

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора Зингермана Константина Моисеевича о диссертации **УЖЕГОВОЙ Надежды Ивановны «Разработка методов анализа экспериментальных данных атомно-силовой микроскопии для исследования структуры и свойств эластомерных нанокомпозитов»**, представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твёрдого тела»

Атомно-силовая микроскопия является мощным средством экспериментального исследования структуры и свойств материалов на наномасштабном уровне. С помощью атомно-силового микроскопа можно не только исследовать структуру поверхности, но и получить информацию о механических свойствах материала. В частности, существенный интерес представляет применение атомно-силовой микроскопии к исследованию эластомерных нанокомпозитов, которые широко применяются в современной технике, в том числе при производстве шин – изделий массового спроса. Для получения эластомерных композитов с улучшенными свойствами важно понимание того, как формируются на наноуровне макроскопические свойства материалов, и анализ процессов, происходящих при деформации вблизи частиц наполнителя. Этим определяется **актуальность** темы диссертации.

При исследовании механических свойств нанокомпозитов с помощью АСМ необходимо определить с высокой точностью места расположения включений, прилегающих к поверхности. Необычным эффектом, который проявляется на наномасштабном уровне, является самопроизвольное внедрение зонда в материал при достижении поверхности. При применении атомно-силовой микроскопии к исследованию механических свойств материалов возникает проблема, связанная с существенной зависимостью результатов от состояния внешней среды – относительной влажности и

ионизации воздуха. Особенностью эластомерных материалов является их способность к большим упругим деформациям, вследствие чего оказывается возможным проникновение зонда в материал без разрушения на глубину, в несколько раз превышающую радиус скругления зонда. Эти особенности важно учесть при моделировании.

В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан метод выделения объектов на рельефе поверхности, полученном с помощью зондовой микроскопии.

2. Разработана и исследована компьютерная модель взаимодействия зонда атомно-силового микроскопа (АСМ) с жидкостью на поверхности исследуемого материала.

3. Предложена модель контактного взаимодействия зонда АСМ с поверхностью эластомерного нанокompозита и показано, что эта модель хорошо согласуется с экспериментальными данными и позволяет учесть экспериментально обнаруженные эффекты, проявляющиеся при подводе зонда к поверхности эластомера и при его отводе от этой поверхности.

Практическая значимость работы состоит:

- в разработке методологии и программных средств для выделения агрегатов наноразмерных частиц наполнителя на поверхности эластомерного композита.

- в разработке методологии определения модуля Юнга и плотности поверхностной энергии наноразмерной области эластомера по силовой кривой, полученной экспериментально.

Объём диссертации составляет 136 страниц. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 156 источников и приложения.

Во *введении* сформулирована цель работы, поясняется актуальность ее темы, научная новизна и практическая значимость исследования, изложено краткое содержание диссертации.

В *первой главе* диссертации приводятся сведения о композиционных материалах, устройстве, назначении, принципах и режимах работы АСМ.

Во *второй главе* решается задача выделения объектов на рельефе поверхности, полученном с помощью зондовой микроскопии. Предложен метод выделения частиц наполнителя и их агломератов, выступающих из связующего, на неровной поверхности образца. Суть метода заключается в разделении исходного рельефа поверхности на сумму нескольких рельефов, каждый из которых содержит объекты заданного характерного размера. В работе рассматривается разделение исходного рельефа на сумму трех поверхностей различной кривизны. Приведены результаты обработки экспериментальных данных с использованием предложенного подхода.

Третья глава содержит математическую модель и результаты компьютерных экспериментов по исследованию контактного взаимодействия зонда атомно-силового микроскопа с жидкостью на поверхности образца. Новизна предложенного подхода определяется учетом действия сил Лапласа. Рассмотрена осесимметричная задача внедрения зонда в жидкость при условии, что жидкость занимает полубесконечное пространство. Предложенная модель иллюстрирует влияние внешнего фактора (относительной влажности воздуха) на взаимодействие зонда с поверхностью материала. Также показано, что капиллярные явления не могут служить объяснением скачка зонда на прямом ходе движения кантилевера.

Наиболее интересной представляется *четвёртая глава* диссертации. В этой главе выполнен сравнительный анализ трех моделей контактного взаимодействия, которые используются для расшифровки экспериментальных данных, получаемых методами атомно-силовой микроскопии: модели Герца, модели Дерягина-Мюллера-Топорова (ДМТ) и модели Джонсона-Кендалла-Робертса (ДжКР). Модели использовались для аппроксимации силовой кривой, полученной для полидиметилсилоксана. Показано, что уравнения модели Герца не описывают скачок зонда на

силовой кривой. Согласно этой модели, прямой и обратный ход движения кантилевера совпадают, так как она не учитывает действие адгезионных сил. Модели ДМТ и ДжКР позволяют описать как прямой, так и обратный ход движения кантилевера. В диссертации сделан вывод о том, что среди представленных моделей теория ДжКР лучше всего подходит для описания полученной силовой кривой. Она позволяет не только описать скачок на прямом ходе движения кантилевера, но и учитывает налипание материала на зонд при отводе кантилевера от образца. Выявлены недостатки рассмотренных моделей и на основе этого разработана новая модель контактного взаимодействия зонда АСМ с мягким материалом. Данная модель позволяет более точно по сравнению с рассмотренными моделями описывать процесс отрыва зонда от поверхности материала на обратном ходе движения кантилевера, что важно при исследовании адгезионных и диссипативных свойств материала.

В *заключении* сформулированы основные результаты и выводы, полученные автором диссертационной работы.

Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию.

Диссертация прошла необходимую апробацию на научных конференциях, в том числе международных. Автором получены свидетельства о государственной регистрации программ, реализующих разработанные в диссертации математические модели и методы. По теме диссертации автором опубликовано 8 статей в журналах из списка ВАК, имеются статьи в журналах, индексируемых в системе Scopus.

Замечания

1. В автореферате (с. 4, строка 18 снизу) имеется неудачная фраза «Для задания граничных явлений...». Как можно задавать явления?
2. В модели, описывающей взаимодействие зонда с жидкостью (глава 3 диссертации), целесообразно было бы учесть силы Ван-дер-Ваальса.
3. В моделях, используемых в третьей и четвертой главах диссертации, часть зонда, вступающая в контакт с жидкостью или эластомером,

предполагается осесимметричной. Однако это допущение не вполне верно для реальной формы этой части зонда.

4. Было бы полезно описать в диссертации методику определения радиуса скругления зонда, указать погрешность этой методики.

Указанные недостатки не снижают положительную оценку работы в целом.

Заключение

Диссертация Н.И. Ужеговой является законченной научно-квалификационной работой. Диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела», а её автор, Ужегова Надежда Ивановна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по данной специальности.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
вычислительной математики федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Тверской государственной
университет»

170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33.

Тел. +7-4822-580-522 (доб. 119)

E-mail: Zingerman.KM@tversu.ru

Зингерман Константин
Моисеевич



28.11.2016

Подпись *Зингерман*
удостоверяю:
Начальник управления
аспирантуры и докторатуры
Жабанова Е.И.

