

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЇ ФІЗИКИ**

**Ляшенко Яків Олександрович**

УДК 539.62:621.891(043.3)

**СТАТИСТИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ МЕЖОВОГО ТЕРТЯ  
ТА ФРАГМЕНТАЦІЇ МЕТАЛІВ**

01.04.02 — теоретична фізика

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2008

**Дисертацією є рукопис.**

**Робота виконана** у Сумському державному університеті Міністерства освіти і науки України, м. Суми.

**Науковий керівник** - кандидат фізико-математичних наук, доцент  
**Хоменко Олексій Віталійович**,  
кафедра фізичної електроніки  
Сумського державного університету, доцент.

**Офіційні опоненти:** доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий  
співробітник **Стефанович**  
**Леонід Ілліч**,  
Донецький фізико-технічний Інститут  
НАН України ім. О.О. Галкіна,  
провідний науковий співробітник;

кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Кульментьєв Олександр Іванович**,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
провідний науковий співробітник.

Захист відбудеться “4” вересня 2008 року о 14 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.250.01 при Інституті прикладної фізики НАН України за адресою: 40030, м. Суми, вул. Петропавлівська, 58.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту прикладної фізики НАН України за адресою: м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 3.

Автореферат розіслано “9” липня 2008 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С.М. Мордик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Останніми роками інтенсивно проводиться експериментальне дослідження процесу тертя і реологічних властивостей молекулярно-тонких шарів рідин між двома атомарно-гладкими поверхнями при різних величинах прикладеного навантаження, тиску, товщини шарів, при зміні зсувної швидкості, температури тощо. Це обумовлено тим, що з розвитком нанотехнологій зростає потреба у створенні таких систем, що труться. Слід також зазначити, що дані вузли тертя існують майже в кожному реальному механізмі і їх появу викликано витисканням мастила з-під поверхонь. Нещодавні експерименти, теоретичний розгляд і комп'ютерне моделювання розширили розуміння тертя двох гладких твердих поверхонь за наявності тонкого шару рідини між ними. З фундаментальної точки зору інтерес обумовлений тим, що отримання гладких поверхонь низького тертя все більше і більше необхідно для високотехнологічних пристроїв типу комп'ютерних систем, мініатюрних двигунів, космічних приладів тощо. З'ясовано, що шар рідини стає у процесі тертя тоншим, його фізичні властивості змінюються спочатку плавно (кількісно), а потім при деякій критичній товщині зміни набувають різкого якісного характеру. Кількісні зміни виражаються неньютонівською поведінкою рідини і заміною звичайного плавлення склуванням, але шар мастила при цьому розпізнається як рідина.

На сьогодні значне місце у фізичних дослідженнях належить системам нанорозмірів, оскільки вони поводять себе відмінним від об'ємних тіл чином і одночасно з цим мають велике прикладне значення. Зокрема, вузли тертя, що є атомарно-гладкими поверхнями, які розділені тонким шаром мастила, можуть використовуватися в системах позиціонування в мікропристроях. Відомо, що фрагментація металів до нанорозмірів дозволяє значно покращити їх міцнісні і пластичні характеристики. Для ультратонких плівок мастила задача зводиться до розроблення феноменологічної схеми, що дозволяє описати їх аномальну поведінку. Вивчення закономірностей фрагментації спрямоване на удосконалення існуючої термодинамічної моделі і опис процесу на її основі.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота виконана на кафедрі фізичної електроніки Сумського державного університету і пов'язана з виконанням таких держбюджетних тем: "Статистична нелінійна теорія динамічних фазових режимів межового тертя у нанопристроях" (науково-дослідна робота Державного фонду фундаментальних досліджень, номер державної реєстрації

0107U008898, термін виконання 2007-2009 рр.); "Синергетика межового тертя" (номер державної реєстрації 0107U001279, термін виконання 2007-2008 рр.); "Статистична теорія складних систем економічного типу" (номер державної реєстрації 0106U001940, термін виконання 2006-2008 рр.).

**Мета і завдання досліджень.** Метою дисертаційної роботи є розроблення якісної феноменологічної моделі, що дозволяє описати поведінку ультратонких плівок мастил при терті між атомарно-гладкими слюдяними поверхнями, використовуючи детерміністичний підхід, і в умовах стохастичності, а також аналіз динаміки процесу інтенсивної пластичної деформації (ПД) на основі термодинамічної моделі і визначення можливих режимів фрагментації. У результаті головна задача зводиться до дослідження моделей, що дозволяють представити експериментально спостережувану поведінку.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі наукові задачі:

- використовуючи систему рівнянь Лоренца описати експериментально спостережувану поведінку при плавленні тонких плівок мастил;
- мінімізацією багатовимірного термодинамічного потенціалу отримати систему кінетичних рівнянь, що описує фрагментацію металів у процесі ПД;
- знайти розв'язок систем рівнянь у стаціонарному випадку;
- дослідити кінетику процесів, що розглядаються;
- розглянути вплив адитивних некорельованих шумів на плавлення мастила і фрагментацію металів;
- дослідити самоподібний режим даних процесів;
- проаналізувати вплив корельованих флуктуацій температури на плавлення мастила;
- врахувати вплив дефекту модуля зсуву мастила.

*Об'єктом дослідження* є система атомарно-гладких поверхонь, що розділені ультратонким шаром мастила, і метод ПД.

*Предметом дослідження* є процеси плавлення ультратонкої плівки мастила і фрагментації металів.

**Методи дослідження.** Під час виконання роботи використовувалися реологічні, синергетичні і стохастичні методи, методи теорій пружності і фазових переходів, методи математичної фізики, обчислювальної математики і математичного моделювання. Самоузгоджені нелінійні диференціальні рівняння розв'язувались при використанні адіабатичного наближення. При побудові стаціонарного роз-

поділу зсувних напружень за їх величиною використовувалися рівняння Ланжевена і Фоккера-Планка. Дослідження кінетики процесів, що розглядаються, проводилось методом фазової площини. Аналіз впливу корельованого шуму здійснювався методом ефективного потенціалу.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше у рамках реологічної моделі описано гістерезисну поведінку при плавленні ультратонкої плівки мастила. Знайдено три режими поведінки мастила, що відповідають нульовим зсувним напруженням, гуківській ділянці діаграми навантаження і ділянці пластичної течії. Досліджено процеси безперервного і стрибкоподібного плавлення при різних співвідношеннях часів релаксації.
2. Проаналізовано вплив температурних залежностей в'язкості у вигляді закону Фогеля-Фулчера і степеневого виразу на плавлення мастила. Визначено відповідні вирази для температур плавлення. Знайдено умови, при яких тертя зменшується.
3. Показано, що вплив адитивних некорельованих шумів основних параметрів приводить до переривчастого режиму плавлення мастила. Досліджено самоподібний режим поведінки твер-доподібного мастила.
4. Пояснено експерименти, при яких мастило плавиться без підведення додаткового тепла ззовні за рахунок дисипативного розігріву поверхонь тертя. У рамках чисельного моделювання отримано часові залежності напружень і показано зміни режимів тертя.
5. При врахуванні впливу корельованих флуктуацій температури показано, що мастило може знаходитись у декількох стаціонарних станах. Побудовано фазову діаграму самоподібного процесу плавлення, яка прогнозує різні режими тертя.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розвинута модель для опису межового тертя дозволяє прогнозувати поведінку змащувальних плівок і підбирати їх параметри таким чином, щоб звести до мінімуму ймовірність реалізації переривчастого (*stick - slip*) режиму, який є основною причиною руйнування деталей, що труться, в мікроелектроніці. Термодинамічна модель ПДД передбачає мож-

ливість формування граничних структур різного типу і відповідно отримання матеріалів із заданими фізико-механічними властивостями.

**Особистий внесок здобувача.** У роботі [1] участь автора дисертації полягала у вивченні літературних джерел, аналітичному і чисельному розв'язанні поставлених задач, а також в обговоренні отриманих результатів. У роботі [2] дисертантом проведено чисельний розрахунок фазових діаграм і стаціонарних значень напружень при безперервному перетворенні. У роботі [3] здобувачем отримано аналітичний вираз для розподілу ймовірності і при його чисельному аналізі побудовано фазову діаграму. У роботі [4] дисертантом досліджено вплив температурної залежності в'язкості степеневого вигляду і проведено врахування деформаційного дефекту модуля зсуву. У роботах [5,6] дисертантом побудовано фазові портрети, що описують кінетику мастила. У роботі [7] здобувачем розвинена процедура чисельного розв'язання рівняння Ланжевена і з її допомогою побудовано часові залежності напружень для різних областей фазової діаграми. У роботі [8] здобувачем проаналізовано стійкість перехідних станів. У роботі [9] дисертантом досліджено гістерезисну поведінку на основі отриманих ним стаціонарних залежностей напружень від температури поверхонь тертя. У роботі [10] дисертант дослідив фазову кінетику мастила. У роботах [11-14] автор дисертації провів чисельний аналіз основних рівнянь, і на його основі побудував фазові діаграми, а також брав участь в обговоренні отриманих результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідалися і обговорювалися на таких семінарах і конференціях:

- Міжнародних конференціях студентів і молодих вчених з теоретичної та експериментальної фізики "ЕВРИКА-2005, 2006, 2007" (Львів, 2005-2007 рр.);
- International Conference "Statistical Physics 2005: Modern Problems and New Applications" (Львів, 2005 р.);
- XVII International School-Seminar "Spectroscopy of molecules and crystals" (Берегове, Крим, 2005 р.);
- Третій Всеукраїнській конференції молодих вчених та спеціалістів "Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості та застосування" (Київ, 2006 р.);
- 9-й Міжнародній конференції "Високі тиски 2006 - Фундаментальні та прикладні аспекти" (Судак, Крим, 2006 р.);
- 2<sup>nd</sup> International Conference "Quantum Electrodynamics and Statistical Physics - QEDSP2006" (Харків, 2006 р.);
- Міжнародній конференції, присвяченій 100-річчю з дня народ-

ження Володимира Івановича Архарова "Мезоскопічні явища в твердих тілах" (Донецьк, 2007 р.);

- Конференції молодих вчених і аспірантів Інституту електронної фізики НАН України "ІЕФ-2007" (Ужгород, 2007 р.);

- VII Всеукраїнській школі-семінарі і конкурсі молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини Інституту фізики конденсованих систем НАН України (Львів, 2007 р.);

- International conference "Functional Materials - ICFM'2007" (Партеніт, Крим, 2007р.);

- Всеукраїнському конкурсі студентських наукових робіт з природничих, технічних і гуманітарних наук 2005/2006 н.р. з напрямку "Фізика та астрономія" (диплом переможця за перше місце);

- Семінарах Донецького фізико-технічного Інституту ім. О.О. Галкіна та Інституту прикладної фізики НАН України.

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи викладено в 10 статтях, опублікованих у спеціалізованих наукових журналах, що відповідають вимогам ВАКУ України, і 12 збірниках тез конференцій.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків і списку використаних джерел (107 найменувань). Обсяг дисертації становить 166 сторінок (66 рисунків за текстом).

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми. Сформульовано мету й задачі дослідження, також визначено новизну, практичне значення результатів, внесок здобувача та структуру роботи. Наведено зв'язок із науковими програмами досліджень наукової установи, в якій виконувалася робота.

**Перший** розділ роботи "Межовий режим тертя та процес інтенсивної пластичної деформації" складається з трьох підрозділів.

У *першому* підрозділі на основі аналізу літературних даних останніх років розглянуто межовий режим тертя, який має місце при терті атомарно-гладких поверхонь, які розділено ультратонким шаром мастила. Наведено експериментальні методики, що використовуються при дослідженні таких систем. Згідно з отриманими за допомогою цих методик експериментальними залежностями такий режим приводить до постійних переходів між твердоподібними і рідиноподібними станами мастила (*stick - slip* режим). При цьому може виникати багато різних кінетичних режимів тертя. Наведено узагальнену діаграму Страйбека, на якій показано нові трибологічні режими.

У *другому* підрозділі розглянуто наявні теоретичні моделі опису межового режиму тертя на прикладі механістичної, термодинамічної і реологічної моделей. Показано, що реологічна модель повніша за змістом і саме її дослідженню присвячено дисертаційну роботу.

У *третьому* підрозділі проведено аналіз літературних джерел, що стосуються методу ПД. Зазначено, що ряд питань із дослідження ПД на сьогодні не вирішений, а методи дослідження в основному зводяться до узагальнення експериментальних даних. Наприклад, теоретично не було передбачено можливість утворення декількох граничних структур. Не описано експериментально спостережуване формування фрактальних структур тощо.

**Другий** розділ дисертації "Гістерезисні явища при плавленні ультратонкої плівки мастила" складається з чотирьох підрозділів.

У *першому* підрозділі перехід ультратонкої плівки мастила, затиснутої між молекулярно-гладкими твердими поверхнями, з твердо-подібного у рідиноподібний стан подається як результат термодинамічного і зсувного плавлення. Проведено сукупний аналітичний опис цих процесів, що відбуваються у результаті самоорганізації полів зсувних напружень  $\sigma$  і деформації  $\varepsilon$ , а також температури  $T$  плівки мастила. Записано систему основних рівнянь у безрозмірних величинах:

$$\tau_{\sigma} \dot{\sigma} = -\sigma + g\varepsilon, \quad (1)$$

$$\tau_{\varepsilon} \dot{\varepsilon} = -\varepsilon + (T-1)\sigma, \quad (2)$$

$$\tau_T \dot{T} = (T_e - T) - \sigma\varepsilon + \sigma^2, \quad (3)$$

де введено часи релаксації  $\tau_{\sigma, \varepsilon, T}$  відповідних величин, температуру поверхонь тертя  $T_e$  та постійну  $G = G/G_0$ , яка є відношенням модуля зсуву мастила  $G$  до характерного його значення  $G_0$ . Показано, що із зростанням  $\sigma$  мастило плавиться, оскільки збільшується відносна швидкість руху контактуючих поверхонь

$$V = \frac{\sigma_v h}{\eta_{eff}} \quad (4)$$

де  $\sigma_v$  - в'язкі напруження;  $h$  - товщина мастила та  $\eta_{eff}$  - ефективна в'язкість.

У *другому* підрозділі проведено врахування температурних залежностей в'язкості, що описуються степеневим співвідношенням і законом Фогеля-Фулчера. В обох випадках знайдено загальні вирази



для критичної температури, вище за яку мастило плавиться. Визначено параметри, при яких тертя зменшується. Також досліджено ситуацію, коли модуль зсуву  $G$  залежить від величини напружень  $\sigma$ . При цьому спостерігається плавлення за механізмом фазового переходу першого роду.

У *третьому* підрозділі при врахуванні деформаційного дефекту модуля зсуву, коли  $G$  залежить від деформації  $\varepsilon$ :

$$G(\varepsilon) = \Theta + \frac{G - \Theta}{1 + (\varepsilon / \varepsilon_p)^\beta} \quad (5)$$

де  $\Theta$  - коефіцієнт зміцнення та  $\beta > 0$ ;  $\varepsilon_p > 0$  - параметри, досліджено гістерезисну поведінку при плавленні мастила. Встановлено можливість реалізації стрибкоподібного і безперервного плавлення. Описано гістерезис залежностей стаціонарних напружень від де-

формації і температури поверхонь тертя (рис. 1). Знайдено три режими поведінки мастила, які відповідають нульовому зсувному напруженню, гуківській ділянці діаграми навантаження і ділянці пластичної течії. Досліджено фазову кінетику системи в різних координатах.

У *четвертому* підрозділі досліджено гістерезисні явища при параметрах фазового переходу першого роду. Отримано залежність, на якій реалізується двозначна ділянка  $T_c^0 < T_e < T_{c0}$  (рис. 2а), що відповідає співіснуванню нестійкого (штрихова крива) та двох стійких (при  $\sigma_0 = 0$  і  $\sigma_0 \neq 0$ ) стаціонарних станів. При цьому поведінка системи залежить від її передісторії, що означає реалізацію ефектів пам'яті. Досліджено кінетику системи. На рис. 2б наведено фазовий портрет,

де вузол  $D$  при  $\sigma = 0$  відповідає сухому тертю, сідло  $N$  - нестійкому стаціонарному стану (максимуму синергетичного потенціалу), а точка  $O$  представляє фокус, що описує релаксаційні коливання до встановлення рідинного тертя. Такі коливання відповідають stick – slip режиму.

**Третій** розділ дисертації ”Вплив білого шуму“ складається із п’яти підрозділів. Проведено дослідження впливу  $\delta$  - корельованого шуму  $\xi(t)$  на основні параметри системи. Цей шум має моменти

$$\langle \xi_i(t) \rangle = 0, \quad \langle \xi_i(t) \xi_j(t') \rangle = 2\delta_{ij}\delta(t - t'). \quad (6)$$

Для врахування шуму у рівняння (1) - (3) введено стохастичні доданки у вигляді  $\sqrt{I_\sigma} \xi_1(t)$ ,  $\sqrt{I_\varepsilon} \xi_2(t)$ ,  $\sqrt{I_T} \xi_3(t)$ , де  $I_\sigma$ ,  $I_\varepsilon$  та  $I_T$  - інтенсивності шумів напружень, деформації та температури відповідно.

У *першому* підрозділі у рамках адіабатичного наближення  $\tau_\sigma \gg \tau_\varepsilon, \tau_T$  отримано рівняння Ланжевена

$$\tau_\sigma \dot{\sigma} = f(\sigma) + \sqrt{I(\sigma)} \xi(t), \quad (7)$$

де  $f(\sigma)$  - узагальнена сила і  $I(\sigma)$  - ефективна інтенсивність шуму. У рамках підходу Іто цьому рівнянню відповідає рівняння Фоккера-Планка вигляду

$$\tau_\sigma \frac{\partial P(\sigma, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial \sigma} [f(\sigma)P(\sigma, t)] + \frac{\partial^2}{\partial \sigma^2} [I(\sigma)P(\sigma, t)] \quad (8)$$

При аналізі (8) у стаціонарному випадку ( $\partial P/\partial t = 0$ ) побудовано динамічну фазову діаграму (рис. 3), де визначено різні режими тертя.

Ці

режими задаються максимумами функції розподілу  $P(\sigma)$ , яка вже не залежить від часу. Область  $DF$  відповідає реалізації одного нульового максимуму ( $\sigma_0 = 0$ ), область  $SF$  - одного ненульового максимуму. В області  $SS$  співіснують нульовий та ненульовий максимуми, що задають режими, між якими у процесі тертя здійснюються переходи.

У *другому* підрозділі чисельно розв'язано рівняння (7) і для всіх областей фазової діаграми отримано часові залежності напружень (рис. 4). Верхня панель рисунка подає режим, що відповідає рідиноподібній структурі мастила ( $\sigma_0 = 0$ ). У випадку, показаному на середній панелі, відбуваються часті випадкові переходи між нульовим і ненульовим значеннями напружень, що відповідає режиму переривчастого тертя. Нижня панель рисунка відповідає режиму сухого тертя, оскільки тут здійснюються флуктуації поблизу  $\sigma_0 = 0$ , що свідчить про твердоподібну структуру мастила. Пояснено експериментальні залежності сили тертя від швидкості зрушуваних поверхонь.

У *третьому* підрозділі пояснено експерименти, в яких переходи між режимами тертя здійснюються при постійних швидкостях зсуву. Припущено, що дисипація енергії поступального руху поверхонь тертя приводить до їх розігріву та при твердоподібному стані мастила поверхні нагріваються швидше, ніж при рідиноподібному. Зростання температури апроксимується експоненціальною залежністю

$$T_e(t) = T_e^0 (1 - \exp(-Ct)), \quad (9)$$

де  $T_e^0$  - значення  $T_e$ , що встановлюється із часом  $t$ ;  $C$  - константа, яка задає швидкість зростання температури. Побудовано часову

залежність  $|\sigma|(t)$ , згідно з якою із часом здійснюються послідовні переходи  $DF \rightarrow SS \rightarrow SF$ .

У *четвертому* підрозділі показано, що при врахуванні шуму за параметрами рис. 2б із часом встановлюється не рідинне тертя, а *stick - slip* режим. Аналіз відповідної спектральної густини потужності показує, що він є періодичним. Але за рахунок шуму амплітуда *stick - slip* переходів не є постійною. Даний випадок відповідає використанню як мастила складних ланцюгових молекул.

У *п'ятому* підрозділі розглянуто дробову модель Лоренца, коли в основних рівняннях (1) - (3)  $\sigma$  замінюється на  $\sigma^a$ . Фізичний зміст проведеної заміни полягає в тому, що вимога самоподібності досягається в рамках припущень про нелінійну релаксацію напружень, а також про дрібні характери додатного та від'ємного зворотних зв'язків. Показано, що у випадку  $I_T \gg I_\sigma$ ,  $I_\sigma$  спостерігається степеневий розподіл напружень за їх величиною

$$P(y) = y^{-2a} P(\sigma), \quad y = \sigma \sigma_s, \quad (10)$$

що відповідає самоподібній системі, для якої відсутній характерний масштаб напружень. При розв'язанні рівняння Ланжевена отримано самоподібні часові залежності  $|\sigma(t)|$  для різних масштабів напружень та часу. Побудовано фазову діаграму, що визначає різні режими тертя. Для опису переходу першого роду проведено врахування деформаційного дефекту модуля зсуву.

**Четвертий** розділ дисертації "Врахування кореляцій температури" складається з чотирьох підрозділів.

У *першому* підрозділі показано, що кореляції температури можуть бути подані процесом Орнштейна-Уленбека  $\lambda(t)$ , який описує кольоровий шум з моментами

$$\langle \lambda(t) \rangle = 0, \quad \langle \lambda(t) \lambda(t') \rangle = \frac{I}{\tau_\lambda} \exp\left(-\frac{|t-t'|}{\tau_\lambda}\right), \quad (11)$$

де  $I$  відіграє роль інтенсивності флуктуацій температури, а  $\tau_\lambda$  - часу їх кореляції. Причому  $I$  пропорційна квадрату температури і обернено пропорційна теплоємності мастила. Побудовано залежність  $\lambda(t)$  і проведено порівняння з білим шумом. При врахуванні процесу  $\lambda(t)$  у рівнянні (3) в рамках адіабатичного наближення  $\tau_\sigma, \tau_\epsilon \gg \tau_T$  отримано еволюційне рівняння в канонічному вигляді рівняння нелінійного стохастичного осцилятора типу генератора ван дер Поля:

$$m\ddot{\sigma} + \gamma(\sigma)\dot{\sigma} = f(\sigma) + \phi(\sigma)\lambda(t), \quad (12)$$

де  $\gamma$  - коефіцієнт тертя;  $f$  - ефективна сила;  $\phi$  - амплітуда шуму і стала  $m$  зводиться до маси системи. Рівнянню (12) відповідає рівняння Фоккера-Планка вигляду

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial \sigma} (D^{(1)} P) + \frac{\partial^2}{\partial \sigma^2} (D^{(2)} P), \quad (13)$$

де коефіцієнти дрейфу  $D^{(1)}$  та дифузії  $D^{(2)}$  залежать від  $\sigma$ . Стационарний розв'язок (13) приводить до розподілу

$$P(\sigma) = Z^{-1} \exp\{-E(\sigma)\} \quad (14)$$

з нормуючою постійною  $Z$  та ефективним потенціалом

$$E(\sigma) = \ln D^{(2)}(\sigma) - \int_0^\sigma \frac{D^{(1)}(x)}{D^{(2)}(x)} dx. \quad (15)$$

У другому підрозділі у випадку безперервного перетворення досліджено розподіл (14) і побудовано фазову діаграму в координатах температура поверхонь тертя - інтенсивність шуму (рис. 5а). На діаграмі реалізуються ті самі області, що і у випадку дії білого шуму (див. рис. 3).

У третьому підрозділі проведено врахування деформаційного дефекту модуля зсуву  $G(\sigma)$ . Відповідну фазову діаграму показано на рис. 5б. В області  $SS + SF$  співіснують твердоподібний, а також метастабільний і стійкий рідиноподібні стани мастила, які відповідають максимумам  $P(\sigma)$ . При цьому є можливим переривчасте тертя, при якому відбуваються переходи між динамічними режимами, що відповідають названим станам. Дана область, на відміну від інших, при невеликій зміні параметрів може не реалізуватися. В області  $MSF + SF$  можливі переходи між метастабільним ( $MSF$ ) і стійким рідинним ( $SF$ ) тертям.

У четвертому підрозділі проаналізовано дробову систему Лоренца. При цьому флуктуації температури призводять до того, що твердоподібному стану мастила відповідає ненульовий максимум  $P(\sigma)$  при  $\sigma_0 \approx 0$ . Встановлено, що функція розподілу (14) набирає степеневого вигляду (10) в області  $\sigma \ll 1$  навіть при температурах, що відповідають сухому тертю. Це означає, що виникає самоподібний режим поведінки твердоподібного мастила. На вигляд фазової діаграми істотно впливає показник розподілу  $a$ .

**П'ятий** розділ дисертації "Феноменологічна теорія інтенсивної

пластичної деформації“ складається з чотирьох підрозділів.

У першому підрозділі наведено основні положення теорії, яка базується на першому законі термодинаміки вигляду

$$du = \delta A + \delta Q = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} + Tds, \quad (16)$$

де  $\sigma_{ij}$ ,  $\varepsilon_{ij}$  - тензори напружень та деформації. Якщо представити тензор деформації у вигляді суми пружної та в'язкої компонент

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^n, \text{ то}$$

$$du = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^e + \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^n + Tds. \quad (17)$$

Необоротна робота зовнішніх сил іде на ”розігрів“ системи та вироблення дефектів

$$\sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^n \equiv Tds' + \phi dh, \quad (18)$$

де  $s'$  - додаткова ентропія за рахунок внутрішніх процесів;  $\phi$  - середня поверхнева густина енергії внутрішніх меж - меж зерен;  $h$  - об'ємна густина сумарної поверхні меж зерен. Об'єднавши ентропію  $s'$  та  $s$ , отримаємо

$$du = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^e + Tds + \phi dh. \quad (19)$$

Згідно з перетворенням Лежандра здійснено перехід від внутрішньої до вільної енергії

$$f = u - Ts - \phi h. \quad (20)$$

Енергія, що вводиться в систему за рахунок необоротної частини зовнішньої роботи, розподіляється між двома каналами дисипації -  $Ts$  і  $\phi h$ . Оскільки точний аналітичний вираз для вільної енергії  $f$  не відомий, далі розглядається її розвинення в ряд за аргументами до кубічних внесків вигляду

$$\begin{aligned} f(\varphi, T, \varepsilon_{ij}^e) = & f'_0 - h'_0 \varphi + \frac{1}{2} a' \varphi^2 - \frac{1}{3} b \varphi^3 + \frac{1}{2} \lambda (\varepsilon_{ii}^e)^2 + \mu (\varepsilon_{ii}^e)^2 - \\ & - g \varphi \varepsilon_{ii}^e - \frac{1}{2} \bar{\lambda} \varphi (\varepsilon_{ii}^e)^2 - \bar{\mu} \varphi (\varepsilon_{ij}^e)^2 - e \varphi^2 \varepsilon_{ii}^e + \\ & + \alpha' \varphi \Delta T + \alpha_g \varphi \Delta T \varepsilon_{ii}^e + \beta \varphi^2 \Delta T - \gamma (\Delta T)^2, \end{aligned} \quad (21)$$

де  $\Delta T = T - T_0$ ,  $T_0$  - початкова температура до ПД для бездефектного стану. Сталі  $h'_0$ ,  $a'$ ,  $b$  виражають залежність вільної енергії квазірівноважної підсистеми від густини енергії меж зерен за відсутності зовнішніх дій. Решта параметрів описує зовнішні механічні, температурні або змішані дії. Пружні напруження враховуються з точністю до

квадратичних внесків через два перших інваріанти тензора деформацій  $\varepsilon_{ii}^e$ ,  $(\varepsilon_{ij}^e)^2 = \varepsilon_{ij}^e \varepsilon_{ji}^e$ . Вважається, що внаслідок швидкої релаксації

в нерівноважній підсистемі напруження, при яких стають суттєвими кубічні внески за тензором деформацій  $\varepsilon_{ii}^e$ , не встигають розвинути. Далі при аналізі беруться від'ємні значення інваріанта  $\varepsilon_{ii}^e$ , оскільки описується процес стиску об'єкта, що деформується при ПД.

У другому підрозділі для динамічних параметрів записано рівняння руху вигляду

$$\tau_\phi \dot{\phi} = -\frac{\partial f}{\partial \phi}, \quad \tau_T \dot{T} = -\frac{\partial f}{\partial T}, \quad (22)$$

де введено часи релаксації  $\tau_{\phi, T}$  відповідних величин, що характеризують інерційні властивості системи. Час релаксації деформації  $\varepsilon_{ii}^e$  досить малий, тому можна вважати її константою. Система отриманих рівнянь далі аналізується в адіабатичному наближенні  $\tau_\phi \gg \tau_T$ . Побудовано фазову діаграму (рис. 6а). Нижче за криву 1 можливе

існування нульового стаціонарного розв'язку  $\phi_0 = 0$ , при якому відсутній канал дисипації енергії, що пов'язаний з утворенням дефектних структур, тобто система є монокристалом. Точки 1-4 на фазовій діаграмі відповідають кривим потенціалу на рис. 6б. В області А реалізуються два ненульових мінімуми потенціалу. Тут спостерігаються дві граничні структури з великим (перший мінімум потенціалу) і малим (другий мінімум) розміром зерна. Область діаграми А' є подібною



до області  $A$ , але з тією відмінністю, що перший мінімум потенціалу тут нульовий. У цій області у процесі ПД фрагментація матеріалу може не реалізовуватися. В області великих деформацій  $B$  формується одна гранична структура. При збільшенні  $(\varepsilon_{ii}^e)^2$  розмір зерна зменшується, і у границі  $(\varepsilon_{ii}^e)^2 \rightarrow 0$  оброблений зразок є аморфною структурою. Єдиний нульовий мінімум потенціалу реалізується в області малих деформацій  $A'$ . Тут система є монокристалом.

У *третьому* підрозділі на основі загального кінетичного рівняння типу Ландау-Халатнікова проаналізовано релаксаційні залежності  $\varphi(t)$  для всіх областей отриманої в попередньому підрозділі фазової діаграми. Досліджено кінетику в координатах  $\dot{\varphi} - \varphi$ . Також проаналізовано вплив зовнішньої періодичної дії, коли перший або другий інваріанти змінюються за законом косинуса.

У *четвертому* підрозділі досліджено вплив некорельованих шумів густини енергії меж зерен і температури на процес ПД. Побудовано динамічну фазову діаграму, області якої якісно збігаються з наведеними на рис. 6. Для пояснення експериментів з ПД, в яких виникають фрактальні структури, проведено дослідження самоподібного режиму. Для цього в розкладанні вільної енергії введено показник  $\omega < 1$ , який забезпечує дробовий характер від'ємного зворотного зв'язку у рівняннях еволюції (22). У рамках адиабатичного наближення знайдено співвідношення параметрів системи, при яких розподіл густини енергії меж зерен має степеневий вигляд (10) у визначеному діапазоні  $0 < \varphi < \varphi_{\max}$ . У вказаному інтервалі формуються квазіфрактальні структури, де існують розміри зерен при всіх  $\varphi$  даного відрізка.

## ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження розвинена модель, що дозволяє описати ефекти, які спостерігаються при терті атомарно-гладких твердих поверхонь, що розділені ультратонким шаром мастила. Результати роботи дозволяють розширити уявлення про фізику тертя об'єктів нанорозмірів, коли звичайні закони, на зразок закону Амонтона, не виконуються. Дослідження впливу білого шуму на процес ПД у рамках термодинамічної моделі передбачає можливість виникнення нових режимів фрагментації і відповідно формування матеріалів із заданими властивостями. Головні результати дисертації подано такими висновками.

1. Показано, що плавлення ультратонкої плівки мастила в процесі тертя між атомарно-гладкими твердими поверхнями на-

стає за рахунок появи зсувних напружень, що викликані на-грівом поверхонь, вищим за критичне значення. Визначено вирази для температури плавлення при температурних залежностях в'язкості, що описуються степеневим виразом і співвідношенням Фогеля-Фулчера.

2. Описано експериментально спостережувану гістерезисну поведінку при врахуванні деформаційного дефекту модуля зсуву. Визначено три режими поведінки мастила. Перший відповідає нульовим зсувним напруженням і деформації, другий – гуківсь-кій ділянці діаграми навантаження і третій – ділянці пластичної течії.
3. При врахуванні адитивних некорельованих шумів побудовано фазову діаграму з областями рідинного, сухого і переривчастого тертя. Отримано часові залежності напружень і показано переходи між режимами тертя, що приводять до переривчастого руху. З'ясовано, що шум температури приводить до виникнення самоподібного режиму поведінки твердоподібного мастила.
4. Описано плавлення мастила за рахунок дисипативного розі-гріву зрушуваних поверхонь, коли в процесі тертя температура поверхонь зростає за експоненціальним законом. При цьому з часом відбуваються послідовні переходи між режимами тертя. Пояснено експерименти з граничного тертя з атомарно-гладкими слюдяними поверхнями, в яких відбувається плавлення мастила з часом без підведення додаткового тепла ззовні.
5. Досліджено вплив корельованих флуктуацій температури на плавлення мастила. Побудовано динамічні фазові діаграми. Знайдено переривчастий режим, що характеризується спонтанними переходами між трьома стаціонарними значеннями напружень, при яких реалізується сухе, метастабільне і стійке рідинне тертя. Показано, що кореляції флуктуацій приводять до виникнення самоподібного режиму поведінки твердоподібного мастила.

#### **СПИСОК ОСНОВНИХ ПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Хоменко А. В. Стохастическая теория прерывистого режима плавления ультратонкой пленки смазки / А. В. Хоменко,

- Я. А. Ляшенко** // Журнал технической физики. - 2005. - Т. 75, № 11. - С. 17-25.
2. Хоменко А. В. Влияние корреляций температуры на самоподобное поведение ультратонкой пленки смазки / А. В. Хоменко, **Я. А. Ляшенко** // Вестник Сумского государственного университета. - 2005. - № 4(76). - С. 70-87.
  3. Хоменко А. В. Фазовая кинетика внутреннего трения ультратонкой пленки смазки / А. В. Хоменко, **Я. А. Ляшенко** // Вестник Сумского государственного университета. - 2005. - № 8(80). - С. 68-77.
  4. Khomenko A. V. Temperature dependence effect of viscosity on ultrathin lubricant film melting / A. V. Khomenko, **I. A. Lyashenko** // Condensed Matter Physics. - 2006. - Vol. 9, № 4(48). - P. 695-702.
  5. Khomenko A. V. Influence of temperature correlations on phase kinetics of boundary friction / A. V. Khomenko, **I. A. Lyashenko** // Вестник Львовского университета. - 2007. - № 40. - С. 71-85.
  6. Khomenko A. V. Phase dynamics and kinetics of thin lubricant film driven by correlated temperature fluctuations / A. V. Khomenko, **I. A. Lyashenko** // Fluctuation and Noise Letters. - 2007. - Vol. 7, № 2. - P. L111-L133.
  7. Хоменко А. В. Плавление ультратонкой пленки смазки за счет диссипативного разогрева поверхностей трения / А. В. Хоменко, **Я. А. Ляшенко** // Журнал технической физики. - 2007. - Т. 77, № 9. - С. 137-140.
  8. Хоменко А. В. Гистерезисные явления при плавлении ультратонкой пленки смазки / А. В. Хоменко, **Я. А. Ляшенко** // Физика твердого тела. - 2007. - Т. 49, № 5. - С. 886-890.
  9. Khomenko A. V. Hysteresis phenomena at ultrathin lubricant film melting in the case of first-order phase transition / A. V. Khomenko, **I. A. Lyashenko** // Physics Letters A. - 2007. - Vol. 366, № 1-2. - P. 165-173.
  10. Хоменко О. В. Фазова динаміка тонкої плівки мастила між твердими поверхнями при деформаційному дефекті модуля зсуву /

- О. В. Хоменко, **Я. О. Ляшенко** // Журнал фізичних досліджень.  
- 2007. - Т. 11, № 3. - С. 268-278.
11. Метлов Л. С. Влияние аддитивных шумов на процесс интенсивной пластической деформации / Л. С. Метлов, А. В. Хоменко, **Я. А. Ляшенко** // Мезоскопические явления в твердых телах : Междунар. конф., 26 февраля - 1 марта 2007 г. : тезисы докл. -Донецк, 2007. - С. 73.
  12. Хоменко А. В. Стохастическая теория фрагментации в процессе интенсивной пластической деформации / А. В. Хоменко, **Я. А. Ляшенко**, Л. С. Метлов // ИЭФ-2007 : Всеукр. конф., 14 - 19 мая 2007 г. : тезисы докл. - Ужгород, 2007. - С. 201.
  13. Хоменко О. Фазова кінетика інтенсивної пластичної деформації / О. Хоменко, **Я. Ляшенко**, Л. Метлов // ЕВРИКА-2007 : Між-нар. конф., 22 - 24 травня 2007 р. : тези доповіді. - Львів, 2007. -С. А4.
  14. Khomenko A. V. Noise effect on thermodynamics of fragmentation at severe plastic deformation / A. V. Khomenko, **I. A. Lyashenko**, L. S. Metlov // Functional Materials - ICFM'2007 : Int. conf., 1-6 October 2007 : abstract. - Crimea, Partenit, 2007. - P. 279.
  15. **ЛяшенкоЯ.** Статистична нелінійна теорія плавлення ультратонкої плівки мастила / Я. Ляшенко // VII Всеукраїнська школа-семинар і конкурс молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини ІФКС НАН України, 31 травня - 1 червня 2007 р. : тези конкурсної доповіді. - Львів, 2007. - С. 21-23.

#### АНОТАЦІЯ

**Ляшенко Я.О. Статистичне представлення межового тертя та фрагментації металів. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика, Інститут прикладної фізики, Суми, 2008.

Метою досліджень, проведених у дисертації, є дослідження феноменологічних моделей, що описують процеси межового тертя та інтенсивної пластичної деформації (ПД) і базуються на системах самоузгоджених диференціальних рівнянь.

Межове тертя досліджено в рамках реологічної моделі, що враховує термодинамічне і зсувне плавлення. Проведено опис цих процесів, що відбуваються у результаті самоорганізації полів зсувних напружень і деформації, а також температури плівки мастила. Враховано різні температурні залежності в'язкості, адитивні некорельовані флуктуації основних параметрів системи, корельовані флуктуації температури. Досліджено вплив деформаційного дефекту модуля зсуву мастила на плавлення. Процес ПД вивчається на основі моделі, що базується на теорії фазових переходів Ландау.

У результаті досліджень показано, що врахування деформаційно-го дефекту модуля зсуву мастила приводить до гістерезисної поведінки при плавленні. Знайдено параметри, при яких реалізується періодичний переривчастий режим тертя. При врахуванні шуму побудовано фазові діаграми з різними режимами тертя. Описано самоподібний режим. За допомогою часових залежностей напружень простежено зміни режимів тертя.

Досліджено фрагментацію металів у процесі ПД та побудовано фазову діаграму з різними режимами фрагментації. Встановлено, що із зростанням пружних деформацій розмір зерен у сформованих за допомогою ПД зразках зменшується. Показано принципову можливість формування квазіфрактальних зеренних структур.

**Ключові слова:** ультратонка плівка мастила; зсувні напруження та деформація; переривчасте тертя; білий та кольоровий шум; інтенсивна пластична деформація; межа зерна; гранична структура.

## АННОТАЦІЯ

**Ляшенко Я.А. Статистическое представление граничного трения и фрагментации металлов. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика, Институт прикладной физики, Сумы, 2008.

В диссертационной работе исследовано плавление ультратонкой пленки смазки в процессе трения между атомарно-гладкими поверхностями. Проанализированы температурные зависимости вязкости, описываемые соотношением Фогеля-Фулчера и степенным выражением. В обоих случаях найдена температура плавления смазки. Определены значения параметров смазки, необходимые для уменьшения трения.

Исследовано влияние деформационного дефекта модуля сдвига

на характер плавления. При этом может реализоваться как скачкообразное плавление, когда внутреннее сдвиговое напряжение превышает определенное критическое значение, так и непрерывное плавление. Существуют три режима поведения смазки. Первый отвечает нулевым сдвиговым напряжениям и деформации, второй — гуковско-му участку диаграммы нагружения и третий — участку пластического течения. Первые два режима соответствуют твердоподобной структуре смазки, третий интерпретируется как жидкоподобное ее состояние, приводящее к скольжению.

Скачкообразное плавление характеризуется гистерезисом зависимостей стационарного напряжения от деформации и температуры поверхностей трения. Найдены параметры системы, при которых реализуется гистерезисное поведение. Показано, что при переходе между гуковским и пластическим участками в определенном интервале температур напряжения сохраняются. Построены фазовые портреты системы, позволяющие проследить эволюцию напряжений и деформации.

Введены аддитивные некоррелированные шумы основных параметров системы, и построена динамическая фазовая диаграмма с областями жидкостного, прерывистого и сухого трения. При численном анализе уравнения Ланжевена получены временные траектории сдвиговых напряжений, и показаны переходы между режимами трения, которые приводят к прерывистому (stick -slip) движению. Рассмотрено плавление смазки за счет диссипативного разогрева, когда в процессе трения температура поверхностей растет по экспоненциальному закону. Объяснены эксперименты, в которых происходит плавление смазки с течением времени без подвода дополнительного тепла извне. Рассмотрен случай, в котором эволюция системы протекает самоподобным образом, в связи с чем ее функция распределения имеет степенную асимптотику. Получены соответствующие временные зависимости напряжений при различных масштабах. Определены условия реализации периодического прерывистого режима трения.

Исследовано влияние коррелированных флуктуаций температуры, которые описываются процессом Орнштейна-Уленбека. Рассмотрено поведение наиболее вероятного значения сдвиговых напряжений, и построены фазовые диаграммы. Установлено, что возможно прерывистое движение, характеризуемое спонтанными переходами между тремя стационарными значениями сдвиговых напряжений, при которых реализуется сухое, метастабильное и устойчивое жид-

костное трение. В рамках дробной системы Лоренца исследовано самоподобное поведение. Показано, что в этом случае твердоподобно-му состоянию смазки отвечает максимум функции распределения при значениях напряжений, близких к нулю.

Также исследована фрагментация твердых тел в процессе интенсивной пластической деформации. Для описания образующихся дефектных структур введены плотность энергии границ зерен и плотность суммарной поверхности границ зерен, что позволяет учесть два канала диссипации энергии (тепловой и производства дефектов). Построена фазовая диаграмма с областями реализации различных типов предельных структур. На фазовой диаграмме выделено четыре области — две с существованием двух предельных структур и две — с существованием одной. При нулевой плотности энергии границ зерен формируются крупные монокристаллические зерна, при ненулевом ее значении — более мелкие зерна. Для всех областей в рамках адиабатического приближения построены релаксационные зависимости для плотности энергии границ зерен. Учет влияния аддитивных некоррелированных шумов не вносит качественных изменений в поведении системы — на фазовой диаграмме реализуются аналогичные области. Установлена принципиальная возможность формирования квазифрактальных зеренных структур.

**Ключевые слова:** ультратонкая пленка смазки; сдвиговые напряжения и деформация; прерывистое трение; белый и цветной шум; интенсивная пластическая деформация; граница зерна; предельная структура.

#### ABSTRACT

**Lyashenko I.A. Statistical representation of boundary friction and fragmentation of metals. – Manuscript.**

Thesis for a candidate sciences degree in physical and mathematical sciences by speciality 01.04.02 – theoretical physics, Institute of Applied Physics, Sumy, 2008.

Thesis for a degree of Doctor of Philosophy (PhD) in physical and mathematical sciences by speciality 01.04.02 – theoretical physics, Institute of Applied Physics, Sumy, 2008.

The purpose of the dissertation is the study of phenomenological models which describe the processes of boundary friction and severe plastic deformation (SPD) based on the systems of self-consistent differential equations.

Boundary friction is investigated within the framework of the rheological model which takes into account thermodynamic and shear melting. Description of these processes, occurring as a result of self-organization of the fields of shear stress and strain, as well as temperature of lubricant film is carried out. Different temperature dependences of viscosity, additive uncorrelated fluctuations of basic parameters, correlated fluctuations of temperature are taken into account. Influence of deformation defect of shear modulus of lubricant on melting is investigated. The process of SPD is studied on the basis of model that is based on the Landau theory of phase transitions.

It is shown that the deformation defect of the shear modulus of lubricant results in a hysteresis behavior at melting. Parameters are found at which the periodic stick-slip mode of friction is realized. At consideration of noise the phase diagrams are built with different friction modes. The self-similar mode is described. The changes of the friction modes are observed using the time dependences of stresses.

The fragmentation of metals during the process of SPD is investigated, and the phase diagram with different modes of fragmentation is built. It is found out that with the growth of elastic strain the size of grains decreases in samples formed by SPD. The principle possibility of quasi-fractal grain structures formation is shown.

**Key words:** ultrathin lubricant film; shear stress and strain; stick-slip friction; white and colour noise; severe plastic deformation; grain boundary; limiting structure.



Підп. до друку 03.07.2008 р.  
Формат 60x80/16. Папір ксерокс. Гранітура Times New Roman Cyr.  
Друк офс.  
Ум.друк.арк. 0,9. Обл.-вид.арк. 0,8.  
Тираж 100 пр.  
Зам. № 914

Видавництво СумДУ при Сумському державному університеті  
40007, м. Суми, вул. Р.-Корсакова, 2.  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного  
реєстру  
ДК № 3062 від 17.12.2007.  
Надруковано у друкарні СумДУ  
40007, м. Суми, вул. Р.-Корсакова, 2.