

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Масленикова Игоря Игоревича
ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАБОТЫ СКАНИРУЮЩИХ НАНОТВЕРДОМЕРОВ

представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.07 — Физика конденсированного состояния

Диссертационная работа носит теоретико-экспериментальный характер и посвящена совершенствованию экспериментальных методов изучения физических свойств однородных и гетерогенных материалов с использованием подходов, свойственных сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) и наноиндентированию. Выполненные исследования позволяют лучше понять механизмы влияния физических явлений, происходящих в области контакта зонда с поверхностью исследуемого материала, на макроскопические характеристики зонда, регистрируемые измерительной системой. При своей практической направленности, разработанные теоретические модели представляются достаточно универсальными и имеют признаки фундаментального научного исследования.

Диссертация выполнена в объеме 200 страниц, содержит введение, семь глав, заключение и список литературы, насчитывающий 123 источника.

Введение содержит общее описание проблемы, рассматриваемой в диссертации. Обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, обозначена научная новизна и практическая ценность выполненной работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, рассмотрен личный вклад автора в проделанную работу, приведен список его публикаций.

Первая глава диссертации содержит обзор моделей контактного взаимодействия зонда с поверхностью. Описаны различные механизмы, обуславливающие потери, возникающие при контакте зонда с образцом: пластическая деформация, адгезионные и капиллярные силы, гидродинамические силы. Дано описание метода инструментального индентирования.

Во второй главе представлен обзор конструкций современных нанотвердомеров и доступные им методы измерения. Рассмотрены конструкции используемых в «НаноСкан» зондов и способы их включения в автогенераторный тракт.

Третья глава посвящена анализу автогенераторного тракта и принципов измерения параметров колебаний резонансного зонда. В ней проанализированы характеристики камертонного пьезокерамического зонда и установлена взаимосвязь геометрических, механических и пьезоэлектрических свойств камертона с резонансной частотой и электрическими свойствами пьезорезонансного зонда. Получена система аналитических выражений, одно из которых связывает амплитуду автоколебаний с диссипативными силами, действующими на зонд со стороны поверхности образца, а другое подтверждает известную ранее связь сдвига резонансной частоты автоколебаний с консервативными силами, действующими в области контакта.

В четвертой главе предложены модели, позволяющие рассчитать изменение частоты резонансных колебаний зонда в процессе его подвода к поверхности. Рассмотрены инденторы, обладающие различной кривизной кончик, проанализирована применимость упругой модели Герца для колебательного режима взаимодействия таких инденторов с

поверхностью. Предложена новая модель острия индентора в форме «усеченного конуса», обладающая в отличие от модели Герца правильным асимптотическим поведением при различных глубинах погружения острия в поверхность в случае большого размера «отсеченного кончика».

Пятая глава посвящена вопросам электропроводности контакта зонда с образцом при наличии постоянного электрического напряжения, приложенного между ними. Получено уравнение, позволяющее связать удельные сопротивления индентора и образца с амплитудно-частотными и механическими характеристиками системы.

В шестой главе рассмотрены диссипативные силы, влияющие на амплитуду колебаний зонда. Проанализированы четыре механизма механических потерь в области контакта – вязкое трение, капиллярные силы, вязкоупругие свойства материала и пластическая деформация материала. Получены аналитические выражения, позволяющие оценить вклад данных механизмов в уменьшение добротности зонда и амплитуды его резонансных колебаний.

В седьмой главе описываются результаты, связанные с построением карт механических свойств поверхности во время сканирования. В частности, продемонстрирована возможность картографирования модуля упругости в процессе сканирования поверхности пьезорезонансным зондом с датчиком среднего значения силы прижима для таких материалов как пластмассы, стекла и металлы.

Заключение содержит выводы и описание основных результатов, полученных в диссертационной работе.

Целью диссертации является теоретико-экспериментальное обоснование возможности измерения таких характеристик твердых, токопроводящих и вязкоупругих конденсированных материалов, как твердость, модуль упругости, удельная электропроводность и просто топография поверхности в процессе их сканирования пьезорезонансным зондом, возбуждаемым автоколебательным способом.

Актуальность темы диссертации, поставленных и решенных в ней задач связаны с потребностями современной науки и техники в новых средствах изучения физико-механических свойств материалов на наноуровне, позволяющих выявлять фундаментальные закономерности поведения новых перспективных материалов. Важность выполненных исследований обусловлена необходимостью создания физических моделей, объясняющих явления, возникающие при контакте пьезорезонансного зонда, используемого в сканирующих нанотвердомерах семейства «НаноСкан», с поверхностью исследуемого образца.

Основные положения и результаты диссертации заключаются в разработке и экспериментальной проверке теоретических моделей, связывающих между собой вязкоупруго-пластические и электрические свойства образца с резонансной частотой зонда, амплитудой его колебаний и силой прижима в контактном и полуконтактном режимах взаимодействия острия зонда с поверхностью образца. Разработанные модели, как показано в диссертации, позволяют более эффективно и корректно производить измерения физико-механических свойств поверхности образца, задавать оптимальные режимы работы измерительного устройства.

Достоверность основных положений и результатов диссертации обеспечивается использованием апробированных теоретических подходов к анализу системы образец – резонансный зонд, сопоставлением полученных результатов с экспериментом и известными результатами других авторов, а также использованием сертифицированного

экспериментального оборудования. Это позволяет утверждать о высокой степени обоснованности научных положений, результатов и выводов, сформулированных в диссертации.

Основным элементом новизны диссертации является новая теоретическая модель функционирования системы образец – резонансный зонд, учитывающая различные факторы взаимодействия зонда с поверхностью образца (упругость, вязкость, пластичность, капиллярные и гидродинамические эффекты).

Содержание диссертации в достаточной степени отражено в публикациях автора и докладывалось им на научных конференциях. Следует отметить высокий уровень публикаций по теме диссертации, многие из которых индексируются в системах Scopus, Web of Science. Автореферат включает основные положения диссертации и соответствует ее содержанию.

По диссертации имеются следующие замечания.

1. Отсутствует систематизированный обзор исследований по теме диссертации. Несмотря на то, что при описании конкретных результатов автор ссылается на известные работы, отсутствие такого обзора затрудняет оценку новизны и достоверности полученных в диссертации результатов.

2. Используемые в диссертации модели деформационного поведения материала образца не учитывают его инерционных свойств, т.е. используется квазистатическое приближение, при том, что инерционные свойства колебательной системы зонд – биморфный элемент (держатель зонда) учитываются. Несмотря на то, что полученные на основе квазистатического приближения результаты подтверждены экспериментально, в диссертации следовало бы дать оценку инерционным эффектам материала образца и теоретически обосновать возможность пренебречь ими.

3. Во введении к диссертации (п.1.3) достаточно обстоятельно описаны модели контактного взаимодействия тел с учетом фактора межмолекулярного взаимодействия (адгезии). Однако при дальнейшем изложении полученных результатов данный фактор, по сути, исключен из рассмотрения. По мнению оппонента, в диссертации следовало бы обосновать возможность не учитывать межмолекулярное взаимодействие зонда и образца.

4. Диссертация содержит ряд недочетов в оформлении и представлении информации.

4.1. Некоторые формулировки новизны (с. 11) представляются весьма общими и их следовало бы конкретизировать. Примером тому служит формулировка: «Была обоснована теоретически и подтверждена экспериментально возможность количественного измерения модуля упругости и твердости образца методом кривых подвода». Насколько известно оппоненту, оценки модуля упругости и твердости образца методом кривых подвода выполнялись и раньше. Наверное, здесь следует конкретизировать, что в диссертации предложена более корректная процедура такой оценки на основе разработанной теоретической модели.

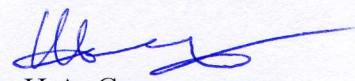
4.2. Описанный на с.16 вклад соавторов в работу повторен на с.19.

4.3. В правой части равенства (1.4) пропущен множитель $(1-\nu^2)^{-1}$.

4.4. Для обозначения коэффициента Пуассона в диссертации (например, сс. 21, 26) используется два символа: ν и σ .

Сделанные замечания не свидетельствуют о наличии ошибок в диссертации и не влияют на достоверность полученных в ней результатов. Несомненно, что поставленные в диссертации цели достигнуты, она является самостоятельной и законченной научно-исследовательской работой на актуальную тему и обладает научной новизной. По значимости полученных результатов уровень диссертации соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842), а ее автор – Маслеников Игорь Игоревич, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 — Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Института проблем механики
имени А.Ю. Ишлинского
Российской Академии наук


И.А. Солдатенков

“08” сентября 2016 г.

Подпись Солдатенкова Ивана Алексеевича
удостоверяю





Ученый секретарь ИПМех РАН
к.ф.-м.н. Е.Я. Сысоева

119526 г. Москва, пр-т Вернадского, д.101а
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки (ФГБУН)
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук
Тел.: +7 495 434 0017; e-mail: imp@ipmnet.ru; isoldat@mail.ru