

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Кравчука Константина Сергеевича

### ИЗМЕРЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СУБМИКРОННОМ И НАНОМЕТРОВОМ МАСШТАБАХ

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

Диссертационная работа посвящена разработке новых экспериментальных методов изучения свойств композиционных материалов и функциональных покрытий на наноуровне, позволяющих оценивать их трибологические характеристики. Основные результаты диссертации, обуславливающие ее актуальность и новизну, связаны с современным, интенсивно развивающимся направлением науки о трение и изнашивании – нанотрибологией.

Работа носит экспериментальный характер, выполненные в ней теоретические выкладки в основном используются для обработки и интерпретации полученных экспериментальных результатов.

Диссертация выполнена в объеме 138 страниц, содержит введение, пять глав, заключение и список литературы. Библиография насчитывает 111 наименований.

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.

Первая глава диссертации посвящена обзору методов и приборной базы для исследования трибологических и механических свойств поверхности твердых тел: твердость, модуль упругости, износостойкость, трещиностойкость, шероховатость.

Во второй главе описываются принципы работы используемых измерительных приборов. Дано описание основных измерительных методов, реализованных в этих приборах, в частности, в приборе «НаноСкан-3D».

Третья глава посвящена анализу рельефа поверхности по СЗМ-изображению. Представлен алгоритм определения параметров царапины, нанесённой пирамидальным индентором и результат его экспериментальной реализации. Приводятся результаты исследования поверхности нанокomпозиции алюминия и меди с фуллереном, важнейшим свойством которого является размер кристаллитов.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния механических свойств компонентов углерод-углеродного композиционного материала на трибологические свойства образца в целом.

В пятой главе рассмотрены результаты исследования механических свойств некоторых нанопокровов. Приводятся результаты исследований свойств покрытия на



основе оксидов, полученных карбоксилатным методами, физико-механических свойств поверхности образцов из поликарбоната и полиметилметакрилата. Представлены результаты анализа покрытия из линейно-цепочечного углерода, нанесённого на поверхность полиуретана, приводятся данные по трещиностойкости твёрдого алмазоподобного покрытия на кремниевой подложке.

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

Целью диссертации является разработка комплексного экспериментально-теоретического подхода к исследованию механических и трибологических свойств материалов, реализуемых на субмикронном и нанометровом масштабах, сравнение получаемых с их помощью результатов с традиционными трибологическими испытаниями.

Актуальность темы диссертации, поставленных и решенных в ней задач связаны с потребностями современной науки в новых средствах изучения физико-механических свойств материалов на наноуровне, позволяющих выявлять фундаментальные закономерности поведения новых перспективных материалов. Кроме того, актуальность работы обуславливается потребностями современной техники, в которой все больше используются различные миниатюрные устройства типа MEMS, NEMS.

Основные положения и результаты диссертации заключаются в:

а) разработке комплексного подхода к оценке триботехнических характеристик нанокompозитных материалов, включающего определение на наноуровне твердости, модуля упругости, электросопротивления, параметров трещиностойкости, трения и изнашивания;

б) апробации предложенного подхода в отношении ряда современных наноматериалов: металломатричные нанокompозиты с добавкой фуллерена, углерод-углеродные композиты, покрытия на основе линейно-цепочечного углерода, карбоксилатные оксидные и силоксановые покрытия.

Достоверность основных положений и результатов диссертации обеспечивается использованием сертифицированного экспериментального оборудования (СЭМ, СЗМ, наноинденторы), апробированных моделей механики сплошных сред и численных методов для интерпретации экспериментальных данных, а так же сопоставлением полученных результатов с известными результатами других авторов. Это позволяет утверждать о высокой степени обоснованности научных положений, результатов и выводов, сформулированных в диссертации.

Основным элементом новизны диссертации является положение об использовании единой системы образец – измерительный зонд (контроль образец) для измерения физико-механических свойств материалов и оценки их трибохарактеристик. Данное обстоятельство существенно повышает достоверность и адекватность оценки трибологических свойств исследуемых материалов.

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. Аннотация включает основные положения диссертации и соответствует ее содержанию.

По диссертации имеются следующие замечания.

1. Представленные в диссертации экспериментальные методы опираются на самое современное оборудование для исследований материалов на масштабах, близких к атомному. Однако используемые в диссертации теоретические модели основываются на весьма традиционных концепциях классической механики сплошных сред. Такое несоответствие представляется странным, при том, что к настоящему времени разработано немало теоретических моделей (в том числе, достаточно простых), учитывающих особенности контактного взаимодействия тел на наноуровне, например, фактор межмолекулярного взаимодействия (адгезии).

2. Формулировки выводов о влиянии на износостойкость фрикционных углерод-углеродных материалов параметров их структуры (п.4 Заключение, с.123) представляются необоснованно общими и категоричными. Следовало бы оговорить, что соответствующие результаты были получены для вполне определенного вида углерод-углеродных материалов (– ФКУМ-1, 2, 3) и при определенных условиях испытаний (– режим торможения). То же самое касается выводов по износостойкости полимерных материалов с нанесённым силоксановым покрытием (п.6 Заключение, с.124).

3. В диссертации недостаточно полно описано основное экспериментальное оборудование – сканирующий нанотвердомер «НаноСкан-3D». В частности, не указаны такие его технические характеристики как точность измерения, диапазоны нагрузок и скоростей движения индентора. Неясно, какие требования предъявляются к образцам.

4. Ряд формул в диссертации приводится без вывода или ссылок на источники. Примером тому служит формула (2.13) на с.57, которая в диссертации выписывается без обоснований, при том, что подробный ее вывод содержится в работе [31], соавтором которой является автор диссертации.

5. Рассчитываемая по формулам (2.5) – (2.9) (с. 47 – 48) величина  $\mu$  называется автором коэффициентом трения и получается выделением из общей силы  $F_x$  сопротивления скольжению индентора деформационной составляющей  $T$ . Однако, согласно принятой в трибологии терминологии, такую величину правильно называть адгезионным коэффициентом трения. Здесь следует отметить, что для оценки эксплуатационных трибохарактеристик материала главный интерес представляет полный коэффициент трения, определяемый как отношение  $F_x / P$ , а не его составляющие.

6. Определения интенсивности изнашивания (с.45):  $J = Ltv/h$  и твердости (с.49):  $H = S_t / F_x$  представляются некорректными – соответствующие дроби следует перевернуть.

7. Диссертация содержит ряд опечаток:



- а) В оглавлении и тексте диссертации присутствуют два раздела под номером 3.1.
- б) В формуле (1.1) на с.16 присутствует странный аргумент у функции синуса:  $\sin d/2$ .
- в) В левой части формулы (2.7) на с.48 вместо  $F_x$  должно стоять  $F_{тр}$ .
- г) В формуле (3.5) на с.75 пропущен показатель степени 2 у множителя  $\tan \vartheta$ .
- д) В формулировке п.1 Заключения (с.123) присутствуют явно лишние словосочетания.

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 в целом соответствует Положению ВАК о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор – Кравчук Константин Сергеевич, 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

“17” ноября 2015 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](mailto:imp@ipmnet.ru); [isoldat@mail.ru](mailto:isoldat@mail.ru)