МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра наноелектроніки та модифікації поверхні

Кваліфікаційна робота магістра

зі спеціальності 153 – «Мікро- та наносистемна техніка»

на тему:

"Дослідження впливу модуля зсуву на процеси межового тертя поверхні льоду"

Мельніков Роман Олександрович

Завідувач кафедрою _____ проф. О.Д.Погребняк

«___»_____2021 р.

Науковий керівник _____ доц. О.В. Ющенко

«___»_____2021 р.

Суми 2021

РЕФЕРАТ

Робота присвячена дослідженню розм’якшення льоду при терті, що відбувається в наслідок мимовільного виникнення деформації зсуву. В ході роботи була описана модель перетворення за допомогою рівняння Кельвіна-Фойгта для в’язкопружного середовища та рівняння теплопровідності. Також враховано вплив деформації модуля зсуву та флуктуацій параметра порядку, спряженого поля і керуючого параметра на процеси на поверхні льоду з використанням масштабного.

Магістерська робота складається зі вступу, аналітичного огляду щодо процесів тертя на поверхні матеріалу, опису базової синергетичної моделі, аналізу впливу модуля зсуву на фазову діаграму режимів розм’якшення льоду та розділу з техніки безпеки та охорони праці при роботі з ПК.

Ключові слова: ФАЗОВИЙ ПЕРЕХІД, ДЕФОРМАЦІЯ, НАПРУЖЕННЯ, МОДУЛЬ ЗСУВУ

ЗМІСТ

ВСТУП 4
РОЗДІЛ 1. ТЕРТЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ТА ЙОГО ВЛАСТИВОСТІ 5
1.1 Загальні характеристики контактних поверхонь 5
1.2 Контакт поверхні тіл 6
1.3 Залишкові напруження 9
1.4 Особливості будови поверхневого шару 10
1.5 Адгезія 11
1.6 Тертя. Загальні поняття 11
1.7 Види тертя 12
РОЗДІЛ 2. СИНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСІВ ДЕФОРМАЦІЇ НА ПОВЕРХНІ ЛЬОДУ 15
2.1 Базова модель 15
2.2 Синергетичний підхід 18
2.3 Безперервний тип переходу між різними станами 22
РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ МОДУЛЯ ЗСУВУ НА ФАЗОВУ ДІАГРАМУ РЕЖИМІВ РОЗМ'ЯГШЕННЯ ЛЬОДУ 26
3.1 Залежність модуля зсуву від деформації 26
3.2 Врахування флуктуацій 29
3.3 Імовірність реалізації стаціонарних станів 33
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ РОБОТІ З ПК 36
ВИСНОВКИ 42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 43
Додаток А 49

ВСТУП

Надійність та довговічність поверхонь які стискаються багато в чому залежать від таких явищ як тертя і зношування, які постійно відбуваються у будь-яких рухомих частинах машин. Зношування поверхонь тертя призводить до порушення цілостності та герметичності вузлів та розшатування рухомих деталей. Нідмірне тертя у механізмах призводить до перегріву, пришвидшує зношування, збільшує втрати енергії, та пального, знижує передані зусилля.

Трибологія - це наука шо вивчає проблеми тертя, зносу та змащування поверхонь твердих тіл шо рухаються відносно один одного. До теперішнього часу трибологія остаточно сформувалася як самостійна галузь знань що охоплює теоретичні та експериментальні дослідження фізичних, хімічних, біологічних та інших явищ, пов'язаних з тертям.

Одним з перспективних напрямків розвитку є вивчення властивостей тертя льоду і снігу, що має велике значення в побуті та промисловості, так як вода є одним з найрозповсюджених ресурсів на землі та легко переходить з одного агрегатного стану в інший. Кінетику межового тертя льоду вчені вивчають не перший рік, та описують цей процес як нанорозмірну трибологічну систему основними процесами в якій є такі явища як руйнування контактних поверхонь, плавлення під тиском, фрикційний нагрів, адгезія. Одним з цікавих властивостей льоду є плівка, що створюється на приповерхневому шарі льоду, вона відіграє роль мастила та знижує тертя і підвищує зносостійкість.

РОЗДІЛ 1. ТЕРТЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ТА ЙОГО ВЛАСТИВОСТІ

1.1 Загальні характеристики контактних поверхонь

Однією з основних проблем які вивчає трибологія є вивчення тертя контактних поверхонь. До поняття «контактних поверхонь» відносять взаємодію поверхонь твердих тіл під дією відносного зміщення та стискання.[1]

Важливим параметром при терті є шершавість поверхонь яка з'являється при формоутворенні будь-яких деталей. Вона являє собою ряд виступів та впадин відносно невеликого розміру. Шершавість поверхні також може бути наслідком обробки матеріалу, слідами ріжучого інструменту, копією нерівності форм або штампів, результатом вібрацій що виникає при різанні матеріалів.

До показників що характеризують експлуатаційні властивості поверхневого шару відносять:

-Міцність матеріалу

-Контактна жорсткість

-Антикорозійну стійкість

-Адгезійну здатність

-Щільність та герметичність

Для того, щоб оцінити шершавості поверхонь найчастіше використовують щуповий, оптичний методи електронної мікроскопії. Найбільш розповсюдженим є щуповий метод, принцип роботи якого полягає в тому, що по поверхні матеріалу рухається голка з радіусом скруглення 2-10 мкм, що значно менше ніж радіус скруглення нерівностей поверхні. При проходженні цієї голки по шершавій поверхні утворюються вертикальні

коливання, які перетворюються у електричні сигнали що передаються на мікропроцесор що видає характеристики профілю у цифровому вигляді. [2]

На даний момент вже розроблені більш точні методи отримання профілограмм за допомогою скануючого та растрового електронного мікроскопа, що значно підвищило точність. Та надало можливість реєструвати мікродефекти кристалічних структрур та шершавість молекулярних розмірів.

1.2 Контакт поверхні тіл

Для того, що б процес тертя відбувся, необхідно забезпечити контакт поверхонь твердих тіл. Явища, що відбуваються при контакті поверхонь можна визначити фізико-механічними, хімічними та мікрогеометрією контактуючих поверхонь. Контакт поверхонь проходить по вершинам шершавості які деформуються під впливом навантаження. Деформації виступів бувають декількох видів: пружні, пружно-пластичні без зміцнення та пружно-пластичні зі зміцненням. [3]

При дослідженні контактуючих поверхонь можна виділити такі параметри як номінальна, контурна та фактична площа контактуючої поверхні.

Номінальна контактна площа A_a можлива лише за умови ідеально гладкої поверхні. У цьому випадку площа контакту буде дорівнювати номінальній площі спряжених контактних поверхонь.

Однак у реальності контакт поверхонь твердих тіл має дискретний характер через шершавості [5]. Фактичний контакт A_r проходить по вершинам шершавостей які нерівномірно розташовані по площі поверхні. Це називають площею фактичного контакту. Між такими вершинами створюються мікропорожнини, які заповнені газами, змащувальними

рідинами або продуктами зношування. Розмір мікропорожнин залежить від мікрогеометрії поверхонь, навантаження а також фізико-механічних властивостей поверхонь.

Площа фактичного контакту зазвичай становить від 0,001-10% від номінального та залежить від навантаження, радіуса скруглення вершин, шершавості поверхні. При високому та довгому навантаженні площа фактичного контакту не перевищує 40% від номінальної площі поверхні.

При вза'ємодії декількох матеріалів фактичну контактну площу визначають фізичні властивості більш м'якого матеріалу та геометрія контактної поверхні більш твердого.

В наслідок нерівностей контактуючих поверхонь фактичний контакт з'являється на вершинах цих нерівностей. Кожна вершина створює область що обмежена контуром в якому проходить фактичний контакт поверхонь, та являє собою елементарну контурну площадку, а сума цих площадок являє собою елементарну контурну площу контакту A_K. Від розміру контурних площадок залежить розмір частинок зносу, температура тертя, та час взаємодії одиничного контакту поверхні. Середня відстань між площинами фактичного контакту впливає на частоту взаємодії при терті цих площин.

На рисунку (Рис. 1.1.) показана схема контакту двох тіл

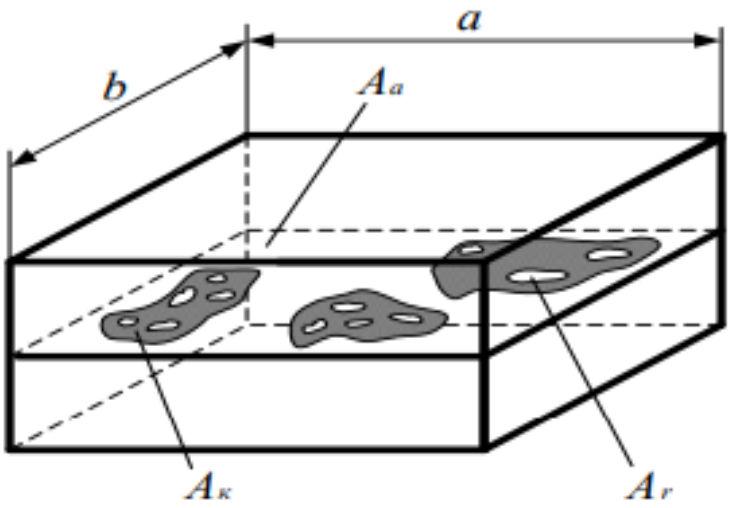


Рисунок 1.1 Схема контакту поверхонь тіл: A_a-Номінальна площа контакту, A_K контурна площа, A_r-фактична площина контакту

При силовому контакті двох тіл виникає тиск який розраховують за наступними рівняннями:

Номінальний тиск

$$P_h=P_a=N/A_a$$

Контурний тиск

$$P_k=N/A_k$$

Фактичний тиск

$$P_r=N/A_r$$

Де N-нормальний тиск

Фактичний тиск P_r дуже високий, це часто призводить до пластичних деформацій виступів. У деяких випадках у контактній зоні може виникнути повзучість, це може призвести до зміни характеристик контакту без зміни прикладених до тіла сил. Особливо ця властивість проявляється зі збільшенням температури контактної зони.

1.3 Залишкові напруження

При дії зовнішніх навантажень на матеріал положення атомів у кристалічній решітці виходить за мінімальний рівень кінетичної енергії. Це порушує структуру решітки та призводить до певного напруженого стану матеріалу.

Такі напруги, що існують в тілі при відсутності зовнішніх силових впливів на нього називають залишковими [4]. Ці напруженя можа обумовити нерівністю температури по об’єму тіла при охолодженні або нагріві цього тіла, наявністю включень іншого матеріалу і т.д [7].

Залежно від розміру області, в якій виникають напруги, розрізняють залишкові напруги першого, другого і третього роду:

- залишкові напруги першого роду-мікронапруги що врівноважуються в межах областей, розміри яких співмірні з розмірами тіла

- залишковими напругами другого роду називають мікронапруження що займають області, співмірні з об'ємом окремих кристалітів або груп кристалітів.

- залишкові напруги третього роду змінюються в субмікроскопічних областях.

Залишкові напруги, що виникають в поверхневих шарах при механічній обробці, можуть ставитися до напруг як першого, так і другого роду. Типові епюри залишкових напружень першого роду в поверхневому шарі наведені на рисунку (Рис.1 2).

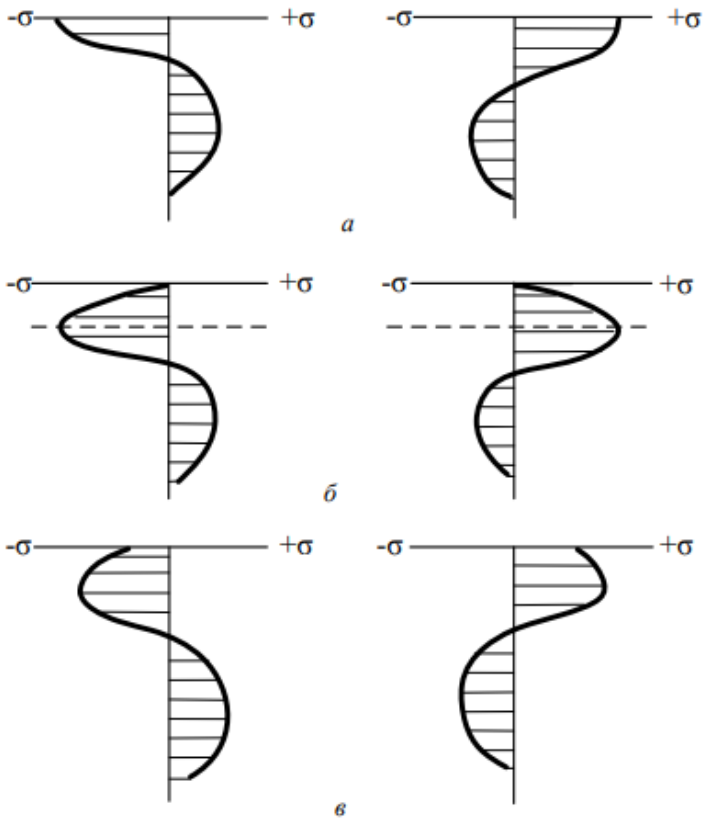


Рисунок 1.2. Епюри залишкових напружень[8]

Характер епюри залишкових напружень може бути таким, що максимальні напруги виникають безпосередньо у поверхневого шару (а), на деякій глибині, причому у поверхні вони дорівнюють нулю (б) або мають вигляд, представлений на рисунку (в)

1.4 Особливості будови поверхневого шару

Розглядаючи структуру поверхневого шару, слід зазначити, що він радикально відрізняється від основного матеріалу. Якість поверхні деталей характеризується мікро-і макрогеометрією поверхні, завитками, структурою, затвердінням і залишковими напруженнями, оскільки несе в собі сліди технологічного процесу обробки, яка зазвичай призводить до утворення дефектного шару з деформованою структурою. При використанні виробу процес зміни властивостей поверхні через сили тертя проходить постійно.

Так, наприклад при обробці металів методом різання або шліфування в поверхневому шарі виникають нові утворення. Це відбувається в результаті дії двох протилежних процесів – зміцнення (наклепу) в результаті впливу на поверхню зусиль різання і зменшення міцності (зняття наклепу) в результаті впливу температури різання. В різних умовах превалює вплив одного або іншого фактора.

1.5 Адгезія

При зіткненні двох тіл, між дотичними поверхнями виникає адгезія. Адгезія обумовлена міжмолекулярною взаємодією в поверхневому шарі і характеризується питомою роботою, необхідною для поділу поверхонь. Однак сили зв'язку між зразками при спробі відірвати один від іншого виявляються, як правило, невеликими, навіть при наявності однорідних матеріалів.

Слід зазначити, що адгезія залежить від двох основних факторів. Фактор перший-величина площі фактичного контакту, яка набагато менше геометричної площі контакту. Другим фактором є наявність на поверхні зразків плівок і адсорбованого шару молекул речовин різної природи.

1.6 Тертя. Загальні поняття

Під терміном «тертя» у сучасній механіці розуміють досить широкий спектр явищ, що виникають при взаємодії двох твердих тіл що контактують між собою а також рухом у твердих, рідких та газоподібних середовищах. Найбільшу увагу як правило приділяють саме зовнішньому тертю, так як воно зустрічається найчастіше.

Внутрішне тертя- це такий вид тертя характеризувати який можна як взаємодію що проходить в об’ємі одного тіла. Така взаємодія відбувається в рамках одного тіла в незалежності від його агрегатного стану (твердого тіла, газу або рідини). Це означає що взаємодія здійснюється по всій поверхні виділеного шару. Швидкість руху шарів речовини відносно один одного, змінюється плавно та безперервно. При зовнішньому терті в загальному випадку взаємодія здійснюється між різними за будовою твердими тілами і має атомно-молекулярну та механічну природу. Взаємодія реалізується в окремих зонах фактичного контакту ізольованих один від одного. Швидкість ковзання в зонах фактичного контакту змінюється стрибкоподібно.

Відмінності зовнішнього тертя від внутрішнього полягають в наступному:

-При зовнішньому терті виникнення і руйнування зв'язків між тілами, що труться локалізується в тонкому поверхневому шарі, при внутрішньому зона деформації охоплює весь їх обсяг.

- При зовнішньому терті тіло переміщається в напрямку, перпендикулярному вектору відносної швидкості. Внутрішнє тертя характеризується ламінарним переміщенням тіла в напрямку вектора відносної швидкості.

-При зовнішньому терті контакт двох тіл що труться завжди має дискретний характер, тобто вони стикаються в окремих точках(точках фактичного контакту). При внутрішньому терті поверхня торкання безперервна.

1.7 Види тертя

В залежності від характеру руху розрізняють два види тертя. Тертя ковзання при якому відносна швидкість всіх точок взаємодіючих тіл

однакова, та тертя кочення при якому можна завжди вказати точку в зоні контакту, швидкість ковзання в якій дорівнює нулю. [8]

Тертя ковзання-опір, що виникає при переміщенні одного тіла щодо іншого, притиснутого до першого при дії на тіла деяких рушійних сил, при цьому розрізняють тертя спокою, ковзання і кочення (рис. 1.3.)

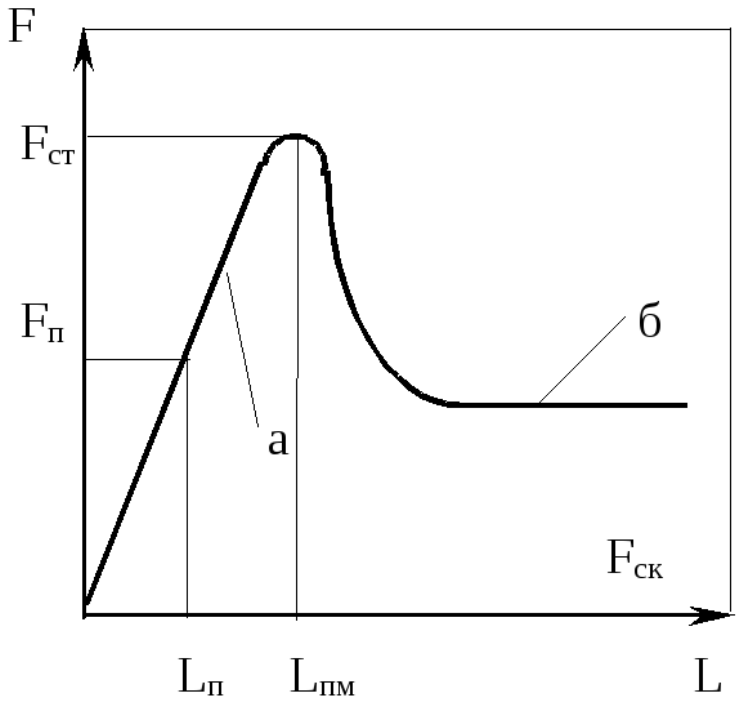


Рис. 1.3: а –сила тертя спокою; б – сила тертя ковзання

Силою тертя спокою називають зсувне зусилля, що прикладається до контактуючих тіл і не викликає їх взаємного ковзання. Взаємне переміщення досягається через деформацію матеріалу, виступів шорсткості контактної поверхні і називається попереднім зміщенням. Воно носить пружний характер та зникає при знятті зусилля.

Сухе тертя-це такий вид тертя матеріалу що виникає при відсутності на поверхнях тертя тіл спеціально введеного мастильного матеріалу. При терті без змащувального матеріалу витрачається додаткова енергія для подолання взаємного механічного зачеплення нерівностей поверхонь (шершавостей), що труться при їх відносному переміщенні, сил міжмолекулярного тяжіння,явища зварювання окремих гострих виступів поверхонь.

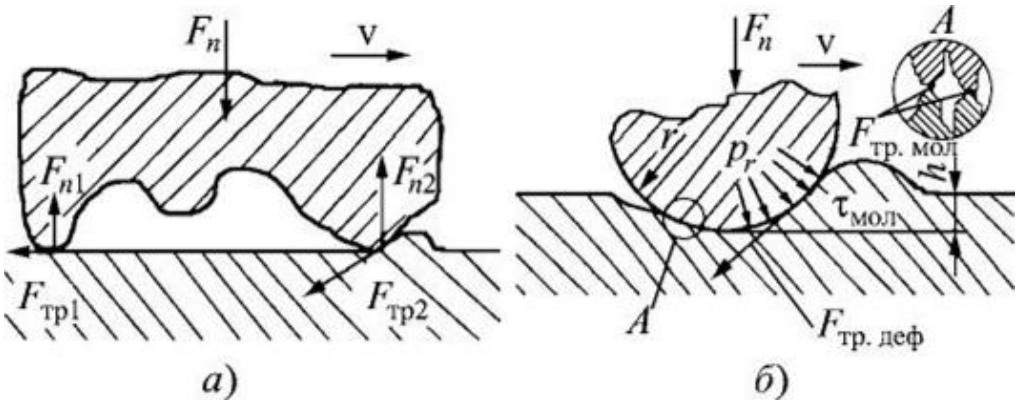


Рис. 1.4. а) тертя ковзання, б) тертя кочення

Таке тертя має механічну природу де молекулярні сили, що діють на фактичних майданчиках контакту, викликають адгезію. Сила тертя в цьому випадку залежить від протяжності контактуючих зон.

Рідинне тертя-це такий вид тертя який можливий, якщо поверхні контакту змащує рідина яка повністю розділяє пари тертя, тобто тертя між твердими тілами замінюється тертям між молекулами рідини. Рідинне тертя найбільш сприятливо для роботи пар тертя, так як при цьому виді тертя зменшується в багато разів, знижуються витрати потужності на подолання тертя, різко зменшуються знос і нагрів деталей, вузол тертя витримує більш високі навантаження. В роботі вузла тертя збільшується тривалість безперервної роботи але і збільшується надійність.

РОЗДІЛ 2. СИНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСІВ ДЕФОРМАЦІЇ НА ПОВЕРХНІ ЛЬОДУ

2.1 Базова модель

Кінетику тертя льоду описують такими процесами, як плавлення поверхні і тиску, адгезія, нагріванням при терті, і руйнування [11, 12]. Згідно з дослідженнями [13], питання про те, чи температура льоду є вирішуючим фактором при терті, все ще залишається предметом дискусій. Висновок про те, що причиною зниження тертя є водяна плівка, був вперше зроблений дослідженні [14] .Ця плівка утворюється на поверхні льоду в наслідок фрикційного нагріву. Інші дослідження, зокрема [15-17], у подальшому розвинули цю ідею. Однак саме розуміння умов утворення рідкої плівки необхідно для застосування на практиці. Деякі з досліджень [17] були зосереджені на такому параметрі як теплопровідність, яка змінюється в залежності від швидкості ковзання.

Танення поверхні льоду в наслідок тертя відбувається не завжди через механічний нагрів, на що вказують результати досліджень [15, 20], в цих дослідженнях пояснювали це термодинамічними аргументами. В рамках підходу, що був описаний у статті [21], вказано на залежності коефіцієнта тертя для м'якої сталі, плексигласу на льоду від таких параметрів як швидкість проходження процесу ковзання, температури плавлення, температури навколишнього середовища, і теплопровідності контакту. Також у статті представлені докази того, що посилене розм'якшення льоду при температурі вище за -2◦C призводить до значного зносу контактної поверхні. В ході досліджень були виявлені дві області з різними залежностями коефіцієнта тертя від швидкості. В першій області танення льоду не відбувається, а в другій області контакту регулюється тонкою водяною плівкою, що виникає в ході нагріву в наслідок тертя. У дослідженні [20] підтверджується ідея переважаючого механізму терморегулювання при терті

льоду, розглядається роль пом'якшення, гідродинамічного тертя і видавлювання мастильної плівки в зносі матеріалів, що труться. У статтях [23, 24] досліджують теорії змащення розплавом які включають в себе випадок видавлювання. Врахування як гідродинамічного тертя, так і шорсткості поверхні, дозволяє отримати вирази для товщини шару, коефіцієнта тертя і зносу. Кінетичне тертя на снігу можна визначити такими компонентами [25]: сухим, змазаним і капілярним тертям:

1) Залежність товщини плівки води на ізольованих алюмінієвих слайдерів від температури;

2) Залежність коефіцієнту змащенного тертя від швидкості при різних температурах;

3) Залежність товщини плівки води від відстані уздовж змастити куточок для пластика і алюмінію повзунки при різних температурах;

4) сумарне тертя в порівнянні з довжиною уздовж алюмінієвий повзунок в різних температура.

В цих розрахунках можна побачити, що вплив сили тертя на контактну поверхню, протягом широкого діапазону швидкостей та температур, змінюється незначно. Цю теорію обмежують припущеннями про незалежність від навантаження, виняткова увага приділяється тертю води, приблизній оцінці теплового потоку ковзаючої поверхні.

В останні роки з'явилися дослідження [28-28] в яких створюють атомістичні моделі тертя льоду з використанням методу молекулярної динаміки [26, 27] та гамільтоніану (вільна енергія Гінзбурга-Ландау) для випадку фазового переходу першого порядку. У науковій роботі [27] показано, що розплавлена поверхнева плівка льоду складається з молекулярних шарів, і її товщина зростає в залежності від навантаження і температури. Це в сво чергу призводить до збільшення змащувальноі рідини і зниження тертя через ослаблення зв'язків водню між молекулами льоду.

Оскільки збільшення швидкості ковзання призводить до зростання температури і розм'якшення товщини плівки через фрикційний нагрів, перший підтримується постійним завдяки введенню термостата при моделюванні [26]

Можна стверджувати що розрахована залежність сили тертя від швидкості лінійно зростає, і причиною цьому є в'язка складова напруги, що виникає плівці під час здвигу контактних поверхонь льоду. З плином часу відбувається релаксація зсувної складової напруги [29]

$$\tau = \eta/G \,, \tag{2.1}$$

де η - динамічна в'язкість при зсуві, G - модуль зсуву.

В'язкість η стає нескінченною, кінетичний ефект рідини замерзає, якщо G- кінцевий модуль зсуву. Однак потрібно звернути увагу на те, що у звичайному фазовому переходу другого порядку ситуація протилежна. Також спостерігається нескінченне збільшення τ в критичній точці. Фактично, переходячи від в'язкопружної рідини до загальному випадку, вираз набуває вигляду

$$\tau = \chi/\gamma, \tag{2.2}$$

де χ-узагальнена сприйнятливість, γ -Кінетичний коефіцієнт

В (2.1) ці величини G^{-1}, η^{-1}, відповідно [31, 32]. Спостерігається нескінченне збільшення сприйнятливості χ, в той час як кінетичний коефіцієнт γ не має сингулярності. В цьому випадку можна стверджувати, що прагнення до нуля модулю зсуву G відбувається при кінцевій в'язкості η в рівнянні (2.1). Ця ситуація характерна для в'язкопружного переходу [33-37].

Розм'якшення льоду в процесі тертя забезпечується такими явищами як самоорганізація компонентів та напруги σ, так і деформації ε зсуву і температури T [38]. Модель Кельвіна-Фойта, що показує найпростіший випадок взаємозв'язку між компонентами σ і ε [39]. При зниженні температури G = 0 для води та G≠0 для льоду такий температурний ефект обумовлений критичним збільшенням модуля зсуву G(T). Настання стійкого стану при надкритичному значенні обумовлено взаємодією зазначених факторів. Це призводить до того, що теплова енергія з’являється у поверхневому шарі. В такому випадку деформація зсуву може приймати аномально великі значення. Це стосується мастильного мастильного тертя льоду в модель якого застосовується до тертя сухого льоду, коли температура нижча ніж потрібно для того, щоб лід міг розтанути.

2.2 Синергетичний підхід

Модель для якої буде представлено рішення можна скласти з двох площин тертя льоду або площин льоду та іншого твердого матеріалу, які будуть розділені розм'якшеним шаром льоду. Це нелінійна модель розм'якшення поверхні льоду під час тертя, релаксація зсувної складової тензора деформації ε визначається рівнянням Кельвіна-Фойгта для в'язкопружного середовища [39]

$$\dot{\varepsilon} = -\varepsilon/\tau_\varepsilon + \sigma/\eta_\varepsilon, \qquad (2.3)$$

де τ_ε - час релаксації Дебая, η_ε - ефективний коефіцієнт в'язкості при зсуві.

В правій частині рівняння (2.3) описується перебіг в'язкої рідини під дією зсувної складової напруги σ. Якщо розглядати стаціонарний стан при якому $\dot{\varepsilon}$=0, то рівняння (2.3) можна звести до співвідношення типу Гука $\sigma = G_\varepsilon \varepsilon$, де $G_\varepsilon \equiv \eta_\varepsilon/\tau_\varepsilon \equiv G(\omega)|_{\omega\to 0}$ - де ω-кругова частота періодичного зовнішнього впливу. Згідно з феноменологічною теорією Ландау [31,33] фазовий перехід регулюється за допомогою вільної енергії , яка розширюється по σ, граючи роль параметра порядку [34]:

$$F = F_0 - \sigma\varepsilon = \frac{1}{2G(T)}\sigma^2 + \frac{A}{4}\sigma^4 - \sigma\varepsilon, \qquad (2.4),$$

де $G(T) \equiv G(\omega)|_{\omega\to\infty}$ - модуль зсуву, що залежить від температури, σε-вплив зовнішнього поля ε, А-позитивна константа негармонійності. Рівноважне значення σ можна визначити

$$\partial F_0 / \partial\sigma = \varepsilon, \qquad (2.5)$$

де F_0-вільна енергія при значенні ε =0. Перехід в рівноважний стан описується рівнянням типу Ландау Халатникова [32-41]

$$\dot{\sigma} = -\frac{G(T)^2}{\eta}\left(\frac{\partial F_0}{\partial\sigma} - \varepsilon\right). \qquad (2.6)$$

Де η-кінетичний коефіцієнт, який має значення зсувної в'язкості. При σ близькому до $\sigma_0 = 0$ лінійне наближення $\partial F_0/\partial\sigma \approx \sigma/G(T)$ може бути використаний, де $G(T) \equiv \partial\sigma/\partial\varepsilon = (\partial^2 F_0/\partial\sigma^2)^{-1}$ з цього ми можемо стверджувати що рівняння релаксації (2.6) передбачає лінійну форму

$$\tau_\sigma \dot{\sigma} = -\sigma + G(T)\varepsilon. \quad (2.7)$$

Тут описується релаксація протягом часу $\tau_\sigma \equiv \eta/G(T)$. У сталому стані $\dot{\sigma}=0$ кінетичне рівняння (2.7) має вигляд закону Гука

$$\sigma = G(T)\varepsilon. \quad (2.8)$$

Заміна ε/τ_σ на $\partial\varepsilon/\partial t$ в рівнянні (2.7) зведе його до рівняння Максвелла для в'язкопружної речовини [29]. Потрібно звернути увагу на те, що ефективна в'язкість $\eta_\varepsilon \equiv \tau_\varepsilon G_\varepsilon$ і розслаблений модуль $G_\varepsilon = \eta_\varepsilon/\tau_\varepsilon$ не збігаються з реальною в'язкістю η і модулем G(T) відповідно. Це викликано різним фізичним рівнянь Ландау-Халатникова (2.7) і Кельвіна-Фойгта (2) [29, 34,]. Такі величини майже не залежать від температури поверхневого шару льоду, а модуль зсуву зникає при зниженні температури до T_c [30, 42-44]. Далі використовуються температурні залежності: G_ε (T), η (T), η_ε (T) = const,

$$G(T) = G_0\,(T/T_c - 1), \quad (2.9)$$

де $G_0 \equiv G(T = 2T_c)$ - типове значення модуля.

Для повного уявлення процесу самоорганізації [34, 43-48], необхідно для завершення системи, кінетичне рівняння для температури T (2.3) і (2.7), які містять параметри порядку ε, пов'язані з полем σ та T що використовується у якості керуючого параметру. Використовуючи підхід показаний у [38], який грунтується на співвідношеннях теорії пружності в [28], можна вивести наступне рівняння:

$$C_P\dot{T} = k\nabla^2 T - \sigma_\varepsilon/\tau_\varepsilon + \sigma^2 \,/\, n_\varepsilon \qquad (2.10)$$

де C_P-теплоємність, k - теплопровідність.

З іншого боку, одномодове наближення $(k/I^2)(\tau_T Q - T \approx k\nabla^2 T)$ можна використати з відносно прийнятною точністю в рівнянні (2.10). З цього ми бачимо що тепловий ефект поверхонь тертя, величина якого не зводиться до компонента Онсагера та фіксується зовнішніми умовами (l-масштаб теплопровідності, $\tau_T \equiv I^2$, C_P/к- називають часом теплопровідності):

$$\tau_T\dot{T} = (\tau_T Q - T) - \frac{l^2\sigma\varepsilon}{k\tau_\varepsilon}, \qquad (2.11)$$

$$Q = Q_0 + \sigma^2 \,/\, C_p\eta_\varepsilon. \qquad (2.12)$$

Q_0-це тепловий потік від навколишніх твердих тіл до поверхневого шару. Квадратичний внесок показує, що напруга повинна бути включена в температуру поверхонь контакту тертя $T_e = \tau_T Q$. Врахування цього призводить до ускладнення подальшого аналізу, хоча окрім перенормування величин це ні до чого не призводить. Томуможна вважати, що для нашого рівняння компонент $T_e = \tau_T Q$ є постійним. Треба відмітити, що при виведенні рівняння (10) було прийнято рівноважне значення поверхневого шару , тобто температури льоду T_{00} рівні нулю. Не потрібно забувати що при терті є очевидний факт нагріву. Поверхня, спочатку нагрівається до температури$T_{00} \neq 0$, та T_{00}/τ_T необхідно додати до рівняння (2.12). Цим терміном описують релаксацію поточної температури яка проходить на поверхні льоду до його рівноважного значення T_{00} при відсутності теплового потоку Q.

Для зручності можна ввести наступні одиниці виміру:

$$\sigma_S = \left(C_p n_\varepsilon T_C, \tau_T\right)^{1/2},\ \varepsilon_s = \sigma_s \,/\, G_e, T_C \tag{2.13}$$

для σ,ε,T відповідно. Після цього основні рівняння (2.3), (2.7) і (2.11) виводяться до до такого вигляду, що що їх можна застосовувати до будь-якого в'язкопружного середовища [38]:

$$\tau_\varepsilon \dot{\varepsilon} = -\varepsilon+\sigma, \tag{2.14}$$

$$\tau_\sigma \dot{\sigma} = -\sigma+g\,(T-1)\varepsilon, \tag{2.15}$$

$$\tau_T \dot{T} = (\tau_T Q - T) - \sigma\varepsilon, \tag{2.16}$$

Де необхідно ввести константу

$$g = \frac{G_0}{G_\varepsilon} \tag{2.17}$$

Розглянувши рівняння можна стверджувати що вони мають форму, аналогічну схемі Лоренца [45]. Що в свою чергу дозволяє позначати термодинамічні, фазові, та кінетичні переходи [38-44].

2.3 Безперервний тип переходу між різними станами

Варто зазначити що загальний випадок рівнянь (2.14)– (2.16) не мають аналітичного рішення. Тому для їх подальшого вирішення необхідне адіабатичне наближення:

$$\tau_\sigma \ll \tau_\varepsilon,\ \tau_T \ll \tau_\varepsilon. \tag{2.18}$$

В цьому випадку за зміною деформації ε(t) в процесі еволюції слідують напруга σ(t) і температура T(t). Час релаксації деформації τε визначається часом переорієнтації молекул води при температурі $2x10^{-5}$с і τ_ε збільшується на декілька порядків при утриманні розплавленого шару льоду між поверхнями тертя [52-53]. Мікроскопічний Дебаевський час оцінюється співвідношенням $\tau_\sigma \approx$ a/c≈10^{-12}с, де a≈1 нм - постійна решітки або міжмолекулярна відстань, а c≈10^3 м/с швидкість звуку. Отже, за умови що перша з нерівностей (2.18) буде справедлива. Другу умову (2.18) можна записати у вигляді

$$l \ll L, \tag{2.19}$$

де L - максимальне значення характеристичної довжини теплопровідності та має вигляд

$$L = \sqrt{\frac{\chi v_\varepsilon}{c_\varepsilon^2}}, \tag{2.20}$$

термометрична провідність $\chi \equiv$ к/C_p, ефективна кінематична в'язкість $v_\varepsilon \equiv \eta_\varepsilon$/ ρ і швидкість звуку $c_\varepsilon \equiv (G_\varepsilon / p)^{\frac{1}{2}}$ (ρ - середня щільність). Для льоду ρ ≈ 916 кг / м^3, к ≈ 2,22 Вт/м*К, C_p≈2050 Дж/кг*К, G_ε≈10 ГПа і динамічної в'язкості води при зсуві η_ε ≈1,8·10^{-3}Па*с при T=0 ˚C, значення L ≈ 10 нм, що узгоджується як з з польовою і атомістичною теоріями так і з експериментами [16, 17], а також [27, 28].

Прирівнюючи до нуля ліву частину рівнянь (2.15-2.16), ми можемо виразити напругу σ і температуру T в термінах деформації:

$$\sigma = \frac{g\varepsilon(T_e-1)}{1+g\varepsilon^2}, \tag{2.21}$$

$$T=1+\frac{T_e-1}{1+g\varepsilon^2} \tag{2.22}$$

Виходячі з рівняння (2.22), на важливому інтервалі значень параметра T_e=τ_TQ>1 можна виділити що температура T поступово зменшується з ростом деформації ε від значення T_e при ε=0 до (T_e+1)/2 при ε =$\varepsilon_m \equiv \sqrt{1/g}$. Виходячи з цього можна стверджувати що саме негативний зворотний зв'язок напруги і деформації та температури в рівнянні (2.16) призводить зниження. Позитивний зворотний зв'язок температури та деформації на напругу в рівнянні (2.15) є основною причиною танення льоду. Тобто швидкість самоорганізації повинна збільшитись при збільшенні температури, однак з рівняння (2.16) ми бачимо що наслідком наростання деформації, є падіння температури, зростання якої є причиною збільшення ε. Залежність напруги від деформації (2.21) має лінійний перетин Гука при $\varepsilon \ll \varepsilon_m$ з ефективному модулі зсуву $G_{e_f} \equiv$ g ($T_e - 1$). При $\varepsilon=\varepsilon_m$ функція σ(ε) зростає до свого максимуму і тому $\varepsilon>\varepsilon_m$ не має фізичного сенсу. Саме тому постійна $\varepsilon_m \equiv \sqrt{1/g}$ відповідає максимально можливій деформації. Зростання модуля G_0 зменшує максимальну деформацію ε_m та збільшує ефективний модуль G_{e_f}, значення якого залежить від фонової температури льоду T_e.

При підстановці рівняння (2.21) в рівняння (2.14) отримаємо рівняння типу Ландау-Халатникова [32,42,54]

$$\tau_\varepsilon \dot{\varepsilon} = -\partial V/\partial \varepsilon. \quad (2.23)$$

Синергетичний потенціал в цьому випадку має таку форму

$$V=\frac{1}{2}[\varepsilon^2 + (1 - T_e) ln(1 + g\varepsilon^2)] \quad (2.24)$$

При стаціонарному стані ε=0 потенціал (2.24) набуває значення свого мінімуму.

РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ МОДУЛЯ ЗСУВУ НА ФАЗОВУ ДІАГРАМУ РЕЖИМІВ РОЗМ'ЯГШЕННЯ ЛЬОДУ

3.1 Залежність модуля зсуву від деформації

Для дослідження впливу деформації модуля зсуву розглянемо перше рівняння синергетичної моделі більш детально

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = -\frac{\varepsilon}{\tau_\varepsilon} + \frac{\sigma}{\eta\varepsilon} \tag{3.1}$$

Так само, як і в попередньому розділі у якості одиниці вимірювання часу (або масштабу часу) обираємо

$$t_s = \tau_\varepsilon.$$

Але тепер співвідношення $G_\varepsilon \equiv \eta_\varepsilon/\tau_\varepsilon \equiv G(\omega)|_{\omega\to 0}$ (де ω-кругова частота періодичного зовнішнього впливу) втрачає сенс. Для врахування переходу до режиму пластичної деформації можна використати апроксимацію

$$G_\varepsilon(\varepsilon) = \theta + \frac{G_\varepsilon - \theta}{1+(\varepsilon/\varepsilon_p)^\beta} \tag{3.2}$$

З урахуванням масштабного коефіцієнту β та масштабу дисперсії деформації ε_p.

Тоді для отримання безрозмірного вигляду розділимо рівняння (3.1) на масштаб для деформації зсуву

$$\frac{d\varepsilon/\varepsilon_S}{dt/\tau_\varepsilon} = -\varepsilon \,/\, \varepsilon_S + \frac{\tau_\varepsilon}{2\varepsilon}\sigma/\varepsilon_S \qquad (3.3)$$

і також врахуємо позначення

$$\frac{\theta}{G_e} = k$$

Аналогічним чином модифікуємо залежність (3.2) модуля зсуву від деформації

$$G_\varepsilon(\varepsilon) = G_\varepsilon \left(\frac{\theta}{G_\varepsilon} + \frac{1-\frac{Q\theta}{G_\varepsilon}}{1+\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_S}\Big/\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_S}\right)^\beta} \right) \frac{\theta}{G_\varepsilon}.$$

В кінцевому безрозмірному вигляді залежність модуля зсуву від деформації з урахуванням масштабних ефектів набирає вигляду

$$G_\varepsilon(\varepsilon) = G_\varepsilon \left(k + \frac{1-k}{1+(\varepsilon/\gamma)^\beta} \right). \qquad (3.4)$$

Тут введено також безрозмірний коефіцієнт

$$\gamma = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_s}.$$

Тоді замість (2.14) маємо залежність

$$\dot{\varepsilon}=-\varepsilon+\frac{1}{G_e(\varepsilon)}\cdot\frac{\sigma}{\varepsilon_s},$$

підставляючи до якої вираз (3.4) для першого рівняння нової синергетичної моделі отримаємо

$$\dot{\varepsilon}=-\varepsilon+\frac{1*\sigma}{G_\varepsilon\left(k+\frac{1-k}{1+(\varepsilon/y)^{\beta}}\right)\varepsilon_S}$$

Далі згадаємо зв'язок між масштабами виміру напруження та деформації зсуву

$$\sigma_s=G_\varepsilon\cdot\varepsilon_S$$

та введемо позначення

$$m(\varepsilon)=\frac{1}{k+\frac{1-k}{1+\left(\varepsilon/y\right)^{\beta}}}. \qquad (3.5)$$

В результаті нова синергетична модель, що враховує деформацію модуля зсуву та задає перехід від пружної деформації до пластичної, набирає вигляду

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}&=--\varepsilon+m(\varepsilon)\cdot\sigma;\\ \alpha\dot{\sigma}&=-\sigma+g(T-1)\varepsilon;\\ \beta_1\dot{T}&=T_e-T-\sigma\varepsilon.\end{aligned} \qquad (3.6)$$

Аналізуючи дану модель за допомогою адіабатичного наближення, можна отримати залежність синергетичного потенціалу, вигляд якого (на відміну від (2.24)) буде аналогічний тому, що описує фазові переходи за механізмом першого роду. Тобто на залежності такого потенціалу можливе співіснування двох мінімумів, або двох стаціонарних станів. Така ситуація характерна для переривчастого тертя, коли поверхні якби «прослизають» та зупиняються. Саме такий режим тертя призводить до сильного зношування матеріалу, а врахування в теоретичній моделі залежності модуля зсуву від деформації і реалізує опис таких експериментальних спостережень.

3.2 Врахування флуктуацій

Для врахування випадкових чинників, що можуть впливати на кожну складову основної синергетичної моделі, необхідно також врахувати флуктуації деформації, напруження та температури. Тобто до системи (3.6) додаємо δ-корельовані стохастичні гауссівські джерела з різними інтенсивностями

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= -\varepsilon + m(\varepsilon)\cdot\sigma + \sqrt{I_\varepsilon}\xi_1(t); \\ \alpha\dot{\sigma} &= -\sigma + g(T-1)\varepsilon + \sqrt{I_\sigma}\xi_2(t); \\ \beta_1\dot{T} &= T_e - T - \sigma\varepsilon + \sqrt{I_T}\xi_3(t). \end{aligned} \tag{3.7}$$

Спочатку розглянемо стаціонарний випадок за відсутності шумів. Використовуючи наближення для часів релаксації (див. попередній розділ) ліву частину другого рівняння системи (3.7) можна приблизно дорівняти

нулю. Тоді отримаємо криву навантаження (Рис. 3.1), або залежність напруження від деформації

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{m(\varepsilon)} = \varepsilon\left(k + \frac{1-k}{1+(\varepsilon/y)^{\beta}}\right).$$

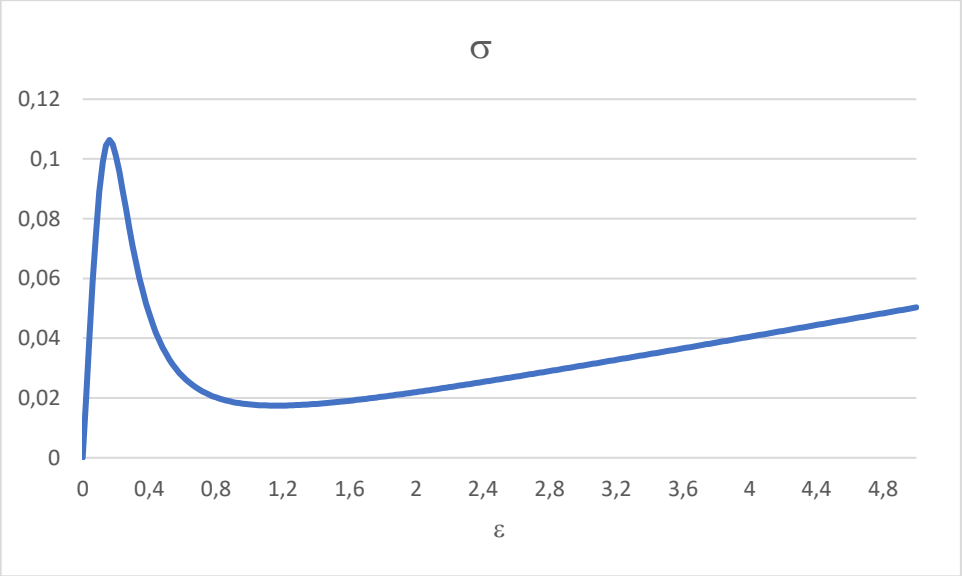


Рисунок 3.1 – Крива навантаження $\sigma(\varepsilon)$ для моделі (3.7) без врахування флуктуації та в рамках адіабатичного наближення (β=3, γ=0,2, k=0,01)

Як видно з Рис.3.1 окрім гуківського навантаження, що описує пружні деформації, для нашої моделі характерна також наявність ділянки пластичної деформації, що задається впливом залежності модулю зсуву від деформації.

Щоб проаналізувати вплив флуктуаційних складових необхідно розмірні інтенсивності шумів привести до безрозмірного вигляду. Тобто введемо масштаби для кожної інтенсивності:

$$\sqrt{I_\varepsilon}\cdot\frac{\tau_\varepsilon}{\varepsilon_s} \to \frac{\tau_\varepsilon^2}{\varepsilon_s^2} \text{ для } I_\varepsilon \to \varepsilon_s^2\tau_\varepsilon^{-2}$$

$$\sqrt{\perp_\sigma}\cdot\frac{1}{\sigma_s} \to \frac{1}{\sigma_s^2} \text{ для } \perp_\sigma \to \sigma_s^2$$

$$\sqrt{I_T} \cdot \frac{1}{Tc} \to \frac{1}{T_C^2} \text{ для } I_T \to T_C^2$$

Тоді в безрозмірному вигляді наша система рівнянь в межах адіабатичного наближення буде

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= -\varepsilon + m/(\varepsilon) \cdot \sigma + \sqrt{I_\varepsilon}\xi(t) \\ 0 &= -\sigma + g(T-1) + \varepsilon\sqrt{I_\sigma}\xi(t) \\ 0 &= T_e - T - \sigma\varepsilon + \sqrt{I_T}\xi(t)\,. \end{aligned} \tag{3.8}$$

Із третього рівняння системи отримаємо рівняння для температурної залежності

$$T(t) = \bar{T} + \tilde{T} \cdot \xi(t)$$

де

$$\bar{T} = \frac{Te+g\varepsilon^2}{1+g\varepsilon^2};\ \tilde{T} = \frac{\sqrt{I_T+I_\sigma\varepsilon^2}}{1+g\varepsilon^2}. \tag{3.9}$$

Зсувні напруження при цьому в межах того самого наближення будуть

$$\sigma(t) = \bar{\sigma} + \tilde{\sigma} \cdot \xi(t)$$

де

$$\bar{\sigma} = \frac{(T_e-1)g\varepsilon}{1+g\varepsilon^2};\ \tilde{\sigma} = \frac{\sqrt{I_\sigma+I_T g^2\varepsilon^2}}{1+g\varepsilon^2} \tag{3.10}$$

Як видно із (3.9)-(3.10) температура та напруження мають дві складові. Друга, стохастична, складова задається мультиплікативною (відносно деформації зсуву) функцією.

Далі введемо позначення

$$\frac{1}{1+g\varepsilon^2} = d(\varepsilon)\,. \tag{3.11}$$

А для інтенсивностей шумів врахуємо стандартне перетворення

$$\sqrt{I_\varepsilon} + \left(\sqrt{I_\sigma} + \sqrt{I_T}g\varepsilon\right)m(\varepsilon)\cdot d(\varepsilon) => \sqrt{I_\varepsilon + (I_\sigma + I_T g^2\varepsilon^2)m^2(\varepsilon)\cdot d^2(\varepsilon)}$$

$$= \sqrt{I(\varepsilon)}$$

Таким чином система трьох диференційних стохастичних рівнянь зводиться до рівняння для деформації зсуву

$$\dot{\varepsilon} = -\varepsilon + g(T_e - 1)\varepsilon\cdot m(\varepsilon)\cdot d(\varepsilon) + \sqrt{I_\varepsilon + (I_\sigma + I_T g^2\varepsilon^2)m^2(\varepsilon)\cdot d^2(\varepsilon)}\,\xi(t),$$

звідки похідна від синергетичного потенціалу може бути визначена виразом

$$\frac{\partial V}{\partial \varepsilon} = -f(\varepsilon) = \varepsilon - g(T_e - 1)\varepsilon\cdot m(\varepsilon)\cdot d(\varepsilon) =$$

$$= \varepsilon - g(T_e - 1)\cdot\varepsilon\cdot\frac{1}{k+\frac{1-k}{1+(\varepsilon/y)}\beta}\cdot\frac{1}{1+g\varepsilon^2} \tag{3.13}$$

Беручи інтеграл від (3.13), можна знайти потенціал, що описує стан системи при заданих параметрах.

3.3 Імовірність реалізації стаціонарних станів

Для знаходження імовірності розподілу стаціонарних значень деформації зсуву для нашої стохастичної системи можна використати рівняння Фоккера-Планка

$$\frac{\partial P(\varepsilon,t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial \varepsilon}[f(\varepsilon)\cdot P(\varepsilon,f)] + \frac{\partial}{\partial \varepsilon}\left[\sqrt{I_{(\varepsilon)}}\frac{\partial}{\partial \varepsilon}\sqrt{I_{(\varepsilon)}}\cdot P_{(\varepsilon,t)}\right]$$

Шуканий розподіл стає стаціонарним , коли

$$\frac{\partial P(\varepsilon,t)}{\partial t} = 0.$$

В результаті імовірність задається рівнянням

$$P(\varepsilon) = Z^{-1}\exp(-U(\varepsilon)),$$

де функція $U(\varepsilon)$ задається рівнянням

$$U(\varepsilon) = \frac{1}{2}\cdot lnI(\varepsilon) - \int_0^{\varepsilon}\frac{f(\varepsilon')}{I(\varepsilon')}d\varepsilon'.$$

Екстремуми даної функції визначають екстремуми розподілу. Щоб знайти ці екстремуми спочатку знаходимо похідні від залежності

$$m(\varepsilon) = \frac{1}{k+\frac{1-k}{1+(\varepsilon/y)^{\beta}}},$$

а саме

$$m'(\varepsilon)=-\left(k+\frac{1-k}{1+(\varepsilon/y)^{\beta}}\right)^{-2}\cdot\left(k+\frac{1-k}{1+(\varepsilon/y)^{\beta}}\right)'=$$

$$=\left(k+\frac{1-k}{1+(\varepsilon/y)^{\beta}}\right)^{-2}\cdot(1-k)\cdot\left(1+\left(\frac{\varepsilon}{y}\right)^{\beta}\right)^{-2}\cdot\left(1+\left(\frac{\varepsilon}{y}\right)^{\beta}\right)'=$$

$$=\frac{(1-k)\beta\cdot\left(\frac{\varepsilon}{y}\right)^{\beta-1}}{\left(1+\left(\frac{\varepsilon}{y}\right)^{\beta}\right)^{2}\left(k+\frac{1-k}{1+\left(\frac{\varepsilon}{y}\right)^{\beta}}\right)^{2}}$$

а також похідну

$$\left(\left(\frac{\varepsilon}{y}\right)^{\beta}\right)'=\beta\left(\frac{\varepsilon}{y}\right)^{\beta-1}.$$

Тоді рівняння, що визначає найбільш імовірні значення деформації зсуву набирає вигляду

$$m(\varepsilon)\cdot d^2(\varepsilon)\left\{[I_\sigma+I_T g^2\varepsilon^2]\left(m'(\varepsilon)-2g\varepsilon\cdot m(\varepsilon)\cdot d(\varepsilon)\right)+I_T g^z\varepsilon\cdot m(\varepsilon)\right\}=$$

$$=\varepsilon(g(T_e-1)m(\varepsilon)\cdot d(\varepsilon)-1) \qquad (3.14)$$

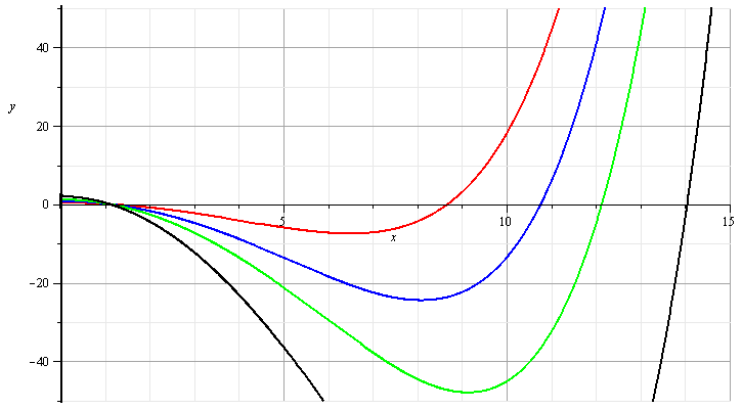
Границю існування нульового стаціонарного стану задає рівняння

$$T_e=1+g^{-1}-2I_\sigma+I_T g+I_\sigma\frac{\beta}{yg}(1-k)\left(\frac{\varepsilon}{y}\right)^{\beta-2} \qquad (3.15)$$

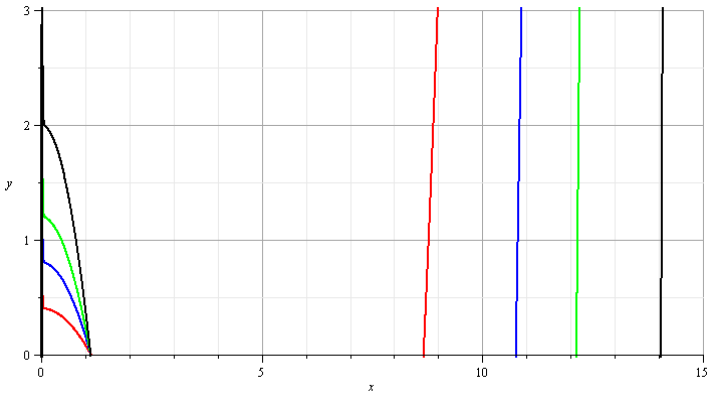
яке при $\beta=2$ буде

$$T_e=1+g^{-1}-2I_\sigma+I_T g+I_\sigma\frac{\beta}{yg}(1-k). \qquad (3.16)$$

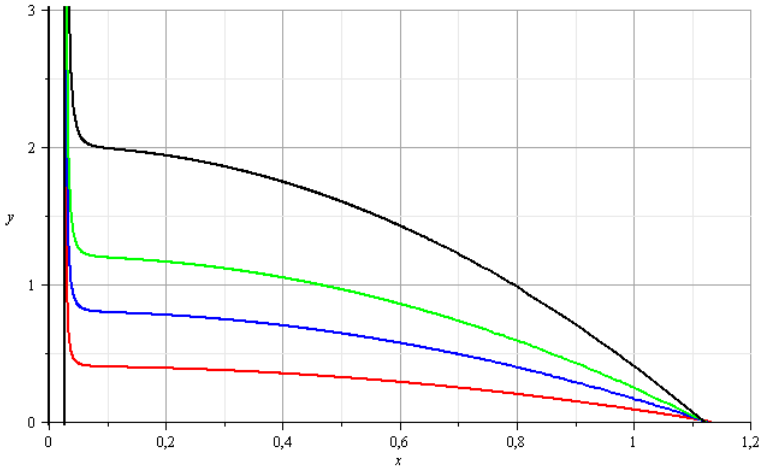
На рисунку 3.2 зображена залежність (3.14) для інтенсивності флуктуацій напруження зсуву.



а)



б)



в)

Рисунок 3.2 – Залежність (3.14) для інтенсивності I_σ флуктуацій напруження зсуву від деформації зсуву ε; β=3; γ=0,01; k=0,01; g=0,8; T_e=0,5; I_t=1;2;3;5 відповідно для червоної, блакитної, зеленої та чорної кривих.

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ РОБОТІ З ПК

При роботі за персональним комп'ютером (далі ПК) мають місце такі шкідливі фактори та небезпечні:

-фізичні;

-психофізіологічні.

До фізичних факторів можна віднести:

-підвищений рівень іонізації повітря.

-підвищене значення напруги електричного кола;

- підвищений рівень статичної електрики;

- підвищений рівень електромагнітного випромінювання;

До психофізіологічних факторів можна віднести:

- динамічні та статичні перевантаження;

- розумове перенапруження;

- перенапруження зору екранами пристроїв.

Для зменшення вірогідності небезпеки ураження електричним струмом одним з основних заходів є правильне розміщення устаткування та електричних кабелів. Іншими заходами щодо забезпечення електробезпеки можна порівнювати з загальними заходами електробезпеки та пожежобезпеки. Для забезпечення пожежної безпеки слід використовувати надійні розетки з пожежобезпечних матеріалів, приховану електромережу, силові мережі живлення устаткування виконувати спеціалізованими кабелями, розрахованими на підключення навантаження що перевищує номінальне у 3-5 разів, вимикати та вмикати живлення в обладнанні

виключно за допомогою штатних вимикачів. При роботі з комп’ютером є необхідність регулярно робити очищення їх внутрішніх частин та устаткування від пилу, розташувати комп'ютери потрібно тільки на окремих столах. Для того що б запобігти іскріння необхідно діставати та вставляти штепсельні вилки з розеток якомога рідше.

Основними приладами обладнання робочого місця користувача комп'ютера є монітор, системний блок, миша та клавіатура.

На рівень комфорту, безпеки й продуктивності роботи користувача впливають такі важливі фактори як положення монітора, масштабування зображення на екрані й освітлення— це важливі фактори.

Монітор на робочому місці розташовувати необхідно таким чином, щоб поверхня екрана знаходилася в центрі поля зору на відстані не меншої ніж 40-70 см від очей. Загальною рекомендацією з розміщування елементів робочого місця є такою, щоб витримувалася однакова відстань очей як від екрана, так і до клавіатури.

На робочому місці розташування монітору повинно відповідати стандартам безпеки: на відстані не менше 150 см від стін у яких є вікна, так як світло з вікон та мерехтіння екрану монітору мають дуже негативний вплив на зір, від інших стін на відстані не менше 100 см, між собою на відстані не менше 150 см. Робоче місце з монітором доцільно розташовувати відносно вікон таким чином, щоб природне освітлення падало на нього переважно з лівого боку. Робоче місце необхідно розташовувати враховуючи попадання в очі прямого сонячного світла, так як це призводить до бліків на екрані монітору та зайвого навантаження на очі. Освітлювальні джерела краще розташовувати з обох боків від екрану та паралельно напрямку погляду. Для того на екрані та клавіатурі уникнути світлових відблисків в напрямку очей, від світильників загального освітлення або сонячного світла,

необхідно використовувати спеціальні антибликові екранні фільтри , захисні козирки, на вікнах – штори або жалюзі.

Найвищу якість зображення забезпечують скляні поляризаційні фільтри. Такі фільтри усувають майже всі відблиски що значно знижує навантаження на очі роблячи зображення чіткішим та контрастнішим.

Ще одним важливим моментом що стосується здоров’я очей, є необхідність створення неоднорідного поля зору. Для створення цього ефекту на стіни можна повістити різноманітні елементи, наприклад можна розвісити на стінах картини, виконані у тонах, які не дуже кидаються в очі. Важливо пам’ятати що при роботі з текстом, найбільш фізіологічно правильним є зображення чорних позначок на білому фоні.

Вимоги до системи освітлення робочого місця з комп’ютером:

-освітленість робочого місця повинна відповідати характеру зорової роботи, який можна визначити такими трьома параметрами, фоном, який характеризується коефіцієнтом відбиття; контрастом об'єкта і фону, що розглядається на моніторі ПК об'єктом розрізнення – найменшим розміром об'єкта;

- для зменшення навантаження на очі необхідно забезпечити достатньо рівномірне освітлення з розподіленням яскравості як на робочій поверхні монітора і в межах навколишнього простору;

-на робочій поверхні різкі тіні повинні бути відсутні;

-в полі зору не повинно бути відблисків природнього та не природнього освітлення, як на самому екрані так і на навколишньому робочому просторі;

-Освітленість повинна бути незмінною під час роботи;

-в залежності від розташування комп’ютера слід обирати оптимальну спрямованість світлового потоку та необхідний склад світла.

Перед початком роботи необхідно дотримуватися таких вимог безпеки:

-система кондиціонування приміщення повинна буди ввімкненою;

-Особливу увагу необхідно звернути на надійне встановлення пристроїв на робочому столі, монітор повинен бути повернутий так, що б дивитись на екран було зручно під прямим кутом (а не збоку) і трохи зверху вниз, при цьому екран має мати невеликий нахил, нижній його край повинен бути ближче до користувача;

-перед початком роботи необхідно перевірити загальний стан елементів комп’ютера, перевірити електропроводку на справність, перевірити з'єднувальні кабелі, штепсельні вилки, розетки, заземлення захисного екрана;

- освітленість робочого місця повинна бути відрегульованою;

-також необхідно відрегулювати та зафіксувати висоту крісла, та зручне для користувача нахилення спинки крісла;

-перевірити приєднання до системного блоку всієї необхідної апаратури. Кабелі, що з'єднують системний блок з іншими пристроями, слід виймати та вставляти лише при вимкненому комп’ютері та з положенням (вимкнено) на вимикачі блоку живлення;

-ввімкнути вимикачами апаратуру комп'ютера на корпусах в правильній послідовності: монітор, системний блок, принтер (за необхідності);

- яскравість свічення монітора необхідно відрегулювати також потрібно налаштувати мінімальний розмір точки світла, фокусування та контрастність.

Під час виконання роботи за комп’ютером необхідно дотримуватися таких вимог безпеки:

-необхідно розташовувати клавіатуру на робочому столі у стійкому положенні;

-для запобігання несприятливого впливу (наприклад тунельного синдрому) на користувача пристроїв типу ”миша” необхідно забезпечити вільну велику поверхню столу для переміщення ”миші” і зручного упору ліктьового суглоба у такому положенні при якому зап’яток не буде вигнуто при триманні миші;

-при роботі за комп’ютером необхідно уникати сторонніх розмов, та шумів що відволікають;

-періодично прибирати ледь змоченою мильним розчином бавовняною ганчіркою пил з поверхонь апаратури(при вимкненому комп’ютері).

При роботі за комп’ютером:

-забороняється класти будь-які предмети на пристрої комп'ютера;

- забороняється прикривати будь-чим вентиляційні отвори пристроїв що може призвести до перегріву, і, в наслідок чого, виходу з ладу ПК;

-ставити пристрої друку на системний блок;

- використовувати засоби очищення поверхонь комп’ютера що мають рідинні або аерозольні властивості.

Для запобігання накопичення статичного струму рекомендується доторкатися до металевих поверхонь з деякою періодичністю.

При роботі за комп'ютером важливо забезпечити зручну робочу позу регулюванням висоти робочого столу, крісла та (за наявності) підставки для ніг.

Правильною робочою позою можна вважати таке положення тіла, при якому ступні розташовані горизонтально на підлозі, стегна у горизонтальній площині, верхні частини рук у вертикальному положенні. Ліктєвий суглоб повинен згибатися під кутом що коливається в межах від 70 до 90°, зап'ясток зігнутий під кутом 20° та менше, нахил голови 15-20°. Важливою частиною

робочого місця є форма спинки крісла користувача, яка повинна відповідати форму спини. Висота крісла регулюється відносно зросту користувача та повинна бути такою, щоб користувач не почував напруження на стегна або кістки тазу.

При роботі, з деякою періодичністю користувач повинен рухатися, змінювати положення свого тіла і робити перерви у роботі. Якщо користувач робить напружену роботу за комп'ютером він має щогодини робити перерву на 10-15 хвилин. Під час роботи бажано виконувати серію легких вправ для розслаблення декілька разів на годину. Для підвищення рівня продуктивності й комфорту роботи, необхідна регулярна зміна положення тіла, вставати та сідати , оскільки довге знаходження в одній позі може призвести до дискомфорту у м’язах і суглобах та виникнення надмірного напруження.

Нейтралізацію зарядів статичної електрики в приміщенні рекомендується зменшувати за допомогою кімнатних зволожувачів. Також для уникнення статичних розрядів не рекомендується носити синтетичний одяг

Комп’ютери останнього покоління використовують досить дієві засоби захисту, тим не менш небезпека лише зведена до мінімуму.

ВИСНОВКИ

Дана робота була присвячена проблемі таких явищ як тертя і зношування. Зношування контактних поверхонь призводить до порушення цілісності та герметичності вузлів та розшатування рухомих деталей. Тому дослідження у цьому напрямку є досить перспективними. Розуміння основних механізмів тертя льоду є особливо важливим у різних сферах застосувань. Результати досліджень показують, що причиною зниження тертя є водяна плівка, що виникає на поверхні льоду внаслідок нагрівання при терті

В роботі досліджується розм'якшення поверхні льоду при терті, що відбувається в результаті деформації зсуву. Така деформація може задаватися зовнішнім нагріванням. Для опису вказаного процесу були враховані в'язкопружні властивості середовища та рівняння теплопровідності.

Також в магістерській роботі було проведено дослідження впливу модуля зсуву на перехід від пружної деформації до пластичної для процесів на поверхні льоду. Вперше було використано масштабний коефіцієнт для задання деформації цього модуля. В результаті на отриманій кривій навантаження присутня ділянка, що відповідає пластичній деформації, яка підтверджена експериментально.

Досліджено вплив модуля зсуву, який залежить від деформації, та флуктуацій; знайдено функцію розподілу за значенням деформації; побудовано фазову діаграму можливих станів системи. Проаналізовані умови виникнення переривчастого режиму переходу до стану пом’якшеного льоду.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гаркунов, Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность: учеб. для вузов / Д.Н. Гаркунов. – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.

2. Погодаев, Л.И. Теория и практика прогнозирования износостойкости и долговечности материалов и деталей машин: учеб. для вузов / Л.И. Погодаев. – СПб.: Изд-во СПГУВК, 1997. – 415 с

3. Трение, износ и смазка. Трибология и триботехника: учеб. для вузов / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун; под ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

4. Беркович, И.И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: учеб. для вузов / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; под ред. Д.Г. Громаковского. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2000. – 268 с

5. Демкин, Н.Б. Контактирование шероховатых поверхностей: учеб. пособие / Н.Б. Демкин. – М.: Наука, 1970. – 226 с

6. Анухин, В.И. Допуски и посадки: учеб. пособие. / В.И. Анухин. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2007. – 84 с.

7. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Теоретическая физика. Т. 10: Физическая кинетика. - М.: Наука, 1979. – 528 с.

8. Полюшкин, Н.Г. Основы теории трения, износа и смазки: учеб. пособие / Н.Г. Полюшкин; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2013. – 192 с

9. Kietzig A.M., Hatzikiriakos S.G., Englezos P., J. Appl. Phys., 2010, 107, No. 8, 081101; doi:10.1063/1.3340792.

10. Persson B.N.J., Sliding Friction. Physical Principles and Applications, 2nd Edn., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2000; doi:10.1007/978-3-662-04283-0.

11. Kennedy F.E., Schulson E.M., Jones D.E., Philos. Mag. A, 2000, 80, No. 5, 1093; doi:10.1080/01418610008212103.

12. Schulson E.M., Fortt A.L., J. Geophys. Res. Solid Earth, 2012, 117, No. B12, B12204; doi:10.1029/2012JB009219.

13. Fülöp T., Tuononen A.J., Wear, 2013, 307, No. 1–2, 52; doi:10.1016/j.wear.2013.08.017.

14. Bowden F.P., Hughes T.P., Proc. R. Soc. London, Ser. A, 1939, 172, 280; doi:10.1098/rspa.1939.0104. 7. Wiese K., Kessel T.M., Mundl R., Wies B., Tire Sci. Technol., 2012, 40, No. 2, 124.

15. Bäurle L., Kaempfer T.U., Szabó D., Spencer N.D., Cold Reg. Sci. Technol., 2007, 47, No. 3, 276; doi:10.1016/j.coldregions.2006.10.005.

16. Marmo B.A., Blackford J.R., Jeffree C.E., J. Glaciol., 2005, 51, No. 174, 391; doi:

17.3189/172756505781829304. 10. Blackford J.R., Skouvaklis G., Purser M., Koutsos V., Faraday Discuss., 2012, 156, 243; doi:10.1039/C2FD00128D.

18. Kietzig A.M., Hatzikiriakos S.G., Englezos P., J. Glaciol., 2010, 56, No. 197, 473; doi:10.3189/002214310792447752.

19. Akkok M., Ettles C.M.M., Calabrese S.J., J. Tribol., 1987, 109, 552; doi:10.1115/1.3261503.

20. Evans D.C.B., Nye J.F., Cheeseman K.J., Proc. R. Soc. London, Ser. A, 1976, 347, 493; doi:10.1098/rspa.1976.0013.

21. Oksanen P., Keinonen J., Wear, 1982, 78, No. 3, 315; doi:10.1016/0043-1648(82)90242-3.

22. Stiffler A.K., J. Tribol., 1986, 108, No. 1, 105; doi:10.1115/1.3261128.

23. Stiffler A.K., J. Tribol., 1984, 106, No. 3, 416; doi:10.1115/1.3260949.

24. Colbeck S.C., J. Glaciol., 1988, 34, No. 116, 78.

25. Samadashvili N., Reischl B., Hynninen T., Ala-Nissilä T., Foster A., Friction, 2013, 1, No. 3, 242; doi:10.1007/s40544-013-0021-3.

26. Limmer D.T., Chandler D., J. Chem. Phys., 2014, 141, No. 18, 18C505; doi:10.1063/1.4895399.

27. Neshyba S., Nugent E., Roeselová M., Jungwirth P., J. Phys. Chem. C, 2009, 113, No. 11, 4597; doi:10.1021/jp810589a.

28. Landau L.D., Lifshitz E.M., Course of Theoretical Physics, Vol. 7: Theory of Elasticity, 3rd Edn., ButterworthHeinemann, Oxford, 1986.

29. Havranek A., Marvan M., Ferroelectrics, 1996, 176, 25; doi:10.1080/00150199608223597.

30. Landau L.D., Lifshitz E.M., Course of Theoretical Physics, Vol. 5: Statistical Physics, Butterworth, London, 1999.

31. Lifshits E.M., Pitaevskii L.P., Course of Theoretical Physics, Vol. 10: Physical Kinetics, 1st Edn., Pergamon Press, Oxford, 1981.

32. Bar'yahtar V.G., Olemskoi A.I., Fiz. Tverd. Tela (Sov. Phys.–Solid State), 1991, 33, No. 9, 2705 (in Russian).

33. Khomenko A.V., Yushchenko O.V., Phys. Rev. E, 2003, 68, 036110; doi:10.1103/PhysRevE.68.036110

34. Khomenko A.V., Phys. Lett. A, 2004, 329, No. 1–2, 140; doi:10.1016/j.physleta.2004.06.091.

35. Khomenko A.V., Lyashenko I.A., Tech. Phys., 2007, 52, No. 9, 1239; doi:10.1134/S1063784207090241

36. Khomenko A.V., Lyashenko I.A., Phys. Solid State, 2007, 49, No. 5, 936; doi:10.1134/S1063783407050228.

37. Khomenko A.V., Condens. Matter Phys., 2014, 17, No. 3, 33401; doi:10.5488/CMP.17.33401.

38. Rheology, Eirich F. (Ed.), Academic Press, New York, 1960.

39. Landau L.D., Khalatnikov I.M., Dokl. Akad. Nauk S.S.S.R., 1954, 96, 469 (in Russian).

40. Collected Papers of Landau L.D., ter Haar D. (Ed.), Pergamon Press, London, 1965.

41. Tusima K., In: New Tribological Ways, Ghrib T. (Ed.), 1st Edn., InTech, Rijeka, 2011; doi:10.5772/15085.

42. Olemskoi A.I., Khomenko A.V., Tech. Phys., 2000, 45, 672; doi:10.1134/1.1259700

43. Olemskoi A.I., Khomenko A.V., Tech. Phys., 2000, 45, 677; doi:10.1134/1.1259702.

44. Haken H., Synergetics. An Introduction. Nonequilibrium Phase Transitions and Selforganization in Physics, Chemistry, and Biology, 3rd Edn., Springer, Berlin, 1983.

45. Olemskoi A.I., Khomenko A.V., JETP, 1996, 83, No. 6, 1180.

46. Olemskoi A.I., Khomenko A.V., Kharchenko D.O., Physica A, 2003, 323, 263; doi:10.1016/S0378-4371(02)01991-X.

47. Olemskoi A.I., Khomenko A.V., Phys. Rev. E, 2001, 63, 036116; doi:10.1103/PhysRevE.63.036116.

48. Lyashenko I., Khomenko A., Metlov L., Tech. Phys., 2010, 55, No. 8, 1193; doi:10.1134/S1063784210080190.

49. Khomenko A.V., Lyashenko I.A., Borisyuk V.N., Ukr. J. Phys., 2009, 54, No. 11, 1139.

50. Khomenko A.V., Lyashenko I.A., Condens. Matter Phys., 2006, 9, No. 4(48), 695; doi:10.5488/CMP.9.4.695

51. Eisenberg D.S., Kauzmann W., The Structure and Properties of Water, 1st Edn., Oxford University Press, Oxford, 2011.

52. Yamada S., Langmuir, 2008, 24, No. 4, 1469; doi:10.1021/la701714g.

53. Metlov L.S., Phys. Rev. Lett., 2011, 106, 165506; doi:10.1103/PhysRevLett.106.165506

54. Khomenko A.V., Lyashenko I.A., Phys. Lett. A, 2007, 366, No. 1–2, 165; doi:10.1016/j.physleta.2007.02.010.

55. Khomenko A.V., Lyashenko I.A., J. Phys. Stud., 2007, 11, No. 3, 268 (in Ukrainian).

56. James H. Lever, Susan Taylor, Arnold J. The mechanics of snow friction as revealed by micro-scale interface observations, Journal of Glaciology (2018), 64(243) 27–36.

57. Patrick B. Louden and J. Daniel Gezelter. Friction at Ice/Water Interfaces Is Governed by Solid/Liquid Hydrogen-Bonding. J. Phys. Chem. C 2017, 121, 26764−26776

58. Bart Weber, Yuki Nagata, Stefania Ketzetzi. Molecular Insight into the Slipperiness of Ice. J. Phys. Chem. Lett. 2018, 9, 2838−2842.

59. Lever JH, Lines AP, Taylor S, Hoch GR, Asenath-Smith E, Sodhi DS (2021). Revisiting mechanics of ice–skate friction: from experiments at a skating rink to a unified hypothesis. Journal of Glaciology 1–20. https://doi.org/10.1017/jog.2021.97

60. Orgeldinger, C.; Tremmel, S. Understanding Friction in Cam–Tappet Contacts—An Application-Oriented Time-Dependent Simulation Approach

Considering Surface Asperities and Edge Effects. Lubricants 2021, 9, 106. https://doi.org/10.3390/lubricants9110106.

61. Lever JH, Asenath-Smith E, Taylor S and Lines AP (2021) Assessing the Mechanisms Thought to Govern Ice and Snow Friction and Their Interplay With Substrate Brittle Behavior. Front. Mech. Eng 7:690425.doi: 10.3389/fmech.2021.690425.

62. Sánchez, M. A., Kling, T., Ishiyama, T., van Zadel, M-J., Bisson, P. J., Mezger, M., Jochum, M. N., Cyran, J. D., Smit, W. J., Bakker, H. J., Shultz, M. J., Morita, A., Donadio, D., Nagata, Y., Bonn, M., & Backus, E. H. G. (2017). Experimental and theoretical evidence for bilayer-by-bilayer surface melting of crystalline ice. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 114(2), 227-232. https://doi.org/10.1073/pnas.1612893114

Додаток А

Програма для побудови залежності інтенсивності шуму напруження від деформації зсуву

> $b := 3;\ g := 0.8;\ k := 0.01;\ It := 1;\ It2 := 2;\ It3 := 3;\ It5 := 5;\ Is := 5;\ gam := 0.01;\ te := 0.5;$

$$de(x) := \frac{1}{1 + g \cdot x^2};$$

$$x \to \frac{1}{1 + g\, x^2}$$

$$me(x) := \frac{1}{k + \dfrac{(1-k)}{1 + \dfrac{x^b}{gam^b}}};$$

$$x \to \frac{1}{k + \dfrac{1-k}{1 + \dfrac{x^b}{gam^b}}}$$

$$y(x) := \frac{b \cdot (1-k) \cdot \dfrac{x^{b-2}}{gam^{b-2}}}{gam \cdot \left(1 + k\dfrac{x^b}{gam^b}\right) \cdot \left(1 + \dfrac{x^b}{gam^b}\right)} - 2 \cdot g \cdot me(x) \cdot de(x);$$

$$x \to \frac{b\,(1-k)\,x^{b-2}}{gam^{b-2}\, gam \left(1 + \dfrac{k\,x^b}{gam^b}\right)\left(1 + \dfrac{x^b}{gam^b}\right)} - 2\, g\, me(x)\, de(x)$$

$$Isigma(x) := \frac{1}{y(x)} \cdot \left(\frac{g \cdot (te-1) \cdot me(x) \cdot de(x) - 1}{me(x) \cdot de(x)^2} - It \cdot g^2 \cdot me(x)\right) - It \cdot g^2 \cdot x^2;$$

$$x \to \frac{\dfrac{g\,(te-1)\,me(x)\,de(x) - 1}{me(x)\,de(x)^2} - It\, g^2\, me(x)}{y(x)} - It\, g^2\, x^2$$

> $$Isigma3(x) := \frac{1}{y(x)} \cdot \left(\frac{g \cdot (te-1) \cdot me(x) \cdot de(x) - 1}{me(x) \cdot de(x)^2} - It3 \cdot g^2 \cdot me(x)\right) - It3 \cdot g^2 \cdot x^2$$

$$Isigma3 := x \to \frac{\frac{g\ (te-1)\ me(x)\ de(x)-1}{me(x)\ de(x)^2} - It3\ g^2\ me(x)}{y(x)} - It3\ g^2\ x^2$$

> $Isigma2(x) := \frac{1}{y(x)} \cdot \left(\frac{g \cdot (te-1) \cdot me(x) \cdot de(x) - 1}{me(x) \cdot de(x)^2} - It2 \cdot g^2 \cdot me(x) \right) - It2 \cdot g^2 \cdot x^2;$

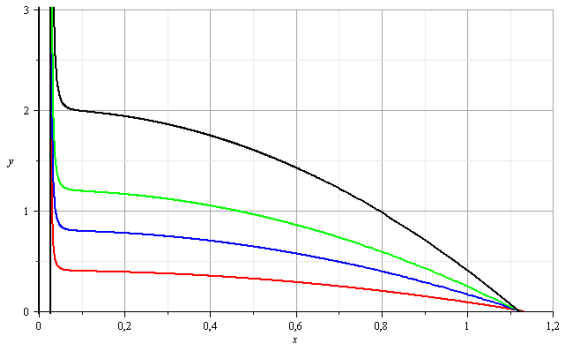
$$Isigma2 := x \to \frac{\frac{g\ (te-1)\ me(x)\ de(x)-1}{me(x)\ de(x)^2} - It2\ g^2\ me(x)}{y(x)} - It2\ g^2\ x^2$$

> $Isigma5(x) := \frac{1}{y(x)} \cdot \left(\frac{g \cdot (te-1) \cdot me(x) \cdot de(x) - 1}{me(x) \cdot de(x)^2} - It5 \cdot g^2 \cdot me(x) \right) - It5 \cdot g^2 \cdot x^2;$

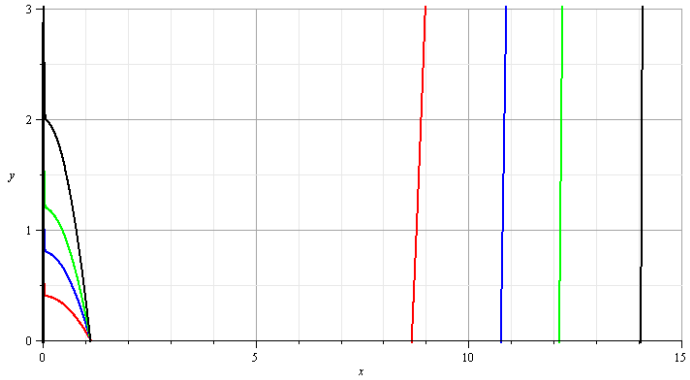
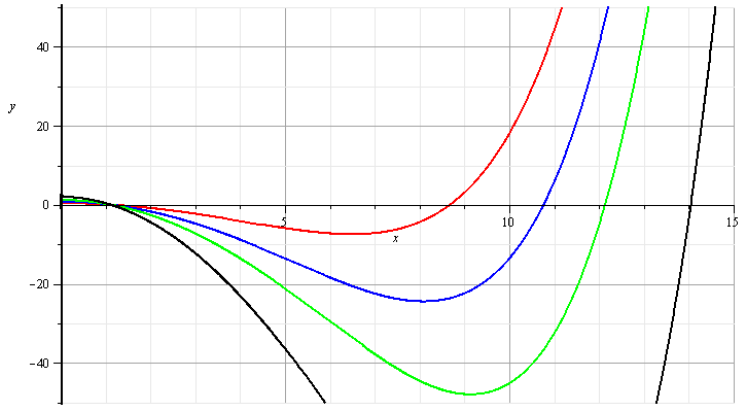
$$Isigma5 := x \to \frac{\frac{g\ (te-1)\ me(x)\ de(x)-1}{me(x)\ de(x)^2} - It5\ g^2\ me(x)}{y(x)} - It5\ g^2\ x^2$$

$$x \to \frac{\frac{g\ (te-1)\ me(x)\ de(x)-1}{me(x)\ de(x)^2} - It\ g^2\ me(x)}{y(x)} - It\ g^2\ x^2$$

> $plot([Isigma(x), Isigma2(x), Isigma3(x), Isigma5(x)], x = 0..1.2,\ y = 0..3, color = [red, blue, green, black], thickness = 2, numpoints = 2000)$



$plot([Isigma(x), Isigma2(x), Isigma3(x), Isigma5(x)], x = 0..15,\ y = 0..3, color = [red, blue, green, black], thickness = 2, numpoints = 2000)$



$plot([Isigma(x), Isigma2(x), Isigma3(x), Isigma5(x)], x = 0..15, y = -50..50, color = [red, blue, green, black], thickness = 2, numpoints = 2000)$