



Федеральное государственное унитарное предприятие  
“Ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени  
научно-исследовательский институт синтетического каучука  
имени академика С.В. Лебедева” (ФГУП «НИИСК»)

✉ Россия, 198035, Санкт-Петербург, ул. Гапсальская д. 1; ☎ (812) 251-40-28, 575-10-18;  
Факс: 251-48-13; E-Mail: [office@fgupniisk.ru](mailto:office@fgupniisk.ru); <http://www/fgupniisk.ru/>

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
**Жукова Михаила Валерьевича** на тему: «**Наноструктурированные зонды  
для сканирующей силовой микроскопии: создание, исследование,  
применение**», представленную на соискание учёной степени кандидата  
технических наук по специальности 05.11.01 – Приборы и методы измерения  
(механические величины)

В настоящее время применение метода сканирующей силовой микроскопии (ССМ) в исследовании материалов открывает новые перспективы в изучении особенностей их структуры и определении важных физико-химических характеристик с целью разработки новых материалов для nanoиндустрии, нанобиотехнологии и медицины. Метод ССМ активно развивается в последние годы и в России, и за рубежом. Однако, при интерпретации результатов, полученных методом ССМ, возникает ряд трудностей, обусловленных отсутствием прямых доказательств достоверности получаемой информации, плохой воспроизводимостью результатов, наличием артефактов и т.п. Одним из возможных путей решения этих проблем является создание новых типов зондов. Известно, что соответствующим образом подбирая материал и изменяя геометрию зондов, можно существенно улучшить качество получаемых ССМ изображений и расширить функциональные возможности этого метода. Учитывая сказанное выше, создание, исследование и сравнительный анализ эффективности применения наноструктурированных зондов при ССМ-изучении наноструктур различной природы является несомненно **актуальной в фундаментальном плане научной задачей**, решению которой посвящена диссертационная работа Жукова М.В.

Известно, что качество выполняемых с помощью ССМ измерений линейных размеров с нанометровой точностью по трем координатам во многом определяется размерами, формой и физико-химическими свойствами используемых зондов. С целью расширения функциональных возможностей метода ССМ, а также повышения точности измерений, автором разработана технология изготовления нескольких новых типов наноструктурированных зондов – зондов-нановискеров, в том числе, с магнитным покрытием, наноскальпелей, нанопипеток со сферами, зондов-кластеров с гидроксипатитом, и продемонстрированы их преимущества по сравнению со

стандартными зондами при исследовании нано- и микроструктур на поверхности объектов различной природы, находящихся как в воздушной среде, так и в жидкости.

В диссертационной работе Жукова М.В. приведены **новые результаты** по исследованию структуры и определению физико-химических и размерных характеристик широкого класса объектов - нанопор и наноканалов на гидрофильных поверхностях, измерения сил адгезии гидроксиапатита к тканям сердечного клапана, картирования магнитной микроструктуры, манипулирования наночастицами, модификации поверхности с помощью зондов-наноскальпелей и др. с высоким пространственным разрешением.

Диссертация Жукова М.В. состоит из введения, четырех глав, и заключения, в котором сформулированы основные итоги работы. Материал диссертации изложен на 143 страницах, включая 78 рисунков, 6 таблиц и два приложения, список использованных источников содержит 168 наименований.

**Во введении** сформулированы необходимые для диссертационной работы моменты, такие как актуальность, научная новизна и практическая значимость проведенных исследований, определены основные задачи работы, обоснован выбор методов и объектов исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту и главная цель работы. В этом разделе также приведен список научных мероприятий - российских и международных, на которых диссертация проходила апробацию.

**В первой главе** приведен литературный обзор по тематике исследования. Данный раздел диссертационной работы построен весьма целенаправленно. В нем коротко изложены основные принципы существующих в настоящее время технологий создания нановискерных структур, описание разных видов специализированных зондов для ССМ и их применения, а также современное состояние в решении проблем метрологической обеспеченности измерений линейных размеров в ССМ.

**Во второй главе** приведено описание разработанных автором технологий, используемых для создания наноструктурированных зондов: 1) технология выращивания металлорганических Pt/C нановискеров, углеродных нановискеров, углеродных наноскальпелей, 2) технология выращивания новых наноструктур, названных автором «нановилками», на вершине Si и W игл с помощью фокусированного электронного пучка в присутствии газов прекурсоров, 3) технология нанесения магнитных покрытий (Ni/Co) на Si кантилеверы, 4) технология вытягивания стеклянных нанопипеток с закрепленными на их вершине золотыми наносферами диаметром 200 нм, 5) технология создания зондов-кластеров с гидроксиапатитом (ГА) и кластерами золота. Проведены теоретические расчеты и обоснование экспериментально наблюдаемого самоорганизованного распада углеродной пластины, растущей на вершине вольфрамовой иглы с образованием «нановилки». В конце **главы 2** сформулированы **краткие выводы**.

**Глава 3** наиболее важна по содержанию, в ней приведены полученные в работе по апробации и тестированию разработанных диссертантом наноструктурированных зондов. Динамическим и статическим способами измерен модуль Юнга углеродного нановискера, теоретически и экспериментально изучена механическая устойчивость зонда с нановискером. С использованием тестовых образцов проведено сравнение результатов, полученных наноструктурированными зондами с результатами, полученными стандартными зондами, традиционно используемыми в ССМ. Показано улучшение латерального разрешения и точности определения перепада высот на корригированной поверхности при использовании наноструктурированных зондов с высоким аспектным отношением. Проведен теоретический расчёт фазового контраста для магнитных зондов с высоким аспектным отношением и их экспериментальное тестирование при картировании микроструктуры магнитных доменов, демонстрирующие преимущество высокоаспектных магнитных зондов по сравнению со стандартными магнитными зондами.

В работе измерено пространственное разрешение зонда с кластером ГА, предназначенного для картирования сил адгезии к тканям сердечного клапана. Определено пространственное разрешение, достигаемое при модификации поверхности методом силовой литографии с использованием зондов наноскальпелей, и показано, что зонд-наноскальпель может также использоваться для измерения линейных размеров создаваемых структур в едином технологическом цикле с процессом литографии. Показано, что с помощью зонда-нановилки (или наноскальпеля) можно осуществлять перемещение наночастиц на заданные расстояния и проводить последующие измерения линейных перемещений с нанометровой точностью. Предложен оригинальный метод совмещения зонда-нанопипетки с пьезорезонансным силовым зондом, позволяющий совместить измерение локального силового взаимодействия с измерением локальных ионных токов в жидкости. В конце главы 3 сформулированы **краткие выводы**, касающиеся этой части работы.

В четвертой главе приведены результаты исследования сложных объектов с помощью наноструктурированных зондов, которые крайне важны для решения конкретных задач в области наноэлектроники, медицины и биологии. Установлено, что использование зондов с нановискерами существенно повышает точность измерений и контраст тонкой структуры мембран высушенных эритроцитов и нативных бактерий *E.Coli* в жидкости по сравнению со стандартными зондами. Автором продемонстрирована возможность проведения локальных прецизионных надрезов мембран клеток зондами-наноскальпелями с контролируемой силой прижима.

Результатом, полученным в этой части работы, имеющим фундаментальное значение, является измерение силы адгезии микрокластера ГА, закрепленного на вершине стандартного зонда, к различным участкам сердечного клапана. То есть, убедительно продемонстрирована возможность использования наноструктурированных зондов в диагностике заболеваний, в частности, для



выяснения причин возникновения аортального стеноза.

Следует особо отметить исследование эффекта инверсии, возникающего при измерении методом ССМ размеров нанопор и наноканалов на гидрофильных поверхностях. Проведённые исследования убедительно доказывают, что использование в качестве зондов стандартных Si кантилеверов может привести к принципиальной ошибке при измерении глубины нанопор и наноканалов.

Оценивая **научную новизну** диссертации Жукова М.В., можно уверенно констатировать, что в работе получен ряд новых уникальных результатов. Это, во-первых, сформированы наноструктуры, названные автором «нановилками», которые возникают в результате самоорганизованного распада углеродной пластины под воздействием фокусированного электронного пучка, во-вторых, впервые разработаны и апробированы зонд-нанокластер с ГА, и зонд-нановискер с магнитным покрытием, что позволило автору получить ССМ-изображения с улучшенным контрастом и пространственным разрешением. Новыми являются также результаты, полученные при комбинированном использовании методов ССМ и СМВП с использованием зондов-пипеток с наносферами. Впервые проведено манипулирование нанообъектами зондами-наноскальпелями с одновременной ССМ-визуализацией этих процессов.

Очевидная **практическая значимость** работы Жукова М.В. заключается в том, что с помощью разработанных автором наноструктурированных зондов получена детальная и достоверная информация о структуре, размерных характеристиках и свойствах широкого класса твердотельных и биологических систем. Эти данные необходимы при создании новых материалов для молекулярной электроники, оптики, химической сенсорики, медицины и биоинженерии. Практическую ценность работы Жукова М.В. подтверждает также и Акт о внедрении результатов диссертационной работы, касающихся применения наноструктурированных зондов на основе ГА, на кафедре госпитальной терапии ФГБВОУ ВО «Военно-медицинской академии имени С.М. Кирова» МО РФ для решения конкретной научной задачи.

**В заключении** автор подводит общие итоги проделанной работы.

**В целом**, следует признать, что диссертационная работа Жукова М.В. является законченным исследованием. Обстоятельность в постановке и проведении эксперимента, использование современной техники, исчерпывающие вариации факторов, влияющих на технологические параметры сканирующего силового микроскопа, и, наконец, хорошая эрудиция позволили диссертанту обобщить большой экспериментальный материал.

**Научные положения и выводы**, сформулированные в диссертации, равно как и количественные оценки, достаточно **надежны и убедительны**. В диссертации подробно описаны и технологические приемы, и аналитические расчеты, заключения делаются путем сопоставления данных для объектов разного происхождения с разными локальными характеристиками структуры, разными составами и типами морфологии. **Достоверность полученных**

**результатов не вызывает сомнений**, так как они были многократно проверены и подтверждены данными различных современных методов исследования, использованных в работе, а также согласием полученных результатов с литературными данными.

При прочтении работы каких-либо серьезных недостатков мною не обнаружено. Диссертация в целом написана логично, хорошим языком, содержит большой экспериментальный материал и заслуживает высокой оценки. Вместе с тем, возникли вопросы, ответ на которые может иметь достаточно важное значение:

1. В диссертации в некоторых случаях недостаточно приведены данные, касающиеся статистической обработки полученных экспериментальных результатов.
2. В тексте диссертации следовало бы дать более подробное описание возможных причин и механизмов возникновения наноструктур, которые автор назвал «нановилками». Это совершенно новые регулярные наноструктуры, которые могут найти широкое применение в нанобиотехнологических разработках.
3. В тексте работы достаточно часто используется термин «артефакт». Он неоднозначен. Следовало бы уточнить, какое конкретно значение имел в виду автор в контексте данной работы. Также требуют пояснения термины: «объекты с тонкой топологией структуры» и «объекты сложной топологии структуры» (стр. 18), использованные автором.
4. В некоторых местах использован слишком мелкий шрифт на ССМ-изображениях, затрудняющий восприятие материала и осмысление информации.

В качестве замечания следует отметить, что в работе в небольшом количестве присутствуют опечатки и стилистические неточности.

Разумеется, высказанные вопросы и замечания ни в коей мере не снижают ценности полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы Жукова М.В.

Диссертационная работа Жукова М.В. является **самостоятельной** **завершенной** **научно-исследовательской** **квалификационной** **работой**, решающей ряд **актуальных задач**, связанных с созданием и изучением зондов для ССМ, расширяющих возможности этого метода. Она содержит **новые и ценные результаты**. Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертации. Жуков М.В. является автором и соавтором статей в весьма солидных изданиях. Так, полученные в работе результаты опубликованы в 12-и статьях, из них 3 статьи входит в перечень ВАК, а 9 статей - в базы цитирования Scopus/WoS. Результаты диссертационной работы многократно

докладывались на международных и всероссийских конференциях (22 тезиса докладов).

В целом, диссертационная работа Жукова Михаила Валерьевича по теме: «Наноструктурированные зонды для сканирующей силовой микроскопии: создание, исследование, применение» **по научной новизне, актуальности, объему и обоснованности научных результатов отвечает требованиям ВАК РФ**, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Работа соответствует критериям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 28.08.2017), а ее автор Жуков Михаил Валерьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.01 – Приборы и методы измерения.

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук,  
Заместитель директора по научной  
работе ФГУП «Ордена Ленина  
и ордена Трудового Красного Знамени  
научно-исследовательский институт синтетического  
каучука имени академика С.В. Лебедева»  
198035, г. Санкт-Петербург, ул. Гапсальская, д.1.

Т.Е. Суханова

Тел. (812)251-40-28; 8-921-3984212

Подпись Т.Е. Сухановой заверяю:

« 3 » 12 2017 г.

*Чл. секретарь*  *(Матеева Л.Н.)*

