

## ВІДГУК

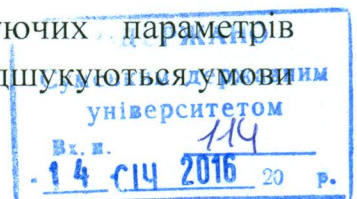
офіційного опонента

на дисертаційну роботу Заскоки А. М. «Фазові переходи в ультратонких твердоподібних плівках мастила при межовому терті», представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла

**Актуальність теми дисертації.** У зв'язку зі стрімким розвитком електроніки та мініатюризацією деталей останнім часом суттєво підвищився інтерес до процесів, які відбуваються на нано- та мікро-розмірних рівнях. Зважаючи на малі розміри систем, забезпечити повноцінне змащування інколи не вдається. Тому використовують тонкі та надтонкі плівки мастила з товщиною до 3 нм. Таке мастило називають межовим. З метою дослідження межового режиму тертя проводяться численні експериментальні дослідження, які показали, що поведінка межового мастила сильно відрізняється від об'ємного. І хоча на сьогоднішній день існує величезна кількість експериментальних даних, проте універсального підходу, який би узагальнював усі особливості межового режиму тертя досі не розроблено. До того ж, на цьому шляху виникають величезні труднощі розрахункового плану, що не вдається подолати існуючими методами аналізу. Тому подальше вивчення межового тертя часто проводиться за допомогою методів молекулярної динаміки та феноменологічних моделей. У дисертації Заскоки Антона Миколайовича проводиться розвиток термодинамічної моделі плавлення надтонких плівок мастила, розробленої професором В.Л. Поповим на основі теорії фазових переходів Ландау другого роду.

Однією з найбільших проблем при використанні надтонких шарів мастила є так званий переривчастий режим тертя, що часто виникає під час взаємного зсуву функціональних частин механізмів та призводить до інтенсивного зношування поверхонь і руйнування пристроїв. Виходячи з цього, загальне завдання дисертації полягало саме у вивченні тих явищ, що можуть викликати цей режим, та методів його запобігання та усунення, що є нагальною проблемою для розвитку технологій на мікро- та нано-рівнях.

Основна частина дисертації присвячена вивченню плавлення надтонкого шару мастила при межовому терті, виходячи з моделі, відповідно до якої плавлення та тверднення мастила відбувається за сценаріями фазових переходів першого або другого родів. З цією метою проводиться модифікація термодинамічного потенціалу. На основі даних модифікацій досліджується кінетика трибологічних систем при варіюванні керуючих параметрів термодинамічної системи. Таким чином аналізуються та відшукуються умови



переходу до рідиноподібного режиму тертя, що є актуальним питанням з точки зору зменшення тертя та подовження терміну функціонування пристроїв.

Таким чином, актуальність теми дисертації не викликає сумнівів.

**Ступінь обґрунтованості та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** У дисертаційній роботі використовувались наступні методи дослідження: методи математичного аналізу та моделювання, методи математичної фізики та порівняння отриманих розрахункових результатів з експериментальними та теоретичними даними інших авторів, теорія фазових переходів та стохастичні методи. Усі ці методи пройшли багаторазову перевірку при їх застосуванні до розв'язуванні різноманітних задач теоретичної та прикладної фізики.

**Характеристика дисертації та новизна отриманих результатів.**

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків і списку використаних джерел. Першим розділом є літературний огляд, у якому аналізується стан проблеми межового тертя на сьогоднішній день як з теоретичної, так і експериментальної точок зору, а також робиться короткий огляд існуючих моделей. Наступні три розділи присвячені вивченню ефектів під час тертя двох атомарно-гладких твердих поверхонь на основі трьох модифікацій термодинамічного потенціалу, що використовувався у моделі Попова, та з урахуванням ефективної залежності в'язкості мастила від температури та швидкості зсуву. Відповідно, в кожному оригінальному розділі роботи було отримано та обґрунтовано нові наукові результати, серед яких слід виділити такі:

1. Уперше теоретично встановлено, що при зміні параметрів нанотрибологічної системи, таких як жорсткість пружини та температура мастила, для трьох типів рідин (псевдопластичних, ньютонівських та ділатантних), найменшу силу тертя в трибосистемі завжди забезпечує псевдопластичне мастило, хоча пружні напруження при цьому можуть бути найбільшими.

2. Уперше показано, що наявність пружної взаємодії у нанотрибологічній системі суттєво збільшує ширину гістерезису на залежності сили тертя від температури за рахунок фазових переходів першого роду у порівнянні з залежністю, розрахованою за умови фіксованої швидкості зсуву. Гістерезис на залежності сили тертя від швидкості зсуву при фіксованій температурі відсутній за наявності пружного зв'язку.

3. Уперше досліджено поведінку трибологічної системи при термодинамічному потенціалі з урахуванням лінійного доданку. Показано, що ненульове значення параметра порядку для розплавленого мастила дозволяє описати квазістатичну силу тертя.

4. Показано, що під час функціонування нанотрибологічної системи в режимі рідиноподібного тертя різний час зупинки зовнішнього приводу приводить до часткового або повного тверднення мастильного матеріалу. За допомогою цього вдалося описати та пояснити ефекти пам'яті, які проявляються у вигляді піків різної висоти у залежностях сили тертя від часу при повторному увімкненні зовнішнього приводу.

**Практична цінність роботи.** Результати роботи розширюють уявлення про межовий режим тертя, дозволяють спрогнозувати поведінку трибологічних систем у різних режимах функціонування та виявити властивості мастильних матеріалів, які найкращим чином підходять для зменшення руйнування поверхонь тертя в наномеханіці та біоінженерії при розробці пристроїв електроніки з рухливими елементами, штучних суглобів та інше.

На основі ознайомлення з науковими працями здобувача можна стверджувати, що **повнота викладу основних результатів дисертації в наукових працях** є майже стовідсоткова за винятком п.4 у четвертому розділі, де показана кінетика трибологічної системи з використанням темодинамічного потенціала, який враховує лінійний доданок параметра порядку.

Дисертація оформлена у відповідності до вимог та існуючих стандартів України оформлення документів у сфері науки та техніки. **Зауважень до оформлення дисертації немає.**

**Автореферат повністю та ідентично відтворює зміст дисертації** та містить стисле викладення постановки завдання, методики досліджень, основних результатів та висновків.

**Проте є кілька зауважень до змісту роботи.**

1. Головним зауваженням до всієї роботи є замала кількість, а іноді й відсутність, числових оцінок, що свідчили б про застосовність запропонованої теорії або її модифікації до питання, що розглядається. До деякої міри, виправданням може слугувати те, що отримані результати відтворюють експериментальні залежності. Але це відтворення відбувається здебільшого на якісному рівні. Це означає, що така поведінка може спричинитися й іншими факторами, які виходять за коло явищ, що аналізуються в дисертації.

2. Як приклад нехтування такими оцінками, можна навести використання моделі атомарно-гладких поверхонь. При надтонких проміжках між поверхнями, що рухаються одна відносно іншої, стають важливими такі параметри як, наприклад, атомарна структура поверхні та частота коливань атомів на поверхні. Сама задача, навіть у моделі безструктурного мастила стає динамічною (нестационарною) через наявність крайових умов, що постійно змінюються.

3. Іншим прикладом є застосування, а вірніше, розвинення теорій фазового переходу першого та другого роду для розгляду задачі тертя. Загалом, це - теорії, що описують речовину у рівноважному стані або при невеликих відхиленнях від нього. Дисертант робить модифікації термодинамічного потенціалу, вважаючи як його, так і свої доданки такими, що відповідають цьому критерію, але без наведення конкретних оцінок. Можливо, такі оцінки були зроблені в теорії Попова. Але це не відміння необхідності принаймні повторити їх у дисертації та зробити оцінку своїх нововведень щодо їх відповідності до основних припущень теорії. Це тим більше важливо, що у дисертації досліджуються ефекти пам'яті, беззаперечно пов'язані з релаксаційними процесами.

4. До недоліку дисертації можна також віднести відсутність порівняння отриманих результатів з результатами теорії Попова, які б незаперечно свідчили про необхідність зроблених модифікацій. До того ж, матеріал дисертації викладений так, що відчувається певна сваволя автора у застосуванні моделі фазового переходу того чи іншого типу до різних аспектів досліджуваного явища. Було б бажано провести певну класифікацію, пов'язати між собою ці дві моделі та вказати критерії застосування кожної з них.

5. Гістерезис при терті дійсно може бути результатом фазового переходу першого роду в системі. В дисертації навіть не розглядається можливість іншого висновку. Натомість, "фальшивий" гістерезис може виникнути внаслідок неповної релаксації стану системи. Тому, якщо тема дисертації буде розвиватися у майбутньому, було б доцільно не тільки обґрунтувати зроблений висновок відповідними оцінками, але й зробити експериментальну перевірку.

6. Тертя - це виконання роботи, а отже і дисипація енергії, що пов'язано з підвищенням локальної температури. В моделях, що розглядаються в дисертації, температура вважається не тільки сталим параметром, але ще й просторово-однорідним по всьому об'єму мастила. Останнє можливе при стаціонарних процесах та надтонких шарах, але знову потрібні відповідні оцінки. З іншого боку, режим переривчастого тертя навряд чи можна вважати стаціонарним в тих масштабах часу та простору, що розглядаються. Але оцінок щодо можливості знехтувати відповідними змінами температури в дисертації немає.

7. З іншого боку, температурні залежності досліджуваних параметрів враховуються через температурну залежність параметра в'язкості мастила. Однак сама застосовність цього поняття, враховуючи масштаб товщин надтонких шарів, для яких будується теорія, потребує доведення або принаймні деякого обговорення.

8. З моєї точки зору, вибрати модельні функції у вигляді на кшталт формул (2.4) або (2.6) не можна. Інакше ми отримуємо деякий розмірний параметр, який змінюється при переході від однієї системи одиниць до іншої, а отже не застосовний для аналізу,

### Загальний висновок.

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи та на цінність отриманих у ній результатів. У цілому дисертація Заскоки А.М. «Фазові переходи в ультратонких твердоподібних плівках мастила при межовому терті» є завершеною працею, в якій отримано нові наукові результати. Таким чином, дисертація відповідає вимогам до кандидатських дисертацій, а її автор Заскока Антон Миколайович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла.

Офіційний опонент  
доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
провідний науковий співробітник  
відділу фізики кристалів  
Інституту фізики  
НАН України (м. Київ)

*А. Вейтченко*

О. І. Войтенко

