

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Ляшенка Якова Олександровича
«Фазові переходи між кінетичними режимами межового тертя»,
на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла

Актуальність теми дисертації

Дисертаційна робота Я. О. Ляшенка присвячена вирішенню однієї з фундаментальних проблем фізики – з'ясування механізмів тертя в ультратонких плівках мастила, в першу чергу механізму появи переривчастого режиму руху, що також є дуже актуальним і з практичної точки зору, тому як дозволяє заздалегідь вибирати параметри системи або приладу, що забезпечують оптимальний режим роботи. Про актуальність обраної теми досліджень свідчить також те, що сьогодні багато дослідників працюють над дослідженнями різноманітних нанорозмірних систем, в яких є контактуючі рухомі поверхні. В зоні контакту використовується межове мастило задля того, щоб зменшити коефіцієнт тертя. Існує багато теоретичних напрацювань і експериментальних даних щодо цього питання. Але, багато питань і досі лишаються відкритими. Це пов'язано у першу чергу із тим, що на стан ультратонкого мастила суттєво впливають обмежуючі його поверхні, змінюючи симетрію термодинамічних станів. Завдяки цьому в таких шарах стають несправедливими звичайні класичні підходи, що використовуються до опису об'ємних мастил. Ці особливості потребують побудування нових підходів до вивчення межового тертя, один із яких розвинуто в дисертаційній роботі, в якій вирішується важлива наукова проблема “Термодинаміка фазових переходів між кінетичними станами межового мастила”. Отже, актуальність теми дисертації насамперед обумовлена прикладним значенням одержаних результатів, оскільки системи, що розглядаються, використовуються в сучасній промисловості. З іншого боку, отримані результати мають також і високе фундаментальне значення, оскільки дозволяють просунутися у розумінні фізичних процесів, що проходять в зоні контакту в нанорозмірних трибологічних системах.

Загальна характеристика дисертаційного дослідження

Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів (один з яких є літературним оглядом), висновків і списку використаних джерел, у якому міститься 316 посилань, що подані на 34 сторінках.

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційного дослідження, сформульовано мету, задачі досліджень, вказано на зв'язок дисертації з науковими програмами і темами, сформульовані об'єкт і предмет дослідження, вказані методи дослідження, наукова новизна і практична значущість отриманих в дисертації результатів. Також описаний особистий вклад здобувача в опублікованих роботах і перелік конференцій та семінарів, де робота доповідалася (дані апробації).

Перший розділ є літературним оглядом, де дисертант описує теоретичні моделі, що застосовуються для опису межового тертя, а також наводить відомі експериментальні дані інших авторів. Також розглянуто сучасні експериментальні методики, які дозволяють вимірю-

вати силу тертя, в'язкість мастила, пружні і в'язкі компоненти напружень, товщину мастила, тощо в системах, які працюють в режимі межового тертя. Докладно описано модель фазових переходів, на якій базується дисертаційне дослідження. Наприкінці розділу автор приходиться до висновку, що запропоноване ним дослідження актуальне, оскільки досі не існує єдиної теорії, що описувала б великий набір явищ, що спостерігається в різноманітних експериментах з дослідження режиму межового тертя.

Нажаль, досить коротко описано два альтернативних теоретичних підходи – розрахунки методом молекулярної динаміки (МД) і використання "землетрусних" моделей (ЗМ). При цьому не підкреслена важлива проблема про невідповідність критичних швидкостей виникнення/зникнення переривчастого типу руху – метри в секунду в методі МД і мікрометри в секунду при використанні ЗМ (що відповідає експерименту), адже дослідження переривчастого режиму руху є основною темою дисертаційної роботи.

Другий розділ на початку містить обґрунтування обраної методики дослідження, де автор проводить порівняння теоретичних і експериментальних робіт різних авторів, в яких використовується теорія фазових переходів Ландау першого і другого роду. Родзинкою підходу, який використовує дисертант, є введення в розвинення вільної енергії доданка, що зв'язує пружну деформацію з параметром порядку. Це і дозволяє описати зсувне плавлення, а також пояснити появу переривчастого режиму руху в трибологічній системі. В розділі з'ясовано, що в системах, які розглядаються, в залежності від зовнішніх умов можуть спостерігатися фазові переходи як першого, так і другого роду. Значна частина розділу містить модель фазового переходу першого роду в рамках двох типів (симетричного і несиметричного) розвинення вільної енергії в ряд за степенями параметра порядку, який є модуляцією густини (періодична частина мікроскопічної функції розподілу густини середовища). Таким чином визначений параметр порядку приймає нульове значення в рідиноподібному стані мастила, і ненульові, коли мастило твердоподібне. На основі запропонованих виразів для вільної енергії розглянуто стаціонарні стани мастила, побудовано фазові діаграми із різними режимами тертя, узагальнену на межовий режим діаграму Герсі-Штрібека, розглянуто кінетику двох типів трибологічних систем, а також переривчастий режим руху контактуючих через мастило поверхонь. Автором також запропоновано пояснення причин, що призводять до переривчастого режиму. Також розглянуто деякі моменти в моделі, яка описує фазовий перехід другого роду. Наприкінці розділу проведено моделювання, яке дозволяє зробити порівняння межового режиму тертя зі звичайним сухим тертям без мастила, і гідродинамічним тертям, коли мастильний шар має об'ємні властивості.

Нажаль, недостатньо докладно описана роль параметра " a " в доданку, який зв'язує пружну деформацію з параметром порядку і вибір його значення ($a = 2 \times 10^{10}$ Па).

Третій розділ дисертації присвячений вивченню тих самих явищ, що і в попередньому розділі, але при врахуванні залежності в'язкості мастила від температури і градієнту швидкості, яка отримана у науковій групі Бо Персона, що займається дослідженнями в області контактної механіки і фізики тертя. В розділі показано, що врахування такої залежності в'язкості приводить до того, що в системі з'являється статична компонента сили тертя, що дозволило автору теоретично описати деякі особливості ефектів пам'яті, які останнім часом привертають увагу багатьох дослідників і пов'язані із релаксаційними процесами в шарі мастила.

В **четвертому** розділі проведено дослідження тертя шорстких поверхонь, а також проведено врахування просторово неоднорідного розподілу параметра порядку по товщині мастильного шару. Оскільки задача тертя поверхонь, що володіють нерівностями, дуже складна, автор розглядає спрощені варіанти, у рамках певних наближень. Показано, що наявність нерівностей може порушувати періодичність залежностей у переривчастому режимі руху. Також розглянуто випадок, в якому при терті мастило має доменну структуру із доменами, які дають різні вклади в загальну силу тертя. Моделювання кінетики тертя із урахуванням градієнтного доданку в розкладі вільної енергії показує, що вплив цього доданку несуттєвий. Це пояснює той факт, що в експериментах в переривчастому режимі часто спостерігаються саме періодичні залежності сили тертя від часу. Тому хоча одновимірною моделлю фазового переходу і не повністю відображає картину, що спостерігається на мікроскопічному рівні, вона добре описує якісну макроскопічну поведінку системи, яка відображається часовими залежностями сили тертя, пружних і в'язких напружень, значення параметра порядку, тощо. Також в розділі розглянуто ситуацію, в якій враховується пружність контактуючих поверхонь, що приводить до просторового розподілу зміщень і пружних напружень по площі контакту. В цьому випадку плавлення і тверднення розповсюджується фронтами, які спрямовані від границі контакту, де починається плавлення, оскільки саме на границі пружні напруження приймають найбільші значення, і умова плавлення виконується раніше, ніж в інших ділянках контакту. В цьому випадку переривчастий режим асоціюється із періодичним плавленням і твердненням мастила, хоча він не пов'язаний зі зміною швидкості руху, тому що верхня контактуюча поверхня зміщується із постійною швидкістю. Це є дуже цікавим результатом, що може бути безпосередньо перевірено експериментально. Значним досягненням, з моєї точки зору, є також використання графічного процесора для розрахунку решітки величезного розміру (200x200) при описі неоднорідного інтерфейсу.

У **п'ятому** розділі дисертантом побудовано модель, в якій фазовий стан мастила визначається значенням параметра «надлишкового об'єму», який виникає при плавленні – досить популярний метод в феноменологічному підході при розгляді термодинаміки твердих тіл. Запропоновано розкладання вільної енергії за степенями цього параметра, що є головним моментом при побудові відповідних кінетичних моделей. Розглянуто декілька залежностей вільної енергії. Автор пов'язує ці види розкладань із типом межового мастила. Значною перевагою запропонованого в розділі підходу є те, що він явним чином враховує вплив тиску на поверхні тертя (зовнішнього навантаження). Досліджено вплив величини навантаження на режими тертя і показано, що отримані результати якісно збігаються з відомими експериментальними даними. Побудовано залежності сили тертя від навантаження, які свідчать про те, що коли величина навантаження перевищує критичне значення, фазовий перехід першого роду стає переходом другого роду. Також показано, що зі збільшенням швидкості зсуву зростає частота фазових переходів, а зі зростанням температури мастила вона, навпаки, зменшується. В останньому підрозділі автор дисертації встановлює зв'язок між моделлю, що запропонована ним в цьому розділі, і моделями, що розглядаються у попередніх розділах дисертації. Звичайно, використання в якості параметрів порядку модуляції густини і параметра надлишкового об'єму – це різні феноменологічні підходи, однак автору дисертації вдалося їх зв'язати між собою, принаймні на якісному рівні, і отримати важливі результати про вплив тиску на коефіцієнт тертя. Тому останні два розділи дисертації, де параметром порядку є надлишковий об'єм, не тільки узагальнюють результати попередніх розділів, а і доповнюють їх.

Останній, **шостий** розділ дисертаційної роботи присвячений повному опису еволюції трибосистеми за допомогою використання методів нерівноважної термодинаміки – одного із найсучасніших методів теоретичної фізики, за розвинення якого І.Р. Пригожину була присуджена Нобелівська премія. Головною ідеєю тут є те, що поверхні тертя і мастило мають різні температури, які можуть вирівнюватися за рахунок процесів теплопровідності. Умовно виділено дві підсистеми – рівноважна і нерівноважна, між якими існує передача тепла за рахунок процесів дисипації механічної енергії. В розділі побудовано фазові діаграми, на яких у залежності від керуючих параметрів (температури, швидкості зсуву і зовнішнього навантаження) реалізується фазовий перехід першого або другого роду. Записано повну систему кінетичних рівнянь, за допомогою якої проведено числове моделювання процесу тертя. Нажаль, при цьому недостатньо докладно описаний нагрів плівки мастила при ковзанні і не обговорюється можливість експериментальної перевірки цього ефекту. Також в розділі розглядається застосування теорії, що розроблена в дисертації, для опису фізичного явища надпластичності. Автор робить висновки, що теорія фазових переходів між кінетичними станами мастила може застосовуватися для пояснення процесу ковзання зерен, що розділені міжзеренною фазою, у фрагментованому металевому зразку. При малій силі тертя між контактуючими зернами у об'ємному зразку виникатиме режим надпластичного стану, але для його описання потрібні подальші дослідження.

Безсумнівною перевагою даної дисертаційної роботи є те, що багато результатів отримано аналітично, а не тільки наведені чисельні величини, отримані для деякого набору параметрів системи, як це відбувається в більшості розрахунків методом МД.

До тексту дисертації є такі зауваження:

1. В розділі 1 (літературний огляд) на стор. 46-48 наведено виведення виразу для сили, що відповідає переходу від ковзання до зупинки для атома, що рухається в періодичному потенціалі (рівняння (1.16), рис. 1.17) – проте це питання є давно дослідженим (див. монографію Н. Risken, *The Fokker–Planck Equation*, Springer, Berlin, 1984).

2. В списку літератури, у посиланні [221] не вказані автори.

3. На залежності сили тертя від часу спостерігається пік при зупинці ковзання (рис. 3.16 на стор. 166, рис. 4.9 на стор. 188, рис. 4.11 на стор. 195). Наскільки мені відомо, такий пік не спостерігається в експерименті, як і при використанні інших теоретичних підходів; тому слід було б пояснити, чи є це артефактом підходу, або чому цей пік може бути відсутнім в експерименті.

4. Частина результатів, що наведені в дисертації, є "прогнозуючими" – вони ще не спостерігалися експериментально. Бажано було б наприкінці дисертації скласти список таких результатів як "інструкцію" для експериментаторів для майбутньої перевірки запропонованої теорії.

5. Незважаючи на те, що головною перевагою феноменологічного підходу є тісний зв'язок з реальними системами і експериментами, цей зв'язок відображено в дисертації недостатньо докладно. Всі експериментальні результати зібрані в розділі 1 (літературний огляд), а в наступних розділах є тільки посилання на них. З моєї точки зору, було б бажано вибрати хоча б одну конкретну систему, вже досліджену експериментально, детально обґрунтувати вибір параметрів для її розрахунку (адже число параметрів, необхідних для розрахунку, досить велике – наприклад, в розділі 6.2.2 (стор. 277) використовується близько 30 параметрів), і при-

вести на одному рисунку порівняння теорії з експериментом. Однак це зауваження, як і попереднє, носить характер побажання в майбутньому працювати в більш тісному зв'язку з експериментаторами.

Наукова новизна у роботі полягає в наступному:

1. У рамках теорії фазових переходів Ландау при використанні як параметра порядку модуляції густини і надлишкового об'єму описано фазовий перехід першого роду між структурними станами межового мастила, затиснутого між атомарно-гладкими твердими поверхнями, при їх зсуві. Знайдено зв'язок між визначеними таким чином параметрами порядку. Показано, що в широкому діапазоні параметрів динамічної трибологічної системи спостерігається переривчастий режим руху, що є однією з основних причин руйнування деталей, що труться в мікромеханізмах.

2. Проведено урахування універсальної залежності в'язкості межового мастила від температури і градієнта швидкості і показано, що при низьких температурах у трибологічній системі реалізується статична сила тертя, наявність якої дозволила теоретично описати особливості широко розповсюджених «стоп-старт» експериментів. На основі такого опису пояснено ефекти пам'яті, експериментально спостережувані у режимі межового тертя. Показано, що до них може приводити статична сила тертя або багаторазове збільшення часів релаксації основних величин у режимі спокою.

3. У рамках побудованої моделі фазових переходів у режимі межового тертя враховано вплив просторово неоднорідного розподілу параметра порядку за площею мастильного матеріалу, що перебуває в зоні контакту твердих тіл. Показано, що після першого акту плавлення мастила за рахунок багаторазового збільшення відносної швидкості зсуву мастильний матеріал наближається до однорідної структури, і далі встановлюється періодичний переривчастий режим руху, що підтверджується в експериментах.

4. Явно враховано вплив зовнішнього навантаження на контактуючі поверхні при їх зсуві і показано, що за наявності межового мастила між ними збільшення рівня навантаження приводить до того, що фазовий перехід першого роду між кінетичними режимами тертя замінюється на фазовий перехід другого роду. Це пояснює нетривіальний вплив навантаження на стаціонарні режими переривчастого тертя.

5. У рамках методу редукції розмірності проведено урахування пружних властивостей контактуючих тіл, розділених шаром межового мастила, при їх зсуві зі сталою швидкістю. З'ясовано, що за площею їх контакту встановлюється неоднорідний розподіл пружних напружень, що приводить до виникнення у трибологічній системі фронтів плавлення і тверднення. Це, у свою чергу, приводить до встановлення режиму з осцилюючою силою тертя, причому на поведінку системи критично впливає співвідношення між часами релаксації пружної деформації і параметра порядку.

6. Описано вплив на процес межового тертя нанорозмірних нерівностей контактуючих поверхонь твердих тіл. Показано, що вони можуть приводити до неоднорідного плавлення мастильного шару за площею контакту, коли реалізується доменна структура із двома типами доменів, що визначаються значенням параметра порядку. У результаті порушується періодичність залежностей сили тертя від часу.

Практичне значення роботи

Вважаю, що отримані в дисертаційній роботі Я. О. Ляшенка наукові результати можуть бути корисними для дослідників, що займаються вивченням нанотрибологічних систем, які працюють в режимі межового тертя. Оскільки в роботі отримані аналітичні вирази для температур і швидкостей, за яких мастило плавиться або твердне, маючи експериментальні значення цих величин можливо отримати значення сталих розкладання, функціями яких є вказані величини. Практично важливими є також фазові діаграми, що містять різні режими тертя, і узагальнена на межовий режим діаграма Герсі-Штрібека, оскільки вони можуть дати пораду експериментаторам, в якій області параметрів шукати той чи інший режим. Але, взагалі цінність роботи полягає саме в побудованих моделях, які здатні описати результати експериментів з дослідження межового тертя і фізичні ефекти, які в них спостерігаються, що згодом може бути використано при проектуванні реальних систем і механізмів.

Також слід зазначити, що результати роботи використовуються в учбовому процесі в Сумському державному університеті при викладанні спеціальних дисциплін на старших курсах, таких як «Нелінійні процеси та моделі», «Теорія фракталів» та «Математичне моделювання».

Достовірність отриманих результатів та ступінь обґрунтованості наукових положень, що виносяться на захист

Достовірність отриманих результатів передусім підтверджується використанням широко відомих фізичних методів і підходів – це методи теорії фазових переходів Ландау, методи теорії пружності, реологічні моделі і т. ін.. Окрім того, скрізь по всій дисертації проводиться порівняння отриманих результатів із експериментальними даними, а також із даними комп'ютерного моделювання інших авторів.

Основні результати роботи викладені в 28 статтях у фахових виданнях України і закордонних виданнях, переважно більшість яких опубліковано у журналах, які індексуються провідними наукометричними базами даних – Scopus, Web of Science, тощо. Широку апробацію результатів роботи підтверджують 28 робіт апробаційного характеру, деякі з яких опубліковано в матеріалах конференцій, які проходили закордоном, і в яких автор дисертації брав особисту участь. У списку публікацій в авторефераті відсутні повністю тотожні, а сам автореферат відповідає змісту дисертації.

Наукові результати, які отримані в роботі є новими, цікавими з наукової точки зору і будуть корисні для широкого кола науковців, які працюють в напрямку трибологічної науки. Найголовнішим в роботі, на мою думку, є те, що в ній фактично в рамках єдиної ідеології термодинамічного подання проблеми межового тертя описано багато явищ і ефектів межового тертя, які неодноразово спостерігались експериментально, а багато з яких до сьогодні не було теоретично пояснені. Якість оформлення дисертації добра, вона відповідає вимогам, що ставляться до дисертаційних робіт, а зроблені по роботі зауваження не знижують наукової цінності запропонованої роботи.

ВИСНОВОК

Враховуючи сказане вище, можна зробити такий загальний висновок. Дисертаційна робота Я. О. Ляшенка є завершеною кваліфікаційною працею, в якій вирішується важлива нау-

кова проблема “Термодинаміка фазових переходів між кінетичними станами межового мас-тила”, при вирішенні якої отримані нові важливі наукові результати.

За актуальністю теми, науковою новизною, обґрунтованістю і достовірністю висновків, науковим і практичним значенням отриманих результатів дисертаційна робота «Фазові переходи між кінетичними режимами межового тертя» задовольняє вимогам МОН України стосовно дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук, а саме, пп. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 із змінами (окрім п. 3), які внесені до постанов КМУ, затвердженими постановою КМУ від 12.09.2011 р. № 955. Згідно із цим вважаю, що автор дисертації, Ляшенко Яків Олександрович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Головний науковий співробітник
відділу фізичної електроніки
Інституту фізики НАН України
д-р фіз.-мат. наук, с.н.с.



О. М. Браун

