

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Манько Наталія Миколаївна

УДК 539.62:621.891(043.3)

**СИНЕРГЕТИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ПЕРЕРИВЧАСТОГО РЕЖИМУ
МЕЖОВОГО ТЕРТЯ**

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2015

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук, доцент
Ляшенко Яків Олександрович,
доцент кафедри моделювання складних систем
Сумського державного університету.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Татаренко Валентин Андрійович,
заступник директора з наукової роботи Інституту
металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України;

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Кульментьєв Олександр Іванович,
провідний науковий співробітник відділу квантової
електродинаміки сильних полів Інституту прикладної
фізики НАН України.

Захист відбудеться « 5 » червня 2015 р. 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 Б, ауд. 307.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розіслано « __ » _____ 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

І. В. Чешко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Процеси межового тертя, що протікають у нанорозмірних трибологічних системах, останнім часом викликають підвищений інтерес у багатьох теоретиків та експериментаторів. Зокрема, розглядаються атомарно-гладкі тверді поверхні з ультратонким однорідним шаром мастильного матеріалу між ними під час їх відносного руху з фіксованою відстанню між поверхнями. Це спричинено частим використанням таких систем для побудови високоточного обладнання та приладів. Як відомо, нанорозмірні системи проявляють аномальні властивості щодо звичайних макроскопічних вузлів тертя. Більшість праць, присвячених цій тематиці, має фундаментальний характер, що дозволяє наблизитися до розуміння таких систем. Ультратонкі шари відносно об'ємних мастил мають інші температури плавлення й тверднення, немонотонну залежність сили тертя від швидкості, що викликано можливістю мастила перебувати у декількох структурних станах. Також спостерігається переривчастий режим руху, плавлення мастила при зсуві поверхонь, ефекти пам'яті тощо.

Фундаментом для створення теоретичних моделей, що описують процеси межового тертя в нанорозмірних системах, стала достатня кількість експериментальних праць. На сьогодні, незважаючи на складність дослідження нанотрибологічних систем, відомі експериментальні дані надають вичерпну інформацію про такі основні властивості, як товщину мастила (кількість молекулярних шарів мастильного матеріалу), температуру, зовнішнє навантаження, ефективну в'язкість, пружні та в'язкі компоненти зсувних напружень тощо. При побудові моделі необхідно враховувати, що на нанорозмірні системи впливають найменші зміни як внутрішніх (тип мастила, структура поверхонь тертя, тиск тощо), так і зовнішніх (навантаження на поверхні, швидкість зсуву, тип трибологічної системи) параметрів.

На цей час дослідженню нанорозмірних систем відводиться особливе місце, оскільки їх поведінка відрізняється від поведінки об'ємних тіл, і у той самий час вони мають велике прикладне значення. Наприклад, у системах позиціонування в мікропристроях можуть використовуватися вузли тертя, що є атомарно-гладкими твердими поверхнями, розділеними тонким шаром мастильного матеріалу. Актуальним завданням є вивчення межового тертя в рамках феноменологічної моделі, за допомогою якої можна врахувати багато особливостей поведінки нанорозмірних трибологічних систем. Також актуальним є дослідження механізму зсувного плавлення в твердих тілах, оскільки це явище має велике прикладне значення, зокрема, у практичних проблемах деформації матеріалів і при вивченні механічних властивостей земної кори.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі моделювання складних систем Сумського державного університету і пов'язана з виконанням таких науково-дослідних робіт: держ-

бюджетної теми «Реологічні властивості трибологічних систем у режимі межового тертя» (2011–2016 рр.), № 0111U009623; науково-дослідної роботи Державного фонду фундаментальних досліджень України в рамках гранту Президента України GP/F44/010 «Феноменологічна теорія межового тертя в трибологічних наносистемах» (2012 р.), № 0112U007318; науково-дослідної роботи Державного фонду фундаментальних досліджень України в рамках гранту Президента України GP/F49/044 «Термодинамічна теорія прослизання по границям зерен у проблемі надпластичності наноструктурованих металів» (2013 р.), № 0113U007248.

Дисертант брав участь у виконанні зазначених НДР як виконавець наукових досліджень та під час підготовки проміжних і заключних звітів.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є дослідження процесів межового тертя в рамках моделі нанорозмірної трибологічної системи, що дозволяє описати поведінку ультратонких плівок мастила, затиснутих між атомарно-гладкими твердими поверхнями при їх зсуві, а також аналіз процесу зсувного плавлення в твердих тілах при врахуванні адитивних шумів основних величин.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- описати причини виникнення переривчастого режиму руху (*stick-slip*) у рамках реологічної моделі межового тертя при детерміністичному підході;
- дослідити типи стійкості стаціонарних режимів межового тертя залежно від параметрів моделі;
- оцінити вплив неоднорідностей розподілу основних параметрів за товщиною мастила;
- проаналізувати вплив адитивних шумів на плавлення мастила, враховуючи деформаційний дефект модуля зсуву;
- провести аналіз впливу адитивних шумів у рамках моделі зсувного плавлення у твердих тілах;
- дослідити самоподібний режим процесів плавлення в трибологічних системах без мастила.

Об'єкт дослідження – процеси зсувного плавлення, що спостерігаються при терті атомарно-гладких твердих поверхонь.

Предмет дослідження – властивості трибологічної системи, яка складається з двох атомарно-гладких твердих поверхонь, розділених ультратонким шаром мастильного матеріалу і без нього.

Методи дослідження. У роботі використовувалися методи теорій пружності і статистичної фізики, обчислювальної математики, математичного моделювання, методики дослідження фазових переходів, а також реологічні, синергетичні та стохастичні методи дослідження. Диференціальні рівняння розв'язувалися за допомогою методів Рунге – Кутти та Ейлера, явних різницевих схем. Також використовувалися рівняння Ланжевена та Фоккера – Планка для врахування впливу шуму на трибологічну систему, а за допомогою системи Лоренца проаналізовано стохастичну поведінку системи.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Уперше в рамках реологічної моделі в детерміністичному випадку досліджено хаотичну поведінку трибологічної системи та показано, що при перевищенні температурою критичного значення система виходить на режим, що описується атрактором Лоренця, і у широкому діапазоні параметрів реалізується реверсивний рух поверхонь тертя.

2. Показано, що при врахуванні просторової неоднорідності основних параметрів за товщиною мастильного матеріалу можливо описати випадки ньютонівської та неньютонівської поведінки мастила. З'ясовано, що при врахуванні неоднорідності за площею контакту всієї контактної області з часом установлюється однакове значення напружень, яке задає відносну швидкість руху поверхонь тертя.

3. Установлено, що у випадку деформаційного дефекту модуля зсуву мастила, враховуючи вплив адитивних флуктуацій основних параметрів системи, можливо підібрати умови, за яких відсутні ділянки сухого і переривчастого режимів тертя, що забезпечує зменшення тертя.

4. Уведення до розгляду зовнішнього адитивного шуму критично впливає на характер поведінки системи, зокрема встановлюється режим самоподібної поведінки часових рядів параметра порядку, при описанні руху пари взаємодіючих шарів у моделі зсувного плавлення.

Практичне значення результатів. У результаті дослідження було здійснено подальший розвиток синергетичної моделі, яка описує плавлення ультратонкого шару мастильного матеріалу в умовах межового тертя, що дозволяє прогнозувати поведінку системи й визначити діапазон параметрів, за яких реалізується переривчастий режим руху, що часто призводить до руйнування деталей, які труться. Модель зсувного плавлення у твердих тілах з урахуванням шуму також дозволяє прогнозувати поведінку відносного руху пари взаємодіючих шарів і знайти параметри, які визначають оптимальний режим роботи розглянутої системи.

Особистий внесок здобувача. Всі результати дисертаційного дослідження обговорювалися з науковим керівником – доц. Ляшенком Я. О. Представлені в роботі результати отримані як особисто автором, так і при співпраці з Борисюком В. М. У роботі [1] автор дисертації брав участь у вивченні літературних джерел, аналітичному і чисельному розв'язуванні задач, а також в обговоренні отриманих результатів. У роботі [2] дисертантом проведено аналітичний аналіз рівнянь поблизу стаціонарного розв'язку і побудована діаграма типів стійкості особливих точок. У [3] здобувачем за допомогою явної двошарової різницевої схеми отримана ітераційна процедура, що дозволяє чисельно розв'язати початкову систему диференціальних рівнянь, і на її основі побудовані просторові розподіли стаціонарних напружень. У [4] дисертант побудував двовимірні густини ймовірностей під час аналізу стаціонарного розв'язку рівняння Фоккера – Планка і на їх основі описав режими поведінки системи. У [5] здобувачем проаналізовано вплив температури поверхонь на стаціонарний режим межового тертя. У

роботах [6, 7] дисертантом побудовано та проаналізовано фазові портрети, які описують кінетику мастильного матеріалу. У роботі [8] здобувачем проведено числовий аналіз системи основних рівнянь і побудовано густини ймовірностей параметра порядку. У [9] дисертантом побудовано й описано просторові розподіли напружень за площиною мастильного шару. У [10] здобувачем побудовано фазові діаграми. У роботах [11–15] автор дисертації провів числовий аналіз основних рівнянь.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися і обговорювалися на таких семінарах і конференціях: IV та V Міжнародних науково-інноваційних молодіжних конференціях «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент» (м. Тамбов, Росія, 2012, 2013 рр.); Міжнародних конференціях студентів і молодих вчених з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА» (м. Львів, 2013, 2014 рр.); Конференції молодих вчених і аспірантів Інституту електронної фізики НАН України «ІЕФ-2013» (м. Ужгород, 2013 р.); II та III Міжнародних конференціях «Nanomaterials: Application and Properties (NAP)» (м. Алушта, 2013 р.; м. Львів, 2014 р.); 34-й Міжнародній науковій конференції «Electronics and Nanotechnology (ELNANO)» (м. Київ, 2014 р.); XIV Всеукраїнській школі-семінарі і конкурсі молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини (м. Львів, 2014 р.); школі-семінарі «Багатомасштабне моделювання фізичних процесів у конденсованих середовищах» (м. Суми, 2014 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладено в 15 публікаціях: 5 статтях [1–5], у виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus, 5 статтях у матеріалах конференцій [6–10] та 5 тезах конференцій [11–15], більшість із яких були представлені автором особисто.

Структура і зміст роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, у якому міститься 146 найменувань на 14 сторінках. Обсяг дисертації становить 128 сторінок, із яких 105 – основний текст, 54 рис. та 2 таблиці, у тому числі 11 рис. – на окремих 6 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та основні завдання досліджень, визначені новизна і практичне значення отриманих результатів, зазначений зв'язок роботи з науково-дослідними роботами, наведені відомості про апробацію отриманих результатів, визначені методи досліджень, особистий внесок здобувача та структура роботи.

Перший розділ роботи «Межовий режим тертя та механізм зсувного плавлення (літературний огляд)» складається з чотирьох підрозділів.

У *першому* підрозділі розглянуто будову апарата поверхневих сил, за допомогою якого стало можливим експериментальне дослідження процесів

межового тертя у нанорозмірних системах. Наведено схематичне представлення цього приладу та описано основні принципи його роботи.

У *другому* підрозділі проведено аналіз літературних джерел, описано експерименти, де спостерігається переривчастий режим руху (*stick-slip*). У такому режимі мастило спочатку має твердоподібну структуру (*stick*), потім при перевищенні критичних напружень воно різко стає рідиноподібним (*slip*). При подальшому русі під впливом зовнішнього нормального навантаження мастило знову переходить у твердоподібну фазу. Наведено експериментальні залежності для різних мастил, на яких спостерігається переривчастий режим руху.

У *третьому* підрозділі розглянуто реологічну модель межового тертя. Наведено стислий опис основних рівнянь для еволюцій напружень, деформації і температури. Представлено попередні дослідження межового тертя у рамках реологічної моделі. Показано, як за допомогою цієї моделі було проаналізовано перехідний режим межового тертя при різних співвідношеннях часу релаксації та вплив шуму на динамічні характеристики переривчастого режиму.

У *четвертому* підрозділі проведено аналіз літературних джерел, що стосуються дослідження механізму зсувного плавлення в твердих тілах. Розглянуто моделі, які описують поведінку твердих тіл на атомарному рівні при зсувному плавленні. Наведено динамічні фазові діаграми з різними режимами поведінки системи залежно від швидкості деформації та розглянуто вплив адитивного шуму.

Другий розділ дисертації «Аналіз стійкості стаціонарних режимів межового тертя в рамках реологічної моделі» складається з трьох підрозділів.

У *першому* підрозділі наведено систему основних рівнянь у безрозмірних величинах для напружень σ , деформації ε і температури T у вигляді:

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

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

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

в яких уведено температуру поверхонь тертя T_e , сталу $g = G/G_0$, яка є відношенням модуля зсуву мастила G до його характерного значення G_0 , та параметри:

$$\tau = \frac{\tau_\varepsilon}{\tau_\sigma}, \quad \delta = \frac{\tau_T}{\tau_\sigma}, \quad (4)$$

де τ_σ , τ_ε , τ_T – часи релаксації відповідних величин. У загальному випадку, коли всі часи релаксації в системі (1)–(3) мають відмінні від нуля значення, вона зводиться до диференціального рівняння третього порядку:

$$\ddot{\sigma} = \ddot{\sigma} \left(\frac{\dot{\sigma}}{\sigma} - 1 - \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\delta} \right) + \frac{\dot{\sigma}}{\tau} \left(\frac{\dot{\sigma}(\tau+1)}{\sigma} - \frac{\sigma^2 + 1 + \tau}{\delta} \right) + \frac{\sigma \left(g(T_e + \sigma^2 - 1) - \sigma^2 - 1 \right)}{\delta\tau}. \quad (5)$$

У *другому* підрозділі розглянуто найбільш поширені механічні аналоги двох типів трибологічних систем, на основі яких, як правило, проводяться експерименти з вивчення особливостей межового тертя. Також представлені фазові портрети та

часові залежності напружень для (5) при різних значеннях параметрів g , τ , δ та T_e . Показано, що використовуючи синергетичну модель межового тертя, можна описати поведінку трибологічних систем різних типів. Описано режим переривчастого руху, який часто спостерігається в експериментах. У такому режимі відбуваються послідовні переходи між структурними станами мастила.

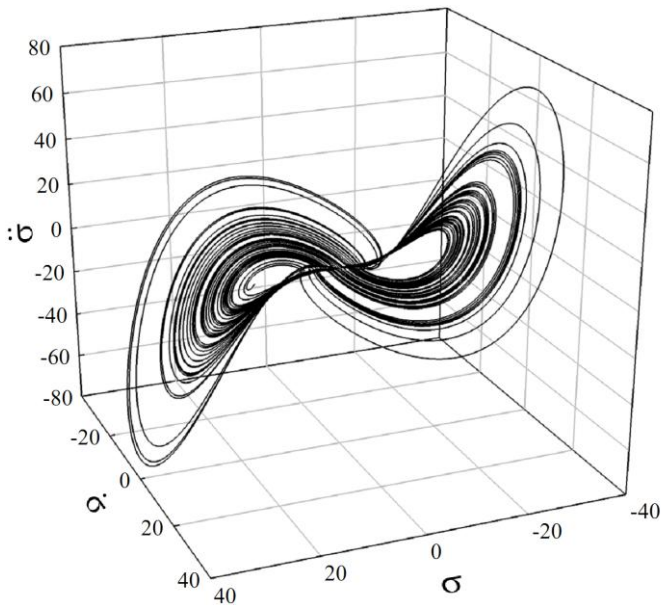


Рис 1. Тривимірна фазова траєкторія, що отримана при чисельному розв'язуванні рівняння (5), $g=0.25$, $\tau=3$, $\delta=95$ та $T_e=500$

Дослідження дозволяють розширити отримані раніше результати у рамках синергетичної моделі, оскільки описаний переривчастий режим має детерміністичну природу, що не було показано раніше, але часто спостерігається експериментально під час дослідження процесів межового тертя. Показано, що із зростанням температури поверхонь тертя в системі посилюється хаотичність, а при перевищенні температурою критичного значення система виходить на режим, який описується аттрактором Лоренця (рис. 1).

У третьому підрозділі проведено аналіз стійкості стаціонарних режимів, за допомогою якого побудовано фазові діаграми з різними режимами функціонування трибологічної системи. Для цього розв'язок диференціальних рівнянь (1)–(3) обрано поблизу стаціонарного стану у лінійній формі:

$$\sigma = \sigma_0 + \alpha e^{\lambda t}, \quad (6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \beta e^{\lambda t}, \quad (7)$$

$$T = T_0 + \gamma e^{\lambda t}, \quad (8)$$

де λ – невідомий показник, величини σ_0 , ε_0 , T_0 відповідають стаціонарному стану, а амплітуди α , β та γ є невеликими відхиленнями від цього стану. За температури поверхні тертя $T_e < 1 + g^{-1}$ реалізується стаціонарне значення:

$$\sigma_0 = \varepsilon_0 = 0, \quad T_0 = T_e, \quad (9)$$

а при $T_e > 1 + g^{-1}$ залежно від початкових умов устанавлюється значення $(\sigma_0^+, \varepsilon_0^+, T_0)$ або $(\sigma_0^-, \varepsilon_0^-, T_0)$:

$$\sigma_0^\pm = \pm \sqrt{\frac{gT_e - 1 - g}{1 - g}}, \quad \varepsilon_0^\pm = \pm \frac{1}{g} \sqrt{\frac{gT_e - 1 - g}{1 - g}}, \quad T_0 = 1 + g^{-1}, \quad (10)$$

що відповідає рідинному режиму тертя. При підстановці (6)–(8) у (1)–(3) система першого порядку записується у такому вигляді:

$$(\lambda + 1)\alpha - g\beta = 0, \quad (11)$$

$$(1 - T_0)\alpha + (\tau\lambda + 1)\beta - \sigma_0\gamma = 0, \quad (12)$$

$$(2\sigma_0 - \varepsilon_0)\alpha + \sigma_0\beta + (\delta\alpha + 1)\gamma = 0, \quad (13)$$

де присутні стаціонарні значення для напружень σ_0 , деформації ε_0 і температури T_0 , тому розв'язки системи вище та нижче критичного значення будуть відрізнятися. Аналізуючи систему (11)–(13), побудовано діаграму типів стійкості особливих точок. На цій діаграмі виділено різні перехідні режими, які можуть мати один із трьох типів стійкості: стійкий вузол, стійкий фокус або сідло-фокус. У кожному випадку побудовано фазові портрети і на їх основі описано поведінку трибологічної системи.

Третій розділ дисертації «Врахування просторової неоднорідності» складається із трьох підрозділів.

У *першому* підрозділі розглянуто врахування просторової неоднорідності температури. Для цього рівняння (3) представлено у вигляді одновимірного диференціального рівняння у частинних похідних:

$$\tau_T \dot{T} = \nabla^2 T + (T_e - T) - \sigma\varepsilon + \sigma^2. \quad (14)$$

Воно було чисельно розв'язано за допомогою явної двошарової різницевої схеми. У випадку, коли верхня поверхня рухається в одному напрямку, а нижня – у протилежному, початкові та граничні умови були вибрані таким чином (рис. 2 а)

$$\sigma_i^0 = -\sigma_0 + 2i\sigma_0 / M, \quad i = 0, 1, \dots, M, \quad (15)$$

$$\sigma_0^j = -\sigma_0, \quad \sigma_M^j = \sigma_0, \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (16)$$

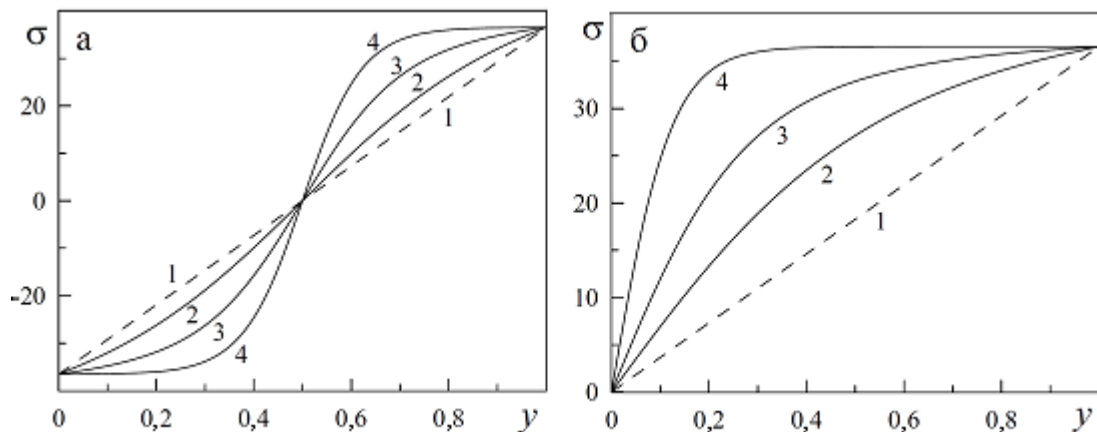


Рис. 2. Просторові розподіли напружень при $g = 0,45$, $T_e = 300$, $\tau_\sigma = 0,2$: а – за початкових (15) та граничних (16) умов; б – за початкових (17) та граничних (18) умов

У випадку, коли нижня поверхня закріплена і не рухається, а з фіксованою швидкістю зсувається лише верхня, початкові та граничні умови мають такий вигляд (рис. 2 б):

$$\sigma_i^0 = \frac{i\sigma_0}{M}, \quad i = 0, 1, \dots, M, \quad (17)$$

$$\sigma_0^j = 0, \quad \sigma_M^j = \sigma_0, \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (18)$$

Розв'язуючи чисельно рівняння (1), (2) та (14), отримано просторові розподіли напружень, подані на рис. 2. Різний знак напружень на рис. 2 а поблизу верхнього та нижнього шарів мастила відповідає відомим результатам експериментальних досліджень.

У другому підрозділі розглянуто випадок просторової неоднорідності напружень, деформації та температури. Цей випадок описано за допомогою модифікованої системи початкових рівнянь (1)–(3), що враховує відповідні градієнтні доданки:

$$\dot{\sigma} = D_\sigma \nabla^2 \sigma - \sigma + g\varepsilon, \quad (19)$$

$$\tau \dot{\varepsilon} = D_\varepsilon \nabla^2 \varepsilon - \varepsilon + (T - 1)\sigma, \quad (20)$$

$$\delta \dot{T} = D_T \nabla^2 T + (T_e - T) - \sigma\varepsilon + \sigma^2. \quad (21)$$

Як і в попередньому підрозділі, для розв'язання системи використовувалась явна двошарова схема з початковими та граничними умовами для двох випадків (рух поверхонь у різних напрямках та випадок, коли одна із поверхонь нерухома). На рис. 3 наведені стаціонарні розподіли напружень за товщиною мастила при різних температурах поверхонь тертя T_e . Рисунок демонструє, що з підвищенням температури зростає відносна швидкість руху поверхонь, оскільки в'язкість мастила зменшується, і воно стає більш рідким.

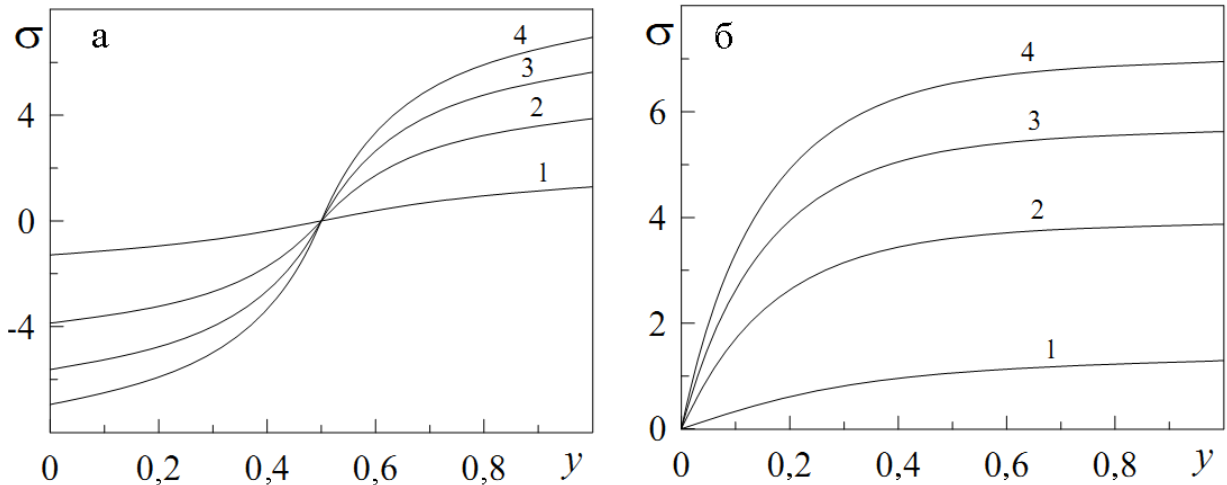


Рис. 3. Просторові розподіли напружень $\sigma(y)$, отримані при $g = 0,25$, $T_e = 32$, $\tau = \delta = 0,1$, $D_\varepsilon = D_T = 0$, $D_\sigma = 0,05$. Криві 1–4 відповідають температурам $T_e = 10, 50, 100, 150$ відповідно: а – рух поверхонь у протилежних напрямках; б – нижня поверхня нерухома, рухається лише верхня

У третьому підрозділі проведено аналіз неоднорідних просторових структур, які виникають у площині мастильного шару при зсуві поверхонь тертя. На рис. 4

наведено розподіли напружень σ по площині контакту xu , отримані при різних значеннях коефіцієнтів дифузії, для чотирьох послідовних моментів часу t .

На рисунку 4 показані темні й світлі області: для темних $\sigma < 0$, для світлих $\sigma > 0$. Показано, що в розглянутому випадку по площині контакту формуються два сорти доменів – з додатними і від’ємними значеннями напружень. Розглянуто часову еволюцію доменної структури і показано, що з плином часу мастило стає однорідним, і по всій площині контакту реалізується одне й те саме значення зсувних напружень, яке визначає відносну швидкість руху блоків тертя. Показано, що можливо підібрати параметри, за яких система швидко еволюціонує до стаціонарного стану і, навпаки, коли спостерігається повільна релаксація. Характер еволюції істотно залежить від початкових умов параметрів за площиною

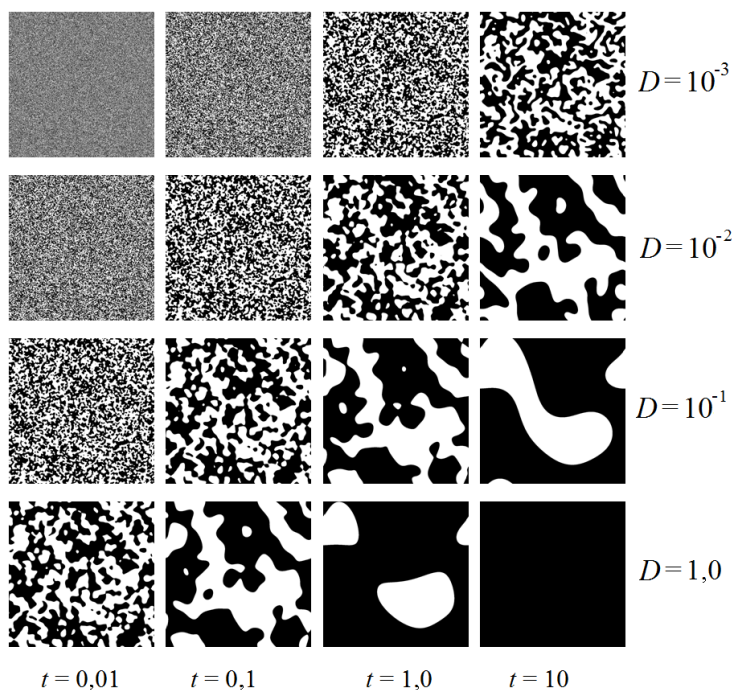


Рис. 4. Розподіли напружень σ по площині контакту $\sigma(x, y)$, отримані при чисельному розв’язуванні рівнянь (19)–(21) при параметрах $g = 0,5$, $\tau = \delta = 1$ та $T_e = 30$. По горизонталі зазначені моменти часу $t = 0,01$; $0,1$; $1,0$; $10,0$. По вертикалі – значення коефіцієнтів дифузії $D_\sigma = D_\varepsilon = D_T = D = 10^{-3}$; 10^{-2} ; 10^{-1} ; $1,0$ відповідно

контакту. У розглянутому випадку початковий розподіл величин є гаусовим, причому напруження і деформацію вибирають як додатні, так і від’ємні, а температура набуває лише додатних значень. Використовуючи отримані ітераційні процедури, за необхідності можна досліджувати не лише еволюцію розподілу параметра порядку, а й аналізувати зміну з часом поля температури і деформацій за площиною контакту. У роботі розглянуто ситуацію, коли система з часом стає однорідною, проте можливо підібрати параметри, за яких буде реалізуватися хаотичний режим, у якому доменна структура постійно змінює свій вигляд, і стаціонарний режим руху не встановлюється.

Четвертий розділ

дисертації «Вплив деформаційного дефекту модуля зсуву на режим тертя» складається з п’яти підрозділів.

У першому підрозділі подана система основних рівнянь (1)–(3), що враховує деформаційний дефект модуля зсуву та вплив адитивних некорельованих

флуктуацій і, у свою чергу, більш точно відображає відомі експериментальні результати порівняно з (1)–(3):

$$\tau_{\sigma}\dot{\sigma} = -\sigma + g(\sigma)\varepsilon + \sqrt{I_{\sigma}}\xi_1(t), \quad (22)$$

$$\tau_{\varepsilon}\dot{\varepsilon} = -\varepsilon + (T-1)\sigma + \sqrt{I_{\varepsilon}}\xi_2(t), \quad (23)$$

$$\tau_T\dot{T} = (T_e - T) - \sigma\varepsilon + \sigma^2 + \sqrt{I_T}\xi_3(t), \quad (24)$$

де введено функцію, яка враховує деформаційний дефект модуля зсуву, який описує перехід режиму пружної деформації у пластичну:

$$g(\sigma) = g_{\theta} \left(1 + \frac{\theta^{-1} - 1}{1 + |\sigma / \alpha|^{\beta}} \right). \quad (25)$$

У другому підрозділі в адиабатичному наближенні $\tau_{\sigma} \gg \tau_{\varepsilon}, \tau_T$ рівняння (22) записано у вигляді рівняння Ланжевена:

$$\tau_{\sigma}\dot{\sigma} = f(\sigma) + \sqrt{I(\sigma)}\xi(t), \quad (26)$$

де узагальнена сила $f(\sigma)$ та ефективна інтенсивність шуму $I(\sigma)$ задаються виразами

$$f(\sigma) = -\sigma + \sigma g(\sigma) \left(1 - \frac{2 - T_e}{1 + \sigma^2} \right), \quad (27)$$

$$I(\sigma) = I_{\sigma} + \frac{g^2(\sigma)}{(1 + \sigma^2)^2} (I_{\varepsilon} + I_T \sigma^2). \quad (28)$$

Рівняння Фоккера – Планка для (26) записано у формі Стратоновича. З часом розподіл розв'язків стає стаціонарним ($\partial P(\sigma, t) / \partial t = 0$) і набуває вигляду

$$P(\sigma) = Z^{-1} \exp\{-U(\sigma)\}, \quad (29)$$

де ефективний потенціал задається виразом

$$U(\sigma) = \frac{1}{2} \ln I(\sigma) - \int_0^{\sigma} \frac{f(\sigma')}{I(\sigma')} d\sigma'. \quad (30)$$

У третьому підрозділі побудовано фазові діаграми кінетичних режимів тертя та проаналізовано вплив на поведінку системи феноменологічного параметра β за допомогою фазових діаграм (рис. 5). Показано, що значення параметрів системи критично впливає на вигляд фазової діаграми. Можливо підібрати такі умови, за яких відсутні ділянки сухого і переривчастого режимів тертя. У цьому випадку існують лише області рідинного тертя і двофазна область рідинного метастабільного та рідинного стійкого тертя, що відповідає умовам зменшення тертя. За інших параметрів двофазна область рідинного метастабільного і рідинного стійкого тертя не спостерігається, однак з'являються області сухого, переривчастого і багатофазна область переривчастого і рідинного тертя.

У четвертому підрозділі проведено числовий аналіз, за допомогою якого перевірено отримані аналітичні результати. Диференціальне співвідношення Ланжевена має вигляд

$$\tau_\sigma d\sigma = f(\sigma)dt + \sqrt{I(\sigma)}dW(t), \quad (31)$$

де $dW(t) = W(t + dt) - W(t)$ – вінерівський процес, що має властивості білого шуму:

$$\langle dW(t) \rangle = 0, \quad \langle (dW(t))^2 \rangle = 2dt. \quad (32)$$

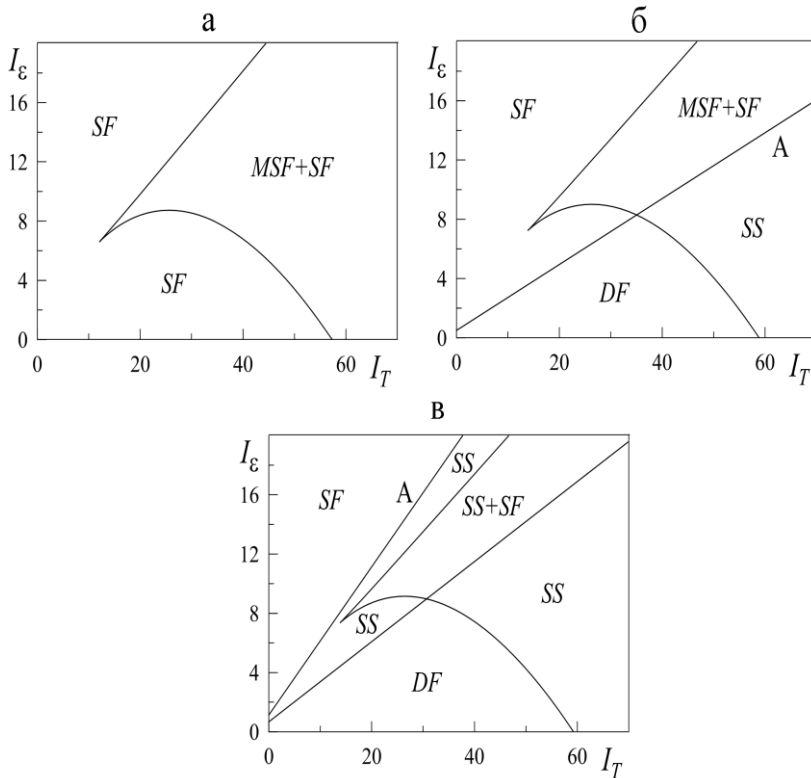


Рис. 5. Фазові діаграми при $g_\theta = 0,5$; $\alpha = 0,2$; $\theta = 0,95$ та $T_e = 1,7$ з областями рідинного (SF), сухого (DF), переривчастого (SS), рідинного метастабільного та стійкого (MSF + SF), переривчастого і рідинного (SS + SF) тертя: а – $\beta = 1$; б – $\beta = 2$; в – $\beta = 3$

складається з трьох підрозділів.

У першому підрозділі наведено загальний вираз густини вільної енергії системи зсувного плавлення в однорідному випадку:

$$F(\rho, \theta) = \frac{a_1 \rho^2}{2} - \frac{b_1 \rho^3}{3} + \frac{c_1 \rho^4}{4} + \frac{\alpha \rho^2}{2} \left(\frac{a_2 \theta^2}{2} - \frac{b_2 \theta^3}{3} + \frac{c_2 \theta^4}{4} \right), \quad (33)$$

де $a_1 = 0,85$; $b_1 = 5,8$; $c_1 = 8,0$; $a_2 = 1,3644$; $b_2 = 8,7105$; $c_2 = 13,674$. Параметр порядку ρ у твердоподібній фазі більший від нуля. Коли в системі спостерігається зсувне плавлення, встановлюється стаціонарне значення $\rho = 0$. Параметр θ описує відхилення, яке виникає під час руху частинок, тобто подає деформацію шарів. Для твердоподібного стану за малих або нульових відхилень $\theta = 0$. Використовуючи (33), записано систему еволюційних рівнянь типу Ландау – Халатнікова:

Показано, що в обох випадках криві розподілу ймовірностей при різних параметрах співпадають з високою точністю. Числовий аналіз також дозволив побудувати часові залежності напружень.

У *п'ятому* підрозділі визначено, що при виконанні умови

$$I_T \gg I_\sigma, I_\epsilon$$

спостерігається самоподібний режим твердоподібного мастила. Установлено, що степеневий розподіл ймовірності, характерний для самоподібної поведінки, реалізується в обмеженому діапазоні напружень $\sigma < 0,1$. При перевищенні критичного значення напружень властивості самоподібності втрачаються.

П'ятий розділ дисертації «Самоподібна поведінка в моделі зсувного плавлення»

$$\dot{\rho} = -\frac{1}{\gamma_\rho} \frac{\partial F(\rho, \theta)}{\partial \rho} + \xi_\rho(t), \quad (34)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{\gamma_\theta} \frac{\partial F(\rho, \theta)}{\partial \theta} + \Omega + \xi_\theta(t), \quad (35)$$

де білий шум $\xi_q(t)$ має моменти

$$\langle \xi_q(t) \rangle = 0, \quad \langle \xi_q(t) \xi_q(t + \tau) \rangle = 2D_q \delta(\tau), \quad q = \rho, \theta, \quad (36)$$

і введено інтенсивність шуму D_q . У рівняння (35) введений параметр Ω , який описує ефект відносного руху поверхонь. У підрозділі використано двовимірне рівняння Фоккера – Планка. У стаціонарному випадку побудовані тривимірні розподіли ймовірностей. Також знайдено ітераційну процедуру розв’язання рівнянь (34), (35) і при її реалізації побудовано часові залежності параметрів ρ і θ .

У другому підрозділі досліджено самоподібну поведінку системи у загальному випадку. На рис. 6 показана розрахована ненормована густина ймовірності $P_\rho(\rho)$ для різних співвідношень між величинами інтенсивностей шуму.

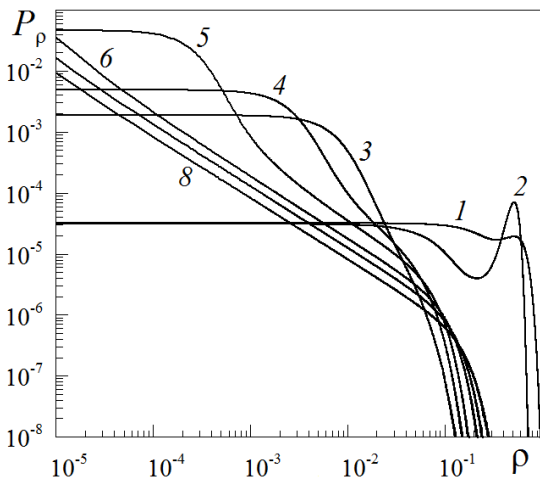


Рис. 6. Густина ймовірностей $P_\rho(\rho)$, розраховані при $D_\theta = 10^{-2}$. Криві 1–8 відповідають значенням $D_\rho = 10^0, 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-5}, 10^{-10}, 10^{-15}, 10^{-25}$. Крива 7 розміщена між кривими 6 та 8

Як слідує з рисунка 6, величина інтенсивності D_ρ критично впливає на поведінку системи. Криві 1 та 2 демонструють поведінку системи у двофазній області, оскільки реалізуються два максимуми ймовірності. Зі зменшенням інтенсивності шуму D_ρ (криві 3–8) двофазна область зникає, оскільки реалізується лише нульовий максимум $P_\rho(\rho)$. Для кривих 6–8 виконується умова $D_\theta \gg D_\rho$, яка приводить до однорідної функції розподілу в області $\rho < 0,1$, що відповідає самоподібній поведінці системи.

У третьому підрозділі проведено статистичний аналіз часових рядів у рамках так званого скейлінгового

аналізу з використанням методу мультифрактального флуктуаційного аналізу, що дозволяє досліджувати часові ряди різної природи. Установлено, що зменшення інтенсивності шуму D_ρ приводить до істотного ускладнення динаміки часових залежностей параметра порядку, яке проявляється у збільшенні ширини розкиду значень узагальненого показника Херста і функції мультифрактального спектра, що зумовлено зростанням числа підмножин (так званих монофракталів) у сегментах часового ряду. Ця ситуація може означати, що в системі збільшується кількість статистично різних сценаріїв розвитку. Крім того, значення класичного показника

Херста зі зменшенням D_p наближається до значення 0,5, що, як відомо, відповідає абсолютно випадковій послідовності. Таким чином, ускладнення структури часових рядів робить їх подальшу поведінку непередбачуваною. Цій ситуації відповідає наявність екстремально великих викидів значень параметра порядку.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено подальший розвиток реологічної моделі, що дозволило описати ефекти, які спостерігаються під час тертя атомарно-гладких твердих поверхонь, розділених ультратонким шаром мастильного матеріалу. Результати роботи дозволили розширити уявлення про фізику тертя нанорозмірних об'єктів. Основні результати дисертації представлені такими висновками.

1. У рамках синергетичної моделі межового тертя описано переривчастий режим тертя, що має детерміністичний характер, який спостерігається у численних експериментах. Показано, що в рамках моделі можливо описати два типи трибологічних систем – при відносному зсуві поверхонь тертя в одному напрямку та при зовнішньому знакозмінному впливі.

2. Установлено, що залежно від температури і параметрів мастильного матеріалу може здійснюватися як режим загасаючих коливань, так і автоколивальний режим, представлений на фазовій площині у вигляді дивного атратора. Дослідження впливу температури поверхонь тертя показало, що з її зростанням у системі посилюється хаотичність, і при перевищенні критичного значення встановлюється режим, який описується атратором Лоренця.

3. Визначено вплив температури поверхонь на функціонування системи в сухому або рідинному режимах тертя. Під час аналізу стаціонарних режимів за допомогою синергетичної моделі встановлено області параметрів, за яких спостерігаються різні перехідні режими, тип збіжності яких може бути представлений у вигляді стійкого вузла, стійкого фокуса або сідла-фокуса.

4. Проведене врахування просторової неоднорідності напружень, деформації і температури мастильного шару дозволило встановити, що з підвищенням температури стає більш вираженою різниця між напруженнями в прилеглих до поверхні мастильних шарах. Аналіз впливу температури поверхонь і в'язкості матеріалу мастила на стаціонарний режим тертя показав, що за допомогою такого підходу запропонована синергетична модель дозволяє описати як ньютонівську поведінку, так і випадок, у якому приповерхневий шар мастила твердне і рухається з поверхнею як єдине ціле.

5. З'ясовано, що в ході еволюції система прагне до однорідного стану, у якому по всій площині контакту реалізується одне й те саме значення зсувних напружень, яке задає відносну швидкість руху блоків тертя. При описанні неоднорідного розподілу напружень по площині контакту показано утворення доменної структури з двома типами доменів у процесі тертя.

6. У випадку врахування деформаційного дефекту модуля зсуву й впливу адитивних флуктуацій напружень, деформації і температури визначено діапазон параметрів моделі, у якому відсутні сухий та переривчастий режими тертя, що відповідає реалізації умов зменшення тертя. Дослідження впливу параметрів системи на фазову діаграму показало, що інтенсивність шуму температури, деформації і температура поверхонь тертя однозначно визначають області сухого, рідинного та переривчастого режимів тертя при фіксуванні інших параметрів.

7. У результаті дослідження впливу шуму на характер поведінки системи при зсувному плавленні твердих тіл визначено умови, за яких спостерігається самоподібна поведінка системи, та умови, за яких система демонструє монофрактальну або мультифрактальну поведінку, що характеризується спектром фрактальних розмірностей. Показано, що зі зменшенням інтенсивності шуму параметра порядку в системі посилюється мультифрактальна поведінка.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ляшенко Я. А. Синергетическое представление прерывистого режима граничного трения / Я. А. Ляшенко, **Н. Н. Манько** // Трение и износ. – 2013. – Т. 34, № 1. – С. 60–68.
2. Ляшенко Я. О. Аналіз стійкості стаціонарних режимів межового тертя в рамках синергетичної моделі / Я. О. Ляшенко, **Н. М. Манько** // Укр. фіз. журн. – 2014. – Т. 59, № 1. – С. 88–95.
3. Ляшенко Я. А. Учет пространственной неоднородности температуры в синергетической модели граничного трения / Я. А. Ляшенко, **Н. Н. Манько** // Ж. нано- электрон. физ. – 2013. – Т. 5, № 3. – С. 03040 (5 с.).
4. Lyashenko I. A. Statistical analysis of self-similar behavior in the shear induced melting model / I. A. Lyashenko, V. N. Borysiuk, **N. N. Manko** // Cond. Matt. Phys. – 2014. – Vol. 17, No2. – P. 23003 (11 p.).
5. Ляшенко Я. А. Учет пространственной неоднородности напряжений, деформации и температуры в синергетической модели граничного трения / Я. А. Ляшенко, **Н. Н. Манько** // ЖТФ. – 2014. – Т. 84, № 12. – С. 1–7.
6. **Манько Н. Н.** Незатухающий режим прерывистого движения при граничном трении / Н. Н. Манько, Я. А. Ляшенко // Материалы IV Международной научно-инновационной молодежной конференции [«Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент»], (Тамбов, Россия, 24–26 октября 2012 г.). – Тамбов, 2012. – С. 263–265.
7. **Manko N. N.** Stochastic oscillations at stick-slip motion in the boundary friction regime / N. N. Manko, I. A. Lyashenko // Proceedings of the International Conference «Nanomaterials: Application and Properties». – 2013. – Vol. 2, No1. – P. 01NTF16 (2 p.).
8. **Манько Н. Н.** Самоподобное поведение в модели сдвигового плавления при влиянии аддитивного шума / Н. Н. Манько, Я. А. Ляшенко, В. Н. Борисюк //

Материалы V Международной научно-инновационной молодежной конференции [«Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент»], (Тамбов, Россия, 31 октября–1 ноября 2013 г.). – Тамбов, 2013. – С. 268–270.

9. Lyashenko I. Fractal analysis of the inhomogeneous spatial structures of the boundary lubricating layer in the friction processes / I. Lyashenko, **N. Manko** // Proceedings of the International Scientific Conference [«Electronics and Nanotechnology»], (Kyiv, 15–18 April 2014). – Kyiv, 2014. – P. 179–182.

10. **Manko N. N.** Phase dynamic of shear melting / N. N. Manko, I. A. Lyashenko // Proceedings of the International Conference «Nanomaterials: Application and Properties». – 2014. – Vol. 3, No1. – P. 01NTF11 (2 p.).

11. **Манько Н.** Аналіз стійкості стаціонарних режимів межового тертя / Н. Манько, Я. Ляшенко // Тези доповідей Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики [«ЕВРИКА-2013»], (Львів, 15–17 травня 2013 р.). – Львів, 2013. – С. Е16.

12. **Манько Н. Н.** Влияние пространственного распределения напряжений в синергетической модели граничного трения / Н. Н. Манько, Я. А. Ляшенко // Програма і тези доповідей Міжнародної конференції молодих учених і аспірантів [«ІЕФ-2013»], (Ужгород, 20–23 травня 2013 р.). – Ужгород, 2013. – С. 235.

13. **Манько Н.** Статистичний аналіз часових рядів в рамках моделі зсувного плавлення / Н. Манько, Я. Ляшенко, В. Борисюк // Тези доповідей Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики [«ЕВРИКА-2014»], (Львів, 15–17 травня 2014 р.). – Львів, 2014. – С. 14.

14. **Манько Н.** Дослідження стійкості стаціонарних режимів та просторової неоднорідності мастила в моделі межового тертя / Н. Манько, Я. О. Ляшенко // Збірка тез XIV Всеукраїнської школи-семінару та конкурсу молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини (Львів, 4–6 червня 2014 р.). – Львів, 2014. – С. 22.

15. **Манько Н.** Дослідження переривчастого режиму межового тертя / Н. Манько, Я. О. Ляшенко // Збірка тез школи-семінару [«Багатомасштабне моделювання фізичних процесів у конденсованих середовищах»], (Суми, 21–22 жовтня 2014 р.). – Суми, 2014. – С. 19.

АНОТАЦІЯ

Манько Н. М. Синергетичне представлення переривчастого режиму межового тертя. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Сумський державний університет, Суми, 2015.

Дисертацію присвячено дослідженню процесів межового тертя в рамках моделі нанорозмірної трибологічної системи, а також аналізу процесу зсувного плавлення в твердих тілах. Описано поведінку трибологічних систем двох типів – при зсуві верхньої поверхні тертя в одному напрямку та при зовнішньому знакозмінному впливі. Встановлено, що залежно від температури та параметрів мастила може встановлюватись як режим загасаючих коливань, так і автоколивальний режим, представлений у вигляді дивного атрактора.

Проведено врахування просторової неоднорідності напружень, деформації та температури мастильного шару. При врахуванні неоднорідного розподілу напружень по площині контакту показано, що в процесі тертя утворюється доменна структура з двома типами доменів.

При врахуванні деформаційного дефекту модуля зсуву проаналізовано вплив адитивних флуктуацій напружень, деформації і температури на процес плавлення мастильного матеріалу.

Розглянуто модель зсувного плавлення при врахуванні адитивних шумів основних параметрів і проведено аналіз впливу інтенсивності шумів на характер поведінки системи. Показано, що зі зменшенням інтенсивності шуму параметра порядку мультифрактальна поведінка ряду посилюється.

Ключові слова: ультратонка плівка мастила, переривчастий режим тертя, дивний атрактор, самоподібна поведінка, зсувне плавлення, мультифрактальний аналіз.

АННОТАЦІЯ

Манько Н. Н. Синергетическое представление прерывистого режима граничного трения. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Сумский государственный университет, Сумы, 2015.

Диссертация посвящена исследованию процессов граничного трения в рамках модели наноразмерной трибологической системы, а также анализу процессов сдвигового плавления в твердых телах. Исследовано плавление ультратонкой пленки смазки, зажатой между двумя атомарно-гладкими твердыми поверхностями при их взаимном перемещении в рамках модели Лоренца. Описано поведение трибологических систем двух типов – при сдвиге верхней трущейся поверхности в одном направлении и при внешнем знакопеременном воздействии. Проведено аналитическое описание процессов, происходящих в результате самоорганизации полей сдвиговых напряжений и деформации, а также температуры смазочного слоя. Установлено, что в зависимости от температуры и параметров смазки может

осуществляться как режим затухающих колебаний, так и автоколебательный режим, представленный на фазовой плоскости в виде странного аттрактора. Показано, что на поведение системы критическим образом влияют начальные условия. Проведен математический анализ синергетической модели с целью объяснения возникновения различных режимов работы системы при изменении основных параметров. Тип функционирования трибологической системы описан в соответствии с характером устойчивости особых точек.

Исследован пространственно неоднородный случай в рамках модели наноразмерной трибологической системы. При реализации численной процедуры решения одномерного дифференциального уравнения в частных производных, позволяющей проследить эволюцию трибологической системы, получено и описано распределение напряжений по толщине смазки. Прослежена зависимость стационарного состояния от температуры и показано, что с ростом температуры увеличивается относительная скорость сдвига трущихся поверхностей. Проведен учет пространственной неоднородности напряжений, деформации и температуры смазочного слоя. Рассмотрено движение трущихся поверхностей во взаимно противоположных направлениях с одинаковыми скоростями, а также ситуация, когда нижняя поверхность жестко закреплена, а верхняя сдвигается с фиксированной скоростью. Учет пространственного распределения параметров позволяет описать нетривиальное неньютоновское поведение эффективной сдвиговой вязкости смазочного материала. Проведен анализ влияния температуры поверхностей и вязкости материала на стационарный режим трения. При описании неоднородного распределения напряжений по плоскости контакта показано, что в процессе трения образуется доменная структура с двумя типами доменов. Выяснено, что в ходе эволюции система стремится к однородному состоянию, в котором по всей плоскости контакта реализуется одно и то же значение сдвиговых напряжений, задающее относительную скорость движения трущихся блоков.

При учете деформационного дефекта модуля сдвига проанализировано влияние аддитивных флуктуаций напряжений, деформации и температуры на процесс плавления смазочного материала. Исследовано влияние параметров системы на фазовую диаграмму, где интенсивность шума температуры и температура поверхностей трения определяют области сухого, жидкостного и прерывистого трения. Построены зависимости эффективного потенциала и распределения вероятностей от величины напряжений, вид которых определяет режим трения. Также исследуется влияние деформационного дефекта модуля сдвига смазочного материала на характер самоподобного поведения временных рядов напряжений при наличии в системе аддитивных некоррелированных флуктуаций.

Рассмотрена модель сдвигового плавления при учете аддитивных шумов основных параметров и проведен анализ влияния интенсивности шумов на характер поведения системы. Подробно рассмотрена ситуация, когда интенсивность шума параметра порядка является малой величиной. Характерной особенностью временных

зависимостей параметра порядка является наличие в ограниченном диапазоне степенного вида функции распределения, и, как следствие, временной ряд является самоподобным. С помощью метода мультифрактального флуктуационного анализа для всех рассматриваемых случаев рассчитаны зависимости модифицированного показателя Херста от параметра деформации и показано, что с уменьшением интенсивности шума параметра порядка мультифрактальное поведение ряда усиливается.

Ключевые слова: ультратонкая пленка смазки, прерывистый режим трения, странный аттрактор, самоподобное поведение, сдвиговое плавление, мультифрактальный анализ.

ABSTRACT

Manko N. N. Synergetic representation of stick-slip regime of boundary friction. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Philosophy degree (Ph. D.) in Physics and Mathematics on speciality 01.04.07 – Solid-State Physics. – Sumy State University, Sumy, 2015.

The thesis is devoted to study of the boundary friction processes within the framework of the nanoscale tribological system model, as well as to analysis of shear melting in solid state. The behavior of two types of tribological systems has been described: during the displacement of the upper friction surface in one direction and under the external alternating influence. It has been determined that both the mode of damped oscillations and auto-oscillating mode, presented in the form of a strange attractor, may be established depending on the temperature and parameters of the lubricant.

The spatial inhomogeneity of the stress, strain and temperature of the lubricant layer has been considered. While considering the heterogeneous distribution of stresses in the plane of the contact, it has been shown that the domain structure with two types of domains appears in the friction process.

The influence of the additive fluctuations of stress, strain and temperature on the melting process of lubricating material has been analyzed considering the deformation defect of shear modulus.

The shear melting model considering the additive noise of the main parameters has been studied, and the impact of the noise intensity on the system behavior has been analyzed. It has been shown that decrease of intensity of the order parameter noise increases the multifractal behavior of the series.

Key words: ultrathin lubricant film, stick-slip friction, strange attractor, self-similar behavior, shear melting, multifractal analysis.

Підписано до друку 14.04.2015.
Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. №

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