и методическую составляющие современных приборов, позволяющих проводить измерения методом инструментального индентирования: конструкции приборов и динамические методы измерений, являющиеся наиболее близкими к рассматриваемым в диссертации подходам. Кроме того, отдельно приведен обзор датчиков, используемых в приборах «НаноСкан», на которых проводились экспериментальные исследования, представленные в диссертации. Также приведен обзор ультразвуковых

твердомеров, физический принцип работы которых является близким к представленным в диссертации подходам.

**Третья глава** посвящена рассмотрению поведения пьезорезонансного зонда в составе автогенераторного тракта. Показано, что колебания пьезокерамического биморфного элемента в тракте, содержащем ограничитель и усилитель, для заданной моды колебаний сводятся к дифференциальному уравнению второго порядка. Показано, что для медленно меняющихся параметров колебаний эти уравнения сводятся к системе из двух дифференциальных уравнений первого порядка, которые в стационарном случае задают амплитуду и частоту колебаний. На основе данных уравнений проанализировано влияние диссипативных и консервативных сил, действующих на резонансный зонд. Данные зависимости используются для анализа влияния сил различной природы в следующих главах диссертации.

**Четвертая глава** посвящена рассмотрению влияния сил, приводящих к сдвигу резонансной частоты колебаний; показано, что для тупых инденторов может быть использовано соотношение, следующее из модели Герца, а для более острых выводится новая зависимость, обладающая правильным асимптотическим поведением при больших глубинах и учитывающая затупление кончика. Для случая пластической деформации предложен подход, позволяющий вычислять отношение твердости к квадрату модуля упругости из данных о средней за период силе и сдвиге резонансной частоты зонда.

**В пятой главе** рассмотрено протекание электрического тока через область контакта токопроводящего индентора с поверхностью материала. Представлен ряд соотношений, связывающих макроскопические параметры колебаний (средняя за период колебаний сила, амплитуда, сдвиг резонансной частоты, величина тока растекания) с удельным сопротивлением образца.

**В шестой главе** рассмотрены различные механизмы демпфирования колебаний зонда и оценивается их вклад в падение амплитуды колебаний. Рассмотрены случаи взаимодействия с вязко-упругими, пластическими материалами, а также случай контакта зонда с поверхностью, покрытой слоем вязкой жидкости.

На основе полученных соотношений в **седьмой главе** экспериментально демонстрируется возможность количественного картографирования модуля и отношения твердости к квадрату модуля упругости поверхности в процессе сканирования.

При изучении текстов диссертационной работы и автореферата возникли следующие **вопросы и замечания**.

1. Диссертация содержит значительное количество опечаток, присутствующих даже в заголовках. В тексте диссертации дважды обсуждается темы «Личный вклад автора» и «Вклад соавторов в работу», что, по-видимому, также является «опечаткой».

2. К недостаткам работы можно отнести большое количество промежуточных выкладок и сложных математических выражений, которые в дальнейшем часто упрощаются до разумного вида. Это привело к значительному увеличению объема диссертации и затруднило беглое ознакомление с сутью основных результатов.

3. Диссертационная работа носит аналитический характер и посвящена обсуждению целого ряда чисто физических проблем. Понятно, что круг обсуждаемых теоретических вопросов продиктован сугубо практическими задачами совершенствования приборов семейства «НаноСкан». При этом на вопрос, в чем состоит основное конкурентное преимущество приборов с пьезорезонансными датчиками, в работе нет четкого ответа.

Все перечисленные вопросы и замечания не носят принципиальный характер и не умаляют научных достижений соискателя.

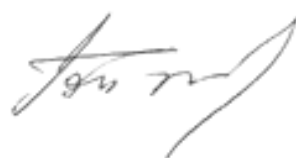
Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 13 печатных источниках, 7 из них являются реферируемыми журналами из списка ВАК. Данные 7 работ входят по крайней мере в одну из баз международных систем цитирования: Web of Science, Scopus или Chemical Abstracts. Работа была представлена на девяти конференциях. Содержание Автореферата соответствует содержанию Диссертации и тексту журнальных публикаций. Автореферат в полной мере отражает содержание работы, ее актуальность, практическую значимость, новизну и другие значимые моменты.

Результаты представленной работы могут быть использованы в организациях и предприятиях, производящих оборудование для контроля механических свойств и рельефа поверхности, в том числе в ФГБНУ «ТИСНУМ», ООО «НТ-МДТ» а также в крупных научно-исследовательских и производственных организациях и институтах, использующих данные устройства: ВНИИФТРИ, ВНИИМС, НИЯУ МИФИ, ГУ МФТИ, НПО КМ «Прометей», НГУ, ИК РАН, СГАУ, УрФУ и других.

Работа выполнена на высоком научном уровне и соответствует Положению ВАК о порядке присуждения ученых степеней. На основании изложенного считаем, что диссертация Масленикова Игоря Игоревича отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 — физика конденсированного состояния, а ее автор за разработку физических основ использования пьезорезонансных датчиков сканирующих нанотвердомерах заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа Масленикова И.И. заслушана и обсуждена на заседании секции «Металловедение и металлофизика» Ученого совета ИМЕТ РАН от 8 сентября 2016 г. протокол №8.

Председатель:  
Член-корр. РАН.



Г.С. Бурханов

Секретарь:  
в.н.с., к.т.н.



И.О. Банных