

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Ляшенко Яків Олександрович

УДК 539.62:621.891(043.3)



**ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ МІЖ КІНЕТИЧНИМИ
РЕЖИМАМИ МЕЖОВОГО ТЕРТЯ**

01.04.07 — фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико—математичних наук

Суми — 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Сумському державному університеті
Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант — доктор фізико-математичних наук, професор
Хоменко Олексій Віталійович,
професор кафедри моделювання складних систем
Сумського державного університету.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Браун Олег Михайлович,
провідний науковий співробітник відділу фізичної
електроніки Інституту фізики НАН України;

доктор фізико-математичних наук, професор
Татаренко Валентин Андрійович,
заступник директора з наукової роботи,
завідувач відділу теорії твердого тіла Інституту
металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України;

доктор фізико-математичних наук, професор
Соболь Олег Валентинович,
завідувач кафедри матеріалознавства
Національного технічного університету
"Харківський політехнічний інститут" МОН України.

Захист відбудеться "27" січня 2017 року о 12-й годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 Сумського державного університету за
адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус ЕТ, ауд. 236.

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного
університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2,
а також на сайті інституційного репозитарію СумДУ. Режим доступу:
<http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/46497>

Автореферат розіслано "21" листопада 2016 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



І. В. Чешко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останніми роками у різних галузях науки і техніки широкого застосування набувають різноманітні мікромеханічні системи [1*]. Вони використовуються в біомедицині, при побудові нових джерел енергії, у системах позиціонування в мікро- і наноелектроніці тощо. Наноскопічні системи позиціонування є нанорозмірними механічними системами, спеціально для яких створюються нанопідшипники, наномотори та інші рухомі частини. Одним із прикладів таких систем є накопичувачі на жорстких магнітних дисках, в яких для зменшення зносу між деталями, що труться, поміщаються ультратонкі мастильні шари. При функціонуванні таких систем між контактуючими частинами виникає сила тертя, яка повинна бути строго контрольованою, оскільки при перевищенні допустимих значень дорогі механізми можуть передчасно вийти з ладу. Для зменшення тертя використовуються мастильні матеріали, що перебувають у зоні контакту поверхонь [1*]. Завдяки малому розміру систем товщина мастильного шару, як правило, не перевищує кількох атомарних діаметрів, а поверхні тертя є атомарно-гладкими [2*]. Такий режим тертя одержав назву межового. Багато експериментів показали, що в межовому режимі тертя властивості мастильних матеріалів істотно відрізняються від властивостей об'ємних мастил або навіть від властивостей мастильних шарів, які лише на кілька нанометрів товщі. Тому упродовж останніх декількох десятиліть проводяться як експериментальні, так і теоретичні дослідження процесів межового тертя [3*]. Було з'ясовано, що у режимі межового тертя існує ряд ефектів, що не спостерігаються у випадку об'ємних мастил. Це ефект зсувного плавлення; наявність різних типів переривчастого руху, викликаного періодичними фазовими перетвореннями між структурними станами мастильного матеріалу; аномальне збільшення в'язкості мастильного шару зі зменшенням його товщини; відмінність температур плавлення і тверднення мастила від аналогічних температур для тих самих речовин в об'ємних системах; ефекти пам'яті; наявність декількох типів кінетичних режимів тертя; складні залежності в'язкості від температури, товщини шару, тиску і градієнта швидкості; багаторазове збільшення (іноді до 10 порядків) часів релаксації у тонких шарах [2*]. До того ж описані системи працюють у досить широкому діапазоні температур — це можуть бути як кімнатні температури, так і криотемператури у пристроях, використовуваних на штучних супутниках Землі. На сьогодні, незважаючи на велику кількість експериментальних [3*] і теоретичних [1*] праць, а також результатів комп'ютерного моделювання [2*], не існує єдиного підходу, що дозволив би описати всі ці спостережувані особливості. Тому вивчення процесів межового тертя має високу актуальність, зокрема у рамках термодинамічного подання, запропонованого в цій дисертаційній роботі, яке дозволило описати

велику кількість ефектів, спостережуваних експериментально, у рамках єдиного підходу.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі моделювання складних систем Сумського державного університету. Дисертант був науковим керівником таких науково-дослідних робіт: "Моделювання просторово неоднорідних явищ межового тертя в кінетичному і статичному режимах", за підтримки ДФФД у рамках гранта Президента України (№ 0115U004662, 2015 р.); "Термодинамічна теорія прослизання по границям зерен у проблемі надпластичності наноструктурованих металів", за підтримки ДФФД у рамках гранта Президента України (№ 0113U007248, 2013 р.); "Феноменологічна теорія межового тертя у трибологічних наносистемах", за підтримки ДФФД у рамках гранта Президента України (№ 0112U007318, 2012 р.); "Реологічні властивості трибологічних систем в режимі межового тертя" (№ 0111U009623, 2011–2016 рр.) і виконавцем робіт "Нерівноважна термодинаміка фрагментації металів і тертя просторово-неоднорідних межових мастил між поверхнями з нанорозмірними нерівностями", за підтримки МОН (№ 0115U000692, 2015–2017 рр.); "Моделювання тертя металевих наночастинок і межових плівок рідин, що взаємодіють із атомарно-гладкими поверхнями", за підтримки МОН (№ 0112U001380, 2012–2014 рр.); "Фізика формування потоків заряджених частинок у приладах для діагностики матеріалів атомної енергетики", за підтримки МОН (№ 0109U001378, 2009–2011 рр.); "Структурний стан і механічна поведінка наноструктурованих металів і сплавів", за підтримки ДФФД і РФФД (№ 0109U007301, 2009–2010 рр.); "Статистична нелінійна теорія динамічних фазових режимів межового тертя у наноприроях", за підтримки ДФФД (№ 0107U008898, 2009–2010 рр.).

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є встановлення основних фізичних закономірностей процесів, що відбуваються при фазових переходах між кінетичними режимами межового мастила, затисненого між двома атомарно-гладкими твердими поверхнями, при їх зсуві.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розробити феноменологічну модель фазових переходів в ультратонкому шарі мастильного матеріалу у режимі межового тертя, ґрунтуючись на теорії фазових переходів Ландау;

- на основі розробленої моделі описати ефекти термодинамічного і зсувного плавлення, одержати аналітичні вирази для критичних швидкостей зсуву і температур у випадках фазових переходів першого і другого роду;

- провести урахування залежності в'язкості мастильного матеріалу від температури і градієнта швидкості, побудувати у рамках моделі узагальнену на межовий режим діаграму Герсі – Штрібека;

- у рамках модифікованого термодинамічного подання провести урахування впливу зовнішнього навантаження на режими тертя;

- провести дослідження впливу просторово неоднорідного розподілу параметра порядку і нанорозмірних нерівностей поверхонь на кінетику системи;

- дослідити особливості зовнішнього періодичного впливу на трибологічну систему і порівняти одержані результати із відомими експериментальними даними;

- у рамках запропонованого підходу описати ефекти пам'яті, спостережувані експериментально, і провести опис статичної сили тертя при урахуванні універсальної залежності в'язкості від температури і градієнта швидкості, а також при модифікації термодинамічного потенціалу;

- у результаті числового моделювання порівняти режими тертя, що відповідають ньютонівським, дилатантним та псевдопластичним мастилам, визначити умови зменшення тертя;

- теоретично описати переривчастий режим руху, спостережуваний експериментально, пояснити причини його виникнення;

- узагальнити результати досліджень на випадок контактуючих поверхонь, що мають пружність і між якими існує обмін енергією за рахунок процесів теплопровідності.

Об'єкт дослідження – фазові переходи, процеси термодинамічного та зсувного плавлення, що спостерігаються під час тертя атомарно-гладких твердих поверхонь за наявності нанорозмірного мастильного шару між ними.

Предмет дослідження – режими тертя у трибологічних системах різних типів, зокрема переривчастий режим руху.

Методи дослідження. При побудові моделей, на основі яких у дисертації досліджуються процеси межового тертя, використовувалася теорія фазових переходів Ландау. Для досягнення поставлених цілей застосовувалися відомі чисельні методи, а також математичне моделювання. Вивчення кінетики процесів, що розглядаються, проводилося із застосуванням рівнянь Ландау – Халатнікова і Ланжевена, а для опису просторово неоднорідного розподілу параметрів – рівняння Гінзбурга – Ландау. Для визначення просторових розподілів напружень, сили тертя і пружних деформацій за площею мастильного шару використовувався метод редукції розмірності. Диференціальні рівняння розв'язувалися за допомогою методів Рунге – Кутти й Ейлера, а також явних різницьових схем. Проводилися аналіз одержаних результатів та їх порівняння з експериментальними і теоретичними даними інших авторів.

Наукова новизна одержаних результатів досліджень полягає в тому, що в дисертації **вперше:**

1. У рамках теорії фазових переходів Ландау при використанні як параметра порядку модуляції густини і надлишкового об'єму описано фазо-

вий 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 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 одержаних результатів. Оскільки розроблений підхід описує і пояснює багато експериментально спостережуваних ефектів у режимі межового тертя, результати роботи можуть бути використані при проектуванні різноманітних пристроїв у мікромеханіці та біоінженерії, зокрема для розроблення штучних суглобів, пристроїв позиціонування в мікроелектроніці, аерокосмічних приладів тощо. Зокрема, описані причини виникнення переривчастого режиму тертя, що спостерігається в широкому діапазоні параметрів і часто призводить до передчасного зносу і руйнування третьових деталей у нанорозмірних системах. Одержані результати дозволяють спрогнозувати і звести до мінімуму ймовірність виникнення такого режиму, що приведе до більш тривалого терміну експлуатації мікромеханічних систем. Також у роботі побудовано фазові діаграми, що показують різні режими тертя залежно від параметрів трибологічної системи. Використання цих діаграм дозволить вибрати оптимальний режим роботи трибологічної системи залежно від конкретно поставлених завдань.

Результати роботи фундаментального характеру використовуються в навчальному процесі Сумського державного університету при викладанні дисциплін "Моделювання фізичних процесів і систем", "Теорія фракталів", "Медична та біологічна фізика", а також під час підготовки магістерських та дипломних робіт за спеціальністю "Прикладна математика". Частина результатів, одержана із застосуванням методу редукції розмірності, використовується як фундамент для проведення подальших теоретичних та експериментальних досліджень у галузі механіки твердого тіла, а також у навчальному процесі в Інституті механіки Берлінського технічного університету (Technische Universität Berlin, Germany).

Особистий внесок здобувача. Матеріал дисертації ґрунтується на результатах досліджень, виконаних за безпосередньої участі дисертанта або під його науковим керівництвом. Фізичні ідеї і методики їх дослідження, наукові висновки та положення, винесені на захист, належать особисто дисертанту і викладені у працях [1–44]. У дисертації узагальнено результати досліджень, виконаних автором самостійно [5, 10, 17, 21, 22, 35, 38–44] і у співавторстві [1–4, 6–9, 11–16, 18–20, 23–34, 36, 37]. Частина результатів отримана у співавторстві з науковим консультантом проф. О. В. Хоменком. Деякі результати одержані спільно з доктором Бо Перссоном [7, 8] (Дослідниць-

кий центр Юліха, Німеччина) та проф. В. Л. Поповим [1, 2, 4, 37] (Берлінський технічний університет, Німеччина) за їх безпосереднього керівництва під час роботи дисертанта у зазначених організаціях. Дослідження, подані в двох останніх розділах дисертації, виконані спільно із д.ф.-м.н. Л. С. Метловим (ДонФТІ НАНУ). Ряд робіт проведено під керівництвом дисертанта спільно з к.ф.-м.н. Н. М. Манько і к.ф.-м.н. А. М. Заскою. Здобувач у всіх опублікованих працях брав повноцінну участь на всіх етапах дослідження: у постановці задач, написанні комп'ютерних програм, безпосередньо під час проведення розрахунків, в обговоренні та інтерпретації одержаних результатів, оформленні та публікації наукових праць. У публікаціях [3, 5, 6, 9–13, 15, 17–19, 21–28, 30–36, 38–44] дисертанту належить основна роль у виборі та обґрунтуванні напрямку досліджень. У працях [1, 2, 4, 7, 8, 16, 20, 29, 37] участь автора зводилася до аналітичного та числового розв'язування поставлених задач. В оглядовій статті [14], опублікованій спільно із науковим консультантом, дисертант виконав частину роботи, що містить термодинамічну модель, подану в дисертаційному дослідженні. Основна частина одержаних результатів доповідалася здобувачем особисто на міжнародних конференціях та семінарах, зокрема зарубіжних.

Особисто автором підготовлені тексти статей [3–5, 10–13, 15, 17, 18, 21–28], статті у матеріалах конференцій [34–36] і тези доповідей [37–44].

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати дисертації доповідалася та обговорювалися на таких міжнародних і національних конференціях та семінарах: Всеукраїнській школі-семінарі і конкурсі молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини Інституту фізики конденсованих систем НАН України (Львів, 2011 (лауреат першої премії), 2014 pp.); International conference "Joint ICTP-FANAS conference on trends in nanotribology" (Trieste, Miramare, Italy, 2011); International conference "Conference on friction and energy dissipation in man-made and biological systems" (Trieste, Miramare, Italy, 2013); German-Russian workshop "Tribology in aerospace applications: damping, wear and structural dynamics in aerospace systems" (Berlin, Germany, 2014); Trilateral German-Ukrainian-Russian workshop "Analysis and control of surface modification applied to machinery parts under severe plastic deformations" (Berlin, Germany, 2015); International conference IEEE International scientific conference on electronics and nanotechnology "ELNANO" (Київ, 2014, 2015, 2016 pp.); школі-семінарі "Багатомасштабне моделювання фізичних процесів у конденсованих середовищах" (Суми, 2014 p.); International conference "Nanomaterials: applications and properties" (Алушта, 2011, 2013 pp.; Львів, 2014 p.); Міжнародній науковій конференції "Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур ФММН" (Харків, 2010, 2011 pp.); International conference "Stati-

stical physics: modern trends and applications“ (Львів, 2012 р.); XV International conference “Dynamical system modelling and stability investigation“ (Київ, 2011 р.); Міжнародній конференції “Високі тиски. Фундаментальні та прикладні аспекти“ (Судак, 2010, 2012 рр.); International conference “Physics of liquid matter: modern problems“ (Київ, 2010 р.); International conference “Low temperature physics“ (Харків, 2010, 2011, 2013 рр.); International conference “Multifunctional nanomaterials: NanoEuroMed“ (Ужгород, 2011 р.); П’ятнадцятій міжнародній конференції “Моделювання і дослідження стійкості динамічних систем“ (Київ, 2011 р.); Десятій відкритій науковій конференції Інституту прикладної математики та фундаментальних наук (ІМФН) (Львів, 2012 р.); Міжнародній конференції молодих учених і аспірантів “ІЕФ-2013“ (Ужгород, 2013 р.); Міжнародній конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “ЕВРИКА“ (Львів, 2010, 2011, 2012, 2013 рр.); семінарах Берлінського технічного університету (Technische Universität Berlin), Інститутів фізики (м. Київ) та прикладної фізики (м. Суми) НАН України і Сумського державного університету.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладені у 44 публікаціях [1–44]: 7 статтях у фахових виданнях України [12, 13, 20, 24–26, 28] та 21 статті у спеціалізованих зарубіжних високорейтингових журналах [1–11, 14–19, 21–23, 27], з яких 25 статей [1–3, 5, 7–25, 27, 28] у виданнях, що індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science; 8 статтях у матеріалах конференцій [29–36], 3 з яких [29–31] у виданнях, що індексуються наукометричними базами даних Scopus і Web of Science, та 8 тезах доповідей конференцій [37–44].

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, в якому міститься 316 найменувань на 34 сторінках. Обсяг дисертації становить 325 сторінок, з яких 279 – основний текст, 136 рис., зокрема 2 рисунки на 2 окремих аркушах.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та основні завдання досліджень, визначені новизна та практичне значення одержаних результатів, зазначений зв’язок дисертації із науководослідними роботами наукової установи, в якій виконувалася дисертація. Наведені дані про апробацію одержаних результатів, визначені методи досліджень, особистий внесок здобувача та структура роботи.

Перший розділ роботи “Межовий режим тертя: експериментальні дані і теоретичні методи опису (літературний огляд)” складається із п’яти підрозділів.

У *першому підрозділі* проведено аналіз літературних джерел останніх ро-

ків, що висвітлюють експериментальні результати з дослідження режиму межового тертя. Детально розглянуто будову апарата поверхневих сил [3*], використуваного у таких експериментах. Розглянуто класичні моделі опису переривчастого режиму руху межового тертя. Також описано запропоновану експериментаторами модель фазових переходів [3*], що дозволяє описати переривчастий режим у випадку тертя атомарно-гладких твердих поверхонь за наявності між ними ультратонкого шару мастила. Наведені експериментально одержані залежності сили тертя від швидкості зсуву, температури і зовнішнього навантаження на контактуючі поверхні. Описано узагальнену на межовий режим діаграму Герсі – Штрібека.

У *другому підрозділі* наведено основні положення моделі сухого тертя Прандтля – Томлінсона [1*]. У рамках моделі розглянуто статичну і кінетичну сили тертя. Побудовано фазову діаграму із різними режимами тертя. Описано переривчастий режим руху.

У *третьому підрозділі* записані основні положення моделі Френкеля – Конторової [2*], яка є узагальненням моделі Прандтля – Томлінсона.

У *четвертому підрозділі* розглянуто основні положення і результати кінетичної моделі межового тертя Карлсона – Батісти у рамках механічного аналога трибологічної системи, що має пружність. Показано, що ця модель досить добре описує наявні експериментальні результати у широкому діапазоні параметрів.

У *п'ятому підрозділі* наведено основні положення термодинамічної моделі, запропонованої В. Л. Поповим. Наведено розвинення вільної енергії Φ у ряд за степенями параметра порядку φ , який є амплітудою періодичної частини мікроскопічної функції густини середовища. Побудовано фазову діаграму із різними режимами тертя. Розглянуто порівняння стаціонарних станів із експериментальними результатами, що показують добре узгодження. Описано гістерезисну поведінку при плавленні/твердненні мастильного шару. Опису цієї моделі в літературному огляді приділено значну увагу, оскільки на її ідеях ґрунтується дисертаційне дослідження.

Другий розділ дисертації ”Феноменологічна модель фазових переходів між кінетичними режимами межового тертя“ складається із п'яти підрозділів.

У *першому підрозділі* пояснюється обрання методики досліджень, зокрема пояснюється, чому в дисертації для опису фазових переходів між структурними станами мастила обираються саме такі вирази для вільної енергії. Також проведено порівняння із теоретичними та експериментальними працями інших авторів, які також досліджують нанорозмірні системи, обмежені твердими поверхнями, із позицій теорії фазових переходів Ландау і комп'ютерного моделювання. Значну увагу приділено працям Мартіна Шоена, в яких за допомогою методів молекулярної динаміки (молекулярної статистики) проведено

дослідження затиснених мастильних шарів молекулярної товщини між гладкими твердими поверхнями. Результати цих розрахунків показують, що плавлення мастила у таких системах може відбутися за механізмом фазового переходу другого роду, причому залежності пружних зсувних напружень і модуля зсуву від пружних зсувних деформацій мають добрі якісні і кількісні збіги із результатами теоретичних праць В. Л. Попова, на яких базується дисертаційне дослідження, що підтверджує адекватність обраних моделей та методів дисертаційного дослідження.

У *другому підрозділі* записано розвинення вільної енергії межового мастила в ряд за степенями параметра порядку φ у симетричному вигляді:

$$\Phi = \alpha(T - T_c)\varphi^2 + \frac{a}{2}\varphi^2\varepsilon_{el}^2 - \frac{b}{2}\varphi^4 + \frac{c}{3}\varphi^6, \quad (1)$$

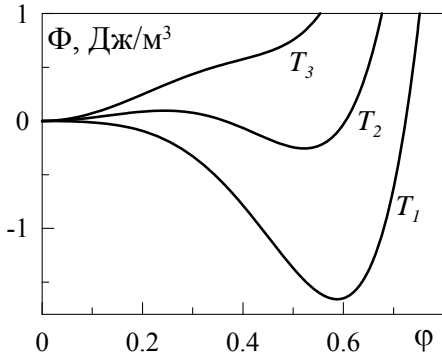


Рис. 1. Залежності потенціала $\Phi(\varphi)$ (вираз (1)) при $\alpha = 0,5 \text{ Дж}\cdot\text{К}^{-1}/\text{м}^3$; $T_c = 290 \text{ К}$; $b = 72 \text{ Дж}/\text{м}^3$; $c = 217 \text{ Дж}/\text{м}^3$; $\varepsilon_{el} = 0$; $T_{1-3} = 288, 297, 305 \text{ К}$

де T – температура мастильного матеріалу; T_c – критична температура; ε_{el} – зсувна компонента пружної деформації; α, a, b, c – додатні сталі; φ – параметр порядку (мікроскопічна модуляція густини середовища), що дорівнює нулю у рідиноподібній фазі, і набуває ненульового значення у твердоподібній. Потенціал (1) відповідає моделі фазових переходів першого роду.

Згідно з виразом (1) пружні напруження σ_{el} і модуль зсуву μ запишуться як

$$\sigma_{el} = \mu\varepsilon_{el}, \quad \mu = a\varphi^2. \quad (2)$$

Абсциси екстремумів потенціалу (1), графічно показані на рис. 1, визначаються за виразом

$$\varphi_{\mp}^2 = \frac{b}{2c} \mp \sqrt{\left(\frac{b}{2c}\right)^2 - \left(\frac{a}{2c}\varepsilon_{el}^2 + \frac{\alpha(T - T_c)}{c}\right)}, \quad (3)$$

де знак “–” відповідає максимуму потенціалу, а “+” – його мінімуму. Згідно з виразом (3) плавлення мастила здійснюється як за рахунок підвищення температури T (термодинамічне плавлення), так і при механічному впливові зі збільшенням зсувної компоненти пружних деформацій ε_{el} (зсувне плавлення).

Незважаючи на те, що для кожної конкретної системи можна знайти числове значення модуляції густини φ , для універсальності опису параметр порядку набагато зручніше подати у безрозмірному вигляді. Нехай параметр φ

нормований на максимальну величину, яку він набуває за відсутності механічного і теплового руху атомів. За рахунок цього він змінює свої значення від 0 до 1. Значення $\varphi = 1$ відповідає максимально впорядкованому мастилу, що згідно з рівнянням (3) відповідає нульовій температурі $T = 0$ і зсувній деформації $\varepsilon_{el} = 0$. Рівняння (3) спільно з умовою $\varphi_{\max} = 1$ при $T = 0$ і $\varepsilon_{el} = 0$ приводить до зв'язку параметрів розвинення у вигляді

$$c - b - \alpha T_c = 0, \quad (4)$$

що накладає додаткові обмеження на їх числові значення.

При зсувові поверхонь тертя із швидкістю V у шарі мастила виникають стаціонарні пружні деформації ε_{el}^0 , що дорівнюють

$$\varepsilon_{el}^0 = \frac{V\tau_\varepsilon}{h}, \quad (5)$$

де τ_ε – максвеллівський час релаксації пружних напружень, а h – товщина мастила. Критичні температури і швидкості, при яких мастило плавиться і реалізується нульове стаціонарне значення параметра порядку φ і модуля зсуву μ (крива T_3 на рис. 1), подані у вигляді виразів:

$$T_{c0} = T_c - \frac{a}{2\alpha} \left(\frac{\tau_\varepsilon V}{h} \right)^2 + \frac{b^2}{4\alpha c}, \quad V_{c0} = \frac{h}{\tau_\varepsilon} \sqrt{\frac{2\alpha(T_c - T)}{a} + \frac{b^2}{2ac}}. \quad (6)$$

Величини, за яких мастило твердне, мають менші значення:

$$T_c^0 = T_c - \frac{a}{2\alpha} \left(\frac{\tau_\varepsilon V}{h} \right)^2, \quad V_c^0 = \frac{h}{\tau_\varepsilon} \sqrt{\frac{2\alpha(T_c - T)}{a}}. \quad (7)$$

Оскільки ми записали температури і швидкості зсуву, за яких мастило плавиться і твердне, маючи експериментальні значення цих величин, можна визначити значення параметрів розвинення вільної енергії (1). Тому далі обираємо числові параметри такими, щоб критичні швидкості (температури) були в діапазоні, що спостерігається в експериментах.

На рис. 2 показані розраховані залежності стаціонарних значень параметра порядку від температури і швидкості зсуву. На рисунку видно, що мастило плавиться, коли температура $T > T_{c0}$ (6) або швидкість зсуву $V > V_{c0}$ (6). Мастило твердне, коли $T < T_c^0$ (7) або $V < V_c^0$ (7). При плавленні параметр порядку φ стрибкоподібно зменшується від величини $\varphi_A^2 = 0,5b/c$ до нульового значення, а коли мастило твердне, він збільшується від нуля до $\varphi_B^2 = b/c$ (φ_A і φ_B відповідають точкам A і B на рис. 2). Ширина гістерезису за температури, що показаний на рис. 2 а, визначається за виразом

$$\Delta T = T_{c0} - T_c^0 = \frac{b^2}{4\alpha c}. \quad (8)$$

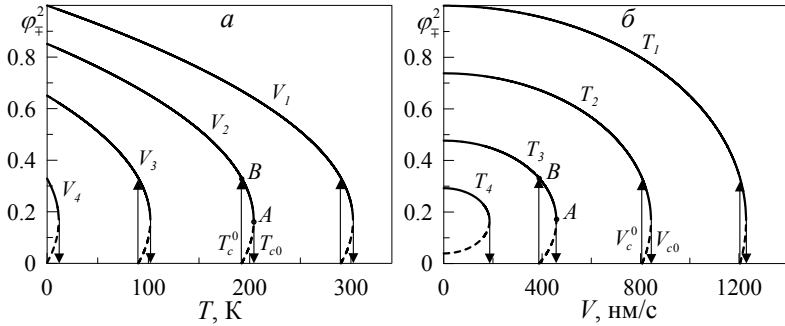


Рис. 2. Залежності стаціонарних значень φ_{\mp}^2 (вираз (3)) від температури мастила T і відносної швидкості зсуву поверхонь V при параметрах рис. 1 і $a = 2 \cdot 10^{10}$ Па; $h = 10^{-9}$ м; $\tau_{\varepsilon} = 10^{-7}$ с: (а) $V_{1-4} = 0, 700, 1000, 1205$ нм/с; (б) $T_{1-4} = 0, 160, 260, 295$ К

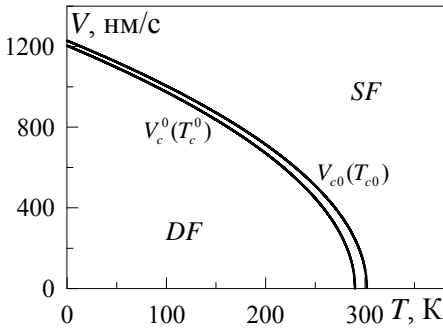


Рис. 3. Фазова діаграма станів мастила з областями рідинного (SF) і сухого (DF) тертя при параметрах рис. 2

При зсувові поверхонь тертя у них, крім пружних, виникають в'язкі напруження [3*]

$$\sigma_v = \frac{\eta_{eff} V}{h}, \quad (9)$$

де ефективна в'язкість η_{eff} істотно відрізняється від звичайної об'ємної в'язкості і може бути знайдена лише експериментальним шляхом для конкретної системи. Ми використовували відому апроксимацію [3*]

$$\eta_{eff} = k (\dot{\varepsilon})^{\gamma}, \quad (10)$$

де k – коефіцієнт пропорційності; $\dot{\varepsilon} = \partial \varepsilon / \partial t$, а феноменологічний параметр γ задає тип мастила: $\gamma = 0$ для ньютонівських рідин; $\gamma < 0$ для псев-

Гістерезис за швидкістю $\Delta V = V_{c0} - V_c^0$ збільшується зі зростанням температури T . На рис. 3 показано залежність критичної швидкості плавлення V_{c0} (6) і тверднення V_c^0 (7) мастила від його температури T . Вище від кривої V_{c0} мастило рідиноподібне, що відповідає режиму рідинного тертя SF. В області $V < V_c^0$ мастило має твердоподібну структуру. Між кривими на рис. 3 потенціал $\Phi(\varphi)$ (1) має вигляд, показаний середньою кривою на рис. 1, тому стан мастила в цій області є невизначеним і залежить від початкових умов.

допластичних і $\gamma > 0$ для дилатантних. У результаті сила тертя запишеться як

$$F = \left[\sigma_{el} + k \operatorname{sgn}(V) \left(\frac{|V|}{h} \right)^{\gamma+1} \right] A, \quad (11)$$

де A – площа контакту.

Рис. 4 а показує відомий факт, що сила тертя зменшується зі зростанням температури T . Коли мастило плавиться ($T > T_{c0}$), сила тертя від темпера-

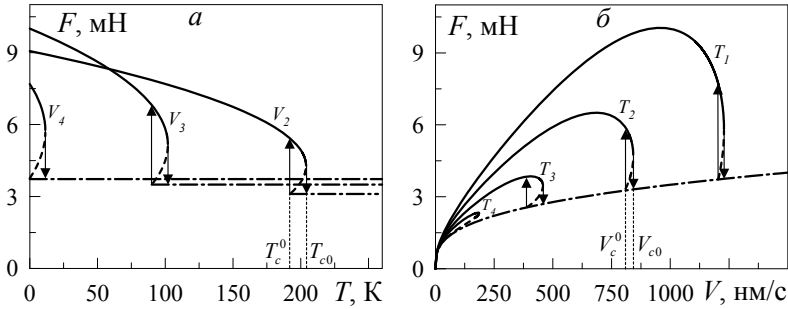


Рис. 4. Залежності сили тертя F (вираз (11)) від температури T і швидкості V при параметрах рис. 2 і $\gamma = -2/3$; $A = 5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$; $k = 7 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot \text{с}^{-1/3}$: (а) $V_{2-4} = 700, 1000, 1205 \text{ нм/с}$; (б) $T_{1-4} = 0, 160, 260, 295 \text{ К}$

тури не залежить, оскільки у рамках моделі при цьому модуль зсуву μ дорівнює нулю. При параметрах кривої V_4 у випадку плавлення мастило не твердне при подальшому зниженні температури T . На рис. 4 б спершу при підвищенні швидкості V сила тертя збільшується за рахунок вкладу в'язких і пружних напружень. Однак із зростанням швидкості зменшується модуль зсуву μ , що приводить до зменшення пружних напружень і сили тертя F . При $V > V_{c0}$ відбувається плавлення. Одержані результати якісно збігаються з картою тертя для межового режиму, отриманою експериментально [3*].

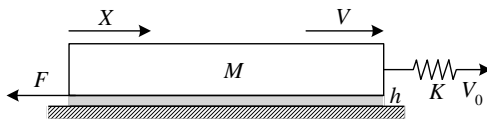


Рис. 5. Механічний аналог трибологічної системи

У рамках описаного випадку фазового переходу першого роду ми дослідили кінетику механічного аналога трибологічної системи, що має пружність (схематично показана на рис. 5). Тут верхній блок рухається із швидкістю V за допомогою пружини з жорсткістю K , маса блока M , товщина мастила h . Вільний кінець пружини зсувається зі сталюю швидкістю V_0 , координата верхнього блока X . Для моделювання динаміки

швидкості V_0 , координата верхнього блока X . Для моделювання динаміки

чисельно розв'язувалося рівняння руху механічної системи, де сила тертя F визначалася за формулою (11), а еволюція параметра порядку задавалася кінетичним рівнянням Ландау – Халатнікова:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\delta \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi}, \quad (12)$$

де кінетичний коефіцієнт δ задає інерційні властивості системи. На основі рівняння (12) ми вивчили різні випадки, коли мастило твердне або плавиться із часом. Порівняння одержаних даних із відомими експериментами показує добре якісне, а іноді і кількісне узгодження. Головна увага в цьому підрозділі дисертації приділена дослідженню особливостей реалізації переривчастого режиму руху, показаного на рис. 6. Також було докладно вивчено механізми, що

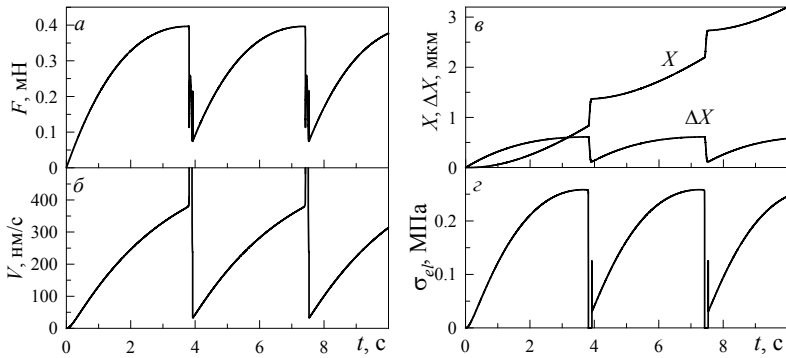


Рис. 6. Кінетичні залежності сили тертя F , швидкості V , координати блока X , натягу пружини ΔX і напружень σ_{el} при параметрах рис. 4 і $M = 0,4$ кг; $\delta = 100$ (Па·с) $^{-1}$; $A = 1,2 \cdot 10^{-9}$ м 2 ; $k = 10^4$ Па·с $^{1/3}$; $K = 650$ Н/м; $T = 260$ К; $V_0 = 378$ нм/с

приводять до реалізації переривчастого режиму, і на основі одержаних результатів пояснено всі особливості, спостережувані на рис. 6. Таке дослідження дозволило визначити параметри системи, за яких переривчастий режим зникає і встановлюється кінетичний режим ковзання зі сталою швидкістю зсуву. З'ясовано, що зі зростанням температури і швидкості зсуву збільшується частота фазових переходів плавлення/тверднення. Це типова поведінка, що спостерігається в експериментах при фіксованій товщині мастила h [3*].

Також у цьому підрозділі проводилося моделювання процесів тертя у системі, схематично показаній на рис. 7, де дві пружини з коефіцієнтами жорсткості K кожна пов'язані з блоком маси M , розміщеним на роликах, тертям кочення яких нехтуємо. На зазначеному блоці розміщений другий блок, що при-

водиться в рух за рахунок зовнішніх сил за періодичним законом:

$$X = X_m \cos(\omega t), \quad V = -X_m \omega \sin(\omega t), \quad (13)$$

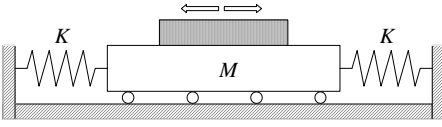


Рис. 7. Схема трибологічної системи

де X_m — амплітуда; ω — циклічна частота. На рис. 8 наведено типові залежності основних величин від часу, що реалізуються у режимі переривчастого тертя в системі, показаній на рис. 7. На рис. 8

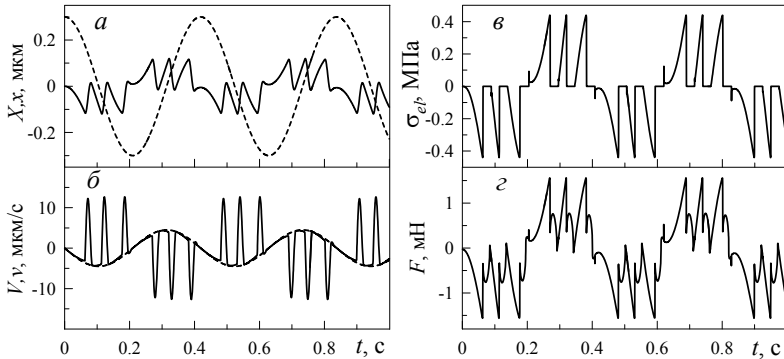


Рис. 8. Кінетичні залежності координати X і швидкості V верхнього (штрихові криві) та нижнього x, v (суцільні криві) блоків, пружних напружень σ_{el} та сили тертя F при параметрах рис. 2 і $\gamma = -2/3$; $A = 3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$; $k = 10^4 \text{ Па} \cdot \text{с}^{1/3}$; $\delta = 100 \text{ (Па} \cdot \text{с)}^{-1}$; $T = 220 \text{ К}$; $X_m = 0,3 \text{ мкм}$; $\omega = 15 \text{ рад/с}$; $M = 0,4 \text{ кг}$; $K = 7000 \text{ Н/м}$

наявні часові інтервали, упродовж яких швидкості $V = v$, що відповідає "прилипанню" блоків, коли мастило твердоподібне. Також у дисертації побудовані фазові портрети для системи, показаної на рис. 7, досліджено вплив на поведінку частоти ω і температури T .

У третьому підрозділі проведено дослідження, аналогічне першому підрозділу, але у випадку несиметричного розвинення вільної енергії у вигляді

$$\Phi = \alpha(T - T_c)\varphi^2 + \frac{a}{2}\varphi^2\varepsilon_{el}^2 - \frac{b}{3}\varphi^3 + \frac{c}{4}\varphi^4, \quad (14)$$

для якого вводиться умова нормування, подібна до (4):

$$c - b - 2\alpha T_c = 0. \quad (15)$$

Як і раніше, знайдено аналітичні вирази для стаціонарних значень параметра порядку φ_{\mp} , критичних температур T_{c0} , T_c^0 і швидкостей V_{c0} , V_c^0 . Причому

вирази для T_c^0 і V_c^0 збігаються із раніше одержаними для симетричного потенціалу (1) значеннями (7). Далі проведено дослідження стаціонарного випадку руху зі сталою швидкістю $V = \text{const}$, а також динамічних випадків у рамках двох типів трибологічних систем, показаних на рис. 5 і 7.

Також ми провели числовий експеримент із дослідження амплітудних значень пружних напружень і сили тертя у трибологічній системі, показаній на рис. 7. Із рис. 9 випливає, що в усьому діапазоні досліджуваних темпе-

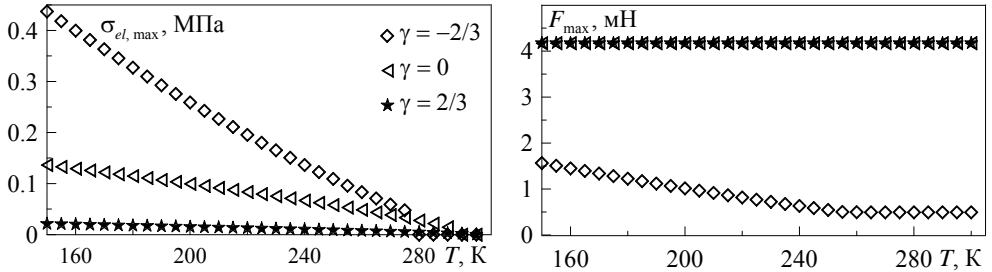


Рис. 9. Залежності амплітуд пружних напружень $\sigma_{el,max}$ і сили тертя F_{max} від температури T при параметрах $\alpha = 0,6 \text{ Дж}\cdot\text{К}^{-1}/\text{м}^3$; $T_c = 290 \text{ К}$; $a = 2 \cdot 10^{10} \text{ Па}$; $b = 125 \text{ Дж}/\text{м}^3$; $c = 473 \text{ Дж}/\text{м}^3$; $h = 10^{-9} \text{ м}$; $\tau_\varepsilon = 10^{-7} \text{ с}$; $A = 3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$; $\gamma = -2/3$; $k = 10^4 \text{ Па}\cdot\text{с}^{1/3}$; $M = 0,4 \text{ кг}$; $K = 7000 \text{ Н}/\text{м}$; $\delta = 100 \text{ (Па}\cdot\text{с)}^{-1}$; $T = 150 \text{ К}$ і $X_m = 0,3 \text{ мкм}$; $\omega = 15 \text{ рад}/\text{с}$ для псевдопластичної (\diamond), ньютонівської (\triangleleft) та дилатантної (\star) рідин

ратур T мінімальне значення сили тертя дає псевдопластична рідина, тому саме такі рідини забезпечують умови зменшення тертя. Дослідження впливу коефіцієнта пропорційності k (див. формулу (10)) і жорсткості пружини K (див. рис. 7) також показують, що у випадку псевдопластичних рідин сила тертя є мінімальною, а пружні напруження σ_{el} — максимальними. Під час руху зі сталою швидкістю потенціал (14) дає гістерезис за температури $\Delta T/2$ (див. формулу (8)).

У четвертому підрозділі було розглянуто модель фазового переходу другого роду, що відповідає потенціалу у вигляді

$$\Phi = \alpha(T - T_c)\varphi^2 + \frac{a}{2}\varphi^2\varepsilon_{el}^2 + \frac{b}{4}\varphi^4, \quad (16)$$

для якого умова нормування параметра порядку записується як

$$b - 2\alpha T_c = 0. \quad (17)$$

У цьому випадку критична температура T_{c0} збігається зі значенням T_c^0 , а швид-

кості $V_{c0} = V_c^0$:

$$T_{c0} = T_c - \frac{a}{2\alpha} \left(\frac{\tau_\epsilon V}{h} \right)^2, \quad V_{c0} = \frac{h}{\tau_\epsilon} \sqrt{\frac{2\alpha(T_c - T)}{a}}. \quad (18)$$

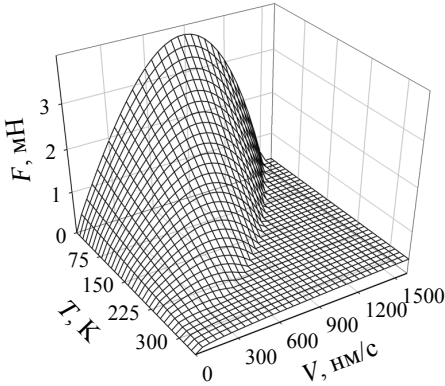


Рис. 10. Тривимірна залежність сили тертя $F(V, T)$ (вираз (11)) при параметрах рис. 9 і $\alpha = 0,8 \text{ Дж}\cdot\text{К}^{-1}/\text{м}^3$; $b = 464 \text{ Дж}/\text{м}^3$

Відповідна залежність сили тертя $F(V, T)$ показана на рис. 10, де відбувається поступове плавлення без гістерезису (пор. з рис. 4). У випадку, що розглядається, досліджено вплив температури і швидкості на кінетичні режими тертя, а також особливості гістерезисних явищ, що виникають, коли поступово збільшується не швидкість зсуву або температура, а діюча сила. У результаті знайдені аналітичні вирази, які повністю характеризують властивості гістерезису у такому випадку.

У н'ятому підрозділі проведено моделювання поведінки трибологічної системи, наведеної на рис. 7, у режимах сухого і рідинного тертя. Одержані при цьому фазові портрети порівняно із результатами, одержаними для межового режиму, і показано, що він має спільні ознаки із сухим тертям. Цей факт неодноразово підтверджувався у багатьох експериментах.

Третій розділ роботи "Опис ефектів пам'яті при урахуванні універсальної залежності в'язкості мастильного матеріалу від температури і градієнта швидкості" складається з чотирьох підрозділів.

У першому підрозділі описано одержану Сівебаєком, Самойловим і Перссоном універсальну залежність в'язкості від температури і градієнта швидкості у вигляді

$$\log \eta_{eff} = C - n \log \dot{\epsilon}, \quad (19)$$

$$n = \left[1 + (T/T_k)^\beta \right]^{-1}, \quad (20)$$

$$C = 10,9n - 3,8, \quad (21)$$

де параметри T_k і β залежать від типу мастила. Розрахована нами тривимірною залежністю для ейкозану $C_{20}H_{42}$ показана на рис. 11. Сила тертя при

врахуванні (19) записується у вигляді

$$F = \left[a\varphi^2\tau_\varepsilon + \operatorname{sgn}(V) 10^{10,9n-3,8} \left(\frac{|V|}{h} \right)^{-n} \right] \frac{AV}{h}. \quad (22)$$

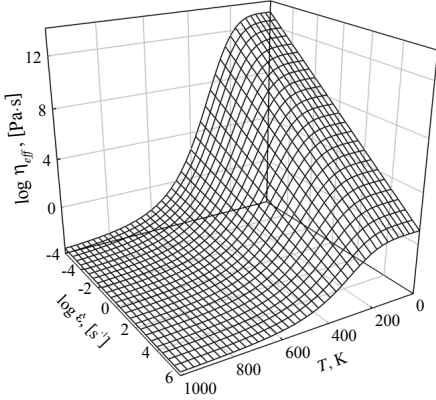


Рис. 11. Залежність (19) при $T_k = 353 \text{ K}$; $\beta = 4,09$

У третьому підрозділі у рамках моделі фазового переходу другого роду (16) нами показано, що урахування залежності (19) приводить до наявності у системі статичної сили тертя при температурі $T \approx 0$, яка при параметрах рис. 10 і 11 становить

$$\lim_{V \rightarrow 0; T \rightarrow 0} F(V, T) = 10^{7,1} A \approx 37,8 \text{ мН}. \quad (23)$$

У підрозділі теоретично описано причини появи у системі ефектів пам'яті, які приводять до того, що після зупинення системи на час τ_s її подальша поведінка істотно залежить від величини τ_s . Причиною такої поведінки є статична сила тертя (23). Порівняння одержаних результатів із відомими експериментальними даними показує добре якісне узгодження.

У четвертому підрозділі ми запропонували опис статичної сили тертя і відповідних ефектів пам'яті при модифікації термодинамічного потенціалу

$$\Phi = -a\varphi + \alpha(T - T_c)\varphi^2 + \frac{b}{2}\varphi^2\varepsilon_{el}^2 - \frac{c}{3}\varphi^3 + \frac{d}{4}\varphi^4 \quad (24)$$

з умовою нормування

$$a + c - d + 2\alpha T_c = 0. \quad (25)$$

У другому підрозділі проведено дослідження залежності стаціонарної сили тертя (22) від температури T і швидкості зсуву V і показано, що після плавлення і подальшого розігріву мастила сила тертя продовжує зменшуватися. Якщо підвищувати швидкість зсуву, то після плавлення поведінка системи залежить від температури мастила: чим менша температура T , тим більша сила тертя F . Одержані залежності узагальнюють залежність, наведену раніше на рис. 4. Також проведено дослідження кінетики трибологічної системи, показаної на рис. 5.

Потенціал (24) описує мастила, що складаються з дипольних молекул, які продукують внутрішнє електричне поле, що обумовлює наявність лінійного доданка $-\alpha\varphi$. Але оскільки системи, що розглядаються у дисертації, активно використовуються у промисловості як системи позиціонування в мікроелектронних пристроях, електричне поле може мати і зовнішню природу. Дослідження проводиться у випадку, коли в'язкість описується рівнянням (10). Потенціал (24) описує стрибкоподібний фазовий перехід першого роду за виконання такої умови:

$$c^3 - 27ad^2 > 0. \quad (26)$$

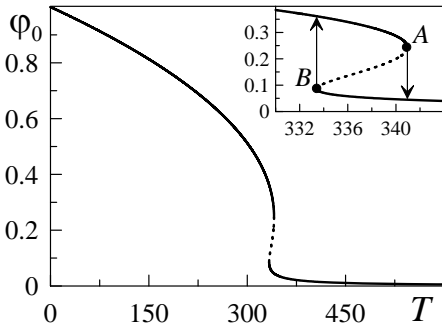


Рис. 12. Залежність стаціонарного значення параметра порядку φ_0 від температури T при $\alpha = 1, 2 \text{ Дж}\cdot\text{К}^{-1}/\text{м}^3$; $T_c = 290 \text{ К}$; $a = 4 \text{ Дж}/\text{м}^3$; $b = 2 \cdot 10^{10} \text{ Па}$; $c = 800 \text{ Дж}/\text{м}^3$; $d = 1500 \text{ Дж}/\text{м}^3$; $V = 0 \text{ нм}/\text{с}$

ненні системи на фіксований час τ_s і подальшому відновленні її руху. На основі теоретично одержаних результатів пояснено експерименти, результати яких наведено у [3*].

Четвертий розділ роботи "Вплив на межовий режим тертя просторових неоднорідностей і нанорозмірних нерівностей" складається з чотирьох підрозділів.

У першому підрозділі було вивчено випадок тертя між двома поверхнями, що мають нанорозмірні нерівності. Розглянуто дві ситуації – одновимірну модель, в якій нерівності задаються фрактальною лінією, і тривимірну, коли генеруються шорсткі поверхні. В обох випадках під час руху поверхонь їх вертикальні координати не змінюються (такі специфічні умови створюються в апараті поверхневих сил), а зчеплення нерівностей не реалізуються, оскільки розглядається випадок, коли між усіма контактними ділянками є шар мастила. У результаті проведеного дослідження доведено, що мастильний шар має динамічну доменну структуру із твердоподібними і рідиноподібними ділянками.

Сила тертя розраховується як сума сил від усіх доменів, що порушує періодичний режим переривчастого тертя, оскільки під час руху поверхонь по всій області контакту змінюється товщина мастила (відстань між поверхнями).

У *другому підрозділі* проведено моделювання із урахуванням у розвиненні вільної енергії (14) градієнтного доданка $g(\nabla\varphi)^2/2$, що описує просторово неоднорідний розподіл параметра порядку φ за площею межового мастила. Для розв'язування одержаних рівнянь у часткових похідних використовуються явна різницева схема подання диференціальних операторів і періодичні граничні умови. Сила тертя розраховується як сума вкладів від усіх елементарних ділянок, на які розбивається площа контакту і в яких мастило вважається однорідним. Ми показали, що під час руху поверхонь мастило за короткий час набуває майже однакових властивостей за всією площею контакту, і вплив просторової неоднорідності стає неістотним. Це пояснює експериментальні результати, в яких вимірюються періодичні залежності сили тертя, а мастило веде себе як однорідне.

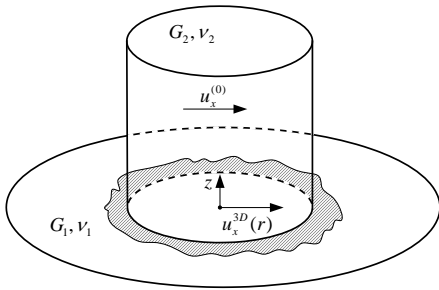


Рис. 13. Циліндричний індентор радіусом a_0 , виконаний із матеріалу з модулем зсуву G_2 і коефіцієнтом Пуассона ν_2 , знаходиться на площині з параметрами G_1, ν_1 і відділений від неї межовим мастилом товщиною h

розподіли як одновимірні функції координати x . Сила тертя при цьому розраховується як

$$F_x = 2 \int_0^{a_0} q(x) dx = 2\pi \int_0^{a_0} \tau(r) r dr, \quad (28)$$

де $q(x)$ – одновимірний розподіл густини сили, а $\tau(r)$ – тривимірна залежність пружних зсувних напружень, що є максимальними на межі контакту

У *третьому підрозділі* у рамках моделі фазового переходу першого роду (14) досліджено трибологічну систему, показану на рис. 13. При цьому проведено урахування пружних властивостей контактуючих тіл. Тут повні деформації в шарі мастила розраховуються як

$$\varepsilon(r) = \frac{u_x^{(0)} - u_x^{(3D)}(r)}{h}, \quad (27)$$

де r – радіальна координата; $u_x^{(0)}$ – зсув верхнього тіла як цілого; $u_x^{(3D)}(r)$ – тривимірний розподіл "зсувів" нижньої поверхні. Для спрощення ми розглядали випадок руху циліндра зі сталою швидкістю V . При цьому сила тертя F визначається у рамках методу редукції розмірності, що дозволяє подати тривимірні

ту. Результати моделювання показують, що у системі встановлюється режим із осцилюючою силою тертя. Причому плавлення починається на межі контакту, коли зсувні напруження перевищують критичні значення, потім фронт плавлення поширюється у напрямку центра контакту. За фронтом плавлення поширюється фронт тверднення, і такий процес є періодичним у часі. Ми показали, що на систему критично впливає величина кінетичного коефіцієнта δ (див. формулу (12)), також було досліджено вплив цього коефіцієнта. На рис. 14 показані результати моделювання, коли після плавлення (перший великий пік на залежності $F(t)$) мастило твердне лише частково, тому всі інші піки нижчі за перший.

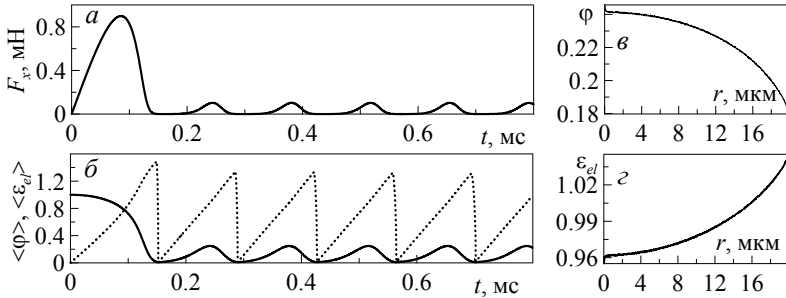


Рис. 14. Залежності сили тертя $F_x(t)$ і середніх величин $\langle \varphi \rangle$ (суцільна крива на панелі (б)), $\langle \varepsilon_{el} \rangle$ (штрихова крива), а також радіальних розподілів параметра порядку φ (панель (в)) і пружних деформацій ε_{el} (панель (г)), розраховані при параметрах $\alpha (T - T_c) = -3, 3 \cdot 10^5$ Дж/м³; $a = 1, 5 \cdot 10^6$ Па; $b = 3 \cdot 10^6$ Дж/м³; $c = 3, 66 \cdot 10^6$ Дж/м³; $h = 10^{-7}$ м; $a_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ м; $G^* = 10^9$ Па (ефективний модуль зсуву, що враховує пружні властивості контактуючих об'єктів на рис. 13), $T = 280$ К; $g = 10^{-6}$ Дж/м; $V_0 = 10^{-3}$ м/с; $\delta = 0, 07$ (Па·с)⁻¹

Така ситуація часто спостерігається експериментально і пов'язана із тим, що для створення впорядкованої структури мастила потрібно набагато більше часу, ніж той, за який відтворюються умови, за яких відбувається плавлення. Дослідження впливу температури на режими тертя показує, що з її зростанням зменшується амплітуда сили тертя. Існує критична температура, при перебільшенні значення якої частота фазових переходів різко збільшується, а амплітуда сили тертя – зменшується.

У четвертому підрозділі розроблено нелінійну динамічну модель наноструктуруючого вигладжування. Цей метод дозволяє одержувати поверхні із підвищеною зносостійкістю, що мають нерівності мікророзмірів і можуть працювати у режимі межового тертя при їх контакті. Проведене моделювання доз-

волило одержати вид поверхонь після вигладжування у режимі автоколивань. У результаті визначено критичну величину коефіцієнта загасання, при перевищенні якого відсутній режим автоколивань, і поверхня після процедури вигладжування є гладкою. Порівняння з експериментальними даними, одержаними співавторами моделі, показує добре якісне узгодження в автоколивальному режимі.

П'ятий розділ роботи "Вплив зовнішнього навантаження на поверхні тертя" складається з трьох підрозділів.

У *першому підрозділі* ми запропонували термодинамічну модель, яка явно враховує навантаження на поверхні тертя. Для опису фазового стану мастила було введено параметр надлишкового об'єму f , що визначається як

$$f = \frac{\rho_{rcp} - \rho}{\rho}, \quad (29)$$

де ρ – густина мастила, а ρ_{rcp} – максимально можливе значення густини мастила у твердоподібному стані. Розвинення вільної енергії Φ за степенями параметра порядку f має вигляд:

$$\Phi = \Phi_0^* + \frac{1}{2}\lambda(\varepsilon_{ii}^e)^2 + \mu(\varepsilon_{ij}^e)^2 - \phi_0 f + \frac{1}{2}\phi_1 f^2 - \frac{1}{3}\phi_2 f^3 + \frac{1}{4}\phi_3 f^4, \quad (30)$$

$$\phi_0 = \phi_0^* + \frac{1}{2}\bar{\lambda}(\varepsilon_{ii}^e)^2 + \bar{\mu}(\varepsilon_{ij}^e)^2 + \alpha T, \quad (31)$$

де надлишковий об'єм f зростає зі збільшенням швидкості зсуву або температури за рахунок хаотизації структури твердого тіла у процесі плавлення і зменшується зі зростанням навантаження на поверхні; ε_{ii}^e , $(\varepsilon_{ij}^e)^2$ – перший і другий інваріанти тензора деформації мастила, які записуються у вигляді

$$\varepsilon_{ii}^e = \frac{n}{\lambda_{eff} + \mu_{eff}}, \quad (\varepsilon_{ij}^e)^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\tau}{\mu_{eff}} \right)^2 + (\varepsilon_{ii}^e)^2 \right], \quad (32)$$

де n , τ – нормальні і тангенціальні напруження, що діють на мастильний шар із боку стискаючих поверхонь, а μ_{eff} і λ_{eff} – сталі, що визначають пружні напруження σ_{ij}^e згідно із законом Гука:

$$\sigma_{ij}^e = 2\mu_{eff}\varepsilon_{ij}^e + \lambda_{eff}\varepsilon_{ii}^e\delta_{ij}, \quad (33)$$

$$\mu_{eff} = \mu - \bar{\mu}f, \quad (34)$$

$$\lambda_{eff} = \lambda - \bar{\lambda}f, \quad (35)$$

із якого випливає вираз $\tau = \mu_{eff}\varepsilon_{el}$, де ε_{el} – зсувна пружна деформація. При мінімізації потенціалу Φ (30) легко одержати кінетичне рівняння для параметра порядку f , із використанням якого було проведено дослідження поведінки трибологічної системи, зображеної на рис. 5.

На рис. 15 наведені стаціонарні залежності параметра порядку f при збільшенні температури T і швидкості зсуву V . Зі зростанням цих двох величин над-

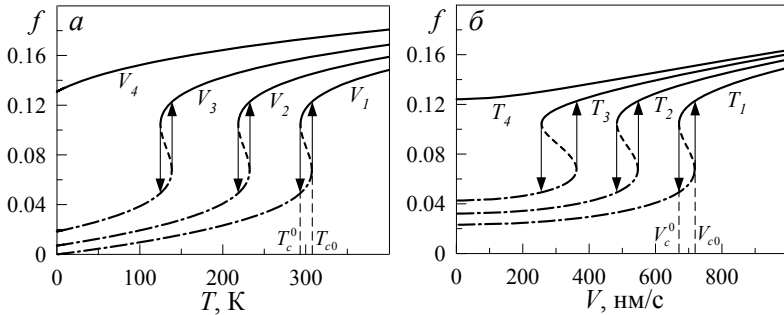


Рис. 15. Залежності стаціонарних значень параметра порядку f від температури T і швидкості зсуву V при параметрах $\lambda = 10^{10}$ Па; $\bar{\lambda} = 10^9$ Па; $\mu = 2 \cdot 10^{10}$ Па; $\bar{\mu} = 10^{11}$ Па; $\phi_0^* = 25$ Дж/м³; $\phi_1 = 27500$ Дж/м³; $\phi_2 = 337500$ Дж/м³; $\phi_3 = 1293750$ Дж/м³; $\alpha = 2, 4$ Дж·К⁻¹/м³; $h = 10^{-9}$ м; $\tau_f = 1$ Па·с; $\tau_\varepsilon = 10^{-7}$ с; $n = -7 \cdot 10^5$ Па; (а) $V_{1-4} = 0, 600, 900, 1250$ нм/с; (б) $T_{1-4} = 200, 245, 280, 310$ К

лишковий об'єм f збільшується. При обраних параметрах реалізується фазовий перехід першого роду між твердоподібним і рідиноподібним структурними станами мастила, яким відповідають ненульові значення надлишкового об'єму. Така ситуація властива мастилам, що складаються з довгих полімерних молекул (наприклад, ейкозан або гексадекан) і впорядковуються лише частково. Ми побудували фазову діаграму, що якісно збігається із наведеною на рис. 3. Стаціонарна сила тертя, наведена на рис. 16, після плавлення продовжує зменшуватися із зростанням температури T , що подібно до ситуації, яка описується формулами (14), (19). Дослідження зростання навантаження на поверхні показує, що при перевищенні критичного значення стрибкоподібний фазовий перехід першого роду стає неперервним переходом другого роду (рис. 16 в). Це означає, що при малих навантаженнях при плавленні об'єм мастила збільшується стрибкоподібно, що властиво фазовим переходам першого роду, а зі зростанням навантаження таке плавлення стає неможливим, і розупорядкування молекул мастила із зростанням температури або швидкості відбувається поступово. Дослідження кінетики показує, що сила тертя після плавлення монотонно зменшується із часом до мінімального значення, після якого монотонно збільшується знову до моменту плавлення, що приводить до встановлення режиму переривчастого руху. Нами також вивчено вплив температури, швидкості зсуву і навантаження на кінетичні режими тертя. На основі одержаних результатів вдалося пояснити особливості експериментальної по-

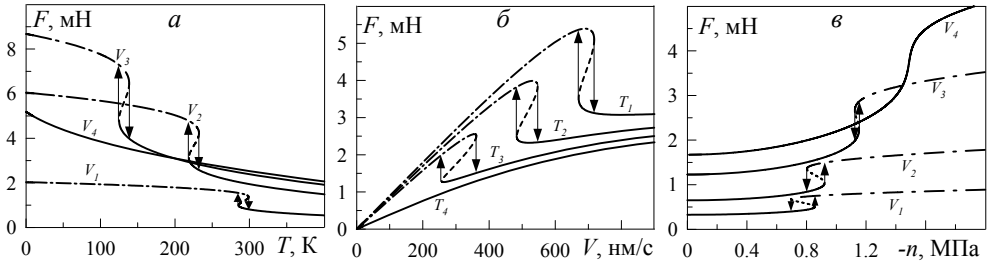


Рис. 16. Залежності сили тертя F від температури T , швидкості зсуву V і нормальних напружень p при параметрах рис. 15 і $\gamma = 2/3$; $k = 1, 2 \text{ Па} \cdot \text{с}^{5/3}$; $A = 5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$: (а) $V_{1-4} = 200, 600, 900, 1250 \text{ нм/с}$; (б) $T_{1-4} = 200, 245, 280, 310 \text{ К}$; (в) $V_{1-4} = 100, 200, 400, 600 \text{ нм/с}$ і температурі $T = 305 \text{ К}$

ведінки нанотрибологічних систем.

У другому підрозділі проведено дослідження у рамках симетричного розвинення вільної енергії у вигляді

$$\Phi = \Phi_0^* + \frac{1}{2} \lambda (\varepsilon_{ii}^e)^2 + \mu (\varepsilon_{ij}^e)^2 + \phi_0 f^2 - \frac{1}{4} \phi_1 f^4 + \frac{1}{6} \phi_2 f^6, \quad (36)$$

$$\phi_0 = \phi_0^* - \frac{1}{2} \bar{\lambda} (\varepsilon_{ii}^e)^2 - \bar{\mu} (\varepsilon_{ij}^e)^2 - \alpha T. \quad (37)$$

У цьому випадку реалізуються фазові переходи першого роду між нульовим (твердоподібний стан) і ненульовим (рідиноподібний стан) значеннями надлишкового об'єму f . Така ситуація відповідає мастилам, що складаються із квазісферичних молекул типу октаметилциклотетрасилоксану $\text{C}_8\text{H}_{24}\text{O}_4\text{Si}_4$ [3*], здатних утворювати впорядковані структури. У цьому випадку стаціонарна сила тертя зі збільшенням температури до критичного значення T_{c0} набуває постійних значень, при $T > T_{c0}$ стрибкоподібно зменшується, після чого із подальшим зростанням температури продовжує монотонне зменшення. Аналогічну поведінку демонструють залежності сили тертя F від навантаження, тобто після тверднення із подальшим зростанням навантаження за інших фіксованих параметрів сила тертя набуває постійних значень. На основі записаних рівнянь було досліджено кінетику трибологічної системи і описано особливості одержаних результатів. Кінетичні залежності сили тертя $F(t)$ якісно збігаються із залежностями, одержаними при використанні потенціалу (30).

У третьому підрозділі нами проведено порівняння підходів, що використовують модуляцію густини φ і надлишковий об'єм f як параметри порядку. Було знайдено зв'язок між цими параметрами для різних типів розвинень віль-

ної енергії. Наприклад, для потенціалів (1) і (30) такий зв'язок записується у вигляді

$$f = \frac{\mu}{\bar{\mu}} - \frac{a}{\bar{\mu}} \varphi^2. \quad (38)$$

Згідно із (38) зі зростанням величини модуляції густини φ (упорядкуванням мастила) надлишковий об'єм f зменшується. Причому максимальне значення надлишкового об'єму $f_{\max} = \mu/\bar{\mu}$ відповідає повністю розупорядкованому мастилу, для якого $\varphi = 0$. Також ми показали, що при модифікації коефіцієнтів розвинення (1) і введенні у вираз для вільної енергії додаткових доданків можливо описати вплив зовнішнього навантаження на трибологічну систему, оскільки при цьому підходи, що використовують як параметр порядку модуляцію густини φ і надлишковий об'єм f , стають еквівалентними. У всіх випадках знайдено відповідності між різними типами розвинень вільної енергії в ряд за степенями модуляції густини φ і надлишкового об'єму f . Зокрема записано розвинення вільної енергії $\Phi(f)$ для випадку фазового переходу другого роду.

Шостий розділ роботи "Нерівноважна еволюційна термодинаміка межового тертя" складається з трьох підрозділів.

У першому підрозділі записано розвинення внутрішньої енергії мастила u за степенями надлишкового об'єму f у вигляді

$$u = \frac{\lambda}{2} (\varepsilon_{ii}^e)^2 + \mu (\varepsilon_{ij}^e)^2 + \alpha s^2 + t_0 \tilde{s} - \frac{t_1}{2} \tilde{s}^2 + \phi_0 f^2 - \frac{\phi_1}{4} f^4 + \frac{\phi_2}{6} f^6, \quad (39)$$

$$\phi_0 = \phi_0^* - \frac{\bar{\lambda}}{2} (\varepsilon_{ii}^e)^2 - \bar{\mu} (\varepsilon_{ij}^e)^2 - \alpha_\phi s^2, \quad (40)$$

$$t_0 = t_0^* + \frac{\bar{\lambda}}{2} (\varepsilon_{ii}^e)^2 + \bar{\mu} (\varepsilon_{ij}^e)^2, \quad (41)$$

де до розгляду введено рівноважну s і нерівноважну \tilde{s} ентропії. Нерівноважна ентропія \tilde{s} описує частину теплового руху, обумовлену нерівноважним і нерівномірним характером теплового розподілу. Ця частина ентропії еволюціонує у процесі зовнішнього впливу, прагнучи до стаціонарного значення. Рівноважна ентропія s змінюється у часі за рахунок релаксації нерівноважної ентропії і переходу останньої у рівноважну підсистему. Пружні параметри у законі Гука (33) записуються так:

$$\mu_{eff} = \mu - \bar{\mu} f^2 + \tilde{\mu} \tilde{s}, \quad (42)$$

$$\lambda_{eff} = \lambda - \bar{\lambda} f^2 + \tilde{\lambda} \tilde{s}. \quad (43)$$

На рис. 17 наведені фазові діаграми при фіксованих параметрах моделі. З обох рисунків видно, що зі збільшенням навантаження на поверхні області рідинного тертя SF і гістерезису $DF + SF$ зменшуються, а область сухого

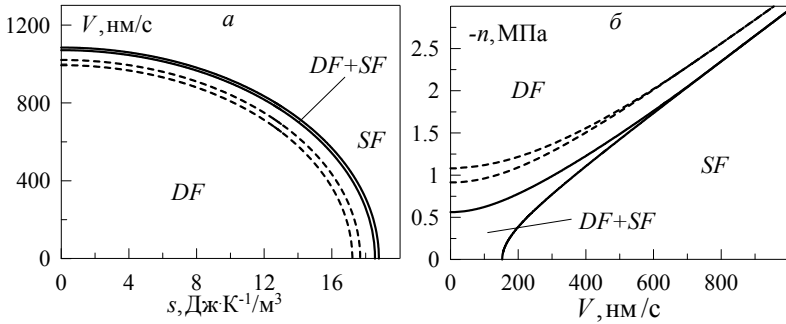


Рис. 17. Фазові діаграми з областями рідинного (SF) і сухого (DF) тертя при параметрах $\phi_0^* = 2960 \text{ Дж/м}^3$; $\phi_1 = 145920 \text{ Дж/м}^3$; $\phi_2 = 13107200 \text{ Дж/м}^3$; $\lambda = 10^{10} \text{ Па}$; $\bar{\lambda} = 4 \cdot 10^9 \text{ Па}$; $\mu = 2 \cdot 10^{10} \text{ Па}$; $\bar{\mu} = 6 \cdot 10^{11} \text{ Па}$; $\alpha = 7,9 \text{ К}^2 \cdot \text{м}^3 / \text{Дж}$; $\alpha_\varphi = 10 \text{ К}^2 \cdot \text{м}^3 / \text{Дж}$; $\tau_\varepsilon = 10^{-7} \text{ с}$; $h = 10^{-9} \text{ м}$; $\tilde{s} = 0$: (а) суцільні лінії відповідають значенням $n = -1,3 \cdot 10^6 \text{ Па}$, штрихові — $n = -7 \cdot 10^5 \text{ Па}$; (б) суцільні лінії відповідають значенням $s = 17 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} / \text{м}^3$, штрихові — $s = 18 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} / \text{м}^3$

тертя DF збільшується. Коли навантаження перевищує критичне значення, стрибкоподібний фазовий перехід першого роду стає неперервним фазовим переходом другого роду. Ця особливість спостерігається експериментально і пов'язана із тим, що при зростанні навантаження настає момент, коли мастильний матеріал при плавленні за рахунок здавлювання з боку контактуючих поверхонь не може збільшувати свій об'єм. Ми проаналізували залежності стаціонарної сили тертя F від температури, швидкості зсуву і навантаження і показали, що при фазовому переході другого роду сила тертя змінюється монотонно.

Також у цьому підрозділі було записано повну систему кінетичних рівнянь із урахуванням процесів теплопровідності між мастилом і поверхнями тертя. Для цього до розгляду було введено температуру поверхонь T_e . Нерівноважна ентропія \tilde{s} збільшується за рахунок роботи зовнішніх сил у процесі зсуву поверхонь і наближається до свого стаціонарного значення, а рівноважна ентропія s еволюціонує при переході її нерівноважної частини у рівноважну підсистему. Відповідні рівняння мають вигляд:

$$\tau_s \frac{\partial \tilde{s}}{\partial t} = t_0 - t_1 \tilde{s}, \quad (44)$$

$$\tau_s \frac{\partial s}{\partial t} = t_1 \tilde{s} + \frac{\tau_s \kappa}{h^2} \left(\frac{T_e}{T} - 1 \right), \quad (45)$$

де κ — коефіцієнт теплопровідності. Доданок $t_1 \tilde{s}$ у рівнянні (44) зі знаком

” – “ описує зменшення нерівноважної ентропії \tilde{s} за рахунок її переходу у рівноважну підсистему, тому цей самий доданок зі знаком ”+“ у рівнянні (45) описує зростання рівноважної ентропії s . Рівняння (44) описує той факт, що внутрішня енергія (39) за змінною \tilde{s} прямує до свого максимального значення, що відповідає принципам нерівноважної еволюційної термодинаміки (НЕТ) [4*].

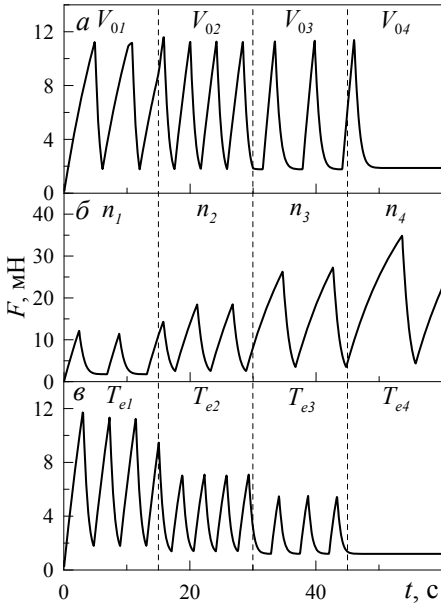


Рис. 18. Залежності сили тертя від часу $F(t)$ (вираз (11)) при параметрах: (а) $T_e = 250$ К; $n = -7 \cdot 10^5$ Па; $V_{01-04} = 1500, 2300, 2895, 3000$ нм/с; (б) $T_e = 250$ К; $V_0 = 2895$ нм/с; $n_{1-4} = -7 \cdot 10^5, -3 \cdot 10^6, -5 \cdot 10^6, -6,5 \cdot 10^6$ Па; (в) $V_0 = 2300$ нм/с; $n = -7 \cdot 10^5$ Па; $T_{e1-4} = 250, 400, 454, 455$ К

лаксації пружної деформації τ_e . У результаті моделювання показано, що в мастилі можуть відбуватися фазові переходи під час руху верхнього контактуючого блока (див. рис. 5) із постійною швидкістю, коли пружина замінюється на жорстке зчеплення.

У третьому підрозділі у рамках побудованої моделі для опису межового тертя описано процеси, що відбуваються при терті монокристалічних зерен у фрагментованому металі, розділених зерномежовою фазою, поданою як ультратонка плівка мастильного матеріалу. Одержані результати узгоджуються з

Ми розглянули кінетику трибологічної системи, що показана на рис. 5. На рис. 18 показані часові залежності $F(t)$ при параметрах рис. 17 і $t_0^* = 600$ К; $t_1 = 200$ К²·м³/Дж; $\tilde{\lambda} = 2 \cdot 10^9$ К; $\tilde{\mu} = 5 \cdot 10^9$ К; $\tau_f = 1$ Па·с; $\tau_s = 0,01$ К²·с/Па; $\kappa = 10^{-10}$ Вт/(К·м); $h = 10^{-9}$ м; $K = 2000$ Н/м; $M = 0,1$ кг. Із рисунка видно, що зі зростанням швидкості зсуву частота фазових переходів спочатку збільшується, а потім зменшується за рахунок появи довгих кінетичних ділянок $F(t) = \text{const}$ після акту плавлення, що підтверджується багатьма експериментами.

У другому підрозділі запропоновано багатовимірний термодинамічний потенціал для опису фазових станів межового мастила. При використанні виразу для цього потенціалу досліджено кінетику трибологічної системи у випадку, коли плавлення мастила відбувається за рахунок того, що у рідиноподібній фазі істотно зменшується значення часу релаксації пружної деформації τ_e .

експериментами із дослідження тертя бікристалів. Запропонований підхід може бути використаний для побудови теоретичного опису надпластичного стану.

У додатку **A** наведено математичну процедуру одержання виразів інваріантів (32) із закону Гука для ізотропного тіла при деформації зсуву.

ВИСНОВКИ

Проведені у дисертаційній роботі дослідження дозволили вирішити практично важливу наукову проблему "Термодинаміка фазових переходів між кінетичними станами межового мастила". Одержані результати дозволяють зробити істотний крок щодо розуміння механізмів межового тертя у нанотрибологічних системах. Запропоновано термодинамічну модель, у рамках якої описаний ряд ефектів, що спостерігаються експериментально у режимі межового тертя за наявності між контактуючими поверхнями межового мастила. У різних ситуаціях проведено вивчення впливу керуючих параметрів типу відносної швидкості зсуву тертьових поверхонь, температури, а також рівня навантаження на процеси тертя. У цілому запропоноване дослідження істотно розширює сучасні уявлення про процеси, що відбуваються у нанорозмірних системах, які мають контактуючі поверхні, при їх зсуві, коли звичайні закони тертя, наприклад закон Амонтона, стають непридатними. Проведено узагальнення процесів, що розглядаються, на нерівноважні відкриті системи. За результатами роботи можна зробити такі загальні висновки.

1. Розроблено феноменологічну теорію, що дозволяє описати поведінку ультратонкої плівки мастильного матеріалу між двома атомарно-гладкими твердими поверхнями. Плавлення і тверднення мастила подаються як фазові переходи першого або другого роду. Показано, що мастило плавиться при перевищенні температурою або швидкістю зсуву критичних значень, для яких знайдено аналітичні вирази. Побудовано фазову діаграму, на якій реалізуються області рідинного або сухого тертя. Описано кінетику процесу плавлення мастила у рамках механічних аналогів двох типів трибологічних систем. Показано, що можлива реалізація трьох випадків: або мастило у процесі тертя завжди твердоподібне, або знаходиться у рідиноподібному стані, або ж реалізується переривчастий режим тертя.

2. У рамках розробленої концепції фазових переходів проведено моделювання поведінки трибологічної системи, що складається з двох контактуючих блоків, один з яких закріплений між двома пружинами, а інший приведено у безперервний періодичний рух. Показано, що для псевдопластичних рідин із зростанням температури мастила пружні напруження і сила тертя у системі зменшуються. Для порівняння наведено результати розрахунків для дилатантних і ньютонівських рідин. Знайдено режим, в якому поведінка системи зале-

жить від напрямку зсуву верхнього тертьового блока, що відповідає реалізації в системі ефектів пам'яті.

3. При врахуванні універсальної залежності в'язкості мастила від температури і градієнта швидкості показано, що такий підхід дозволяє описати низку ефектів, які спостерігаються експериментально. Зокрема, описано особливості широко поширених "стоп-старт"-експериментів, коли система зупиняється на певний час, а потім знову продовжує рух. Показано, що за низьких температур мастила і швидкостей зсуву реалізується квазістатична сила тертя. Побудовано залежність сили тертя від часу при тривалій зупинці зовнішнього привода, яка демонструє, що часи релаксації сили тертя до нульового значення перевищують реальні часи експериментального спостереження.

4. Показано, що у випадку, коли мастильний матеріал затиснений між двома твердими поверхнями, які мають нанорозмірні нерівності, можливий режим, в якому в процесі тертя мастило по площі контакту має доменну структуру, де наявні рідиноподібні та твердоподібні ділянки, що роблять різний внесок до загальної сили тертя. Для шорстких поверхонь залежність сили тертя від часу не є строго періодичною, але близька до такої, що підтверджується відомими експериментальними даними.

5. Проведено врахування просторово неоднорідного розподілу параметра порядку, для чого в розвинення вільної енергії введено градієнтний доданок. Показано, що при цьому мастильний матеріал швидко релаксує до однорідного стану, в якому параметр порядку набуває за площею контакту однакових значень. Залежність сили тертя від часу близька до періодичної, що спостерігається експериментально.

6. У результаті динамічного моделювання процесів межового тертя між циліндричним індентором і плоскою поверхнею з урахуванням їх пружних властивостей з'ясовано, що рух зі сталою швидкістю приводить до переривчастого режиму плавлення мастила. Показано, що плавлення мастила починається на зовнішній межі контакту і поширюється всередину до його центра. Хвиля плавлення супроводжується хвилею тверднення. Залежно від термодинамічних і кінетичних параметрів моделі можливі принципово різні режими ковзання, зокрема майже повне або часткове тверднення мастильного матеріалу під час руху тертьових поверхонь. З підвищенням температури мастила частота стрибкоподібних переходів збільшується, а амплітуда сили тертя зменшується.

7. Запропоновано модель, в якій параметром порядку є надлишковий об'єм. Показано, що зростання зовнішнього навантаження приводить до тверднення мастила. У випадку симетричного розвинення вільної енергії твердоподібний стан мастила відповідає нульовому значенню надлишкового об'єму. Така ситуація реалізується для систем, в яких мастильний шар складається із

квазісферичних молекул, здатних утворювати впорядковані структури. У випадку несиметричного потенціалу ненульове значення параметра надлишкового об'єму відповідає як рідиноподібному, так і твердоподібному мастилу. Такий опис справедливий для полімерних ланцюгових молекул, не здатних повністю упорядковуватися за низьких температур або великих навантажень. Модель показує появу довгих кінетичних ділянок на залежності сили тертя від часу зі зростанням швидкості зсуву, що спостерігається в багатьох експериментах.

8. Розроблено нерівноважну термодинамічну модель межового тертя. При побудові моделі враховано процеси теплопровідності, що дозволяє подати тверднення мастила за рахунок віддавання тепла поверхням тертя. Виділено дві підсистеми – нерівноважну, що отримує теплоту при здійсненні над системою роботи, і рівноважну, в яку частково переходить ця теплота внаслідок внутрішніх процесів. Побудовано фазові діаграми з областями різних режимів тертя. Вивчення впливу нормальної компоненти тиску на поверхні тертя показує, що фазовий перехід першого роду здійснюється за низьких навантажень на поверхні тертя, а коли навантаження перевищує критичне значення, він стає безперервним фазовим переходом другого роду.

9. Показано, що термодинамічна модель межового тертя також може використовуватися до опису процесів, що відбуваються у твердому тілі при його інтенсивному навантаженні в режимі надпластичності. Для пояснення причин виникнення надпластичності розглядається модель ковзання по межах зерен, де межа зерна є мастилом, що розділяє сусідні зерна. Показано, що в широкому діапазоні параметрів реалізується переривчастий режим руху.

10. У результаті порівняння підходів, що ґрунтуються на використанні параметрів порядку, що є надлишковим об'ємом і модуляцією густини, показано, що в окремих ситуаціях обидва підходи можуть із точністю переходити один в інший, вказано відповідні випадки. Однак у загальному випадку ці два підходи описують фізично різні системи, оскільки по-різному інтерпретують переходи між стаціонарними значеннями модуля зсуву в точці фазового переходу.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1*. Попов В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения: от нанотрибологии до динамики землетрясений / В. Л. Попов. – Москва : Физматлит, 2013. – 352 с.
- 2*. Braun O. M. Nanotribology: microscopic mechanisms of friction / O. M. Braun, A. G. Naumovets // Surf. Sci. Rep. – 2006. – Vol. 60, № 6–7. – P. 79–158.

- 3*. Israelachvili J. N. Intermolecular and surface forces, 3-rd edition / J. N. Israelachvili. – USA : Academic Press, 2011. – 674 p.
- 4*. Метлов Л. С. Неравновесная эволюционная термодинамика и ее приложения / Л. С. Метлов. – Донецк : Ноулидж, 2014. – 177 с.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. **Lyashenko I. A.** Adhesive impact of an elastic sphere with an elastic half space: Numerical analysis based on the method of dimensionality reduction / I. A. Lyashenko, E. Willert, V. L. Popov // Mech. Mater. – 2016. – Vol. 92. – P. 155–163.
2. **Lyashenko I. A.** Impact of an elastic sphere with an elastic half space revisited: Numerical analysis based on the method of dimensionality reduction / I. A. Lyashenko, V. L. Popov // Sci. Rep. – 2015. – Vol. 5. – P. 8479 (5 pp).
3. **Lyashenko I. A.** Taking into account the universal dependence of the viscosity of a boundary lubricant on temperature and strain rate to describe stop-start experiments / I. A. Lyashenko, A. M. Zaskoka // Tech. Phys. – 2015. – Vol. 60, № 7. – P. 1014–1020. (**Ляшенко Я. А.** Учет универсальной зависимости вязкости граничной смазки от температуры и скорости деформаций при описании особенностей stop-start-экспериментов / Я. А. Ляшенко, А. Н. Заскока // ЖТФ. – 2015. – Т. 85, № 7. – С. 69–76.)
4. Динамическое моделирование спонтанных колебаний в процессе наноструктурирующего выглаживания / [Я. А. Ляшенко, В. П. Кузнецов, М. Попов и др.] // Физ. мезомех. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 38–42.
5. **Lyashenko I. A.** Stick-slip regime of melting of boundary lubrication taking into account spatial inhomogeneity / I. A. Lyashenko // Tech. Phys. – 2014. – Vol. 59, № 7. – P. 945–950. (**Ляшенко Я. А.** Прерывистый режим плавления граничной смазки с учетом пространственной неоднородности / Я. А. Ляшенко // ЖТФ. – 2014. – Т. 84, № 7. – С. 1–7.)
6. Заскока А. Н. Учет температурной зависимости вязкости неньютоновских смазок в модели граничного трения при фазовом переходе второго рода / А. Н. Заскока, Я. А. Ляшенко // Физ. мезомех. – 2014. – Т. 17, № 2. – С. 93–100.

7. **Lyashenko I. A.** Comment on "Friction between a viscoelastic body and a rigid surface with random self-affine roughness" / I. A. Lyashenko, L. Pastewka, B. N. J. Persson // *Phys. Rev. Lett.* – 2013. – Vol. 111, № 18. – P. 189401 (1 p.).
8. **Lyashenko I. A.** On the validity of the method of reduction of dimensionality: area of contact, average interfacial separation and contact stiffness / I. A. Lyashenko, L. Pastewka, B. N. J. Persson // *Tribol. Lett.* – 2013. – Vol. 52, № 2. – P. 223–229.
9. **Lyashenko I. A.** Hysteresis behavior in the stick-slip mode at the boundary friction / I. A. Lyashenko, A. V. Khomenko, A. M. Zaskoka // *Tribol. Trans.* – 2013. – Vol. 56, № 6. – P. 1019–1026.
10. **Lyashenko I. A.** Effect of the temperature dependence of the viscosity of pseudoplastic lubricants on the boundary friction regime / I. A. Lyashenko // *Tech. Phys.* – 2013. – Vol. 58, № 7. – P. 1016–1024. (**Ляшенко Я. А.** Влияние температурной зависимости вязкости псевдопластических смазок на режим граничного трения / Я. А. Ляшенко // *ЖТФ*. – 2013. – Т. 83, № 7. – С. 87–95.)
11. **Lyashenko I. A.** Stick-slip melting of a boundary lubricant between two rigid surfaces with nanoscale asperities / I. A. Lyashenko, I. V. Vinnichenko // *Tech. Phys.* – 2013. – Vol. 58, № 9. – P. 1329–1336. (**Ляшенко Я. А.** Прерывистый режим плавления граничной смазки между двумя жесткими поверхностями с наноразмерными неровностями / Я. А. Ляшенко, И. В. Винниченко // *ЖТФ*. – 2013. – Т. 83, № 9. – С. 90–97.)
12. **Lyashenko I. A.** Stick-slip mode of boundary friction as the first-order phase transition / I. A. Lyashenko, A. M. Zaskoka // *Ukr. J. Phys.* – 2013. – Vol. 58, № 1. – P. 91–102. (**Ляшенко Я. О.** Перерывчатый режим межового тертя як фазовий перехід першого роду / Я. О. Ляшенко, А. М. Заскока // *УФЖ*. – 2013. – Т. 58, № 1. – С. 92–103.)
13. **Lyashenko I. A.** Melting of the ultrathin lubricant film between atomically-flat solid surfaces as second-order phase transition / I. A. Lyashenko, A. M. Zaskoka // *J. Phys. Stud.* – 2013. – Vol. 17, № 1. – P. 1002 (7 pp.). (**Ляшенко Я. О.** Плавлення ультратонкої плівки мастила між атомарно-гладкими твердими поверхнями як фазовий перехід другого роду / Я. О. Ляшенко, А. М. Заскока // *Ж. фіз. досл.* – 2013. – Т. 17, № 1. – С. 1002 (7 с.).)

14. Khomenko A. V. Statistical theory of the boundary friction of atomically flat solid surfaces in the presence of a lubricant layer / A. V. Khomenko, **I. A. Lyashenko** // Phys. Usp. — 2012. — Vol. 55, № 10. — P. 1008–1034. (Хоменко А. В. Статистическая теория граничного трения атомарно-гладких твердых поверхностей при наличии смазочного слоя / А. В. Хоменко, **Я. А. Ляшенко** // УФН. — 2012. — Т. 182, № 10. — С. 1081–1110.)
15. **Lyashenko I. A.** Thermodynamic theory of two rough surfaces friction in the boundary lubrication mode / I. A. Lyashenko, A. V. Khomenko // Tribol. Lett. — 2012. — Vol. 48, № 1. — P. 63–75.
16. A model of grain boundary sliding during deformation [L. S. Metlov, M. M. Myshlyayev, A. V. Khomenko, **I. A. Lyashenko**] // Tech. Phys. Lett. — 2012. — Vol. 38, № 11. — P. 972–974. (Модель скольжения по границам зерен в процессе деформации / [Л. С. Метлов, М. М. Мышляев, А. В. Хоменко, **Я. А. Ляшенко**] // ПЖТФ. — 2012. — Т. 38, № 21. — С. 28–33.)
17. **Lyashenko I. A.** First-order phase transition between the liquidlike and solidlike structures of a boundary lubricant / I. A. Lyashenko // Tech. Phys. — 2012. — Vol. 57, № 1. — P. 17–26. (**Ляшенко Я. А.** Фазовый переход первого рода между жидкоподобной и твердоподобной структурами граничной смазки / Я. А. Ляшенко // ЖТФ. — 2012. — Т. 82, № 1. — С. 19–28.)
18. Nonequilibrium kinetics of phase transitions in the boundary friction mode [**I. A. Lyashenko**, L. S. Metlov, A. V. Khomenko, S. N. Cherpulskiy] // J. Frict. Wear. — 2012. — Vol. 33, № 4. — P. 244–252. (Неравновесная кинетика фазовых переходов в режиме граничного трения / [**Я. А. Ляшенко**, Л. С. Метлов, А. В. Хоменко, С. Н. Чепульский] // Трение и износ. — 2012. — Т. 33, № 4. — С. 295–306.)
19. **Lyashenko I. A.** Thermodynamics and kinetics of boundary friction / I. A. Lyashenko, A. V. Khomenko, L. S. Metlov // Tribol. Int. — 2011. — Vol. 44, № 4. — P. 476–482.
20. Metlov L. S. Multidimensional thermodynamic potential for descriptions of ultrathin lubricant film melting between two atomically smooth surfaces / L. S. Metlov, A. V. Khomenko, **I. A. Lyashenko** // Cond. Matt. Phys. — 2011. — Vol. 14, № 1. — P. 13001 (11 pp.).
21. **Lyashenko I. A.** Tribological properties of dry, fluid, and boundary friction / I. A. Lyashenko // Tech. Phys. — 2011. — Vol. 56, № 5. — P. 701–707. (**Ляшенко Я. А.** Трибологические свойства режимов сухого, жидкостного

- и граничного трения / Я. А. Ляшенко // ЖТФ. — 2011. — Т. 81, № 5. — С. 115–121.)
22. **Lyashenko I. A.** Tribological system in the boundary friction mode under a periodic external action / I. A. Lyashenko // Tech. Phys. — 2011. — Vol. 56, № 6. — P. 869–876. (**Ляшенко Я. А.** Трибологическая система в режиме граничного трения под периодическим внешним воздействием / Я. А. Ляшенко // ЖТФ. — 2011. — Т. 81, № 6. — С. 125–132.)
 23. **Lyashenko I. A.** Nonlinear thermodynamic model of boundary friction / I. A. Lyashenko, A. V. Khomenko, L. S. Metlov // J. Frict. Wear. — 2011. — Vol. 32, № 2. — P. 113–123. (**Ляшенко Я. А.** Нелинейная термодинамическая модель граничного трения / Я. А. Ляшенко, А. В. Хоменко, Л. С. Метлов // Трение и износ. — 2011. — Т. 32, № 2. — С. 157–170.)
 24. **Lyashenko I. A.** Phenomenological theory of boundary friction in the stick-slip mode / I. A. Lyashenko, A. V. Khomenko, L. S. Metlov // Ukr. J. Phys. — 2011. — Vol. 56, № 3. — P. 278–286. (**Ляшенко Я. О.** Феноменологічна теорія переривчастого режиму межового тертя / Я. О. Ляшенко, О. В. Хоменко, Л. С. Метлов // УФЖ. — 2011. — Т. 56, № 3. — С. 278–286.)
 25. Non-equilibrium stationary modes of boundary friction / [**I. A. Lyashenko**, L. S. Metlov, A. V. Khomenko, S. N. Chepul'skiy] // J. Nano- Electron. Phys. — 2011. — Vol. 3, № 3. — P. 58–66. (Неравновесные стационарные режимы граничного трения / [**Я. А. Ляшенко**, Л. С. Метлов, А. В. Хоменко, С. Н. Чепульский] // Ж. нано- электрон. физ. — 2011. — Т. 3, № 3. — С. 59–69.)
 26. **Ляшенко Я. А.** Гистерезисные явления граничного трения / Я. А. Ляшенко, А. В. Хоменко, Л. С. Метлов // ФТВД. — 2011. — Т. 21, № 2. — С. 67–80.
 27. **Lyashenko I. A.** Phenomenological theory for the melting of a thin lubricant film between two atomically smooth solid surfaces / I. A. Lyashenko, A. V. Khomenko, L. S. Metlov // Tech. Phys. — 2010. — Vol. 55, № 8. — P. 1193–1199. (**Ляшенко Я. А.** Феноменологическая теория плавления тонкой пленки смазки между двумя атомарно-гладкими твердыми поверхностями / Я. А. Ляшенко, А. В. Хоменко, Л. С. Метлов // ЖТФ. — 2010. — Т. 80, № 8. — С. 120–126.)
 28. Non-equilibrium evolutionary thermodynamics of boundary friction / [L. S. Metlov, A. V. Khomenko, **I. A. Lyashenko**, S. N. Chepul'skiy] //

J. Nano- Electron. Phys. – 2010. – Vol. 2, № 2. – P. 120–133. (Неравно-
весная эволюционная термодинамика граничного трения / [Л. С. Метлов,
А. В. Хоменко, **Я. А. Ляшенко**, С. Н. Чепульский] // Ж. нано- электрон.
физ. – 2010. – Т. 2, № 2. – С. 79–93.)

Праці апробаційного характеру

29. Borysiuk V. Modeling of the elastic properties of the core-shell Au-Ag nanorod / V. Borysiuk, **I. Lyashenko** // Proceedings of the International scientific conference [”Electronics and Nanotechnology“], (Kyiv, 19–21 April 2016). – Kyiv, 2016. – P. 118–120.
30. **Lyashenko I. A.** Interrupted mode of the boundary friction in the model of shear melting with asymmetric potential / I. A. Lyashenko, A. M. Zaskoka // Proceedings of the International scientific conference [”Electronics and Nanotechnology“], (Kyiv, 21–24 April 2015). – Kyiv, 2015. – P. 252–255.
31. Zaskoka A. M. Boundary friction thermodynamic model of ultrathin lubricant film confined between two atomically smooth solid surfaces / A. M. Zaskoka, **I. A. Lyashenko** // Proceedings of the International scientific conference [”Electronics and Nanotechnology“], (Kyiv, 15–18 April 2014). – Kyiv, 2014. – P. 219–222.
32. Zaskoka A. M. The viscosity temperature dependence in the boundary friction model under a periodic external action / A. M. Zaskoka, **I. A. Lyashenko** // Proceedings of the International conference ”Nanomaterials: Applications and Properties“. – 2014. – Vol. 3, № 1. – P. 01NTF18 (3 pp).
33. Hysteresis phenomena in the stick-slip motion at the boundary friction mode / [**I. A. Lyashenko**, A. V. Khomenko, A. M. Zaskoka, K. S. Zhmaka] // Proceedings of the International conference ”Nanomaterials: Applications and Properties“. – 2013. – Vol. 2, № 1. – P. 01NTF04 (4 pp.).
34. Влияние давления на тип фазового перехода между кинетическими режимами граничного трения / [**Я. А. Ляшенко**, Л. С. Метлов, А. В. Хоменко, С. Н. Чепульский] // Матеріали П'ятої міжнародної наукової конференції ”Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур“. – 2011. – Т. 2. – С. 392–395.
35. **Lyashenko I. A.** Friction force for boundary lubrication / I. A. Lyashenko // Proceedings of the International conference ”Nanomaterials: Applications and Properties“. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 7–14.

36. **Ляшенко Я. А.** Трибологическая система в режиме граничного трения / Я. А. Ляшенко, А. В. Хоменко, Л. С. Метлов // Матеріали Четвертої міжнародної наукової конференції [”Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур“], (Харків, 6–8 жовтня 2010 р.). – Харків, 2010. – С. 109–113.
37. Dynamical modelling of surface profiles after nanostructuring burnishing / [I. A. Lyashenko, V. P. Kuznetsov, M. Popov et al.] // Abstracts of Trilateral German-Ukrainian-Russian Workshop [”Analysis and control of surface modification applied to machinery parts under severe plastic deformations“], (Berlin, Germany, 13–14 October 2015). – Berlin, 2015. – P. 5.
38. **Lyashenko I.** Thermodynamic representation of boundary friction mode / I. Lyashenko // Abstracts of the German-Russian Workshop [”Tribology in aerospace applications: damping, wear and structural dynamics in aerospace systems“], (Berlin, Germany, 6–10 October, 2014). – Berlin, 2014. – P. 12.
39. **Ляшенко Я. А.** Учет пространственной неоднородности в термодинамической модели граничного трения / Я. А. Ляшенко // Збірка тез школи-семінару [”Багатомасштабне моделювання фізичних процесів у конденсованих середовищах“], (Суми, 21–22 жовтня 2014 р.). – Суми, 2014. – С. 31.
40. **Ляшенко Я. А.** Термодинамическая модель граничного трения с учетом температурной зависимости вязкости / Я. А. Ляшенко // Збірник матеріалів та програма конференції [”Десята відкрита наукова конференція інституту прикладної математики та фундаментальних наук (ІМФН)“], (Львів, 17–18 травня 2012 р.). – Львів, 2012. – С. 7–8.
41. **Ляшенко Я.** Нелінійна термодинамічна теорія межового тертя / Я. Ляшенко // Збірка тез 11-ої Всеукраїнської школи-семінару і конкурсу молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини Інституту фізики конденсованих систем НАН України, (Львів, 1–3 червня 2011 р.). – Львів, 2011. – С. 21.
42. **Ляшенко Я. А.** Термодинамическая модель фазовых переходов в ультратонкой пленке смазки / Я. А. Ляшенко // Abstracts of XV International conference reports [”Dynamical system modelling and stability investigation“], (Kiev, 25–27 May 2011). – Kiev, 2011. – P. 193.
43. **Lyashenko I. A.** Friction map for stick-slip mode in boundary regime / I. A. Lyashenko // Conference programme and Abstract book of the

International conference for young scientists [“Low Temperature Physics“], (Kharkov, 6–10 June 2011). – Kharkov, 2011. – P. 152.

44. **Lyashenko I. A.** Friction process at ultrathin lubricant film melting / I. A. Lyashenko // Program and materials of the Mediterranean – East-Europe Meeting [“Multifunctional Nanomaterials: NanoEuroMed 2011“], (Uzhgorod, 12–14 May 2011). – Uzhgorod, 2011. – P. 108.

АНОТАЦІЯ

Ляшенко Я. О. Фазові переходи між кінетичними режимами межового тертя. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Сумський державний університет, Суми, 2016.

У дисертації побудовано теорію тертя атомарно-гладких твердих поверхонь, розділених межовим мастилом, плавлення і тверднення якого подано як фазові переходи першого або другого роду. Описано переривчастий режим руху та ефекти пам'яті, пов'язані з релаксаційними процесами. При врахуванні залежності ефективної в'язкості від температури і градієнта швидкості описано статичну силу тертя. Можливий випадок, коли по площі контакту існує доменна структура з рідиноподібними і твердоподібними ділянками. При просторово неоднорідному розподілі параметра порядку мастило швидко набуває однорідного стану. При врахуванні пружності контактуючих поверхонь фронт плавлення поширюється від межі контакту до центра системи. Побудовано модель наноструктуруючого вигладжування, описано автоколивальний режим, що має місце в експериментах. При підвищенні зовнішнього навантаження фазовий перехід першого роду стає неперервним фазовим переходом другого роду. Побудовано нерівноважну термодинамічну модель, що враховує передавання енергії від мастила, яке розігрівається за рахунок виконання роботи, до поверхонь тертя. Описано тертя між зернами у фрагментованому металі у надпластичному стані.

Ключові слова: сила тертя, межове мастило, переривчастий режим руху, ефективна в'язкість, трибологічна система, фазові переходи, вільна енергія, метод редукції розмірності, кінетика, ефекти пам'яті.

АННОТАЦИЯ

Ляшенко Я. А. Фазовые переходы между кинетическими режимами граничного трения. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Сумский государственный университет, Сумы, 2016.

В диссертации разработана теория граничного трения между атомарно-гладкими твердыми поверхностями, разделенными ультратонким слоем смазки. Плавление и затвердевание смазки представлены как фазовые переходы первого либо второго рода. Найден аналитический вид выражения критических температур и скоростей, при которых происходят плавление и затвердевание. На примере простого механического аналога трибологической системы показано, что смазка в процессе трения либо всегда твердоподобна, либо находится в жидкоподобном состоянии, либо реализуются периодические переходы плавление/затвердевание. Рассмотрена трибологическая система, состоящая из контактирующих блоков, один из которых закреплен между двумя пружинами, а другой приводится в непрерывное периодическое движение. Установлено, что для псевдопластических жидкостей с ростом температуры упругие напряжения и сила трения уменьшаются.

Проведен учет универсальной зависимости вязкости высокомолекулярных алканов (смазок) от температуры и градиента скорости. Описаны особенности ”стоп-старт“- экспериментов, когда система останавливается на определенное время, а затем продолжает движение. При низких температурах реализуется квазистатическая сила трения, что позволяет объяснить экспериментально наблюдаемые ”эффекты памяти“. Учет линейного слагаемого в разложении свободной энергии, возникающего за счет наличия электрического поля в случае дипольных смазочных молекул при их упорядочении в процессе трения, также позволяет описать статическую силу трения.

Рассмотрено поведение смазки, зажатой между шероховатыми поверхностями. При этом по площади контакта присутствуют жидкоподобные и твердоподобные области. В пространственно неоднородном случае, для описания которого проведен учет градиентного слагаемого в разложении свободной энергии, смазка быстро релаксирует к однородному состоянию. Проведено моделирование с учетом упругих свойств контактирующих тел и показано, что плавление начинается на внешней границе контакта и распространяется внутрь к центру системы. Волна плавления сопровождается волной затвердевания. Проведено моделирование процесса наноструктурирующего выглаживания на основе динамической модели, описывающей движение индентора и учитывающей упругое и пластическое деформирование поверхностного слоя под действием внешней силы. В широком диапазоне параметров реализуется автоколебательный режим, наблюдаемый в экспериментах по выглаживанию цилиндра с просверленным углублением.

Построена термодинамическая модель, явным образом учитывающая вли-

яние внешней нагрузки. Показано, что увеличение давления приводит к вынужденному упорядочению и затвердеванию смазки. Рассмотрены симметричное и несимметричное разложения свободной энергии по степеням параметра порядка. В случае симметричного разложения упорядоченное состояние смазки отвечает нулевому значению избыточного объема, что соответствует кристаллическому состоянию при отсутствии структурных дефектов. Такая ситуация реализуется для систем, в которых смазочный слой состоит из квазисферических молекул, способных образовывать упорядоченные структуры. В случае несимметричного потенциала ненулевое значение параметра избыточного объема отвечает как жидкоподобной, так и твердоподобной смазке. Такое описание справедливо для смазочных материалов, выполненных на основе полимерных цепных молекул, которые неспособны полностью упорядочиваться при низких температурах либо больших нагрузках на поверхности трения. Модель показывает появление длинных кинетических участков на зависимости силы трения от времени с увеличением скорости сдвига, что наблюдается во многих экспериментах.

Предложена неравновесная термодинамическая модель, учитывающая процессы теплопроводности, что позволяет представить затвердевание смазки за счет отдачи тепла поверхностям трения. Выделено две подсистемы: неравновесную, получающую теплоту при совершении над системой работы, и равновесную, в которую переходит эта теплота в результате внутренних процессов. Разработанная теория граничного трения применена к описанию процессов, происходящих в твердом теле при его интенсивном нагружении в режиме сверхпластичности. При этом рассматривается известная модель скольжения по границам зерен, где граница зерна представляет ультратонкую смазку, разделяющую соседние зерна. Рассмотрена кинетика процесса на основе системы, состоящей из двух трущихся кристаллических тел. Полученные в диссертации результаты качественно совпадают с экспериментальными данными других авторов.

Ключевые слова: сила трения, граничная смазка, прерывистый режим движения, эффективная вязкость, трибологическая система, фазовые переходы, свободная энергия, метод редукции размерности, кинетика, эффекты памяти.

ABSTRACT

Lyashenko I. A. Phase transitions between kinetic modes of boundary friction. – Manuscript.

Thesis for Doctor of Science degree in Physics and Mathematics in speciality 01.04.07 – Solid State Physics. – Sumy State University, Sumy, 2016.

In thesis a theory of friction of atomically smooth solid surfaces separated by boundary lubricant is constructed, whose melting and solidification are presented as the first- or second-order phase transitions. Stick-slip motion mode and memory effects associated with relaxation processes are described. Taking into account the effective viscosity dependence on the temperature and velocity gradient the static friction force is construed. The case when the contact area has domain structure with liquid- and solid-like sections is possible. At spatially inhomogeneous distribution of the order parameter lubricant quickly becomes homogeneous. When considering the elasticity of contact surfaces the front of melting extends from the boundary of the contact to the center of system. Nanostructuring burnishing model is proposed and auto-oscillatory mode is revealed which takes place in experiments. With external load increasing the first-order phase transition transforms into continuous second-order phase transition. Nonequilibrium thermodynamic model is built that takes into account the transfer of energy from lubricant, that is heated due to the work execution, to the friction surfaces. Friction between the grains in fragmented superplastic metal is described.

Key words: friction force, boundary lubricant, stick-slip motion mode, effective viscosity, tribological system, phase transitions, free energy, method of dimensionality reduction, kinetics, memory effects.

Підписано до друку 17.10.2016.
Формат 60х90/16. Ум. друк. арк. 2,2. Обл.-вид. арк. 1,9. Тираж 100 пр. Зам. № 836.

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.