

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Васька Артема Анатолійовича

“Трибологічні властивості наноструктурованих об’єктів на атомно-гладких поверхнях”,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка

Серед сучасних наукових методів, які об’єднують у собі можливості неруйнівних режимів досліджень інтерфейсів тертя з субнанометровою роздільною здатністю, можна виокремити сканувальні зондові методи дослідження, а саме: тунельну, електронну, та атомно-силову мікроскопії. Практична реалізація цих методів триває з початку 80-х років минулого сторіччя і за цей час здобуто багато цікавих і унікальних результатів. Незважаючи на бурхливий розвиток зондових методів та на отримані результати, багато питань залишаються ще не вирішеними. До них належать проблеми контролю площі контакту під час вимірювань, визначення топографії поверхні до та після трибологічних досліджень, контролю складу змащувального матеріалу, контролю стабільності моношару в процесі вимірювань в місці контакту. Дисертаційна робота Васька А.А. присвячена вирішенню цих проблем, що свідчить про її актуальність.

Автором запропоновано та реалізовано комплексну методологію дослідження трибологічних властивостей наноструктурованих об’єктів, що включає наступні неруйнівні методи: левітуючий в магнітному полі маятник, сканувальна тунельна мікроскопія, атомно-силова мікроскопія, електронна мікроскопія та тунельна спектроскопія. Ці методи відносяться до галузі фізичної електроніки та плідно застосовані в роботі здобувача для розв’язання поставлених завдань в галузях фізики поверхні, трибології тощо.

Дисертація складається з анотації, вступу, п’яти розділів, два з яких є оглядовими, загальних висновків та списку літератури, що складається з 182 найменувань. Аналіз літературних джерел в першому розділі допоміг виокремити коло проблем, які стають на заваді встановленню трибологічних властивостей інтерфейсів, що досліджуються, в загальній картині тертя. В другому розділі представлено методи дослідження та отримання наноструктурованих об’єктів на атомно-гладеньких поверхнях, представлено технологію синтезу таких об’єктів та технологію отримання атомно-гладких поверхонь. Окрім того, здобувачем реалізовано метод вимірювання тертя спокою наноструктурованих об’єктів (наночастинок золота) на підкладках, що обертаються.

Третій розділ є кістяком дисертаційної роботи. У ньому запропоновано принципово новий неруйнівний метод вимірювання коефіцієнтів тертя на основі магнітного левітаційного маятника. Такий метод був апробований для класичних трибологічних пар сталь/Si та сталь/Al. Отримані результати добре узгоджуються з відомими літературними даними. У цьому ж розділі

представлено дослідження впливу шорсткості поверхні на коефіцієнт тертя для трибологічної пари *сталева кулька/поверхня* на прикладі атомно-гладенької (відпаленої) та зернистої (невідпаленої) поверхонь золота. Проаналізовано залежність коефіцієнта тертя $\mu_{ko}(\tau)$ як функції часу τ для невідпаленої поверхні та виявлено дві ділянки, які відповідають руйнівному та неруйнівному режимам. За таких умов здобувачем встановлено та використано неруйнівні режими трибологічних досліджень.

Четвертий розділ демонструє ще одне застосування запропонованого неруйнівного методу левітуючого в магнітному полі маятника, а саме одночасні вимірювання вольт-амперних характеристик між сталеву кулькою-зондом та поверхнею, що дозволило встановити трибологічні та електрофізичні властивості інтерфейсів тертя *n-алкан/золото (111)* та *n-алкан/графіт*. Структура змащувальних моношарів *n*-алканів, нанесених на атомно-гладенькі поверхні золота(111) та графіту, контролювалась за допомогою сканувального тунельного мікроскопа. Здобувачем експериментально встановлено немонотонну залежність коефіцієнта тертя $\mu_{ko}(L) \sim \cos(L)$ від довжини L молекули алкану для інтерфейсів *n-алкан/золото(111)* та *n-алкан/графіт*. Визначено вплив компонентного складу і структури змащувальних плівок на коефіцієнт тертя на прикладі однокомпонентних плівок тетракозану ($C_{24}H_{50}$), октатетракоктану ($C_{48}H_{98}$) та їхньої бінарної суміші, адсорбованих на поверхні графіту. У такий спосіб виявлено істотне зниження тертя бінарної суміші у порівнянні з моношарами однокомпонентних плівок.

У п'ятому розділі представлено результати дослідження наноструктур золота отриманих безпосередньо на атомно-гладеньких поверхнях слюди, дисульфиду молібдену, графіту за умов поліольного синтезу. Формування плівки стабілізатора росту наночастинок золота на підкладках досліджено методами вимірювання кута змочування та ІЧ-спектроскопії. Хочеться особливо відзначити запроповану та реалізовану здобувачем методику вирощування наноструктур золота із чистою (не забрудненою стабілізатором росту) поверхнею на атомно-гладеньких підкладках. Вона є вельми цікавою по суті, а також на мій погляд має неабияку практичну цінність, адже раніше відомі рецепти вирішення цієї технологічної задачі вимагали умов надвисокого вакууму, тобто були доволі ресурсозатратними. Трибологічні властивості одержаних наноструктур досліджено за допомогою магнітного левітаційного трибометра, атомно-силового мікроскопа та методу дослідження тертя на підкладках, що обертаються.

За сукупністю результатів дисертаційна робота Васька А.А. є завершеним науковим дослідженням, яке розв'язує важливу наукову проблему – дослідження електрофізичних та трибологічних властивостей інтерфейсів, створених металічними поверхнями (атомно-гладенькими), розділеними моношаровими мастильними плівками. Дисертаційна робота виконана на високому науковому та методологічному рівні. Вірогідність отриманих результатів підтверджується використанням комплексу експериментальних методів та теоретичних підходів. Отримані результати опубліковані в провідних міжнародних фахових журналах та широко представлені на міжнародних

конференціях. Робота відзначається науковою новизною та практичною цінністю.

Також в роботі можна відзначити деякі недоліки:

1. Викликає певні сумніви використання вольт-амперних характеристик, тобто фактично тунельної спектроскопії, для перевірки неруйнівного характеру вимірювання, принаймні в контексті даної дисертаційної роботи. З одного боку, дійсно відомо, що ВАХ тунельного переходу може слугувати джерелом інформації про адсорбовані на поверхні молекули або наночастинки. Фактично, на сучасному етапі, можна вести мову про коливальну спектроскопію одиночних молекул та про вимірювання локальної густини електронних станів на рівні окремих атомів. З іншого боку, також відомо й те, що практичне одержання цієї інформації вимагає подолання численних складних технічних проблем: проведення вимірювань при низьких температурах порядку гелієвих та у надвисоковакуумному середовищі, реєстрація тунельних спектрів в режимі першої або другої похідної струму за напругою, тощо. В разі недотримання цих вимог, що якраз і має місце в описаних експериментах, інформація про коливальні збудження чи густину станів маскується безліччю неконтрольованих факторів, залишаючи єдину спостережувану особливість у вигляді експоненційної залежності тунельного струму від напруги, що є загальною квантово-механічною властивістю тунельного бар'єру незалежно від стану поверхонь між якими відбувається тунелювання. На мій погляд, значно вірогіднішим та практичнішим доказом неруйнівного характеру досліджень були б топографічні СТМ та АСМ зображення контактуючих поверхонь до та після акту тертя, оскільки навіть в атмосферних умовах при кімнатній температурі, як власне й доведено автором в 4-му розділі, дозволяють одержати зображення поверхні із атомним або молекулярним розділенням.

2. 5-й розділ роботи залишає певне відчуття неузгодженості вибору об'єктів дослідження із попередніми розділами. Основна логічна лінія роботи проходить в напрямку від макроскопічних вимірювань коефіцієнту тертя традиційних модельних систем до впливу на його значення присутності нанорозмірного мастила, тобто самоорганізованих шарів молекул C_n , та до з'ясування механізмів цього впливу на атомно-молекулярному рівні. У зв'язку із цим виникає природне очікування читачем продовження цієї лінії до самого кінця роботи, а конкретно, вивчення таких самих інтерфейсів в нанорозмірному масштабі методом АСМ, наприклад, коефіцієнту тертя в системі наночастинка золота / наномастило / графіт, або ж навпаки використання золотої кульки в макроскопічних МЛТ дослідженнях в 4-му розділі. Натомість трибологічні АСМ дослідження окремих нанопризм золота здійснено на підкладинці у вигляді свіжосколотої слюди. При цьому, одержані значення коефіцієнту тертя є приблизно на два порядки більшими аніж усі інші значення одержані в роботі. Така відмінність залишається непрокоментованою, було б бажано пояснити це фізично, або ж звернути увагу на відмінність методології визначення чи обчислення коефіцієнту тертя в кінці 5-го розділу.

3. Як і в будь-якій дисертації за всю історію людства, зустрічаються описки, орфографічні та стилістичні помилки. В 3-му розділі спостерігається певне перевантаження деталями програмної та електронної реалізації створеної установки МЛТ вимірювань. Їх доцільніше було б навести в додатку, разом із іншими матеріалами цієї ж тематики, які там вже є, наприклад разом із програмним кодом. Очевидно, що автор намагався підкреслити власний внесок у створення виключно своїми силами складного і сучасного експериментального обладнання, і це є дійсно досягненням яке викликає величезну повагу, що очевидно будь-якому сучасному українському фізику експериментатору. Це досягнення все одно б ніхто не ставив під сумнів, проте в основному тексті доцільніше було б сконцентруватися на фізичній стороні та загальній схемі вимірювань, а ось технічну реалізацію було б краще описати цілісно, і головне більш зручно для сприйняття, в додатках Б,В,Г.

Незважаючи на вказані недоліки, вважаю, що дисертація “Трибологічні властивості наноструктурованих об’єктів на атомно-гладких поверхнях” є самостійною завершеною науково-дослідною роботою, що відповідає усім вимогам до кандидатських дисертацій, а її автор Васько Артем Анатолійович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.04 – фізична електроніка.

Офіційний опонент:

кандидат фізико-математичних наук,
асистент кафедри фізичної електроніки
факультету радіофізики, електроніки
та комп’ютерних систем
Київського національного університету
ім. Т. Г. Шевченка

А. М. Горячко

Підпис А.М. Горячко засвідчую:

Заступник декана з наукової роботи
факультету радіофізики, електроніки
та комп’ютерних систем
Київського національного університету
ім. Т. Г. Шевченка
кандидат фіз.-мат. наук

В. Ф. Борецький