

ВІДГУК

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

1. Актуальність теми дисертації

На сьогодні дуже активно розвиваються експериментальні методи дослідження різноманітних фізичних систем. Одним із актуальних напрямків є побудова експериментального обладнання, яке дозволяє вивчати поведінку і властивості нанорозмірних систем. Це пов'язано із тим, що такі системи широко використовуються в сучасній промисловості, в медицині, в мікроелектроніці, тощо. В дисертаційній роботі Я. О. Ляшенка вивчається трибологічна система, що складається із двох атомарно-гладких твердих поверхонь, які розділено ультратонким шаром мастильного матеріалу, який має товщину в декілька нанометрів. В цьому випадку при взаємному русі контактуючих поверхонь реалізується режим тертя, який отримав назву межового. Такі механізми використовуються, наприклад, в накопичувачах на жорстких магнітних дисках. При побудові будь-яких мікромеханічних систем, в яких є рухомі контактуючі деталі, також буде існувати ситуація, яка вивчається в даній дисертаційній роботі. З іншого боку, в нанорозмірних системах завжди спостерігаються явища, які непридатні об'ємним системам, за рахунок того, що вклад поверхневої енергії стає визначальним. Для опису цих фізичних явищ як правило будуються нові фізичні теорії. Отже, дослідження, що проведено в дисертаційній роботі, є сучасним і актуальним.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота Ляшенка Я. О. виконувалася на кафедрі моделювання складних систем Сумського державного університету в межах науково-дослідних робіт державного замовлення, а саме: НДР 0115U004662 “Моделювання просторово неоднорідних явищ межового тертя в кінетичному і статичному режимах”; НДР 0113U007248 “Термодинамічна теорія прослизання по границям зерен у проблемі надпластичності наноструктурованих металів”; НДР 0112U007318 “Феноменологічна теорія межового тертя у трибологічних наносистемах”; НДР 0111U009623 “Реологічні властивості трибологічних систем в режимі межового тертя”; НДР 0115U000692 “Нерівноважна термодинаміка фрагментації металів і тертя просторово-неоднорідних межових мастил між поверхнями з нанорозмірними нерівностями”; НДР 0112U001380 “Моделювання

тертя металевих наночастинок і межових плівок рідин, що взаємодіють із атомарно-гладкими поверхнями”; НДР 0109U001378 “Фізика формування потоків заряджених частинок в приладах для діагностики матеріалів атомної енергетики”; НДР 0109U007301 “Структурний стан і механічна поведінка наноструктурованих металів і сплавів”; НДР 0107U008898 “Статистична нелінійна теорія динамічних фазових режимів межового тертя у нанопристроях”.

Перші три із вказаних НДР виконувалися в рамках грантів Президента для досліджень молодих вчених, в яких дисертант був науковим керівником.

2. Наукова новизна

Рівень наукової новизни отриманих в дисертації результатів визначено наступними положеннями:

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 таким чином визначеними 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 сталюю 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.

В дисертаційній роботі запропонована цікава модель межового тертя, в рамках якої описано багато особливостей, які спостерігалися в експериментальних роботах. Це переривчастий режим тертя, ефекти пам'яті, ньютонівська в'язкість межових мастил тощо. В рамках моделі досліджено вплив керуючих параметрів на систему, таких як швидкість зсуву, навантаження, і температура мастила. При варіюванні цих величин можна обирати необхідний режим роботи трибологічної системи в різних випадках, що відкриває перспективу застосування результатів роботи при проектуванні обладнання.

4. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень і висновків, що сформульовані в дисертації

Достовірність отриманих в дисертації результатів підтверджується тим, що автором проводяться порівняння із експериментальними даними і результатами комп'ютерного моделювання інших авторів, які дають добре якісне узгодження із отриманими в дисертації результатами. Також правомочність зроблених в роботі висновків підтверджується обранням загально відомих методів дослідження, які описано у вступі до дисертації. У побудові моделей автор виходив із різних типів виразу для вільної енергії, що є головним припущенням. Але, вже на етапі запису цих виразів ставилася мета опису конкретних експериментальних даних за допомогою тієї чи іншої модифікації вільної енергії. Окрім того, в роботі є посилання на роботи інших авторів, які для опису пове-

дінки нанорозмірних систем використовували подібні вихідні врази вільної енергії, що також підтверджує достовірність отриманих в роботі результатів.

5. Повнота викладу наукових положень в дисертаційній роботі

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 56 наукових працях, 28 з яких опубліковано у періодичних виданнях (журналах), як у фахових виданнях України, так і високореєтингових зарубіжних виданнях. Апробаційний характер мають 28 робіт, серед яких є тези міжнародних конференцій, що проходили як в Україні, так і закордоном. Наукометричними базами даних Scopus та Web of Science обліковуються 28 робіт.

6. Практична цінність отриманих результатів

Практична значущість отриманих в роботі результатів обумовлена широким використанням трибологічних систем, що досліджуються в дисертаційній роботі. В роботі досліджено різні режими тертя і показано, які параметри треба змінювати, щоб встановився той чи інший режим. Також практичне значення мають висновки, в яких автор пропонує опис механізмів, за якими проходять ті чи інші фізичні явища, такі як переривчастий режим, ефекти пам'яті, тощо. Отримані результати безсумнівно поглиблюють знання про системи, які працюють в режимі межового тертя. В роботі теоретично описано велику кількість експериментальних даних, отже побудовані моделі можна використовувати безпосередньо для опису конкретних експериментальних ситуацій. Але зазначу, що для цього потрібно проведення додаткових експериментів, з метою визначення числових значень теоретичних параметрів, таких як постійні розкладання вільної енергії, коефіцієнти пропорційності у виразах для в'язкості, тощо.

7. Структура та обсяг роботи

Перший розділ дисертації “Межовий режим тертя: експериментальні дані і теоретичні методи опису (літературний огляд)” є літературним оглядом, і містить результати експериментів і теоретичних робіт, які присвячено дослідженню межового тертя. Велика кількість згаданих робіт опублікована в останні 5 років, що говорить про актуальність обраної тематики.

У **другому** розділі роботи “Феноменологічна модель фазових переходів між кінетичними режимами межового тертя” в рамках теорії фазових переходів Ландау розглянуто фазовий перехід першого роду між структурними станами межового мастила. В розділі записано розкладання вільної енергії, розглянуто

стаціонарні стани мастила в залежності від його температури і швидкості зсуву вільного кінця пружини, завдяки якій рухається тертьовий блок, що ковзає по нижній поверхні, і відокремлений від неї ультратонкою плівкою межового мастила. Записано систему кінетичних рівнянь, на основі якої розглянуто поведінку трибологічних систем двох типів. Описано переривчастий режим тертя, який дуже часто є причиною руйнування деталей, що труться, в різних механізмах і деталях машин. По всьому розділу проводиться порівняння теоретично отриманих результатів із відомими експериментальними роботами інших авторів. Одним із результатів є теоретично побудована в рамках моделі діаграма Штрібека, що описує межовий режим тертя, і якісно збігається з аналогічною діаграмою, що отримана при узагальненні експериментальних даних багатьох авторів.

Третій розділ “Опис ефектів пам'яті при врахуванні універсальної залежності в'язкості мастильного матеріалу від температури і градієнта швидкості” присвячений дослідженню процесів межового тертя у рамках побудованої в попередньому розділі моделі, але при врахуванні універсальної залежності в'язкості від температури мастила і градієнту швидкості. Новим ефектом при цьому є те, що така залежність для в'язкості призводить до того, що в системі з'являється статична сила тертя. Саме наявність статичної компоненти сили тертя дозволила автору описати особливості широко відомих “стоп-старт” експериментів, в яких спостерігаються ефекти пам'яті, що пов'язані з релаксаційними процесами в мастильному шарі, коли система зупиняється на певний час. З одного боку, ефекти пам'яті пов'язані зі статичною силою тертя, а з іншого боку із тим, що у стані спокою часи релаксації зсувних напружень можуть бути в кілька разів вище за часи релаксації для об'ємних мастил. Також автор пропонує вираз для вільної енергії, в якому статична сила тертя з'являється за рахунок того, що значення параметра порядку ненульове не тільки в твердоподібній, а і в рідиноподібній фазі мастила. Це призводить також до ненульової компоненти пружної сили тертя у рідиноподібному стані, бо пружні напруження в мастилі пропорційні квадрату параметра порядку. Розглянуто випадки фазових переходів першого та другого роду.

В **четвертому** розділі дисертації “Вплив на межовий режим тертя просторових неоднорідностей і нанорозмірних нерівностей” проведено узагальнення моделі на випадок контакту шорстких поверхонь. Автор розглядає одновимірну модель, коли шорсткість є тільки в одному напрямку, і тривимірний випадок. В обох ситуаціях побудовано кінетичні залежності головних величин, а також проаналізовано поведінку величин, що розподілені по площі контакту. Показано, що залежності сили тертя від часу близькі до періодичних. Але, важливим є

те, що розглядається ситуація, в якій відстань між третьючими поверхнями є постійною, і нерівності контактують лише через мастило. Така ситуація досліджується експериментально, і отримана макроскопічна поведінка трибологічної системи узгоджується з відомими експериментальними даними. Також в розділі проведено моделювання впливу просторової неоднорідності параметра порядку на кінетику тертя і показано, що неоднорідність не змінює макроскопічну поведінку системи, і взагалі, чинить несуттєвий вплив. В кінці розділу розглянуто побудовану автором модель наноструктуруючого вигладжування, яка дозволяє отримати вигляд поверхні після процедури вигладжування. Такі поверхні мають великий потенціал для трибологічних застосувань. Перевагою моделі є те, що вона містить також і експериментальну апробацію, яку зроблено співавторами статті, в якій автор дисертації опублікував результати відповідного дослідження.

П'ятий розділ роботи "Вплив зовнішнього навантаження на поверхні тертя" базується на моделі межового тертя, що враховує вплив навантаження на контактуючі поверхні. Ця модель дозволяє досліджувати вплив температури і швидкості зсуву на режими тертя, як і моделі в попередніх розділах, але її перевагою є саме врахування впливу зовнішнього навантаження. Новим і цікавим з моєї точки зору результатом тут є те, що зі збільшенням рівня навантаження фазовий перехід першого роду стає фазовим переходом другого роду. Математично це пов'язано із тим, що параметри розкладу не є сталими, а є функціями додаткового об'єму, що з'являється після плавлення мастила (параметр порядку). Також автор встановлює зв'язок між параметрами моделі, запропонованої у п'ятому розділі, із параметрами моделей, що були запропоновані ним у попередніх розділах дисертації. І йому частково це вдається, але повної відповідності немає, і її не може бути, бо ці підходи будуються із різних фізичних уявлень про фазовий перехід. А саме, модуль зсуву мастила поблизу точки фазового переходу в цих двох підходах має різну поведінку. Автором пояснюється така поведінка із міркувань молекулярної будови мастильного шару. Слід зазначити, що в рамках цієї нової моделі можна досліджувати всі випадки, які розглянуто до цього, але автор зупиняється на головних моментах. Ним показано, що макроскопічна поведінка дуже схожа на поведінку, яку показує модель, де параметром порядку є модуляція густини (2, 3 і 4 розділи роботи), хоча стани мастила можуть бути при цьому різними. Це підтверджує важливість дисертаційної роботи, яка виходить із опису стану мастила, а потім вже отримуються кінетичні залежності, які показують поведінку, яка спостерігається експериментально.

Шостий розділ дисертації "Нерівноважна еволюційна термодинаміка межового тертя" є заключним. У ньому проводиться узагальнення моделі п'ятого ро-

зділу на нерівноважні процеси, які завжди мають місце. Головна відмінність в тому, що окремо введено температуру поверхонь тертя, і температуру мастила. Температура мастила може змінюватися за рахунок передачі тепла від поверхонь тертя, а також за рахунок дисипації механічної енергії (робота сил тертя). В стані рівноваги, коли немає руху і робота не виконується, ці обидві температури із часом стають однакові. В дисертації розглядається надтонке мастило, отже процеси теплопередачі дуже швидкі, і врахування різниці температур не привносить великого впливу. Але, така ідеологія за необхідності може бути використана для опису кінетики плавлення більш товстого мастила. З іншого боку, той факт, що температура мастила швидко релаксує до значення температури поверхонь тертя, підтверджує результати попередніх розділів, де фігурувала лише температура мастила і припускалося, що вона співпадає із температурою поверхонь тертя. Також в розділі розглядається застосування запропонованої автором моделі межового тертя для опису процесів надпластичності, на прикладі контакту двох зерен, що розділені аморфною фазою. Зазначу, що така ідея не нова, але саме використання моделі межового тертя для опису взаємодії між зернами оригінальна, і може бути розвинена для опису надпластичності у тривимірних зразках, що звісно є складною задачею і знаходиться поза межами завдань, які ставляться в цій дисертаційній роботі.

8. Зауваження щодо змісту дисертації та її оформлення

1. В роботі автор розглядає різні випадки, що описуються різними розкладами вільної енергії, залежностями в'язкості мастила, тощо. Але при всьому цьому використовується єдиний спосіб, у який пружні деформації зв'язуються із швидкістю зсуву поверхонь (формули (2.13)-(2.16)). Існує багато моделей, які можуть бути використані для опису такого зв'язку. Окрім того, із рівняння (2.16) випливає, що пружні деформації існують навіть в розплавленому мастилi, що є недоліком моделі. Краще було б розглянути декілька ситуацій, і вже потім обрати оптимальний варіант.
2. Це зауваження випливає із першого. Автор отримує кінетичне рівняння для еволюції пружних деформацій у вигляді (2.15), але далі по дисертації завжди використовує стаціонарне значення деформації (2.16), навіть при дослідженні кінетичних процесів. Це є справедливим, коли час релаксації деформації дуже малий, але, як пише автор, часи релаксації фізичних величин для ультратонких плівок мастил можуть бути суттєвими. Отже, слід було б дослідити вплив величини часу релаксації деформації на процес тертя. Це було б цікавим, оскільки рівняння (2.16) при ненульовому часі релаксації деформації фактично задає ще одну динамічну змінну, яка буде суттєво впливати на кінетику процесу тертя.

3. Для визначення сили тертя, що є головним завданням дисертації, автор використовує формулу (2.30), яка дає нульові значення сили тертя при зупинці системи, тобто не враховує статичне тертя. При деяких модифікаціях, які автор проводить у наступних розділах дисертації, він отримує статичне тертя при майже нульових швидкостях зсуву, але при нульовій швидкості сила тертя завжди нульова. В цій формулі слід врахувати доданок, який описує статичне тертя, вона при цьому була б більш повною.
4. Фазові діаграми, що наведені в роботі, побудовані при зсуві із постійною швидкістю. Було б цікавим побачити динамічні фазові діаграми для трибологічних систем, які досліджує автор. Він описує в роботі, як повинні виглядати такі діаграми, але не наводить їх в дисертації. Такі динамічні діаграми безсумнівно мають прикладне значення, оскільки описують поведінку конкретних фізичних систем. Нажаль, маючи таку можливість, автор не проводить розрахунку вказаних діаграм.
5. Інтегральні перетворення (4.31), (4.33), які використовує автор для моделювання впливу пружних властивостей контактуючих поверхонь, мають особливості в нулі, що дає нефізичні результати у центрі контакту. Це легко бачити на рис. 4.15б і 4.15г. На часових ділянках, які розглядаються, це не чинить суттєвого впливу, але на великих часових проміжках це призведе до невірному результату. В дисертації слід було б детальніше обговорити це питання.
6. В підрозділі 6.2 дисертації автор описує модель, яка має велику кількість вільних параметрів. Краще було б залишити ті параметри, які дійсно є важливими. Отже, наведені далі в дисертації результати можна було б отримати зі значно меншою кількістю параметрів.

Але наведені вище зауваження – це скоріш рекомендації і побажання для майбутніх досліджень дисертанта. Вони не знижують високого наукового рівня дисертаційної роботи. Вважаю, що дисертант отримав в роботі цікаві і науково обґрунтовані нові результати, які можуть стати фундаментом для теоретиків і експериментаторів, які будуть досліджувати фазові переходи між структурами межового мастила в майбутньому, а також займатися моделюванням ротаційного міжкристалічного скидання деформації в нанокристалічних матеріалах. Оформлення роботи відповідає вимогам, що ставляться до докторських дисертацій, а в авторефераті викладені головні результати, отримані в дисертації, і його зміст відповідає її тексту.

ВИСНОВОК

В підсумку можна зробити такий загальний висновок. Дисертаційна робота Я. О. Ляшенка є завершеною і актуальною працею. В цій роботі розроблено важливу із прикладної і фундаментальної точок зору наукову проблему "Термодинаміка фазових переходів між кінетичними станами межового мастила".

Оцінюючи актуальність обраної дисертантом теми, наукову новизну отриманих результатів, обґрунтованість і достовірність зроблених висновків, а також наукове і практичне значення отриманих результатів для науки і техніки можна стверджувати, що дисертаційна робота «Фазові переходи між кінетичними режимами межового тертя» задовольняє встановленим вимогам МОН України щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук. Це 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), що внесені до постанов Кабінету Міністрів, затвердженими постановою КМУ від 12.09.2011 р. № 955. В результаті цього вважаю, що автор дисертації, Ляшенко Яків Олександрович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук зі спеціальності 01.04.07 – фізика твердого тіла.

Завідувач кафедри матеріалознавства
Національного технічного університету
"Харківський політехнічний інститут"

МОН України,

д-р фіз.-мат. наук, професор

 О. В. Соболю

