

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

Хоменко Олексій Віталійович

УДК 538.9(043.3)

**САМООРГАНІЗАЦІЯ ТА ФОРМУВАННЯ НИЗЬКОВИМІРНИХ
СИСТЕМ ПРИ ВІДДАЛЕННІ ВІД РІВНОВАГИ**

01.04.07 — фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико—математичних наук

Суми — 2009

Дисертацією є рукопис.

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

Офіційні опоненти: доктор фізико—математичних наук,
професор, член—кореспондент
Академії педагогічних наук України,
заслужений діяч науки і техніки України
Горобець Юрій Іванович,
Інститут магнетизму НАН та МОН України,
заступник директора;

доктор фізико—математичних наук,
старший науковий співробітник
Філіппов Олександр Ельвінович,
Донецький фізико—технічний інститут
НАН України ім. О.О. Галкіна,
головний науковий співробітник;

доктор фізико—математичних наук, професор
Погребняк Олександр Дмитрович,
Сумський інститут модифікації поверхні,
директор.

Захист відбудеться “6” березня 2009 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 при Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського—Корсакова, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету.

Автореферат розісланий “___” січня 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А.С. Опанасюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Будучи наукою про системи, що самоорганізуються, синергетика дозволяє зрозуміти особливості колективної поведінки сильно нерівноважних статистичних ансамблів у фізиці, хімії, біології, соціології тощо [1*]. Разом з цим при дослідженні конденсованого середовища до останнього часу використовувалися методи рівноважної статистичної фізики. Це пов'язано із припущенням, що конденсоване середовище, що знаходиться під дією, яка зберігає його як таке, є рівноважною статистичною системою. Останнім часом, проте, зріс інтерес до явищ, в яких поведінка статистичного ансамблю атомів у конденсованому стані стає такою, що звичайні уявлення (на зразок термодинамічної картини фазових переходів) вимагають принципів змін. Така поведінка пов'язана з сильним відхиленням атомної системи від рівноважного стану, як це має місце, наприклад, в ядрі дефекту кристалічної ґратки або зоні пластичної течії.

Виявлення причин, які обумовлюють тертя твердих тіл, має велике значення як з фундаментальної, так і з практичної точки зору [2*, 3*]. З одного боку, розвиток нанотехнологій і створення нових високотехнологічних приладів, наприклад, комп'ютерних запам'ятовувальних пристроїв і мініатюрних двигунів, вимагають глибокого розуміння процесів, які мають місце під час тертя. З іншого боку, незважаючи на значні зусилля, досі ще не існує цілісної теорії даного явища.

На сьогодні значне місце у фізичних дослідженнях відводиться нановимірним системам, оскільки вони поводяться відмінним від об'ємних тіл чином і одночасно з цим мають велике прикладне значення. Зокрема, вузли тертя, які є атомарно—гладкими поверхнями, розділеними тонким шаром мастила, можуть використовуватися в системах позиціонування в мікропристроях. При проектуванні останніх мінімальність тертя між їх рухомими частинами є одним із головних критеріїв. У даній роботі розроблено феноменологічну схему, що дозволяє описати аномальну поведінку ультратонких плівок мастила.

Інтерес до нано— і субмікрокристалів (НК і СМК), отриманих фрагментацією металів у процесі інтенсивної пластичної деформації (ІПД), визначається з практичної точки зору привабливим поєднанням високих значень міцності і пластичності. Для дослідника НК являє своєрідний фізичний об'єкт, що є проміжним між звичайним полікристалом і металевим склом. Тому теоретичний опис фізико—механічних властивостей НК систем є актуальним як з практичної, так і з фізичної точки зору. У запропонованій роботі вивчення зако-

номірностей фрагментації спрямоване на опис динаміки процесу на основі термодинамічної моделі [4*].

На даний час в теорії систем, що самоорганізуються, склалася своєрідна ситуація. З одного боку, успішно розвивається синергетична концепція, що дозволяє пояснити самоорганізацію (впорядкування) відкритої системи за рахунок посилення безладу навколишнього середовища [1*]. З іншого боку, активно досліджуються явища самоорганізованої критичності (СОК) [5*]. Проте, незважаючи на те, що як синергетика, так і теорія СОК покликані пояснити одне й те саме явище — самоорганізацію, вони розвиваються незалежним чином. Це пов'язано з тим, що в рамках синергетичного підходу [1*] досліджується одиночний статистичний ансамбль, тоді як розгляд моделей СОК [5*] зводиться, як правило, до дослідження еволюції ієрархічно підпорядкованих ансамблей. Оскільки кожному з них відповідає окрема область простору станів, то необхідно описати і втрату ергодичності, що приводить до кластеризації фазового простору системи, що самоорганізується.

Таким чином, послідовна картина сильно нерівноважного конденсованого середовища вимагає використання методів, які дозволяють представити такі особливості, як взаємний вплив підсистеми і навколишнього середовища під час фазового переходу, неергодичність статистичного ансамблю, виникнення ієрархічних структур тощо.

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

Дисертаційна робота є частиною комплексних досліджень, виконаних на кафедрі фізичної електроніки Сумського державного університету згідно з такими держбюджетними науково-дослідними роботами (НДР): НДР 0197U016609 "Стохастична теорія нерівноважного конденсованого стану", 1997–1999 рр.; НДР Державного фонду фундаментальних досліджень 0197U016612 "Дослідження стохастичних систем з мультиплікативним шумом при спонтанному порушенні ергодичності", 1997–1999 рр.; НДР 0100U003216 "Суперсиметрична теорія неупорядкованих гетерополімерів", 2000–2002 рр.; НДР 0103U000772 "Синергетична теорія конденсованих середовищ", 2003–2005 рр.; НДР 0106U001940 "Статистична теорія складних систем економічного типу", 2006–2008 рр. (відповідальний виконавець); НДР 0107U001279 "Синергетика межового тертя", 2007–2008 рр. (науковий керівник); НДР Державного фонду фундаментальних досліджень 0107U008898 "Статистична нелінійна теорія динамічних фазових режимів межового тертя у нанопристроях", 2007–2009 рр. (науковий керівник).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є встановлення механізмів і моделювання зазначених особливостей у низьковимірних системах у рамках синергетичного підходу, що представляє взаємно узгоджену еволюцію гідродинамічних мод, які параметризують систему. Оскільки поняття самоорганізації є узагальненням фізичної концепції фазового переходу, то запропоновану феноменологічну теорію слід розглядати як розвиток схеми термодинамічних перетворень на відкриті системи. Для підтвердження загальності розвинутого підходу вибрано широке коло систем: ультратонкі плівки мастил; метали, що піддаються ІПД; сипкі середовища; ультрадисперсні напівпровідникові аморфні плівки; НК і СМК тощо. У результаті головне завдання зводиться до дослідження моделей, що дозволяють подати експериментально спостережувану поведінку.

Досягнення мети вимагало вирішення таких основних завдань:

- розробити якісну феноменологічну модель, що дозволяє описати поведінку ультратонких плівок мастил під час тертя між атомарно—гладкими твердими поверхнями, використовуючи детерміністичний підхід, і в умовах стохастичності;
- на основі теорії фазових переходів визначити режими фрагментації у процесі ІПД;
- розробити оптимальні синергетичні схеми, що дозволяють самоузгодженим чином описати утворення лавини сипкого середовища, перехід між процесами вибухової і звичайної кристалізації та фазовий перехід з комплексним параметром порядку;
- провести суперсиметричний опис системи, що самоорганізується, з ефектами пам'яті і втрати ергодичності;
- з'ясувати аномальні фізико—механічні властивості НК і СМК на основі термодинамічного підходу і концепції про перебудову атомних станів при значному віддаленні від рівноваги.

Об'єкт дослідження — процеси самоорганізації та формування низьковимірних конденсованих систем.

Предмет дослідження — фазова динаміка та кінетика самоорганізації та формування низьковимірних конденсованих систем при віддаленні від рівноваги під впливом зовнішніх дій.

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'язувалися при використанні адиабатичного наближення. При побудові стаціонарного

розподілу параметра порядку за його величиною використовувалися рівняння Ланжевена і Фоккера—Планка. Дослідження кінетики процесів, що розглядаються, проводилося методом фазової площини. Для аналізу впливу корельованого шуму використовувався метод ефективного потенціалу. Мікроскопічну теорію систем, що самоорганізуються, побудовано на основі теорії суперсиметричного поля, що дозволяє послідовним чином подати ефекти пам'яті та неергодичності.

Наукова новизна одержаних результатів

1. На основі моделі в'язкопружного середовища, що має теплопровідність, вперше розроблено синергетичну теорію плавлення ультратонкої плівки мастила, яка враховує просторову неоднорідність, гістерезисні явища і температурну залежність в'язкості. Побудовано фазові портрети кінетичних режимів плавлення, що відповідають різним співвідношенням часів релаксації зсувних напружень, деформації і температури мастила. Визначено теплові і пружні параметри, при яких тертя зменшується.
2. З урахуванням білого і кольорового гаусових шумів основних параметрів мастила вперше встановлено області реалізації сухого, рідинного і переривчастого тертя. У випадку некорельованих флуктуацій на основі якісного аналізу часових залежностей напружень для всіх областей описано переходи між режимами тертя і пояснено плавлення за рахунок дисипативного розігріву поверхонь тертя. Проведено опис самоподібної поведінки твердоподібного мастила, що характеризується степеневим розподілом напружень.
3. У рамках нерівноважної термодинаміки і теорії фазових переходів Ландау удосконалено підхід, що дозволяє отримати рівняння еволюції дефектних структур у процесі ІПД при дії шуму, виходячи з багатовимірного термодинамічного потенціалу. У детерміністичному випадку і з урахуванням адитивних некорельованих шумів вперше побудовано фазові діаграми, які визначають області існування різних граничних зернистих структур. Знайдено умови реалізації фрактальних зернистих структур.
4. Вперше запропоновано самоузгоджені синергетичні моделі, що описують утворення лавини сипкого середовища, перехід між

режимами вибухової і звичайної кристалізації та фазовий перехід з комплексним параметром порядку. Вибухову кристалізацію представлено як явище СОК, при якому поширення фронту є дифузиею в ультратричному просторі ієрархічно підпорядкованих лавин.

5. Здійснено подальший розвиток суперсиметричної теорії, що описує поведінку нерівноважної термодинамічної системи з урахуванням ефектів пам'яті і неергодичності. Представлено впорядкування нерівноважної термодинамічної системи із замороженим безладом. Побудовано фазову діаграму, що визначає області існування впорядкованої, неупорядкованої, ергодичної і неергодичної фаз.
6. На основі аналізу експериментальних даних про НК і СМК вперше побудовано термодинамічну модель, що дозволяє пояснити їх фізико-механічні властивості. Показано, що зерно НК і СМК являє гетерогенний стан, що складається з центральної області з ідеальною кристалічною ґраткою і сферичного зерномежового шару з розмитим атомним потенціальним рельєфом. Пояснено експериментально знайдену залежність об'ємної частки цього шару від розміру зерна.

Практичне значення одержаних результатів. Даний підхід для опису межового тертя розвинуто з метою контролювання поведінки змащувальних плівок і вибору їх параметрів таким чином, щоб звести до мінімуму ймовірність реалізації переривчастого (stick-slip) режиму, який є основною причиною руйнування третьових деталей. Феноменологічна модель ІПД відкриває перспективи для отримання матеріалів з певними фізико-механічними властивостями за рахунок утворення граничних зернистих структур різного типу. Запропонована схема самоорганізації дозволяє прогнозувати поведінку сипких середовищ, вибирати матеріали, схильні до вибухової кристалізації, а також дає можливість регулювати транспортні потоки. Розвинена суперсиметрична теорія призначена для опису ефектів пам'яті і неергодичності залежно від стану нерівноважної термодинамічної системи. На її основі побудовано фазову діаграму, що визначає термодинамічний стан в осях інтенсивностей замороженого і термічного безладів. Це дозволяє проводити цілеспрямований пошук таких систем, як, наприклад, структурні та спінові стекла, що мають задані властивості. Як зазначалося вище, практичне значення дослідження НК і

СМК обумовлено тим, що вони мають унікальне поєднання фізико—механічних властивостей, яке поліпшує їх експлуатаційні характеристики.

Отримані результати можуть бути також використані в подальших дослідженнях фізичних принципів самоорганізації і формування низьковимірних систем під впливом зовнішніх дій. Результати роботи внесено в навчальний процес при викладанні спеціальних дисциплін та підготовці магістерських та дипломних робіт за спеціальністю "Фізична та біомедична електроніка".

Особистий внесок здобувача. У роботі узагальнено результати комплексних досліджень, виконаних автором у співавторстві ([1–4, 6–11, 13–16, 18, 20–26, 28–32]) і самостійно ([5, 12, 17, 19, 27, 33–35]). Здобувач брав участь у поставленні завдань, проведенні досліджень, обговоренні й інтерпретації отриманих результатів, написанні наукових праць. У публікаціях [3–12, 14–23, 27, 29, 32–35] дисертанту належить провідна роль у виборі і обґрунтуванні напряму досліджень. У роботах [1, 2, 13, 24–26, 28, 30, 31] участь автора дисертації полягала в аналітичному і чисельному розв'язанні поставлених задач. Фізичні ідеї і методи їх дослідження, наукові висновки і положення, що виносяться на захист, належать особисто дисертанту. Основна частина отриманих результатів доповідалася здобувачем особисто на міжнародних і національних конференціях, семінарах.

Апробація результатів дисертації. Основні результати, що викладено в дисертаційній роботі, доповідалися і обговорювалися на міжнародних і національних конференціях, семінарах, таких, як: Middle European Cooperation in Statistical Physics (Lutherstadt Wittenberg, Germany, 1999); XIV, XV, XVI, XVII Міжнародні школи—семінари "Спектроскопія молекул та кристалів" (Одеса, 1999; Чернігів, 2001; Севастополь, 2003; Берегове, Крим, 2005); Всеукраїнські та Міжнародні конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики ЄВРИКА—2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008 (Львів, 2002–2008); International workshop and seminar on Topology in Condensed Matter Physics (Dresden, Germany, 2002); Statistical Physics 2005: Modern Problems and New Applications (Lviv, Ukraine, 2005); Третя всеукраїнська конференція молодих вчених та спеціалістів "Надтверді, композиційні матеріали та покриття: отримання, властивості та застосування" (Київ, 2006); International Conference "Statistical Physics 2006: Theory and Applications" (Kharkiv, Ukraine, 2006); 9–я, 10–я Міжнародные конференции "Высокие давления — 2006, 2008. Фун-

даментальные и прикладные аспекты" (Судак, 2006, 2008); 2nd International Conference "Quantum Electrodynamics and Statistical Physics — QEDSP2006" (Kharkov, Ukraine, 2006); Международная конференция "Мезоскопические явления в твердых телах" (Донецк, 2007); конференція молодих вчених і аспірантів Інституту електронної фізики НАН України "ІЕФ—2007" (Ужгород, 2007); International Conference "Functional Materials" (Partenit, Crimea, Ukraine, 2007); Міжнародна наукова конференція "Фізико—хімічні основи формування і модифікації мікро— та наноструктур" (Харків, 2008); V та VII Всеукраїнські школи—семінари і конкурси молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини Інституту фізики конденсованих систем НАН України (Львів, 2005, 2007); наукові семінари Сумського державного університету, Інституту магнетизму (Київ), Донецького фізико—технічного інституту ім. О.О. Галкіна, Інституту прикладної фізики (Суми) НАН України і кафедри макромолекулярної фізики фізико—математичного факультету Карлова університету (Прага, Чехія).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано навчальний посібник з грифом МОН України, 30 статей у фахових наукових журналах (робота [24] є оглядовою) та 32 тези доповідей.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 229 найменувань на 23 сторінках і двох додатків на 7 сторінках. Робота викладена на 319 сторінках і містить 93 рисунки і 2 таблиці за текстом.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** подається обґрунтування теми дисертації. Зазначаються мета, завдання і методологічна база дослідження, об'єкт та предмет дослідження, наукова новизна, наведено теоретичне та практичне значення результатів, внесок здобувача та обсяг роботи. Описується зв'язок з науковими програмами досліджень Сумського державного університету.

Перший розділ присвячено огляду літератури і відображає теоретичне обґрунтування роботи. Описано особливості межового режиму тертя, який має місце при терті атомарно—гладких твердих поверхонь, які розділені ультратонким шаром мастила. Розглянуто геометрію трибологічного експерименту і будову апарата поверхневих сил, що використовуються при дослідженні таких систем. Серед наявних моделей опису переривчастого режиму тертя (stick—slip режим) основну увагу зосереджено на концепції фазових переходів ша-

ру молекул із твердоподібного в рідиноподібний стан і навпаки. Згідно з нею і експериментальними залежностями stick—slip режим обумовлений постійними переходами між зазначеними станами мастила. При цьому може виникати велика кількість різних кінетичних режимів тертя. Особлива увага приділяється опису неньютонівських властивостей молекулярно—тонких плівок рідин. Подано відповідні результати моделювання методом молекулярної динаміки.

Наведено узагальнену діаграму Страйбека, на якій показано нові трибологічні режими. Проаналізовано теоретичні підходи для опису межового режиму тертя, що мають механістичний, термодинамічний і реологічний характер. Зроблено висновок, що реологічна модель дозволяє врахувати як термодинамічне, так і зсувне плавлення мастила, і тому їй розробленню присвячено дану дисертаційну роботу.

Зазначено, що на цей час ряд фундаментальних та прикладних аспектів, які пов'язані з використанням ПД для отримання металів із поліпшеними фізико—механічними характеристиками, не до кінця зрозумілий. При цьому методи дослідження в основному зводяться до узагальнення експериментальних даних або базуються на феноменологічних і евристичних міркуваннях. З іншого боку, побудова підходів, які дозволяють отримати зв'язок макроскопічної кінетики дислокаційного ансамблю з мікрорівнем, стикається з труднощами врахування багатьох чинників мікроструктурної будови і статистичного усереднювання. Не існує теоретичного підходу, який прогнозує формування декількох граничних структур під впливом стохастичних ефектів. Не описано утворення фрактальних зерених структур, що експериментально спостерігаються. У висновках розділу обґрунтовується необхідність наведених в дисертації досліджень, об'єднаних в одну проблему опису самоорганізації та формування низьковимірних конденсованих систем.

У **другому** розділі показано, що перехід ультратонкої плівки мастила, стиснутої між атомарно—гладкими твердими поверхнями, з твердоподібного у рідиноподібний стан відбувається внаслідок термодинамічного і зсувного плавлення. У рамках моделі Лоренца для реологічного опису в'язкопружного середовища, що має теплопровідність, проведено сукупний аналітичний опис цих процесів, що відбуваються у результаті самоорганізації, обумовленої додатним зворотним зв'язком зсувних напружень σ і температури T плівки мастила із зсувною деформацією ε , з одного боку, і від'ємним зворотним зв'язком зсувних напружень і деформації з температурою — з іншого боку. Отримано систему відповідних рівнянь у безрозмірних величи-

нах:

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

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

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

де введено часи релаксації $\tau_{\sigma, \varepsilon, T}$; температуру поверхонь тертя T_e та сталу $g = G/G_0 < 1$, яка є відношенням модуля зсуву мастила G до характерного його значення $G_0 \equiv \eta_0/\tau_{\varepsilon}$ (η_0 — характерне значення зсувної в'язкості). При $g = \text{const}$ рівняння (1) зводиться до співвідношення типу Максвелла для опису в'язкопружного середовища шляхом заміни $\varepsilon/\tau_{\sigma}$ на $\partial\varepsilon/\partial t$. Вираз (2) має вигляд відповідного рівняння Кельвіна-Фойгта, що враховує залежність зсувної в'язкості від безрозмірної температури: $\eta = \eta_0/(T - 1)$. Зазначимо, що спільно співвідношення (1), (2) подають нову реологічну модель, оскільки вони зводяться до диференціального рівняння другого порядку для напруження σ або деформації ε . Рівняння (3) є виразом для теплопровідності, що описує передачу тепла від поверхонь тертя до плівки мастила, ефект дисипативного розігріву в'язкої рідини, що тече під дією напружень, і оборотний механокалоричний ефект у лінійному наближенні. Рівняння (1) – (3) формально збігаються із синергетичною системою Лоренца [1*], у якій зсувні напруження відіграють роль параметра порядку, спряжене поле зводиться до зсувної деформації, а температура подає керувальний параметр. Відомо, що цю систему використовують для опису як фазових термодинамічних, так і кінетичних перетворень. Показано, що із зростанням σ мастило плавиться, оскільки збільшується відносна швидкість руху контактуючих поверхонь: $V = \sigma_v h / \eta_{eff}$, $\sigma_v = \sigma - \sigma_{el}$, де σ_v і σ_{el} — в'язкі і пружні напруження; h — товщина та η_{eff} — ефективна в'язкість мастила. Особливістю використання синергетичного підходу є та обставина, що він дозволяє з простих початкових рівнянь отримати синергетичний потенціал, який є аналогом вільної енергії. Аналіз стійкості системи дає можливість представити плавлення як результат дії зсувної компоненти напружень, викликаной нагрівом поверхонь тертя вище за критичне значення $T_{c0} = 1 + g^{-1}$. Побудовано схему Гінзбурга–Ландау, що визначає просторові розподіли деформаційного і теплового полів у плівці мастила.

Враховуючи залежність модуля зсуву від напружень

$$G(\sigma) = \Theta + \frac{G - \Theta}{1 + (\sigma/\sigma_p)^\beta}, \quad (4)$$

де Θ — модуль зсуву при $\sigma \rightarrow \infty$, що відіграє роль коефіцієнта зміцнення, та $\sigma_p, \beta > 0$ — параметри, описано механізм плавлення кристалічного мастила та гістерезисні явища при переході першого роду. Отримано залежності, на яких реалізується двозначна ділянка $T_c^0 < T_e < T_{c0}$ (рис. 1а), що відповідає співіснуванню нестійкого σ^m (штрихова крива) та двох стійких (твердоподібного при $\sigma_0 = 0$ і рідиноподібного при $\sigma_0 \neq 0$) стаціонарних станів мастила. У цьому випадку характер еволюції системи залежить від початкових умов.

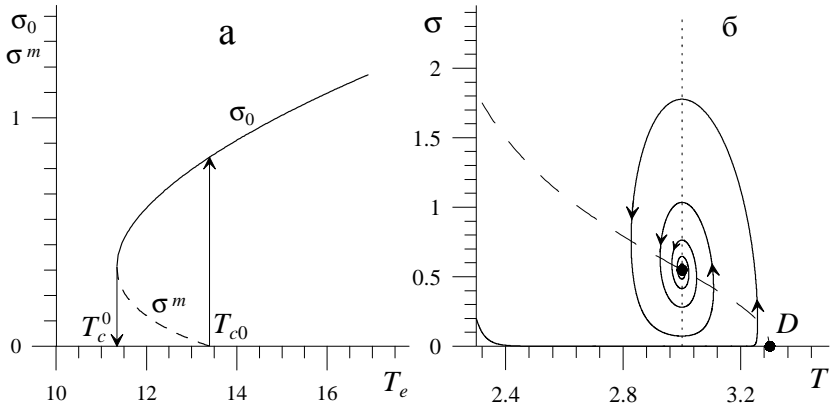


Рис. 1. Залежність стаціонарних значень зсувних напружень σ_0, σ^m від температури поверхонь тертя T_e (а) і фазовий портрет при $T_e > T_{c0}, \tau_\varepsilon \ll \tau_T = 10^2 \tau_\sigma$ (б)

Для можливих граничних випадків співвідношень між часами релаксації $\tau_{\sigma, \varepsilon, T}$ проведено аналітичне та чисельне дослідження фазових портретів у різних кінетичних режимах переходів першого і другого родів — плавлення аморфного мастила. Проаналізовано особливі точки фазової площини, які відповідають стаціонарним твердоподібному і рідиноподібному станам півки мастила. Показано, що переривчасте тертя реалізується, якщо час релаксації температури мастила набагато перевищує його значення для зсувних напружень і деформації (рис. 1б). У протилежному випадку відбувається швидка релаксація системи до універсальної ділянки, яка визначає її кінетику.

Для опису гістерезису при плавленні мастила в координатах $\sigma_0 - \varepsilon_0$ (рис. 2а) враховано деформаційний дефект модуля зсуву (4), де замість σ використовується ε . Показано, що може реалізуватися як стрибкоподібне плавлення, коли внутрішнє зсувне напруження перевищує визначене критичне значення, так і безперервне плавлення. Згідно з рис. 2 існують два режими поведінки мастила. Пер-

ший відповідає гуківській ділянці діаграми навантаження, і другий — ділянці пластичної течії. Перший режим представляє твердоподібну структуру мастила, другий — інтерпретується як рідиноподібний його стан, що приводить до рідинного тертя. При безперервному плавленні перехід між цими режимами відбувається плавно. Стрибокподібне плавлення характеризується гістерезисом залежностей стаціонарного напруження від деформації і температури поверхонь тертя, який спостерігається в експериментах (рис. 2). Знайдено параметри системи, за яких реалізується гістерезисна поведінка. Існує також твердоподібний стан мастила, що відповідає нульовим зсувним напруженням. Визначено температури переходів між твердоподібними і рідиноподібними станами мастила.

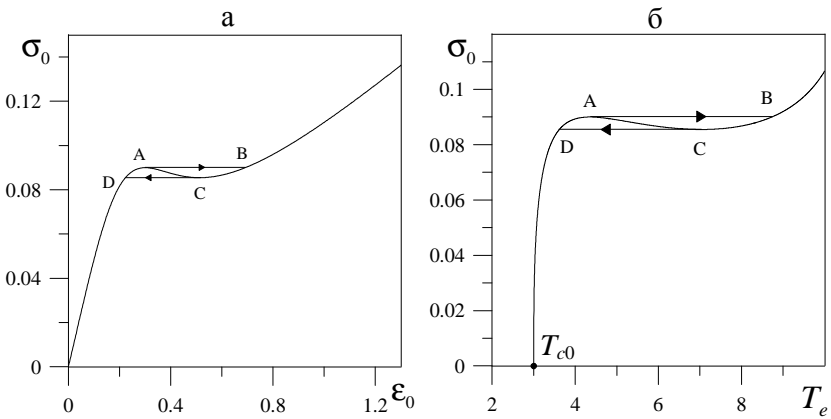


Рис. 2. Залежність стаціонарного значення зсувних напружень σ_0 від стаціонарного значення деформації ϵ_0 (а) та температури поверхонь тертя T_e (б) для фазового переходу другого роду

Побудовано фазові портрети системи, що дозволяють простежити еволюцію напружень і деформації, а також швидкості зміни напружень. Стейкі стаціонарні стани мастила, що представляються фокусами фазової площини, досягаються у результаті релаксаційних коливань, які описують переривчасте тертя. У разі, коли час релаксації деформації набагато перевищує відповідний час для напружень, рух відбувається по кривій, близькій до ізокліни, на якій вони зберігаються. До твердоподібного стану система повільно релаксує по гуківській ділянці, до рідиноподібного — по пластичній. Розглянуто також фазовий перехід першого роду.

Проведено врахування температурних залежностей в'язкості, що описуються законом Фогеля—Фулчера і степеневим співвідношен-

ням. В обох випадках отримано загальні вирази для критичної температури поверхонь тертя, вище за яку мастило плавиться.

У **третьому** розділі проведено дослідження впливу білого (δ — корельованого) та корельованого шумів на плавлення ультратонкої плівки мастила. Адитивний некорельований шум $\xi(t)$ має моменти:

$$\langle \xi_i(t) \rangle = 0, \quad \langle \xi_i(t) \xi_j(t') \rangle = 2\delta_{ij}\delta(t - t'). \quad (5)$$

Для врахування шуму у праві частини рівнянь (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_σ , I_ε та I_T — інтенсивності шумів напружень, деформації та температури відповідно. Використовуючи адіабатичне наближення $\tau_\sigma \gg \tau_\varepsilon, \tau_T$, отримано рівняння Ланжевена

$$\tau_\sigma \dot{\sigma} = f(\sigma) + \sqrt{I(\sigma)} \xi(t), \quad (6)$$

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

$$\tau_\sigma \frac{\partial P(\sigma, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial \sigma} [f(\sigma)P(\sigma, t)] + \frac{\partial^2}{\partial \sigma^2} [I(\sigma)P(\sigma, t)]. \quad (7)$$

При аналізі (7) у стаціонарному випадку ($\partial P/\partial t \equiv 0$) побудовано динамічну фазову діаграму (рис. 3), де визначено різні режими тертя. Ці

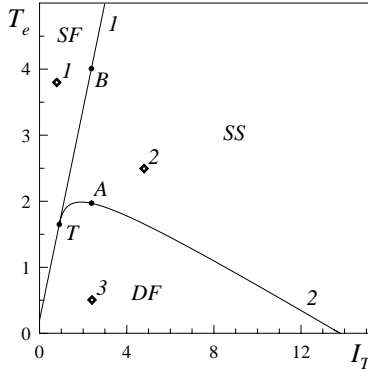


Рис. 3. Фазова діаграма при $g = 0.8$, $I_\varepsilon = 0.64$ з областями рідинного (SF), сухого (DF) і переривчастого (SS) тертя (T — трикритична точка)

режими задаються максимумами стаціонарної функції розподілу ймовірності $P(\sigma)$, яка вже не залежить від часу. Область DF відповідає реалізації нульового максимуму ($\sigma_0 = 0$), область SF — ненульового

максимуму. В області SS співіснують нульовий та ненульовий максимуми, що визначають режими, між якими у процесі тертя відбуваються переходи. Для опису переходу першого роду проведено врахування деформаційного дефекту модуля зсуву $G(\sigma)$ (4), при цьому поведінка системи не зазнає якісних змін.

Чисельно розв'язано рівняння (6), і для всіх областей фазової діаграми отримано часові залежності напружень (рис. 4). Верхня панель

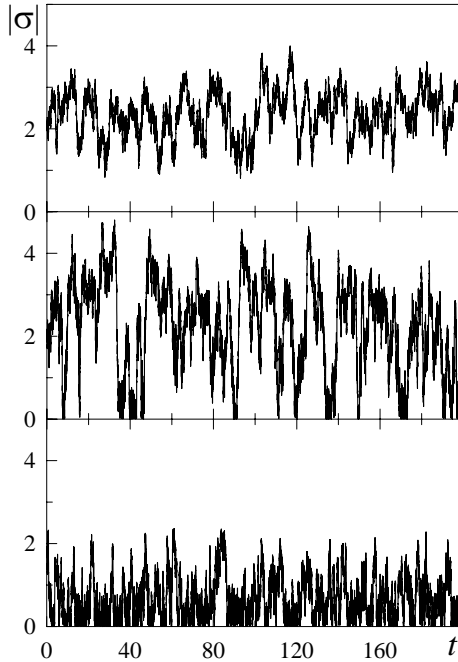


Рис. 4. Часові залежності напружень $|\sigma|(t)$, які відповідають точкам на рис. 3 при $I_\sigma = 0.08$. Верхня панель — точка 1 — $I_T=0.8$, $T_e=3.8$ (SF); середня панель — точка 2 — $I_T = 4.8$, $T_e = 2.5$ (SS); нижня панель — точка 3 — $I_T = 2.4$, $T_e = 0.5$ (DF)

рисунок представляє режим, що відповідає рідиноподібній структурі мастила ($\sigma_0 \neq 0$). У разі, показаному на середній панелі, відбуваються часті випадкові переходи між нульовим і ненульовим значеннями напружень, і реалізується режим переривчастого тертя. Нижня панель рисунка відповідає режиму сухого тертя, оскільки тут здійснюються стохастичні зміни напружень поблизу $\sigma_0 = 0$, що свідчить про твердоподібну структуру мастила. Дано пояснення експериментальних залежностей сили тертя від швидкості сльодяних зсувних поверхонь, між якими поміщалися гідрокарбонатні і силіконова рідини:

циклогексан, октаметилциклотетрасилоксан, n -октан, n -тетрадекан і розгалужений ізопарафін-2-метилоктадекан.

Пояснено часові залежності сили тертя, що експериментально вимірюються, на яких плавлення мастила показане при постійних швидкостях зсуву. Припущено, що дисипація енергії поступального руху поверхонь тертя приводить до їх розігріву. Причому при твердо-подібному стані мастила поверхні нагріваються швидше, ніж при рідиноподібному. Для апроксимації зростання температури поверхонь тертя використовується експоненціальна залежність

$$T_e(t) = T_e^0(1 - \exp(-Ct)), \quad (8)$$

де T_e^0 — значення T_e , що встановлюється із часом t ; C — константа, яка задає швидкість підвищення температури. На основі розв'язання рівняння Ланжевена $|\sigma|(t)$ описано переходи від сухого тертя до переривчастого і далі до рідинного режиму тертя [3*].

Розглянуто дробову модель Лоренца, коли в основних рівняннях (1) – (3) напруження σ замінюється на σ^a , $0 < a < 1$. Фізичний зміст проведеної заміни полягає в тому, що вимога самоподібності досягається у рамках припущень про нелінійну релаксацію σ , а також про дрібні характери додатного та від'ємного зворотних зв'язків. Показано, що у випадку $I_T \gg I_\varepsilon, I_\sigma$ спостерігається степеневий розподіл напружень за їх величиною

$$P(y) = y^{-2a} \mathcal{P}(\sigma), \quad y = \sigma \sigma_s, \quad (9)$$

який відповідає самоподібній системі, для якої відсутній характерний масштаб напружень. Побудовано фазові діаграми, що визначають зміну областей рідинного, переривчастого і сухого тертя залежно від дробового показника a в модифікованій системі Лоренца. Для опису переходу першого роду проведено врахування деформаційного дефекту модуля зсуву $G(\sigma)$ (4). При розв'язанні рівняння Ланжевена отримано самоподібні часові залежності $|\sigma|(t)$ для різних масштабів напружень та часу.

Кореляції температури представлено процесом Орнштайна–Уленбека $\lambda(t)$, який описує кольоровий шум з моментами

$$\langle \lambda(t) \rangle = 0, \quad \langle \lambda(t) \lambda(t') \rangle = \frac{I}{\tau_\lambda} \exp\left(-\frac{|t - t'|}{\tau_\lambda}\right), \quad (10)$$

де I — інтенсивність флуктуацій температури, а τ_λ — час їх кореляції. При цьому I пропорційна квадрату температури й обернено пропорційна теплоємності мастила. Побудовано залежність $\lambda(t)$ і проведено

порівняння з білим шумом. При врахуванні процесу $\lambda(t)$ у рівнянні (3) у рамках адиабатичного наближення $\tau_\sigma, \tau_\epsilon \gg \tau_T$ отримано еволюційне рівняння в канонічному вигляді рівняння нелінійного стохастичного осцилятора типу генератора Ван-дер-Поля:

$$m\ddot{\sigma} + \gamma(\sigma)\dot{\sigma} = f(\sigma) + \phi(\sigma)\lambda(t), \quad (11)$$

де γ — коефіцієнт тертя; f — ефективна сила; ϕ — амплітуда шуму і стала m має зміст маси системи.

Наведено метод ефективного потенціалу [6*], згідно з яким з'ясовано вплив температури поверхонь тертя на поведінку стаціонарних зсувних напружень σ_0 . У випадку безперервного перетворення досліджено стаціонарну функцію розподілу ймовірності $P(\sigma)$ і побудовано фазову діаграму в координатах інтенсивність шуму — температура поверхонь тертя (рис. 5а). На діаграмі реалізуються ті самі

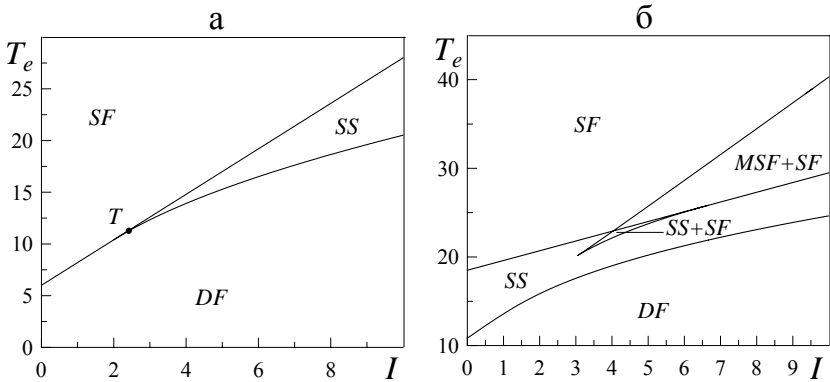


Рис. 5. Фазові діаграми з областями рідинного (SF), сухого (DF) та переривчастих (SS , $MSF+SF$, $SS+SF$) режимів тертя для фазових переходів другого (а) та першого (б) родів

області, що й у випадку дії білого шуму (див. рис. 3). Із зростанням τ_λ область сухого тертя DF на фазовій діаграмі розширюється, та при цьому рідинне тертя (SF) спостерігається при більшому значенні T_e .

Проведено врахування деформаційного дефекту модуля зсуву $G(\sigma)$ (4). Відповідну фазову діаграму показано на рис. 5б. В області $SS+SF$ співіснують твердоподібний, а також метастабільний (MSF) і стійкий (SF) 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 $MSF + SF$ є можливими переходи між метастабільним (MSF) і стійким (SF) рідинним тертям.

Проаналізовано дробову систему Лоренца і показано, що корельовані флуктуації температури приводять до зникнення області рідинного тертя. Встановлено, що функція розподілу $P(\sigma)$ набирає степеневого вигляду (9) 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 . При $a = 0.25$ побудовано фазову діаграму, що прогнозує більшу кількість режимів тертя.

У **четвертому** розділі дисертації досліджено фазову динаміку та кінетику процесу ІПД. Згідно з [4*] подальший розгляд ґрунтується на першому законі термодинаміки:

$$du = \delta A + \delta Q = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} + T ds', \quad (12)$$

де σ_{ij} , ε_{ij} — тензори напружень і деформації; T , s' — температура й ентропія, пов'язана із зовнішніми джерелами тепла. Робота зовнішніх сил складається з оборотної і необоротної складових: $\delta A = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^e + \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^n$. За наявності лише теплового каналу дисипації необоротна частина роботи перетворюється на тепло і можна припустити, що $\sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^n \equiv T ds''$, де s'' — ентропія, обумовлена внутрішніми процесами. Шляхом об'єднання ентропійних внесків від зовнішніх і внутрішніх джерел виходить термодинамічна тотожність [4*]:

$$du = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^e + T ds. \quad (13)$$

Якщо необоротна робота витрачається як на розігрів, так і на створення дефектів, зокрема, додаткових меж зерен при ІПД, то можна записати [4*]:

$$\sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^n \equiv T ds'' + \varphi dh, \quad (14)$$

де φ і h — пов'язана пара термодинамічних змінних, яка характеризує дефектність матеріалу — середня поверхнева густина енергії та об'ємна густина сумарної поверхні меж зерен. Тоді термодинамічна тотожність має вигляд [4*]:

$$du = \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^e + T ds + \varphi dh. \quad (15)$$

Згідно з перетворенням Лежандра здійснюється перехід від внутрішньої до вільної енергії [4*]:

$$f = u - Ts - \varphi h. \quad (16)$$

Енергія, що вводиться в систему за рахунок необоротної частини зовнішньої роботи, розподіляється між двома каналами дисипації — Ts і φh . Оскільки точний аналітичний вираз для вільної енергії f не відомий, у даній дисертації розглядається розкладання вільної енергії у ряд за її аргументами до кубічних внесків вигляду

$$\begin{aligned} f(\varphi, T, \varepsilon_{ij}^e) &= f'_0 - h'_0 \varphi + \frac{1}{2} a' \varphi^2 - \frac{1}{3} b \varphi^3 + \frac{1}{2} \lambda (\varepsilon_{ii}^e)^2 + \mu (\varepsilon_{ij}^e)^2 - \\ &- g \varphi \varepsilon_{ii}^e - \frac{1}{2} \bar{\lambda} \varphi (\varepsilon_{ii}^e)^2 - \bar{\mu} \varphi (\varepsilon_{ij}^e)^2 - e \varphi^2 \varepsilon_{ii}^e + \\ &+ \alpha' \varphi \Delta T + \alpha_g \varphi \Delta T \varepsilon_{ii}^e + \beta \varphi^2 \Delta T - \gamma (\Delta T)^2, \end{aligned} \quad (17)$$

де $\Delta T = T - T_0$, T_0 — початкова температура до ІПД для бездефектного стану. Сталі h'_0 , a' , b виражають залежність вільної енергії квазірівноважної підсистеми від густини енергії дефектів за відсутності зовнішніх дій. Решта параметрів описує зовнішні механічні, температурні або змішані дії. Пружні напруження враховуються з точністю до квадратичних складових через перших два інваріанти тензора деформацій ε_{ij}^e , $(\varepsilon_{ij}^e)^2 = \varepsilon_{ij}^e \varepsilon_{ji}^e$. Вважається, що внаслідок швидкої релаксації у нерівноважній підсистемі напруження, за яких стають суттєвими кубічні внески за тензором деформацій ε_{ij}^e , не встигають розвинутися. Далі при аналізі беруться від'ємні значення інваріанта ε_{ii}^e , оскільки описується процес стиску об'єкта, що деформується при ІПД.

Для динамічних параметрів записано рівняння руху вигляду

$$\tau_\varphi \dot{\varphi} = - \frac{\partial f}{\partial \varphi}, \quad \tau_T \dot{T} = - \frac{\partial f}{\partial T}, \quad (18)$$

де введено часи релаксації τ_φ , τ_T відповідних величин, що характеризують інерційні властивості системи. Час релаксації деформації ε_{ij}^e досить малий, тому можна вважати її константою. Система отриманих рівнянь аналізується далі в адіабатичному наближенні $\tau_\varphi \gg \tau_T$. Побудовано фазову діаграму (рис. 6а). Мінімуми термодинамічного потенціалу $V(\varphi)$ відповідають формуванню граничних структур із різним розміром зерна. Спостерігаються чотири області — дві з існуванням двох граничних структур і дві — з існуванням однієї граничної структури. У цих областях гранична структура може формуватися як при нульовій густині енергії дефектів (монокристал), так і при ненульовому її значенні (дрібні зерна). Встановлено, що нижче за криву 1 існує нульовий стаціонарний розв'язок $\varphi_0 = 0$, за якого відсутній канал дисипації енергії, пов'язаний з утворенням дефектних структур, тобто система є монокристалом. Із збільшенням пружних деформацій

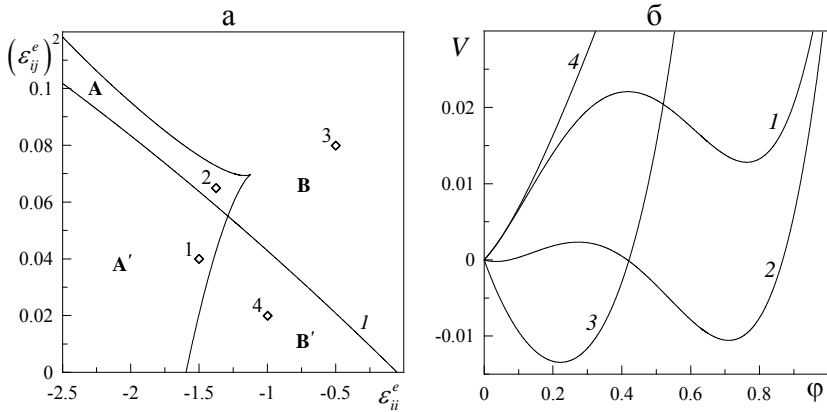


Рис. 6. Фазова діаграма з областями формування двох (A, A') та однієї (B, B') граничних структур (а) і залежність термодинамічного потенціалу V [Дж/м³] від густини енергії дефектів φ [Дж/м²] (б). Криві 1–4 відповідають точкам 1–4 на рис. 6а

розмір зерен зменшується, і у границі $(\varepsilon_{ij}^e)^2 \rightarrow \infty$ оброблений зразок являє собою аморфну структуру. Для всіх областей за допомогою аналізу кінетичного рівняння типу Ландау–Халатнікова побудовано релаксаційні залежності $\varphi(t)$. З них бачимо, що стаціонарні стани досягаються в результаті швидкої релаксації системи. Досліджено кінетику в координатах $\dot{\varphi} - \varphi$.

Проведено врахування адитивних некорельованих шумів густини енергії дефектів і температури. Побудовано динамічну фазову діаграму, області якої якісно збігаються з наведеними на рис. 6. Для пояснення виникнення фрактальних зернистих структур досліджено самоподібний режим. Відповідний розподіл густини енергії меж зерен представляється при введенні в розкладання вільної енергії показника $0 < \omega < 1$. Він забезпечує дробовий характер від'ємного зворотного зв'язку у рівняннях еволюції (18). Суттєву роль при цьому відіграють флуктуації температури. У рамках адіабатичного наближення знайдено співвідношення параметрів системи, за яких розподіл густини енергії дефектів має степеневий вигляд (9) у визначеному інтервалі $0 < \varphi < \varphi_{max}$. У цьому діапазоні утворюються квазіфрактальні структури, де існують розміри зерен при всіх φ зазначеного відрізка.

У п'ятому розділі синергетична концепція використовується для опису утворення потокових станів сипких середовищ (лавин), механізму вибухової кристалізації ультрадисперсних аморфних плівок, ефектів пам'яті і втрати ергодичності в нерівноважних термодинаміч-

них системах та фазових переходів з комплексним параметром порядку і між режимами транспортного потоку. Наведено приклади систем, в яких реалізується режим СОК, та основи підходів до його представлення. Досліджено процес формування лавини сипкого середовища, наприклад, піску. У рамках отриманої системи рівнянь у безрозмірних величинах:

$$\tau_x \dot{u} = -u + v, \quad (19)$$

$$\tau_y \dot{v} = -v + uS, \quad (20)$$

$$\tau_S \dot{S} = (S_e - S) - uv, \quad (21)$$

яка формально збігається з системою Лоренца [1*], показано, що роль параметра порядку відіграє горизонтальна складова швидкості піщинок u , спряжене поле зводиться до вертикальної швидкості v , а нахил поверхні S є керувальним параметром ($\tau_{x,y,S}$ — часи релаксації перелічених величин). Враховано адитивний некорельований шум названих величин. Побудовано фазову діаграму, що визначає різні області поведінки системи та якісно збігається з показаною на рис. 3: SF і DF — потоковий та рівноважний стани відповідно; SS — двофазна область. Встановлено, що зростання інтенсивності флуктуацій призводить до появи лавини навіть за відсутності нахилу сипкої поверхні, що задається зовнішніми умовами S_e (T_e на рис. 3), причому шум керувального параметра відіграє критичну роль. Флуктуаційний режим такого роду відповідає випадку, коли розподіл горизонтальної швидкості за її величиною має степеневий вигляд (9) з цілочисловим показником. Оскільки насправді цей показник є дробом, то використано дробову систему Лоренца, що дозволяє описати реальну картину утворення лавини. У результаті виявляється, що степеневий розподіл, властивий СОК, забезпечується флуктуаціями нахилу сипкої поверхні.

На основі експериментальних даних показано, що картина кристалізації ультрадисперсних аморфних матеріалів визначається великою густиною зародків кристалічної фази. При цьому поширення фронту кристалізації є подібним до утворення перколяційного кластера у задачі про протікання рідини у випадковому середовищі. Кластер, що утворюється, має розгалужену фрактальну структуру, характерну для агрегатів, що виникають у результаті процесу, обмеженого дифузиею. Це приводить до висновку про ієрархічний характер вибухової кристалізації. Проведено дослідження умов розвитку теплової нестійкості в результаті самоорганізації процесів руху фронту кри-

сталізації і температуропровідності, перебіг яких пов'язаний з різницею термодинамічних потенціалів аморфного і кристалічного станів. Виявляється, що при виділенні тепла, що перевищує критичне значення, з'являється стаціонарний стан, в якому швидкість фронту кристалізації набуває аномально великих значень. Для малої товщини плівки такий режим забезпечується зовнішньою дією, а із зростанням товщини до закритичного значення теплоти кристалізації, що утримується в об'ємі плівки, стає достатньо для розвитку нестійкості, яка приводить до спонтанного зростання швидкості фронту, яке спостерігається в експерименті. Досліджено процес вибухової кристалізації, який є результатом СОК у стохастичному поширенні тепла по вузлах ієрархічного дерева. Дослідження ефективного рівняння руху показує, що нестійкість розвивається тільки у тому випадку, коли тепловий ефект кристалізації (або енергія, що вводиться ззовні) перевищує критичне значення, величина якого задається температуропровідністю. Стаціонарна функція розподілу тепла кристалізації визначається рівнянням Фоккера—Планка, розв'язання якого приводить до виразів для потоку тепла, що виділяється в результаті кристалізації, і ймовірності спонтанної кристалізації в плівці докритичної товщини. Виявляється, що ця ймовірність логарифмічно повільно наростає з часом до значення, що монотонно спадає з зростанням температуропровідності.

Здійснено подальший розвиток суперсиметричної схеми, що дозволяє самоузгодженим чином описати поведінку нерівноважної термодинамічної системи з урахуванням ефектів пам'яті й неергодичності. Показано, що гамільтоніан, який відтворює недисипативні доданки рівнянь Лоренца, має простий вид ф'рболіховського типу. Суперсиметричному лагранжіану системи надано канонічного вигляду, що дозволило використовувати стандартну теорію поля. При цьому однокомпонентний параметр порядку замінено чотирикомпонентним суперсиметричним полем. З'ясовано фізичний зміст додаткових компонент вказаного суперполя. Зокрема, добуток грасманових полів представляє ентропію, і, отже, їх поведінка є істотно важливою при описі процесу самоорганізації. Для суперсиметричного корелятора знайдено найбільш зручне розкладання, компоненти якого дозволили визначити структурний фактор і функцію Гріна. Виходячи з суперсиметричного рівняння Дайсона, отримано вирази для компонент суперкорелятора. У рамках суперсиметричної теорії збурень знайдено компоненти власне енергетичної суперфункції, які містять квадратичний ангармонізм. Отримано систему самоузгоджених рівнянь, що

дозволяє описати сприйнятливість, параметри пам'яті й неергодичності залежно від інтенсивностей термічного σ і замороженого p безладів. Побудовано фазову діаграму, що визначає області ергодичності й впорядкування залежно від зовнішніх умов (рис. 7). Досліджено вплив параметра ангармонізму на характерні інтенсивності термічного і замороженого безладів, за яких відбуваються втрата ергодичності і впорядкування.

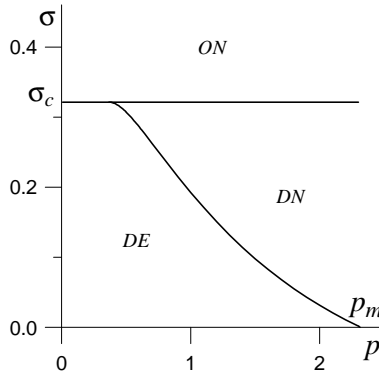


Рис. 7. Фазова діаграма (O — впорядкована фаза, D — неупорядкована, E — ергодична, N — неергодична)

Систему комплексних рівнянь Лоренца застосовано до опису нерівноважного фазового переходу другого роду з комплексним параметром порядку. Кінетику переходу представлено рівнянням Ландау—Халатнікова. У випадках, які відповідають можливим граничним співвідношенням між часами релаксації основних параметрів, проведено чисельне дослідження фазових портретів у різних кінетичних режимах фазового переходу. На фазових портретах виділяється ділянка, до якої швидко збігаються з часом всі траєкторії. Дослідження часових залежностей шляху, пройденого конфігуративною точкою, показує, що вона швидко досягає цієї ділянки і потім повільно рухається по ній. Таким чином, рух тут переважно визначає кінетику системи. Установлено, що відмінність частот зміни параметра порядку і спряженого поля приводить до коливальної поведінки параметрів у комплексних площинах названих величин. На основі моделі Лоренца описано переходи між режимами транспортного потоку і знайдено умови, за яких відбувається утворення затору транспорту. Показано, що досліджуваний перехід може бути представлено у рамках концепції фазових переходів.

Шостий розділ присвячено поясненню аномальних фізико—

механічних властивостей СМК і НК, зокрема, їх підвищеної пластичності [7*]. Зазначено, що останнім часом отримано й активно досліджується новий клас металевих матеріалів із СМК— і НК—структурою з розміром зерна 0.1–1 мкм і 10–100 нм відповідно. Природа аномальних властивостей СМК і НК до цього часу залишається незрозумілою. У зв'язку з цим проведено аналіз експериментальних даних. Принципово важливими виявляються результати мессбауерівських досліджень, виконаних на чистому залізі при кімнатній температурі [7*]. Мессбауерівські спектри являють собою суперпозицію двох складових, що істотно розрізняються параметрами електричної і магнітної надтонкої структури. Це свідчить про наявність двох різних станів атомів заліза і дозволяє говорити не тільки про геометричну межу зерна, але і про наявність зерномежової фази, розташованої у примежовому шарі зерна. Зроблено висновок, що у результаті розвиненої пластичної деформації і попереднього відпалу граткові дислокації поглинаються межами зерен, які переходять при цьому в нерівноважний стан, що характеризується наявністю далекодіючого пружного поля. Щоб уникнути макроскопічного внеску в термодинамічний потенціал, поблизу межі зерна утворюється прошарок зерномежової фази, що екранує це поле. На існування зерномежової фази вказує також аномальна поведінка таких фізичних властивостей, як температура Кюрі T_c , намагніченість насичення I_s , гістерезисні властивості магнетиків, теплоємність тощо [7*]. Так, у чистому Ni перехід у СМК збуджений стан приводить до пониження T_c на 30–40 К, значення I_s спадає на величину 10%. Оскільки обидві величини T_c і I_s є структурно нечутливими характеристиками, то така поведінка свідчить про мікроскопічні зміни при появі зерномежової фази. Принципово важливою обставиною є розм'якшення модуля пружності СМК, що відбувається при зменшенні розміру зерна [7*]. Цей факт можна зрозуміти, якщо розглядати пружне середовище як гетерофазну суміш зеренної і зерномежової фаз, перша з яких має звичайний модуль пружності, а друга — його знижене значення. При цьому у збудженому стані критичне напруження течії приблизно на 10% вище, ніж у рівноважному (у сталях його збільшення, обумовлене збудженням межі зерна, досягало 50%) [7*]. Нерівноважний характер системи є причиною приблизно 100-кратного підвищення коефіцієнта D зерномежової дифузії НК. Використовуючи співвідношення Ейнштейна $D \sim \eta^{-1}$, звідси можна зробити висновок, що зерномежова фаза являє рідноподібний прошарок (із кристалічною структурою!), що має знижене значення коефіцієнта зсувної в'язкості η . Це обумов-

лює, з одного боку, надпластичні властивості СМК і НК при знижених температурах, а з іншого — високі демпферувальні властивості і в'язкість [7*].

Дослідження розподілу пружних полів дозволяє зробити висновок, що пружне напруження в гетерофазній НК— і СМК—структурі обумовлене не тільки статичними спотвореннями ґратки, пов'язаними із збудженням межі зерна, але і різницею амплітуд коливань атомів у зерномежовій і зеренній фазах. Таким чином, аномальна поведінка НК і СМК пов'язана із зростанням середньоквадратичного зміщення атомів зерномежової фази, яке, у свою чергу, обумовлене розм'якшенням міжатомних зв'язків. Зменшення дебаєвської температури в області зерномежової фази також обумовлює зростання названих зміщень і, отже, приводить до пружного напруження. При перебудові потенціального рельєфу є важливими ефекти ангармонізму, які характеризуються сталою Грюнайзена. Тоді утворення зерномежової фази призводить до появи статичних спотворень, що визначаються сумісними змінами температури Дебая і сталої Грюнайзена.

Дослідження термодинаміки рівноваги зеренної і зерномежової фаз показує, що остання реалізується тільки при радіусі зерна менше критичного значення R_c . Зерномежова фаза може існувати при великому значенні коефіцієнта поверхневого натягу міжфазної межі і малому значенні різниці хімічних потенціалів збудженої і незбудженої фаз. Збільшення модуля пружності НК і СМК приводить за інших рівних умов до зменшення об'ємної частки зерномежової фази p . Товщина стійкої зерномежової фази d зростає із зменшенням розміру зерна R . Характерна особливість залежності $d(R)$ полягає в тому, що із зменшенням радіуса зерна об'ємна частка досягає певного максимального значення p_{max} , яке завжди менше одиниці (рис. 8). Це свідчить про те, що навіть в НК не все зерно переходить у збуджений стан. Мікроскопічну природу зерномежової фази досліджено на основі концепції про потенціальний рельєф, що перебудовується. Показано, що пружно—напружена гетерофазна структура НК і СМК подібна до змішаного стану надпровідника другого роду.

У **додатку А** показано, що польові рівняння, отримані у п'ятому розділі на основі суперсиметричного лагранжевого формалізму, збігаються за структурою із системою Лоренца. Пружну енергію гетерофазної структури зерна визначено у рамках наближення пружно—ізотропного континуума у **додатку Б**.

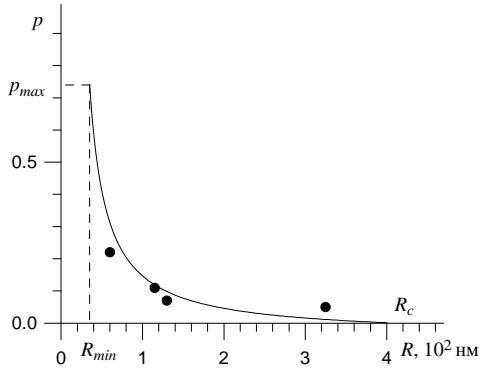


Рис. 8. Залежність об'ємної частки зернонежової фази p від радіуса зерна R (точки відповідають експериментальним даним для чистого заліза [7*])

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено результати досліджень, отриманих при розробленні наукової проблеми "Самоорганізація та формування низьковимірних систем при віддаленні від рівноваги", які дозволили встановити і поглибити модельні уявлення про механізми, статистичну картину і кінетику фазових перетворень, що відбуваються у низьковимірних системах під впливом зовнішніх чинників. Розвинено модель, за допомогою якої можна описати ефекти, що спостерігаються при терті атомарно—гладких твердих поверхонь, розділених ультратонким шаром мастила. Результати роботи дозволяють розширити уявлення про фізику тертя нановимірних об'єктів, коли звичайні закони, на зразок закону Амонтона, не виконуються. Дослідження ІПД у рамках теорії фазових переходів передбачає можливість виникнення нових режимів фрагментації і відповідно отримання матеріалів із заданими властивостями. Запропоновано моделі, що дозволяють описати процеси самоорганізації низьковимірних систем та утворення стаціонарних гетерофазних наноструктур у нерівноважних конденсованих середовищах. Проведені комплексні дослідження дали можливість розвинути схему термодинамічних перетворень на відкриті системи та зробити такі висновки.

1. Плавлення ультратонкої плівки мастила при терті між атомарно—гладкими твердими поверхнями представлено як результат дії зсувних напружень, що спонтанно з'являються, яка спричиняється зовнішнім надкритичним нагрівом. На основі рівняння Гінзбурга—Ландау—Халатнікова описано просторові розподіли напружень, деформації і температури у плівці мастила. Критична температура по-

верхонь тертя, за якої відбувається плавлення, збільшується із зростанням характерного значення зсувної в'язкості і зменшується із зростанням модуля зсуву мастила лінійним чином. Показано, що переривчастий режим тертя (stick—slip) реалізується, якщо час релаксації температури мастила набагато перевищує його значення для зсувних напружень і деформації. Описано гістерезис залежностей стаціонарних напружень від стаціонарної деформації і температури поверхонь тертя. Досліджено плавлення мастила при температурних залежностях в'язкості, що описуються співвідношенням Фогеля—Фулчера і степеневим виразом, які спостерігаються експериментально. Показано, що існує критична температура поверхонь тертя, при перевищенні якої відбувається плавлення плівки мастила. Визначено значення характерних параметрів, що необхідні для зменшення тертя.

2. Враховано адитивний некорельований шум зсувних напружень і деформації, а також температури плівки мастила. Побудовано фазові діаграми, де інтенсивності флуктуацій деформації і температури мастила, а також температура поверхонь тертя визначають області рідинного, переривчастого і сухого тертя. Показано, що збільшення інтенсивності шуму деформації приводить до плавлення плівки мастила навіть при низьких температурах поверхонь тертя. При чисельному аналізі рівняння Ланжевена для різних областей діаграми побудовано часові залежності напружень, які дозволяють пояснити експерименти з тертя, де спостерігається переривчастий рух. Розглянуто плавлення мастила за рахунок дисипативного розігріву поверхонь тертя і дано пояснення експериментально визначеним часовим залежностям сили тертя.

3. Досліджено плавлення з урахуванням флуктуацій її температури, які описуються процесом Орнштайна—Уленбека. Показано, що виникають три переривчасті режими руху, що характеризуються переходами між сухим, метастабільним і стійким рідинними режимами тертя.

4. У рамках теорії фазових переходів Ландау досліджено фрагментацію твердих тіл у процесі ІПД. Побудовано фазову діаграму, де перші два інваріанти пружної частини тензора деформації визначають області реалізації різних типів граничних структур. Встановлено, що із збільшенням пружних деформацій розмір зерен у граничних структурах зменшується. Знайдено умови формування двох граничних структур, що відповідає режиму, при якому існує суміш зерен різного розміру. Проведено врахування адитивного некорельованого шуму основних параметрів і побудовано фазову діаграму в осях інтен-

сивність шуму температури і другий інваріант тензора деформації.

5. Досліджено найпростішу синергетичну модель формування лавини під час руху піску по похилій площині (модель sandpile). З урахуванням адитивних некорельованих флуктуацій швидкості течії піску і нахилу його поверхні побудовано фазову діаграму, що визначає області формування лавини, рівноважного і змішаного стану.

6. На основі аналізу результатів експериментального дослідження вибухової кристалізації ультрадисперсних аморфних плівок германію показано, що при малій товщині плівки кристалізація ініціюється локальною тепловою дією, а при великих — проходить спонтанно. Показано, що на відміну від звичайного режиму кристалізації вибухова обумовлена нестійкістю теплового характеру, яка представляється схемою Лоренца. У результаті вибухова кристалізація зводиться до явища СОК, при якому поширення фронту подається дифузією в ультраметричному просторі ієрархічно підпорядкованих лавин. Отримано вирази для стаціонарних розподілів теплоти кристалізації і теплового потоку.

7. Проведено суперсиметричне дослідження системи, що самоорганізується, лагранжіан якої подано полями параметра порядку, амплітуди флуктуацій спряженого поля і пари грасманово зв'язаних полів, що визначають ентропію. У рамках самоузгодженого підходу знайдено макро— і мікроскопічне значення сприйнятливості, а також параметри пам'яті і неергодичності залежно від інтенсивностей термічного і замороженого безладів. Знайдено характерні чисельні значення інтенсивності термічного безладу, за яких відбуваються втрата ергодичності і впорядкування.

8. У рамках комплексної моделі Лоренца досліджено фазовий перехід другого роду, що описується комплексними параметром порядку і спряженим полем, а також керувальним параметром. На фазових портретах виявлено універсальну притягальну ділянку. Встановлено, що відмінність частот зміни параметра порядку і спряженого поля приводить до коливальної поведінки параметрів у комплексних площинах названих величин.

9. На основі аналізу експериментальних даних про структуру і фізико—механічні властивості НК і СМК зроблено висновок, що їх аномальний характер обумовлено переходом меж зерен у збуджений стан, який супроводжується появою далекодіючих пружних полів. У цих умовах системі термодинамічно вигідно увійти у гетерогенний стан, в якому поле меж зерен екранується прошарком, що характеризується в'язкістю. Не відрізняючись структурно від іншої частини

зерна, вона має всі атрибути термодинамічної фази, що дозволяє провести стандартний аналіз фазової рівноваги цього прошарку з центральною частиною зерна. Отримані результати пояснюють експериментально знайдену залежність об'ємної частки прошарку від розміру зерна.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1*. Хакен Г. Синергетика / Хакен Г.; [пер. с англ. В. Емельянов]. - М.: Мир, 1980. - 404 с.
- 2*. Persson B.N.J. Sliding friction. Physical principles and applications / Persson B.N.J. - Berlin: Springer-Verlag, 2000. - 515 p.
- 3*. Yoshizawa H. Fundamental mechanisms of interfacial friction. 2. Stick-slip friction of spherical and chain molecules / H. Yoshizawa, J. Israelachvili // Journal of Physical Chemistry. - 1993. - Vol. 97, № 43. - P. 11300-11313.
- 4*. Метлов Л.С. Термодинамика интенсивных пластических деформаций / Л.С. Метлов // Металлофизика и новейшие технологии. - 2007. - Т. 29, № 3. - С. 335-345.
- 5*. Bak P. How nature works: the science of self-organized criticality / Bak P. - Oxford: Oxford University Press, 1997. - 212 p.
- 6*. Ван Кампен Н.Г. Стохастические процессы в физике и химии / Ван Кампен Н.Г.; [пер. с англ. Г.А. Хоменко]. - М.: Высшая школа, 1990. - 376 с.
- 7*. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. - М.: Логос, 2000. - 272 с.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Олемской А.И. Синергетика конденсированной среды: Учебное пособие / А.И. Олемской, **А.В. Хоменко**. - Сумы: Изд-во СумГУ, 2002. - 373 с. (Особ. вн.: *брав участь у підготовці і систематизації матеріалу до розділу 1 "Теорія самоорганізуючихся систем", підрозділу 2.8 "Взрывная кристаллизация ультрадисперсных аморфных пленок"*).
2. Олемской А.И. Трехпараметрическая кинетика фазового перехода / А.И. Олемской, **А.В. Хоменко** // Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 1996. - Т. 110, Вып. 6(12). -

- С. 2144-2167. (Особ. вн.: *провів аналітичне та чисельне дослідження фазових портретів, що подають кінетику фазового переходу*).
3. **Khomenko A.V.** Solid-liquid transition of ultrathin lubricant film / A.V. Khomenko, O.V. Yushchenko // Physical Review E. - 2003. - Vol. 68, № 3. - P. 036110 (6). (Особ. вн.: *використано основні рівняння для опису плавлення ультратонкої плівки мастила, проведено дослідження умов плавлення*).
 4. **Khomenko A.V.** Synergetic theory of ultrathin lubricant film melting / A.V. Khomenko, O.V. Yushchenko // Вісник Львівського університету. Серія фізична. - 2005. - Вип. 38. - С. 18-29. (Особ. вн.: *виконав аналіз основних рівнянь еволюції пружного та теплового полів при плавленні ультратонкої плівки мастила, провів дослідження впливу деформаційного ефекту модуля зсуву мастила на плавлення*).
 5. **Khomenko A.V.** Stochastic models of ultrathin lubricant film melting / A.V. Khomenko // Вісник Львівського університету. Серія фізична. - 2006. - Вип. 39. - С. 23-35.
 6. **Хоменко А.В.** Синергетическая кинетика граничного трения / А.В. Хоменко, Н.В. Проданов // Вісник Сумського державного університету. Серія Фізика, математика, механіка. - 2006. - № 6(90). - С. 74-84. (Особ. вн.: *проведено аналітичне дослідження фазових портретів, що подають кінетику фазового переходу*).
 7. **Хоменко А.В.** Синергетическая кинетика плавления ультратонкой пленки смазки / А.В. Хоменко, Н.В. Проданов // Физика и техника высоких давлений. - 2006. - Т. 16, № 4. - С. 164-179. (Особ. вн.: *проведено дослідження залежностей стаціонарних значень основних параметрів у випадку фазового переходу першого роду*).
 8. **Хоменко А.В.** Гистерезисные явления при плавлении ультратонкой пленки смазки / А.В. Хоменко, Я.А. Ляшенко // Физика твердого тела. - 2007. - Т. 49, Вып. 5. - С. 886-890. (Особ. вн.: *досліджено гістерезисну поведінку на основі отриманих залежностей стаціонарних напружень від деформації*).
 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. (Особ. вн.: *дослідив фазову кінетику мастила*).
 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. (Особ. вн.: *досліджено гістерезисну поведінку на основі отриманої залежності стаціонарних напружень від температури поверхонь тертя та безперервне перетворення*).

11. **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. (Особ. вн.: *досліджено вплив температурної залежності в'язкості у вигляді співвідношення Фогеля-Фулчера*).
12. **Khomenko A.V.** Noise influence on solid-liquid transition of ultrathin lubricant film / A.V. Khomenko // Physics Letters A. - 2004. - Vol. 329, № 1-2. - P. 140-147.
13. Olemskoi A.I. Self-organized criticality within fractional Lorenz scheme / A.I. Olemskoi, **A.V. Khomenko**, D.O. Kharchenko // Physica A. - 2003. - Vol. 323. - P. 263-293. (Особ. вн.: *брав участь в аналітичному та чисельному дослідженні стаціонарних значень основних параметрів та фазових портретів у детерміністичному випадку і при врахуванні шумів*).
14. **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, Вып. 9. - С. 137-140. (Особ. вн.: *побудовано та проаналізовано часові залежності напружень при дисипативному розігріві поверхонь тертя*).
15. **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. (Особ. вн.: *досліджено самоподібний, фрактальний і неадитивний характер процесу тертя*).
16. **Хоменко А.В.** Фазовая кинетика внутреннего трения ультратонкой пленки смазки / А.В. Хоменко, Я.А. Ляшенко // Вісник Сумського державного університету. Серія Фізика, математика, механіка. - 2005. - № 8(80). - С. 68-77. (Особ. вн.: *проаналізовано фазову кінетику мастила, здійснено узагальнення результатів*).
17. **Хоменко А.В.** Влияние флуктуаций температуры поверхностей трения на динамическую фазовую диаграмму / А.В. Хоменко

- // Вісник Сумського державного університету. Серія Фізика, математика, механіка. - 2004. - № 10(69). - С. 15-28.
18. **Хоменко А.В.** Влияние корреляций температуры на самоподобное поведение ультратонкой пленки смазки / А.В. Хоменко, Я.А. Ляшенко // Вісник Сумського державного університету. Серія Фізика, математика, механіка. - 2005. - № 4(76). - С. 70-87. (Особ. вн.: *проведено розрахунок фазових діаграм і стаціонарних значень напружень при врахуванні деформаційного дефекту модуля зсуву мастила*).
 19. **Хоменко А.В.** Влияние коррелированных флуктуаций температуры на фазовую динамику ультратонкой пленки смазки / А.В. Хоменко // Журнал технической физики. - 2007. - Т. 77, № 3. - С. 29-37.
 20. **Khomenko A.V.** Influence of temperature correlations on phase kinetics of boundary friction / A.V. Khomenko, I.A. Lyashenko // Вісник Львівського університету. Серія фізична. - 2007. - Вип. 40. - С. 71-85. (Особ. вн.: *проведено аналіз фазових портретів, що описують кінетику мастила*).
 21. **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. (Особ. вн.: *проведено аналіз побудованих фазових діаграм, що описують фазову динаміку мастила*).
 22. **Хоменко А.В.** Фазовая динамика и кинетика интенсивной пластической деформации / А.В. Хоменко, Я.А. Ляшенко, Л.С. Метлов // Металлофизика и новейшие технологии. - 2008. - Т. 30, № 6. - С. 859-872. (Особ. вн.: *побудовано та проаналізовано фазову діаграму, що визначає режими фрагментації*).
 23. **Хоменко А.В.** Термодинамика интенсивной пластической деформации с учетом шума / А.В. Хоменко, Я.А. Ляшенко, Л.С. Метлов // Вісник Сумського державного університету. Серія Фізика, математика, механіка. - 2008. - № 1. - С. 5-21. (Особ. вн.: *побудовано та проаналізовано залежності стаціонарних значень густини енергії меж зерен від другого інваріанта тензора деформації*).
 24. Олемской А.И. Синергетика пластической деформации (обзор) / А.И. Олемской, **А.В. Хоменко** // Успехи физики металлов. - 2001. - Т. 2, № 3. - С. 189-263. (Особ. вн.: *брав участь у підготовці і систематизації матеріалу до розділів 3-5 "Коллек-*

- тивное поведение дислокационно-вакансионного ансамбля в локализованной зоне пластической деформации", "Синергетика структурных превращений при деформации и отжиге ГЦК-металлов", "Волны пластической деформации").
25. Olemskoi A.I. Explosive crystallization of ultradisperse amorphous film / A.I. Olemskoi, **A.V. Khomenko**, V.P. Koverda // Physica A. - 2000. - Vol. 284, № 1-4. - P. 79-96. (Особ. вн.: *брав участь в обговоренні та інтерпретації експериментальних результатів, визначенні умов вибухової кристалізації та представленні її як режиму СОК*).
 26. Olemskoi A.I. Field theory of self-organization / A.I. Olemskoi, **A.V. Khomenko**, D.A. Olemskoi // Physica A. - 2004. - Vol. 332. - P. 185-206. (Особ. вн.: *брав участь у побудові суперсиметричного лагранжевого формалізму та кореляційної техніки для опису системи, що самоорганізується*).
 27. **Хоменко А.В.** Синергетический фазовый переход второго рода с комплексным параметром порядка / А.В. Хоменко // Вісник Сумського державного університету. Серія Фізика, математика, механіка. - 2004. - № 8(67). - С. 5-15.
 28. Olemskoi A.I. Synergetic theory for a jamming transition in traffic flow / A.I. Olemskoi, **A.V. Khomenko** // Physical Review E. - 2001. - Vol. 63, № 3. - P. 036116 (4). (Особ. вн.: *провів дослідження залежностей стаціонарних значень основних параметрів у випадку фазових переходів першого та другого родів, побудував фазові портрети системи*).
 29. **Хоменко А.В.** Синергетическая теория перехода между режимами транспортного потока / А.В. Хоменко, О.В. Ющенко // Вісник Сумського державного університету. Серія Фізика, математика, механіка. - 2000. - № 1(17). - С. 20-26. (Особ. вн.: *виконав аналіз основних рівнянь еволюції, провів дослідження впливу залежності часу релаксації параметра порядку від його величини на фазовий перехід, що досліджується*).
 30. Олемской А.И. О возбужденном состоянии границы зерна в нано- и субмикрорекристаллах / А.И. Олемской, Р.З. Валиев, **А.В. Хоменко** // Металлофизика и новейшие технологии. - 1999. - Т. 21, № 4. - С. 43-58. (Особ. вн.: *брав участь в аналізі експериментальних даних та за поставленим завданням виконав аналітичне та чисельне дослідження термодинаміки фазової рівноваги зеренної та зерномежової фаз НК і СМК, побудував залежності об'ємної частки та товщини*

- зерномежової фази від радіуса зерна).*
31. Olemskoi A.I. Field theory of crystal defect structure // Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Thermodynamics, Microstructures and Plasticity: articles / A.I. Olemskoi, **A.V. Khomenko**; eds. A. Finel, D. Maziere, M. Veron. - Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. - 2003. - P. 363-373. (Особ. вн.: *брав участь в описі впливу розмитого атомного потенціального рельєфу*).
 32. Метлов Л.С. Термодинамическая теория плавления ультратонкой пленки смазки / Л.С. Метлов, **А.В. Хоменко**, Я.А. Ляшенко // Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікрота наноструктур: Збірник наукових праць Міжнародної наукової конференції, 8-10 жовтня 2008 р. - Харків, 2008. - С. 206-209. (Особ. вн.: *брав участь в отриманні основних та розрахункових рівнянь*).
 33. **Khomenko A.V.** Synergetics of phase dynamics of ultrathin lubricant film / A.V. Khomenko // Statistical Physics 2005: Modern Problems and New Applications: International conference, 28-30 August 2005: abstracts. - Lviv, 2005. - P. 102.
 34. **Khomenko A.V.** Synergetics of friction and boundary lubrication / A.V. Khomenko // XVII International School-Seminar "Spectroscopy of molecules and crystals". Beregove, Crimea, 20-26 September 2005: abstracts. - Kyiv, 2005. - P. 153.
 35. **Khomenko A.V.** Synergetics of boundary friction / A.V. Khomenko // Statistical Physics 2006: Theory and Applications: International conference, 12-15 September 2006: abstracts. - Kharkiv, 2006. - P. 152.

АНОТАЦІЯ

Хоменко О.В. Самоорганізація та формування низьковимірних систем при віддаленні від рівноваги. — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 — фізика твердого тіла, Сумський державний університет, Суми, 2009.

Дисертацію присвячено дослідженню моделей самоорганізації низьковимірних конденсованих систем, що базуються на самоузгоджених диференціальних рівняннях. Запропоновано синергетичну реологічну модель Лоренца, яка описує плавлення ультратонкої плівки мастила. Описано гістерезис, який виникає під час плавлення. З

урахуванням впливу білого та кольорового шумів розраховано фазові діаграми з областями сухого, рідинного та переривчастого тертя. Проведено якісний аналіз часових залежностей напружень для всіх областей діаграм. Визначено умови реалізації самоподібного режиму плавлення мастила. Знайдено параметри, за яких тертя зменшується. Фрагментацію металів у процесі інтенсивної пластичної деформації розглянуто з позицій теорії фазових переходів Ландау. Синергетична концепція використовується для опису утворення потокових станів сипких середовищ (лавин), механізму вибухової кристалізації ультрадисперсних аморфних плівок, ефекту пам'яті і неергодичності в нерівноважних термодинамічних системах та фазових переходів з комплексним параметром порядку і між режимами транспортного потоку. На основі аналізу експериментальних даних про нано- та субмікрочастинки показано, що їх аномальний характер обумовлений переходом у гетерогенний стан, у якому пружне поле меж зерен екранується прошарком, що характеризується в'язкістю.

Ключові слова: самоорганізація, фазовий перехід, реологія, ультратонка плівка мастила, переривчасте тертя, шум, фазова діаграма, інтенсивна пластична деформація, фрагментація, нанокристал.

АННОТАЦІЯ

Хоменко А.В. Самоорганизация и формирование низкоразмерных систем при удалении от равновесия. — Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 — физика твердого тела, Сумский государственный университет, Сумы, 2009.

Диссертация посвящена исследованию моделей самоорганизации низкоразмерных конденсированных систем, основанных на самосогласованных дифференциальных уравнениях. Предложена реологическая модель Лоренца, которая описывает плавление ультратонкой пленки смазки, заключенной между атомарно-гладкими твердыми поверхностями. Показано, что этот процесс обусловлен самоорганизацией сдвиговых напряжений и деформации, а также температуры смазки. На основе уравнения Гинзбурга-Ландау-Халатникова описаны пространственные зависимости указанных величин. Учитываемая зависимость модуля сдвига смазки от напряжений, проанализированы гистерезисные явления при фазовом переходе первого рода. С помощью исследования фазовых портретов показано, что прерывистое движение реализуется, если время релаксации температуры

смазки превышает его значение для сдвиговых напряжений и деформации. Гистерезис при плавлении смазки по механизму фазовых переходов первого и второго родов описан при учете зависимости модуля сдвига от деформации. Установлено существование двух режимов поведения смазки — твердоподобного и жидкоподобного. Первый отвечает гуковскому участку диаграммы нагружения, и второй — участку пластического течения. При различных отношениях времен релаксации сдвиговых напряжений и деформации построены фазовые портреты системы. При температурных зависимостях вязкости в виде закона Фогеля—Фулчера и степенного соотношения определены общие выражения для температуры поверхностей трения, при которой смазка плавится. Исследовано плавление смазки с учетом аддитивного некоррелированного шума основных параметров. На фазовой диаграмме определены области сухого, жидкостного и прерывистого трения. Показано, что изменение интенсивностей флуктуаций температуры и сдвиговой деформации смазки может переводить систему ко всем указанным режимам трения. При численном анализе уравнения Ланжевена получены временные траектории сдвиговых напряжений, и показаны случайные переходы между режимами трения, приводящие к прерывистому движению. Рассмотрено плавление смазки за счет диссипативного разогрева сдвигаемых поверхностей. Самоподобный режим плавления твердоподобной смазки описан при учете нелинейной релаксации напряжений и дробного характера обратных связей в системе Лоренца. Проведено исследование влияния коррелированных флуктуаций температуры смазки на характер ее плавления. На фазовой диаграмме появляются области, где прерывистое движение характеризуется переходами между сухим, метастабильным и устойчивым жидкостным режимами трения. Проведено рассмотрение, базирующееся на принципах теории фазовых переходов Ландау, которое дает картину фрагментации твердых тел в процессе интенсивной пластической деформации. В детерминистическом случае и при учете белого шума построены фазовые диаграммы с областями реализации различных типов предельных зернистых структур. Установлено, что с увеличением упругих деформаций размер зерен в предельных структурах уменьшается. Определены условия образования квазифрактальных зернистых структур. Образование одиночной лавины представлено синергетической системой Лоренца, параметризуемой компонентами скорости и наклоном поверхности сыпучей среды, величины которых испытывают аддитивный шум. В результате построена фазовая диаграмма, определяю-

щая области равновесного, неравновесного и смешанного состояний. Дробная система Лоренца позволяет воспроизвести степенную форму распределения горизонтальной скорости лавин по ее величине. Исследован механизм взрывной кристаллизации в аморфных пленках. Найдены условия перехода от холодной к взрывной кристаллизации. Исследование стационарных распределений теплоты кристаллизации и теплового потока по иерархическим уровням приводит к определению условий взрывной кристаллизации в зависимости от температуропроводности. Изложена суперсимметричная теория неравновесных термодинамических систем. Представлены микроскопическая интерпретация и суперсимметричный лагранжев формализм, позволяющие воспроизвести уравнения Лоренца. Построена фазовая диаграмма, определяющая области упорядоченной, неупорядоченной, эргодической и неэргодической фаз. Установлено, что система комплексных уравнений Лоренца позволяет описать основные особенности фазового перехода второго рода с комплексным параметром порядка. Образование транспортного затора представлено как синергетический фазовый переход. На основе анализа экспериментальных данных показано, что аномальное сочетание твердости и пластичности нано- и субмикрочастиц обусловлено наличием жидкоподобной прослойки, формирующейся вблизи границы зерна. Зерно нано- и субмикрочастиц представляет гетерогенное состояние, состоящее из центральной области с идеальной кристаллической решеткой и сферического зернограничного слоя с размытым атомным потенциальным рельефом.

Ключевые слова: самоорганизация, фазовый переход, реология, ультратонкая пленка смазки, прерывистое трение, шум, фазовая диаграмма, интенсивная пластическая деформация, фрагментация, нанокристалл.

SUMMARY

Khomenko A.V. Self-organization and formation of low-dimensional systems when moving off equilibrium. — Manuscript.

Thesis for Doctor of Science degree in physics and mathematics in speciality 01.04.07 — Physics of Solid State, Sumy State University, Sumy, 2009.

The thesis is devoted to study of self-organization models of low-dimensional condensed systems based on the self-consistent differential equations. The synergetic rheological Lorenz model is proposed

describing the ultrathin lubricant film melting. Hysteresis, arising at melting, is described. Taking into account influence of white and colored noises the phase diagrams are calculated with the domains of dry, sliding, and stick–slip friction. The qualitative analysis of time dependencies of stress is carried out for all domains of diagrams. The realization conditions of self–similar mode of lubricant melting are defined. The parameters are found at which the friction decreases. Fragmentation of metals at severe plastic deformation is considered on the basis of Landau phase transitions theory. Synergetic conception is applied for description of formation of the flux steady states of granular mediums (avalanches), mechanism of explosive crystallization of ultradisperse amorphous films, effect of memory and non–ergodicity in the non–equilibrium thermodynamic systems, and phase transitions with the complex order parameter and between the traffic flow modes. With the analysis of experimental data on the nano– and submicrocrystals it is shown that their anomalous character is caused by transition to the heterogeneous state, where the elastic field of grain boundaries is screened by the layer that is characterized by viscosity.

Key words: self–organization, phase transition, rheology, ultrathin lubricant film, stick–slip friction, noise, phase diagram, severe plastic deformation, fragmentation, nanocrystal.

Підп. до друку 15.01.2009 р.
Формат 60x90/16. Папір ксерокс. Гарнітура Times New Roman Суг. Друк офс.
Ум.друк.арк. 2,3. Обл.-вид.арк. 1,9.
Тираж 100 пр.
Зам. №

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.