

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Мікосянчик Оксана Олександрівна

УДК 621.891


ДИСЕРТАЦІЯ
«СТРУКТУРНО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА РЕОЛОГІЧНІ ПОКАЗНИКИ
МАСТИЛЬНОГО ШАРУ В КОНТАКТІ ТЕРТЯ В УМОВАХ
НЕСТАЛИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ»

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Галузь знань 13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 О.О. Мікосянчик

Науковий консультант: Запорожець Олександр Іванович, доктор технічних наук,
професор

Київ – 2017

АНОТАЦІЯ

Мікосянчик О.О. Структурно-енергетичні та реологічні показники мастильного шару в контакті тертя в умовах несталих режимів роботи. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах». – Національний авіаційний університет, Київ, 2017.

В дисертаційній роботі вирішувалась науково-технічна проблема управління процесами самоорганізації дисипативних структур, забезпечення мінімізації зносу і підвищення ресурсу пар тертя шляхом розробки методик оцінки і вибору мастильних матеріалів з урахуванням структурно-енергетичних і реологічних факторів, спрямованих на зменшення інтенсивності накопичення енергії руйнування контактних поверхонь та мастильного шару, створення градієнтності міцністних характеристик внаслідок локалізації деформаційних процесів в тонкому поверхневому шарі.

Теоретичні дослідження виконані на підставі фундаментальних положень трибології, термодинамічної теорії прогнозування та руйнування твердих тіл, концепції самоорганізації та зносостійкості трибосистем, структурно-енергетичної пристосованості матеріалів, нерівноважної кінетики фазових переходів першого роду, положень трибохімії і реології мастильного шару. Лабораторні та стендові випробування виконувались на основі теорії моделювання та планування експерименту. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана із застосуванням комп'ютерних технологій з використанням методів математичного аналізу, методів кінцевих елементів та математичної статистики.

Визначені закономірності структурної пристосованості для різних марок сталей та мастильних матеріалів різного експлуатаційного призначення, які полягають у зниженні питомої роботи тертя, зменшенні напруги зсуву мастильного шару і коефіцієнта тертя, збільшенні періоду напрацювання до прояву першого етапу

знеміцнення поверхневих шарів металу, що забезпечує підвищення зносостійкості контактних поверхонь сталей в умовах кочення з проковзуванням 3 – 40%.

Встановлено, що активація поверхневих шарів металу в нестационарних умовах тертя при коченні з проковзуванням 10 - 40% і термомеханічна деструкція компонентів трансмісійних та моторних олиव обумовлюють формування ретикулярних граничних шарів шаруватої сітчастої структури, що характеризуються неньютонівськими властивостями, підвищенням адгезійної складової коефіцієнта тертя, підвищенням ефективної в'язкості негідродинамічної складової товщини мастильного шару.

В екстремальних умовах тертя збільшення проковзування з 10 до 40% призводить до зростання градієнта швидкості зсуву змащувальних шарів, в сформованих граничних шарах локально проявляються фазові переходи першого роду між твердим і рідким станом внаслідок їх плавлення при граничних значеннях зсувної деформації. Підвищення швидкості ковзання з 0,6 до 1,15 м/с при коченні пар тертя в екстремальних умовах є ведучим фактором, що обумовлює підвищення інтенсивності тепловиділення в контакті, локальне збільшення температури, зростання питомої роботи тертя, деструкцію граничних шарів, руйнування метастабільних вторинних структур.

Встановлено підвищення температурно-механічної стійкості граничних змащувальних шарів зі збільшенням в'язкості базової основи олив, наявністю поліфункціональних присадок при тисках, що призводять до пружно-пластичної деформації контактних поверхонь, і швидкостях ковзання, що обумовлюють появу високих градієнтів швидкості зсуву змащувальних шарів.

Встановлено взаємозв'язок енергетичного параметра (питомої роботи тертя) і зносостійкості сталі від типів вторинних структур, що утворюються на контактних поверхнях в процесі самоорганізації. Для вторинних структур I типу характерні низькі показники питомої роботи тертя, високий ступінь знеміцнення поверхневих шарів металу, аморфізація приповерхневих шарів металу на глибину 40 - 50 мкм, відсутність насичення активними елементами, що призводить до інтенсифікації зношування. Вторинні структури II типу характеризуються підвищенням

зносостійкості внаслідок збільшення енергоємності контакту, формування граничних хемосорбційних плівок, зміцнення поверхневих шарів металу, збільшення вагової частки кисню і сірки в приповерхневих шарах металу на глибині до 50 мкм.

Запропоновані емпіричні залежності величини максимальних дотичних напружень в контакті та глибини їх залягання з урахуванням триботехнічних параметрів контакту. Зростання швидкості ковзання обумовлює зміну напружено-деформованого стану контактних поверхонь за рахунок появи дотичних напружень зсуву при терті, вектор яких локалізується не тільки по товщині змащувального шару, але й опускається в приповерхневі шари металу. Збільшення проковзування до 20% та 40% обумовлює підвищення максимальних дотичних напружень в 1,7 та 2,27 раз та зростання глибини їх залягання в 1,85 та 3,65 разів в умовах граничного / напівсухого режимів мащення відповідно, в порівнянні з гідродинамічним режимом мащення.

Визначені триботехнічні характеристики покриттів самофлюсуючого гранульованого порошку ПГ-АН9 та порошкового дроту ПП-Нп-30ХГСА для оптимізації технологічних процесів нанесення покриттів при виготовленні та зміцненні, ремонті та відновленні зубчастих коліс та шестерен.

Наукова новизна роботи полягає в наступних основних положеннях.

Розроблена термо-кінетична модель оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно-енергетичних параметрів в умовах змащування при несталих режимах роботи, яка включає методику оцінки активаційних характеристик матеріалів, що характеризують довговічність області багатоциклової втоми і області малоциклової втоми debris-шару. Встановлено вплив напружено-деформованого стану матеріалу контактних поверхонь, ступеня зміцнення приповерхневих шарів, типу вторинних структур і граничних плівок мастильного матеріалу на енергію активації руйнування при терті, яка становить 110 – 300 кДж/моль для різних марок сталей. Вперше встановлено, що параметр зовнішнього середовища ΔG може змінювати енергію активації руйнування від -10 до +35 кДж/моль залежно від типу мастильного матеріалу, питомої роботи тертя, ступеня зміцнення – знеміцнення контактних поверхонь.

Розроблена методика розрахунку інтенсивності зношування елементів трибоспрямижень, що працюють в умовах кочення з проковзуванням, яка враховує кінетику зміни антифрикційних, реологічних, енергетичних характеристик контакту та довговічність debris-шару.

Розроблено математичну модель оцінки локалізації вектора максимальних дотичних напружень при переході трибосистеми від гідродинамічного до граничного режиму мащення на підставі експериментально встановленої зміни напружено-деформованого стану поверхонь в результаті появи зон локального підвищеного зносу, градієнтного розподілу мікротвердості поверхневих шарів металу по глибині і моделювання напружено-деформованого стану поверхневих шарів методом скінченних елементів.

Встановлено залежність зносостійкості контактних поверхонь від структурно-фазових перетворень у поверхневих шарах металів при терті в умовах кочення з різним ступенем проковзування. Результатом комбінованого впливу динамічного навантаження, дотичних напружень зсуву, питомої роботи тертя і збільшення локальної температури при граничному режимі мащення є зростання міжплощинних відстаней, формування макронапружень стиснення, зміна кристалографічної текстури у поверхневому шарі внаслідок інтенсивної деформації при терті.

Встановлені залежності інтенсивності зношування трибоелементів від зміни енергоємності контакту при структурній пристосованості вторинних структур на основі оцінки температурної і механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу і міцності матеріалу контактних поверхонь. Формування мастильними матеріалами граничних хемосорбційних та хімічномодифікованих шарів товщиною 0,5 – 2 мкм обумовлює зниження питомої роботи тертя в контакті в 1,7...4 рази, зменшення деформованого об'єму металу в 1,3...2,3 рази. Збільшенню періоду нормальної роботи трибоспрямижень до проявів ознак схоплювання в 1,7 – 3,8 раз в екстремальних режимах мащення сприяє введення в базову основу олів протизношувальних присадок, зміцнення контактних поверхонь за технологією імпульсного термоциклічного іонного азотування.

Теоретично і експериментально обґрунтований механізм прояву процесу схоплювання контактних поверхонь з позицій фазових переходів першого роду в граничних шарах мастильного матеріалу. Коливальний характер стрімкого збільшення або зменшення товщини мастильного шару, коефіцієнта тертя і питомої роботи тертя при схоплюванні обумовлений переходом упорядкованих твердокристалічних шаруватих ретикулярних структур мастильного матеріалу в рідку фазу при збільшенні локальної температури в контакті до 125 – 400⁰С і градієнта швидкості зсуву до $(0,67 - 86) \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$.

Встановлені механізми, які визначають зміну реологічних характеристик граничних змащувальних шарів при надбанні мастильним матеріалом неньютоновських властивостей. Визначено вплив гідродинамічної і негідродинамічної складової товщини мастильного шару на кінетику зміни вектору дотичних напружень, адгезійної складової коефіцієнта тертя, ступеня зміцнення - знеміцнення поверхневих шарів елементів трибоспряжень при переході гідродинамічного режиму мастильного дії до граничного або напівсухого.

Розроблено модель оцінки триботехнічних характеристик трибоспряження верхнє компресійне кільце - гільза циліндра двигуна внутрішнього згоряння в залежності від параметрів конструкції двигуна, матеріалів пар тертя, умов роботи ДВЗ і властивостей мастильного матеріалу. Створена методика оцінки змащувальних, антифрикційних, реологічних та протизношувальних характеристик мастильного матеріалу. Вперше в алгоритмі розрахунку товщини мастильного шару встановлена кінетика зміни динамічної в'язкості та п'єзокоефіцієнту в'язкості мастильного матеріалу в контакті залежно від *i*-го кута повороту кривошипа. Методика апробована для широкого спектру моделей двигунів транспортних засобів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в підвищенні зносостійкості вузлів тертя машин і механізмів на етапах їх проектування, експлуатації та ремонту шляхом підбору сумісності трибоелементів на основі науково-обґрунтованого вибору застосування методик оцінки триботехнічних характеристик контактних поверхонь, мастильного матеріалу та довговічності

зношеного шару при самоорганізації дисипативних структур в несталих умовах тертя.

Розроблено і впроваджено в практику експериментальних випробувань програмно-апаратний комплекс для оцінки триботехнічних характеристик фрикційного контакту. Програмні засоби комплексу забезпечують реєстрацію, збереження та обробку кінетики зміни змащувальних, антифрикційних, реологічних та енергетичних параметрів в реальному часі в несталих умовах роботи. Розроблено спосіб припрацювання контактних поверхонь в нестационарних умовах тертя на основі оцінки завершення етапу припрацювання за кінетикою зміни питомої роботи тертя, антифрикційних характеристик контакту та змащувальних і полімеризаційних властивостей мастильного матеріалу. Розроблено спосіб оцінки динамічної ефективної в'язкості мастильних матеріалів при формуванні гідро- та негідродинамічної складових товщини мастильного шару в несталих умовах тертя.

Розроблена методика оцінки температурно-механічної стійкості граничних шарів мастильного матеріалу в екстремальних режимах тертя при контактних напруженнях, що призводять до пружно-пластичної деформації контактних поверхонь і швидкостях ковзання, що обумовлюють появу високих градієнтів швидкості зсуву змащувальних шарів.

Запропонована методика оцінки величини енергії активації руйнування поверхневих та приповерхневих шарів контактних поверхонь при несталій роботі пар тертя з урахуванням тривалості напрацювання до прояву перших ознак схоплювання елементів трибоспряжень та локального підвищення температури в зоні контакту.

Створені рекомендації щодо товщини, фізико-механічних властивостей та структурної пристосованості зносостійких покриттів з урахуванням локалізації максимальних дотичних напружень зсуву при різних режимах мащення.

Розроблена методика оцінки триботехнічних показників трибоспряження верхнє компресійне кільце – гільза циліндра двигуна внутрішнього згоряння залежно від робочого процесу.

Розроблений програмно-апаратний комплекс, програмне математичне забезпечення, способи і методики використовуються при проведенні наукових

досліджень, виборі складу, структури та технологій нанесення зносостійких покриттів і удосконаленні мастильних матеріалів різного експлуатаційного призначення на підприємствах та установах України.

Ключові слова: товщина мастильного шару, ефективна в'язкість, дотичні напруження, інтенсивність зношування, коефіцієнт тертя, питома робота тертя, енергія активації руйнування, структурно-фазові перетворення, мікротвердість, несталі умови тертя.

Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані в 50 наукових працях.

У фахових виданнях:

1. Порівняльні реологічні характеристики мінеральних і синтетичних масел / Р. Г. Мнацаканов, В. І. Маленко, О. О. Мікосянчик, О. Є. Якобчук // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2006. – Вип. 45. – С. 170-178.
2. Модифікація поверхонь тертя чавун-сталь нанодисперсною добавкою фулерен C_{60} / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, С. С. Кроль, О. О. Мікосянчик // Дороги і мости: зб. наук. статей. – К. : ДерждорНДІ, 2006. – Вип. 5. – С. 312-320.
3. Математична модель ефективності мащення нанодисперсної добавки C_{60} в контакті тертя / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, С. С. Кроль // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К. : НТУ, 2006. – № 3. – С. 5-7.
4. Аналіз взаємозв'язку триботехнічних параметрів суспензії графіту ГС-4 на основі факторного методу / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, С. С. Кроль, О. О. Мікосянчик // Вісник: наук.-техн. зб. – К.: НТУ, 2006. – № 11. – С. 3-5.
5. Змащувальна здатність, антифрикційні та протизношувальні властивості масел для гідромеханічних коробок передач / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, С. С. Кроль, Мікосянчик О.О. // Вісник: наук.-техн. зб. – К.:НТУ, 2006. – № 12. – С. 5-9.
6. Домінуючий вплив еластогідродинамічних чинників в нестационарних режимах тертя / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куш // Вісник: наук.-техн. зб. в 2-х ч. Ч. 1. – К.: НТУ, 2006. – № 13. – С. 3-5.

7. Вплив нанодисперсної добавки фулерена C_{60} на триботехнічні характеристики трансмісійного масла в період припрацювання / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Кущ // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К.: НТУ, 2007. – № 4. – С. 5-7.
8. Підвищення надійності трансмісій автомобіля шляхом оптимізації робочих параметрів зони контакту / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. В. Руденко // Вісник: наук.-техн. зб. – К.: НТУ, 2007. – № 14. – С. 5-8.
9. Кінетика формування експлуатаційної шорсткості контактних поверхонь / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Кущ // Вісник: наук.-техн. зб. в 2-х частинах: Ч.1. – К.: НТУ, 2007. – № 15. – С. 15-18.
10. Динаміка зношування контактних поверхонь при введенні нанодобавки / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Кущ // Вісник: наук.-техн. зб. – К.: НТУ, 2008. – № 16. – С. 3-6.
11. Математична модель оцінки ефективності мащення механізмів з локальною формою контакту / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Кущ // Автошляховик України (окремий вип.). – Вісник Центр. наук. центру транспортної акад. України. – 2009. – № 12. – С. 133-134.
12. Механізм зношування Ст45 при додаванні до мастильного матеріалу бутилкаучуку / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, Ю. О. Туриця // Машинознавство. – 2009. – № 11 (149). – С. 36-38.
13. Закономірності зношування пар тертя в умовах динамічного навантаження / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, Ю. О. Туриця // Вісник: наук.-техн. зб. в 2-х ч. Ч.2. – К.: НТУ, 2010. – № 21. – С. 48-52.
14. Мікосянчик О. О. Кінетика зміни мікротвердості поверхневих шарів металу при адаптації граничних адсорбційних шарів мастильного матеріалу в зоні контакту / О. О. Мікосянчик // Проблеми тертя та зношування. – 2013. – № 2 (61). – С. 56-61.
15. Оцінка динамічної ефективної в'язкості мастильних матеріалів в триботехнічному контакті / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, М. В. Кіндрачук, М. С. Хімко // Проблеми тертя та зношування. – 2014. – № 4 (65). – С. 83-89.

16. Мікосянчик О. О. Моделювання інтенсивності зношування гільзи циліндра двигуна внутрішнього згоряння / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, М. С. Хімко // Проблеми тертя та зношування. – 2015. – № 1 (66). – С. 140-145.

17. Структурно-фазовые превращения в покрытиях из сталей ферритного и мартенситного классов при их напылении и модифицировании электроконтактной обработкой / М. И. Черновол, Т. В. Ворона, Е. Е. Кожевникова, О. А. Микосянчик, Л. А. Лопата // Проблеми тертя та зношування. – 2015. – № 2 (67). – С. 99-109.

18. Реологічні властивості змащувальних шарів та енергонавантаженисть в контактї тертя при змінних контактних напругах / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, М. С. Хімко, С. В. Шакулієв // Проблеми тертя та зношування. – 2015. – № 4 (69). – С. 140-145.

19. Мікосянчик О. О. Автоматизований триботехнічний комплекс для оцінки змащувальних процесів в парах тертя / О. О. Мікосянчик, О. І. Запорожець, Р. Г. Мнацаканов // Проблеми трибології. – 2015. – № 4 (78). – С. 42-48.

20. Оценка структурно-энергетических показателей пар трения при работе в режиме пуск – остановка / О. О. Микосянчик, Р. Г. Мнацаканов, А. Ю. Кумурджи, С. В. Шакулієв // Проблеми тертя та зношування. – 2016. – № 1 (70). – С. 11-20.

21. Микосянчик О. О. К вопросу выбора методики установления функциональных взаимосвязей трибопроцессов при экспериментальном исследовании пар трения с локальным контактом / О. О. Мікосянчик, Н. О. Кузин // Проблеми тертя та зношування. – 2016. – № 4 (73). – С. 4-12.

22. Змащувальна дія олив при нестационарних процесах в умовах припрацювання / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, В. М. Лопата, В. І. Калініченко // Проблеми трибології. – 2016. – № 1 (79). – С. 69-76.

23. Оценка энергетических, реологических и противоизносных характеристик контакта в условиях качения с переменным скольжением / О. А. Микосянчик, Р. Г. Мнацаканов, В. И. Калиниченко, А. В. Куцев // Проблеми трибології. – 2016. – № 3 (81). – С. 6-14.

24. Микосянчик О. О. Влияние переменного градиента скорости сдвига на реологические и противоизносные свойства контакта в режиме пуск – остановка / О.

А. Микосянчик // Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип. 3 (98), ч. 1. – С. 48-55.

25. Анализ триботехнических характеристик самофлюсующихся покрытий в условиях качения со скольжением при нестационарном нагружении / О. А. Микосянчик, Б. А. Ляшенко, М. С. Агеев, В. М. Лопата // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 2/1 (28). – С. 4-9.

26. Микосянчик О. О. Термо - кинетическая модель оценки долговечности контактных поверхностей в условиях смазочного действия в нестационарных режимах работы / О. О. Микосянчик // Проблеми тертя та зношування. – 2017. – №1 (74). – С. 65–77.

27. Influence of the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions / О. Mikosyanchyk, R. Mnatsakanov, A. Zaporozhets, R. Kostynik // Eastern-European J. Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/1 (82). – P. 24-31.

У іноземних спеціалізованих виданнях:

28. Кинетика изнашивания контактных поверхностей при использовании добавки фуллерена C_{60} к моторному маслу / Н. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. А. Микосянчик, А. И. Куш // Трение и износ. – 2009. – Т. 30, № 6. – С. 550–555.

29. Evaluation of effectiveness the breaking-in of friction pair in the non-stationary work conditions / Tareq M.A. Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov, M. S. Khimko // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. – 2015. – № 9 (33). – P. 301–307.

30. Structural-Energy characteristics of tribotechnical contact in unsteady / M. A. Tareq Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov, A. Zaporozhets // Modern Mechanical Engineering. – 2016. – № 6. – P. 91–97.

31. Al-quraan Tareq M. A. The Effect of the Slippage Degree at Rolling with Slipping on the Wear Resistance of Contact Surfaces / Tareq M.A. Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov // Mechanical Engineering Research. – 2016. – Vol. 6, № 2. – P. 48–61.

32. Al-quraan Tareq M. A. Temperature Resistance of the Boundary Lubrication Layers Under Rolling With Slippage Condition / Tareq M.A. Al-quraan, O.O. Mikosyanchik, R.G. Mnatsakanov // International Journal of Mechanical Engineering and Applications. – 2017. – Vol. 5, № 2. – P. 78–86.

Матеріали та тези конференцій:

33. Вплив фізико-хімічного складу масел для гідромеханічних коробок передач на кінетику формування мастильного шару / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, С. С. Кроль, О. О. Мікосянчик // Materialy XVII Konf. Miedzynarodowej: “Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych”, (Rzeszów, 20-23 wrzesień 2006 r.). – Rzeszów: Politechnika, 2006. – P. 43–48.

34. Дмитриченко М. Ф. Розроблення методики прогнозування довговічності вузлів тертя двигунів внутрішнього згоряння та трансмісій автомобілів в нестационарних умовах / М. Ф. Дмитриченко, О. О. Мікосянчик, І. М. Козоріз // LXV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2009. – С. 6-7.

35. Динамика интенсивности изнашивания контактных поверхностей при использовании добавки фуллерена C_{60} / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куш // Полимерные композиты и трибология : междунар. науч.-техн. конф., 22-25 июня 2009 г., Гомель: тезисы докл. – Гомель: ИММС им. В. А. Белого НАН Беларуси, 2009. – С. 72.

36. Дмитриченко М. Ф. Вплив навантаження на динаміку формування мастильного шару в еластогідродинамічному контакті / М. Ф. Дмитриченко, О. О. Мікосянчик, І. М. Козоріз // LXVI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2010. – С. 7.

37. Дмитриченко М. Ф. Моделювання та розрахунок трибологічних процесів пар тертя в двигуні внутрішнього згоряння / М. Ф. Дмитриченко, О. О. Мікосянчик, Ю. П. Ярошенко // LXVII наукова конференція професорсько-викладацького складу,

аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2011. – С. 6.

38. Ефективність мащення олив в контактi залежно від терміну їх експлуатації / Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, Ю. О. Туриця, О. В. Руденко // Ольвійський форум-2011: стратегії України в геополітичному просторі: міжнарод. наук.-практ. конф., 8-12 червня 2011 р., Ялта, Крим, Україна: тези доп. – Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. –Т. 11 – С. 5.

39. Мнацаканов Р. Г. Визначення впливу трибологічних процесів на міцнісні характеристики приповерхневих шарів контактних поверхонь / Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, Ю. О. Туриця // Ольвійський форум-2012: стратегії України в геополітичному просторі: міжнар. наук.-практ. конф., 6-10 червня 2012 р., Севастополь, Крим, Україна: тези доп. – Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2012. – Т. 12. – С. 24-25.

40. Способ получения износостойких покрытий / М. И. Черновол, Т. В. Ворона, О. О. Микосянчик, Л. А. Лопата, В. И. Жорник // Инженерия поверхности и реновация изделий: 15-я международ. науч.-техн. конф., 1-5 июня 2015 г., Одесская обл., Затока : тезисы докл. – К., 2015 – С. 206-208.

41. Мікосянчик О. О. Износостойкость покрытия стали на чугуна в условиях качения с проскальзыванием / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов // Трибологія, енерго- та ресурсозбереження: міжнарод. наук.-практ. конф. в рамках Х Міжнар. наук.-практ. конф. „Ольвійський форум-2016”, 9-12 червня 2016 р., Миколаїв, Коблево, Україна: тези доп. – Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2016. –Т. 12 – С. 31–33.

42. Алгоритм визначення товщини мастильного шару між першим компресійним кільцем та гільзою циліндра ДВЗ залежно від робочого процесу / О. О. Мікосянчик, З. Є. Новохатська, М. О. Хом'якова, М. В. Ціркун // Авіа-2013: XI Міжнародної наук.-техн. конф., 21-23 травня, 2013 р., Київ: матеріали. – К.: НАУ, 2013. – Т. 3. – С. 25–28.

43. Мікосянчик О. О. Вплив контактного навантаження на антифрикційні властивості базових олив / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, М. С. Хімко, М. А.

Петренко // Авіа-2015: XII Міжнародної наук.-техн. конф., 28-29 квітня 2015, Київ: матеріали. – К.: НАУ, 2015. – С. 25–28.

44. Мікосянчик О. О. Нестационарні процеси як фактор припрацювання пар тертя / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, С. В. Шакулієв // Технічна творчість: зб. наук. праць (вип. присвячено Міжнародній наук.-техн. конф. молодих науковців «Сучасні технології в механіці», 21-23 квітня 2016 р., м. Хмельницький. – Хмельницький: ХНУ, 2016. – № 1. – С. 101–103.

45. Tribotechnical characteristics of self-fluxing covering in non-stationary condition of friction / O. O. Mikosianchik, R. G. Mnatsakanov, A. M. Khimko, M. S. Khimko, M. S. Shakuliev // Aviation in the XXI-st century: Safety in Aviation and Space Technologies, 19-21 september, 2016 Kyiv, Ukraine: proceedings the seventh world congress. – Kyiv: NAU, 2016. – P. 1.4.51–1.4.56.

Патенти та свідоцтва:

46. Пат. 88748, Україна, МПК G01N 3/56. Пристрій для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів / Мікосянчик О. О.; заявник та патентовласник Мікосянчик О. О. – № у 2013 13450; заявл. 19.11.2013; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6. – 4 с.

47. Пат. 89261, Україна, МПК G01N 11/00. Спосіб оцінки динамічної ефективності в'язкості мастильних матеріалів в триботехнічному контакті / Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Кіндрачук М. В.; заявник та патентовласник Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Кіндрачук М. В. – № у 2013 14086; заявл. 04.12.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7. – 4 с.

48. Пат. 92071, Україна, МПК G01N 3/56. Спосіб припрацювання пар тертя в нестационарних умовах роботи / Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко М. С.; заявник та патентовласник Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко М. С. – № у 2014 02492; заявл. 13.03.2014; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14. – 4 с.

49. Пат. 98452, Україна, МПК G23C 14/00. Спосіб отримання твердого покриття з підвищеним опором втомному руйнуванню на поверхні металевого виробу / Кіндрачук М. В., Духота О. І., Кудрін А. П., Тісов О. В., Мікосянчик О. О., Науменко Н. О.; заявник та патентовласник Кіндрачук М. В., Духота О. І., Кудрін А. П., Тісов

О. В., Мікосянчик О. О., Науменко Н. О. – № и 2014 12654; заявл. 25.11.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8. – 6 с.

50. Свідоцтво 38664. Методика розрахунку триботехнічних параметрів паркування двигуна внутрішнього згорання / Мікосянчик О. О.; заявник та власник Національний транспортний університет. – № 38824, заявл. 31.03.2011; зареєстровано 21.06.2011. – 2 с.

ANNOTATION

Mikosyanchik O.O. The structural, energy and rheological indicators of lubricant layer in friction contact under non-stationery friction conditions. - Qualifying scientific work on the right of manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 05.02.04 «The friction and wear in the machines». – National Aviation University, Kyiv, 2017.

The thesis was solving the scientific and technical problem of the process control of self-organization in dissipative structures; minimization of wear and resource increasing of friction pairs by developing methodology for evaluation and selection of lubricants, that take into account the structural, energy and rheological indicators to reduce the intensity of accumulation of demolishing energy for contact surfaces and lubricant layer; creating the gradient of durable characteristics through the localization of the deformation processes in thin surface layer.

Theoretical research was based on fundamental principals of tribology; the thermodynamic theory of prediction and fracture of solids; the concept of self-organization and tribosystem durability; the structural and energy adaptation of materials; the non-equilibrium kinetics of the phase transitions of the first order; the principals of tribochemistry and rheology of lubricant layer. The laboratory and bench tests were performed based on the modelling theory and experimental design. The analysis of the results of experimental studies was conducted with computer software application using mathematical analysis, finite element method and mathematical statistics.

The regularities of structural adaptation for different steels grades and lubricants serving to various operational purposes were defined. The regularities reflect the reduction of the specific work of friction, decrease in shear stress of lubricant layer and friction coefficient, increase in the operational time till the manifestation of the first phase of metal surface layers softening; which, in its turn, enhance the durability of the steel contact surfaces under rolling with sliding condition from 3% to 40%.

It is determined that activation of the surface layers of the metal in the non-stationery friction conditions at rolling with sliding of 10 – 40%, and thermo-mechanical degradation

of components of transmission and engine oils cause the formation of reticular boundary layers with foliated, net-shaped structure that is characterized by non-Newtonian properties, increased adhesive component of friction coefficient, increased effective viscosity of non-hydrodynamic component of lubricant layer thickness.

In the extreme friction conditions, the increase of sliding from 10% to 40% leads to the increase of the shear gradient of the lubricating layers; in the formed boundary layers locally appears the first order phase transition between solid and liquid states due to their fusion under the limiting value of shear strain. The increasing sliding velocity from 0.6 to 1.15 m/s with rolling friction pairs in extreme conditions is the leading factor that causes the increased intensity of heat in contact, local temperature increase, increase in friction specific work, boundary layer destruction, destruction of metastable secondary structures.

The increasing temperature and mechanical stability of the boundary lubrication layers with the increasing viscosity of the oils basis with the presence of multifunctional additives was identified. The research was conducted under high pressures that lead to elastic and plastic deformation of contact surfaces and sliding velocity, causing the appearance of high gradients of shear rate of the lubricating layers.

The interrelation was identified of energy parameters (specific work of friction) and wear resistance of steel from the types of secondary structures formed on the contact surfaces in the process of self-organization. The secondary structures of Type I are characterised by low specific work of friction, high softening of the surface layers of the metal, near-surface amorphization of the metal layers to a depth of 40 – 50 microns, no saturation of active elements, resulting in intensification of wear. Secondary structures Type II is characterized by increased durability due to increased energy intensity of the contact, formation of the boundary chemisorbed films, strengthening of surface layers of the metal, increase in proportion weight of oxygen and sulphur in the near-surface layers of the metal to a depth up to 50 microns.

The empirical dependences of value of maximum shear stresses in the contact and the depth of their occurrence are proposed with consideration of tribotechnical parameters of the contact. The sliding velocity growth causes a change in stressed-deformed state of the contact surfaces due to the appearance of shear stresses in friction with the stress vector

which is localized not only along the lubricating layer, but also immerse in the near-surface layers of the metal. The increasing of the sliding up to 20% and 40% causes an increase in maximum shear stress in 1.7 and 2.27 times, as well as an increase in the immersing in 1.85 and 3.65 times under boundary and half-dry lubrication regimes respectively, in comparison with hydrodynamic lubrications regime.

The tribotechnical characteristics of the coverings of the self-fluxing granulated powder PG-AN9 and the flux cored wire PP-Np-30KhGSA were defined to optimize technological processes of the coverings during manufacturing, strengthening, repair and restoration of gears.

The scientific novelty of the research consists of the following key aspects.

Thermo-kinetic model was developed to assess durability of contact surfaces based on structural and energy parameters under lubrication in non-stationery friction conditions that includes methodology for assessing activation characteristics of the materials that characterize the durability of area of high-cycle fatigue and area of low-cycle fatigue debris-layer. The influence was defined of the stressed-deformed state of the material contact surfaces, degree of strengthening of the near-surface layers, type of secondary structures and boundary films of the lubricant on destruction activation energy during friction, which constitute 110-300 kilojoule/mole for different steel grades. For the first time, it was defined that the parameter of the environment ΔG can change destruction activation energy from -10 to +35 kilojoule/mole, depending on the type of lubricant, friction specific work, the degree of strengthening-softening of the contact surfaces.

The method was developed for calculating the wear rate of the tribounit elements functioning under rolling with sliding conditions, which takes into account the changes in the kinetics of anti-friction, rheological, energy characteristics of the contact and durability of the debris-layer.

A mathematical model was devolved to evaluate localization of the vector of the maximum shear stress in the tribosystem transition from hydrodynamic to boundary mode of lubrication based on experimentally established change in the stressed-deformed state of the surface as a result of the areas of local high wear, gradient distribution of microhardness

of the metal surface layers along the depth and modeling of stressed-deformed state of the surface layers by finite-element method.

The dependence was identified for wear resistance of contact surfaces from structural and phase transitions in the surface layers of metal in friction under rolling with varying degrees of sliding. The result of the combined effects of dynamic loading, shear stresses, friction specific work and an increase in local temperature at the boundary mode of the lubrication were growth of inter-surface distances, formation macrostress compression, change in crystallographic texture in the surface layer due to intense deformation in friction.

The correlation was defined for triboelements wear rate from the change of energy intensity of the contact with the structural adaptation of secondary structures based on estimates of temperature and mechanical stability of the boundary films of the lubricant and strength of materials of the contact surfaces. Formation by lubricants of the boundary chemisorbed and chemically-modified layers with thickness of 0.5 - 2 microns are reducing the specific work of friction in contact in 1.7 ... 4 times, as well as the volume of the deformed metal in 1,3 ... 2,3 times. The increase in the period of normal operation of tribounits before the signs of adhesion in 1.7 – 3.8 times in the extreme lubrication regimes facilitates the introduction of antiwear additives into the oil base antiwear additives, and allows strengthening the contact surfaces with pulsed thermocyclic ion nitriding technology.

Theoretically and experimentally were justified the mechanism displaying the adhesion process in the contact surfaces from the point of first order phase transitions in boundary layers of the lubricant. The oscillatory nature of the rapid increase or decrease in the thickness of the lubricating layer, the friction coefficient of friction and specific work of friction in adhesion were conditioned by the transition of the solid-crystalic layered reticular structures of the lubricant into the liquid phase under the increase in local temperature in the contact up to 125 – 400⁰C and shear gradient up to $(0,67 - 86) \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$.

The mechanisms were established to determine the change of rheological characteristics of the boundary lubrication layers in obtaining of non-Newtonian properties by the lubricant. The effect defined of the hydrodynamic and non-hydrodynamic component of the lubricant layer thickness on the kinetics of change of the shear stress vector, adhesive component of the friction coefficient, degree of strengthening – softening of the surface

layers of the tribointerfaces in transformation from hydrodynamic lubrication regime of the lubricant to boundary or half-dry.

The model was developed to estimate tribotechnical characteristics of tribopairs (friction pairs) of upper compression ring – cylinder sleeve of the internal combustion engine (ICE) depending on the engine design parameters, materials of friction pairs, working conditions of ICE and properties of lubricant. The methodology was developed to evaluate lubrication, antifriction, antiwear and rheological characteristics of the lubricant. For the first time in the algorithm for calculating the thickness of the lubricant layer, it was defined the kinetics of change of the dynamic viscosity and pressure coefficient of viscosity of the lubricant in contact depending on i rotation angle of the crank. The methodology was tested for a wide range of models of transport vehicles.

The practical significance of the results is in the improved wear resistance of friction units of machines and mechanisms at the design, operation and maintenance by selecting compatibility of triboelements on the basis of scientifically-informed choice of methodology for assessing tribotechnical characteristics of the contact surfaces, lubricant and durability of wearing layer in self-dissipative structures in non-stationary friction conditions.

The hardware-software system was developed and implemented into experimental examinations to evaluate the tribotechnical characteristics of the frictional contact. The hardware-software system ensures the real time registration, storage and processing of the kinetic changes of the lubrication, anti-friction, rheological and energy parameters in the non-stationary friction conditions. The method was developed for grinding of the contact surfaces in non-stationary friction conditions based on the evaluation of the completion grinding stage by kinetic change of the specific work of friction, anti-friction characteristics of the contact and lubrication and polymerization properties of the lubricant. The method was developed to assess effective dynamic viscosity of the lubricants while forming the hydro- and non-hydrodynamic components of the lubricant layer thickness in non-stationary friction conditions.

The methodology was developed to assess the temperature and mechanical stability of the boundary layers of the lubricant in the extreme friction modes at the contact stress,

that leads to elastic-plastic deformation of the contact surfaces and sliding speeds, causing the appearance of high shear gradient in lubricating layers.

The methodology was developed to estimate the activation energy of destruction of surface and near-surface layers of the contact surfaces at non-stationary friction conditions of the friction pairs with consideration of the operating time before the first manifestation of the adhesion of tribounits and local temperature increase in the contact area.

The recommendations were developed for thickness, physical and mechanical properties and structural adaptation of the wear resistant coatings with consideration of the localization of maximum shear stress at different lubrication modes.

The methodology was developed to evaluate tribotechnical indicators of tribounit (friction pairs) of upper compression ring – cylinder sleeve of the internal combustion engine depending on the working procedure.

The developed hard-software system, mathematical software, methodologies were used in conducting scientific research, in selection of the composition, structure and techniques of anti-wear coatings, and in the improvement of lubricants for various operational purposes at the enterprises and institutions of Ukraine.

Key words: lubricant layer thickness, effective viscosity, shear stress, intensity of wear, friction coefficient, specific friction work, activation energy of destruction, structural and phase transformation, microhardness, non-stationary friction conditions.

The main results of dissertation were published in 50 scientific works.

In professional publications:

1. Comparative rheological properties of mineral and synthetic oils / R.G. Mnatsakanov, V.I. Malenko, O.O. Mikosyanchik, A.E. Yakobchuk // Problems of friction and wear: Scientific digest. – K.: NAU, 2006. – Vol. 45. – P. 170-178.
2. Modification of friction surfaces iron-steel nano disperse additive fullerene C₆₀ / M.F. Dmytrychenko, R.G. Mnatsakanov, S. S. Kroll, O.O. Mikosyanchik // Roads and bridges: Scientific digest. – K.: Derzhdor NRI, 2006. – Vol. 5. – P. 312-320.
3. Mathematical model of efficiency of lubrication with nanodisperse additive C₆₀ in friction contact / M.F. Dmytrychenko, R.G. Mnatsakanov, O.O. Mikosyanchik, S.S. Kroll // Project management, systems analysis and logistics. – K., NTU, 2006. – № 3. – P. 5-7.

4. Analysis of the relationship of the tribotechnical parameters of the graphite suspension (GS-4) based on factorial method / M.F. Dmytrychenko, R.G. Mnatzakanov, S. Kroll, A. Mikosyanchik // Bulletin: scientific digest. – K.: NTU, 2006. – № 11. – P. 3-5.
5. The lubricating ability, antifriction and anti-wear properties of oils for hydro-mechanical transmission / M.F. Dmytrychenko, R.G. Mnatsakanov, S. S. Kroll, O.O. Mikosyanchik // Bulletin: Scientific digest. – K.: NTU, 2006. – № 12. – P. 5-9.
6. The dominant influence of elasto-hydrodynamic factors in non-stationary friction modes / M.F. Dmytrychenko, R.G. Mnatsakanov, O.O. Mikosyanchik, A.I. Kusch // Bulletin: Scientific digest. in 2 parts. Part 1. – K.: NTU, 2006. – № 13. – P. 3-5.
7. The impact of nanodisperse additive fullerene C_{60} on tribotechnical properties of transmission oil during grinding / M.F. Dmytrychenko, R.G. Mnatsakanov, O.O. Mikosyanchik, A.I. Kusch // Project management, systems analysis and logistics. – K.: NTU, 2007. – № 4. – P. 5-7.
8. Improving the reliability of the car transmissions by optimizing the operating parameters of the contact area / M.F. Dmytrychenko, R.G. Mnatsakanov, O.O. Mikosyanchik, O.V. Rudenko // Bulletin: scientific digest. – K.: NTU, 2007. – № 14. – P. 5-8.
9. Kinetics of formation of operational roughness in contact surfaces / M.F. Dmytrychenko, R.G. Mnatsakanov, O.O. Mikosyanchik, A. I. Kusch // Bulletin: scientific digest. in 2 parts: Part 1. – K.: NTU, 2007. – № 15. – P. 15-18.
10. Dynamics of wear in contact surfaces with adding the nanoadditive / M.F. Dmytrychenko, R.G. Mnatsakanov, O.O. Mikosyanchik, A.I. Kusch // Bulletin: scientific digest. – K.: NTU, 2008. – № 16. – P. 3-6.
11. The mathematical model for assessing the effectiveness of lubrication mechanisms of local forms of contact / M.F. Dmytrychenko, R.G. Mnatzakanov, O.O. Mikosyanchik, A.I. Kusch // Avtoshlyahovyk Ukraine (separate vol.). – Bulletin of the Scientific center transport academy of Ukraine. – 2009. – № 12. – P. 133-134.
12. The mechanism of wear of Steel 45 at the adding to lubricating material of butyl rubber / M.F. Dmytrychenko, R.G. Mnatsakanov, O.O. Mikosyanchik, Y.O. Turitsa // Engineering. – 2009. – № 11 (149). – P. 36-38.

13. Patterns of wear of friction pairs in the conditions in a dynamic loading / MF Dmytrychenko, RG Mnatzakanov, O.O. Mikosyanchyk, Y.O. Turytsya // Bulletin: scientific digest. in 2 parts. Part 2. – K.: NTU, 2010. – № 21. – P. 48-52.
14. Mikosyanchik O.O. Kinetic change of microhardness surface layers of metal at adaptation of boundary adsorption layers of lubricant in the contact zone / O.O. Mikosyanchik // Problems of friction and wear. – 2013. – № 2 (61). – P. 56-61.
15. Estimation dynamic viscosity of the lubricant materials in tribological contact / O.O. Mikosyanchik, R.G. Mnatsakanov, M.V. Kindrachuk, M.S. Khimko // Problems of friction and wear. – 2014. – № 4 (65). – P. 83–89.
16. Mikosyanchik O.O. Modeling the wear intensity of sleeve cylinder of internal combustion engine / O.O. Mikosyanchik, R.G. Mnatsakanov, M.S. Khimko // Problems of friction and wear. – 2015. – № 1 (66). – P. 140-145.
17. Structure and phase transformations in coatings from ferritic and martensitic steels under gas-thermalspraying and modifying by electric-contact treatment / M.I. Chernovol, T.V. Vorona, E.E. Kozhevnikov, O.O. Mikosyanchik, L.A. Lopata // Problems of friction and wear. – 2015. – № 2 (67). – P. 99-109.
18. Rheological properties of lubricating layers and energoloadings in the contact of friction pair at alternating contact pressure / O.O. Mikosyanchik, R.G. Mnatsakanov, M.S. Khimko, S.V. Shakuliyev // Problems of friction and wear. – 2015. – № 4 (69). – P. 140-145.
19. Mikosyanchik O.O. Tribotechnical automated evaluation system for lubricating processes in friction fume / O.O. Mikosyanchik, A.I. Zaporozhets, R.G. Mnatsakanov // Problems of tribology. – 2015. – № 4 (78). – P. 42-48.
20. Evaluation of structural and energy parameters of friction pairs under start-stop mode / O.O. Mikosyanchik, R.G. Mnatsakanov, A.Y. Kumurdzhy, S.V. Shakuliyev // Problems of friction and wear. – 2016. – № 1 (70). – P. 11-20.
21. Mikosyanchik O.O. The selection of the procedure for establishing functional relationships of tribotechnical processes in experimental studies of friction pairs with local contact / Mikosyanchik O.O., N.O. Kuzin // Problems of friction and wear. – 2016. – № 4 (73). – P. 4-12.

22. Oil lubricating effect in non-stationary processes and under breaking-in condition / O.O. Mikosyanchik, R.G. Mnatsakanov, V.M. Lopata, V.I. Kalinichenko // Problems of tribology. – 2016. – № 1 (79). – P. 69-76.

23. Evaluation of energy, rheological and anti-wear characteristics of the contact under rolling with variable slip / O.O. Mikosyanchik, R.G. Mnatsakanov, V.I. Kalinichenko, A.V. Kushchev // Problems of tribology. – 2016. – № 3 (81). – P. 6-14.

24. Mikosyanchik O.O. Influence of the gradient variable of speed shear on the rheological and wear characteristics of the contact under start-stop mode / O.O. Mikosyanchik // Digest KrNU named after. M. Ostrogradskii. – Kremenchug: KrNU, 2016. – Vol. 3 (98), part. 1. – P. 48-55.

25. Analysis of tribotechnical characteristics of self-fluxing coating under rolling with sliding in non-stationary loading / O.O. Mikosyanchik, B.A. Lyashenko, M.S. Ageev, V.N. Lopata // Technological audit and production resources. – 2016. – № 2/1 (28). – P. 4-9.

26. Mikosyanchik O.O. Thermo-kinetic model for assessment of durability of contact surfaces under lubrication in non-stationary mode of operation / O.O. Mikosyanchik // Problems of friction and wear. – 2017. – №1 (74). – P. 65-77.

27. Influence of the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions / O. Mikocyanichik, R. Mnatsakanov, A. Zaporozhets, R. Kostynik // Eastern-European J. Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/1 (82). – P. 24-31.

In foreign specialized editions:

28. Kinetics of wear in contact-surfaces with the usage of C₆₀ fullerene additives for engine oil / N.F. Dmytrychenko, R.G. Mnatsakanov, O.O. Mikosyanchik, A.I. Kushch // Frictions and wear. – 2009. – Vol 30 (6). – P. 550-555.

29. Evaluation of effectiveness the breaking-in of friction pair in the non-stationary work conditions / Tareq M.A. Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov, M. S. Khimko // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. – 2015. – № 9 (33). – P. 301-307.

30. Structural-Energy characteristics of tribotechnical contact in unsteady / M. A. Tareq Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov, A. Zaporozhets // *Modern Mechanical Engineering*. – 2016. – № 6. – P. 91-97.

31. Al-quraan Tareq M. A. The Effect of the Slippage Degree at Rolling with Slipping on the Wear Resistance of Contact Surfaces / Tareq M.A. Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov // *Mechanical Engineering Research*. – 2016. – Vol. 6, № 2. – P. 48-61.

32. Al-quraan Tareq M. A. Temperature Resistance of the Boundary Lubrication Layers Under Rolling With Slippage Condition / Tareq M.A. Al-quraan, O.O. Mikosyanchik, R.G. Mnatsakanov // *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*. – 2017. – Vol. 5, № 2. – P. 78-86.

Materials and conference abstracts:

33. The effect of physical and chemical compositions of the oil for hydromechanical transmissions on the kinetics of lubricant layer formation / M.F. Dmytrychenko, R.G. Mnatsakanov, S. S. Kroll, O.O. Mikosyanchik // *Materials of XVII Conf. Miedzynarodowej: "Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych"*, (Rzeszów, 20-23 wrzesień 2006 r.). – Rzeszów: Politechnika, 2006. – P. 43-48.

34. Dmytrychenko M.F. Development of the methodology for projection of the durability of the friction units in internal combustion engines and car transmissions in non-stationary conditions / M.F. Dmytrychenko, O.O. Mikosyanchik, I.M. Kozoriz // *LXV scientific conference of the faculty, graduates, students and university structural divisions: presentation theses*. – K.: NTU, 2009. – P. 6-7.

35. The dynamics of wear of the contact-surfaces with the usage of the additive fullerene C₆₀ / M.F. Dmytrychenko, R.G. Mnatsakanov, O.O. Mykosyanchyk, A.I. Kushch // *Polymer composite and tribology: international scientific conference, 22-25 June 2009, city Gomel: presentation theses*. – Gomel: Academy of Science of Belarus, 2009. – P. 72.

36. Dmytrychenko M.F. Impact of the stress on the dynamics of lubricant layer formation in the elastic- dynamic contact / M.F. Dmytrychenko, O.O. Mikosyanchik, I.M.

Kozoriz // LXV scientific conference of the faculties, graduates, students and university structural divisions: presentation theses. – K.: NTU, 2010. – P. 7.

37. Dmytrychenko M.F. Modeling and calculation of tribological processes in friction pairs in the internal combustion engine / M.F. Dmytrychenko, O.O. Mikosyanchik, Y.P. Yaroshenko // LXV scientific conference of the faculties, graduates, students and university structural divisions: presentation theses. – K.: NTU, 2011. – P. 6.

38. The effectiveness of lubrication oil in contact depending of the operational term / R.G. Mnatsakanov, O.O. Mikosyanchik, Y.O. Turytsya, O.V. Rudenko // Olvijskyy Forum 2011: Strategies of Ukraine in geopolitical space: international theoretical-practical conf., 8-12 June 2011, Yalta, Crimea, Ukraine: presentation theses. – Mykolaev: State University named after Peter Mogyla, 2011. – T. 11. – P. 5.

39. Mnatsakanov R.G. Determining the influence of tribological processes on the strength characteristics of the near-surface layers of the contact surfaces / R.G. Mnatsakanov, O.O. Mikosyanchik, Y.O. Turytsya // Olbijskyy Forum 2012: Strategies of Ukraine in geopolitical space: international theoretical-practical conf., 6-10 June 2012, Sevastopol, Crimea, Ukraine: presentation theses. – State University named after Peter Mogyla, 2012. – T. 12. – P. 24-25.

40. The method of obtaining wear-resistant coverings / M.I. Chernovol, T.V. Vorona, O.O. Mikosyanchik, L.A. Lopata, V.I. Zhornik // Surface engineering and renovation of products: 15th international scientific-technical conf., 1-5 June 2015, Odessa region., Zatoka: presentation theses. – K., 2015 – P. 206-208.

41. Mykosyanchyk O.O. Anti-wear covering of the steel on the iron under rolling with slippage / O.O. Mikosyanchik, R.G. Mnatsakanov // Tribology, energy- and resource-economy, international scientific-technical conf., within the X intern. conf. 'Olvijskyy Forum-2016', 9-12 June 2016, Mykolaev, Koblevo, Ukraine: theses. – Mykolaev: State University named after Peter Mogyla, 2016. – T. 12. – P. 31-33.

42. The algorithm for determining the thickness of the lubricant layer between the first compression ring and cylinder liner of the internal combustion engine depending of the operational process / O.O. Mikosyanchik, Z. E. Novohatska, M.O. Khomyakova, M.V.

Tsirkun // Avia – 2013: XI International scientific-technical conf., May 21-23, 2013, Kyiv materials. – K.: NAU, 2013. – Vol 3. – P. 25-28.

43. Mikosyanchik O.O. Effect of the contact stress on the anti-friction properties of the base oils / O. O.Mikosyanchik, R.G. Mnatzakanov, M.S. Khimki, M.A. Petrenko // Avia -2015: XII International scientific-technical conf., April 28-29, 2015, Kyiv materials. – K.: NAU, 2015. – P. 25-28.

44. Mikosyanchik O.O. Non-stationary processes as factor of grinding in friction pairs / O.O.Mikosyanchik, RG Mnatsakanov, S.V. Shakuliyev // Technical works: Collection of scientific works (for the international scientific-technical conf of young scientists "Modern technologies in mechanics", 21-23 April 2016, city of Khmelnytsky. – Khmelnytsky: KNU, 2016. – № 1. – P. 101-103.

45. Tribotechnical characteristics of self-fluxing covering in non-stationary condition of friction / O.O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov, A. M. Khimko, M. S. Khimko, M. S. Shakuliev // Aviation in the XXI-st century: Safety in Aviation and Space Technologies, 19-21 september, 2016 Kyiv, Ukraine: proceedings the seventh world congress. – Kyiv: NAU, 2016. – P. 1.4.51-1.4.56.

Patents and Certificates:

46. Pat. 88748, Ukraine, (МПК) G01N 3/56. The device for assessing of tribotechnical characteristics of triboelements / Mikosyanchik O. O.; applicant and patentee Mikosyanchik O.O. – № u 2013 13450; appl. 19/11/2013; publ. 03.25.2014, Bull. №6. – 4p.

47. Pat. 89261, Ukraine, (МПК) G01N 11/00. The method for evaluation of dynamic effective viscosity of the lubricant in tribocontacts / Mikosyanchik O.O, Mnatsakanov R.G., Kindrachuk M.V., applicants and patentees Mikosyanchik O.O, Mnatsakanov R.G., Kindrachuk M.V. – № u 2013 14086; appl. 04/12/2013; publ. 04.10.2014, Bull. № 7. – 4 p.

48. Pat. 92071, Ukraine, (МПК) G01N 3/56. The method for grinding of friction pairs in non-stationery operating conditions / Mikosyanchik O.O., Mnatsakanov R.G., Khimko M. C.; applicants and patentees Mikosyanchik O.O., Mnatsakanov R.G., Khimko M.S. – № u 2014 02492; appl. 03/13/2014; publ. 07.25.2014, Bull. № 14. – 4 p.

49. Pat. 98452, Ukraine, (MIIK) G23S 14/00. The method of obtaining of the hard covering with increased resistance to fatigue fracture on the surface of a metal product / Kindrachuk M.V., Duhota O.I., Kudrin A.P., Tisov O.V., Mikosyanchik O.O., Naumenko N. O.; applicants and patentees Kindrachuk M.V., Duhota O.I., Kudrin A.P., Tisov O.V., Mikosyanchyk O.O., Naumenko N. O. – № u 2014 12654; appl. 25/11/2014; publ. 04.27.2015, Bull. № 8. – 6 p.

50. Certificate 38664. The method of calculation of the tribotechnical parameters of sliding pairs in the internal combustion engine / Mikosyanchyk O. O.; The applicant and owner of National Transport University. – № 38824, appl. 31.03.2011; 21.06.2011 registered. – 2 p.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	35
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ОЦІНКИ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФРИКЦІЙНОГО КОНТАКТУ З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГЕТИЧНИХ, РЕОЛОГІЧНИХ І СТРУКТУРНО-ФАЗОВИХ ПАРАМЕТРІВ.....	51
1.1. Механізми зношування зубчастих передач по профілю зуб'їв.....	51
1.2. Фактори, що впливають на силу тертя при граничному режимі мащення.....	57
1.3. Механізми утворення вторинних структур, які характеризуються ефективними протизношувальними властивостями.....	64
1.4. Триботехнічні та реологічні властивості граничних змащувальних шарів.....	74
1.5. Вплив деформаційних процесів і структурно-фазових перетворень на зносостійкість контактних поверхонь.....	81
1.6. Вплив дотичних напружень зсуву при терті на зносостійкість контактних поверхонь.....	91
1.7. Енергетичні аспекти руйнування поверхневих шарів елементів трибоспряжень при терті.....	101
Висновки до розділу 1. Обґрунтування наукового напрямку досліджень.....	106
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНКИ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФРИКЦІЙНОГО КОНТАКТУ В НЕСТАЛИХ УМОВАХ РОБОТИ.....	111
2.1. Загальні аспекти вибору методик трибологічних досліджень і моделювання процесів тертя.....	111
2.2. Програмно-апаратний комплекс (ПАК) для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів.....	113

2.2.1. Методика визначення триботехнічних характеристик вузла тертя..	119
2.2.2. Методика оцінки температурно–механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу в критичних режимах тертя.....	122
2.2.3. Методика оцінки величини енергії активації руйнування поверхневих та приповерхневих шарів металу.....	124
2.3. Методика визначення послідовного зносу субшарів трибологічного шару.....	126
2.4. Методика встановлення функціональних взаємозв'язків трибопроцесів для пар тертя з локальним контактом.....	132
2.5. Методика прогнозування триботехнічних характеристик пари тертя верхнє компресійне кільце – гільза циліндра ДВЗ залежно від робочого процесу.....	139
2.5.1. Розрахунок товщини мастильного шару між першим компресійним кільцем та гільзою циліндра при робочому процесі двигуна внутрішнього згорання.....	141
2.5.2. Вплив параметрів робочого процесу двигуна внутрішнього згорання на інтенсивність зношування гільзи циліндра.....	143
Висновки до розділу 2.....	146
РОЗДІЛ 3. ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ЗМАЩУВАЛЬНИХ, РЕОЛОГІЧНИХ ТА АНТИФРИКЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ....	148
3.1. Оцінка ефективності припрацювання пар тертя в нестационарних умовах роботи.....	148
3.1.1. Оцінки кінцевого терміну припрацювання контактних поверхонь за кінетикою зміни триботехнічних показників контакту.....	149
3.1.2. Оцінка ефективності мащення мінеральних та синтетичних олив залежно від температури та контактного навантаження.....	152
3.1.3. Кінетика зміни реологічних та антифрикційних показників базових олив при припрацюванні.....	155
3.2. Вплив навантаження на триботехнічні показники контакту.....	158

3.2.1. Роль товщини мастильного шару в прояві антифрикційних властивостей оливо за умов чистого кочення.....	159
3.2.2. Оцінка енергоємності контакту при структуризації граничних шарів мастильного матеріалу.....	161
3.3. Реологічні властивості змащувальних шарів та енергоємність триботехнічної системи при змінних контактних напругах.....	163
3.3.1. Вплив напруг зсуву масляного шару на антифрикційні показники контакту.....	164
3.3.2. Кінетика зміни енергоємності контакту з позицій структурної пристосованості вторинних структур.....	166
3.4. Вплив природи граничних змащувальних шарів на адгезійну складову коефіцієнта тертя.....	170
3.4.1. Аналіз факторів, що впливають на реалізацію умов зовнішнього тертя.....	170
3.4.2. Зміна змащувальних, антифрикційних і реологічних властивостей трибосистеми в екстремальних умовах тертя.....	172
3.4.3. Аналіз антифрикційних властивостей трибоспряжень з позиції самоорганізації змащувальних граничних плівок.....	178
Висновки до розділу 3.....	184
РОЗДІЛ 4. МЕХАНІЗМИ УТВОРЕННЯ ВТОРИННИХ СТРУКТУР ПРИ СТРУКТУРНІЙ ПРИСТОСОВАНOSTІ ТРИБОЕЛЕМЕНТІВ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	188
4.1. Структурно – енергетичні показники трибоконтaкту в процесі утворення дисипативних структур.....	188
4.1.1. Напрямки структурної пристосованості елементів трибоспряжень при терті.....	188
4.1.2. Оцінка режиму мастильної дії з урахуванням гідродинамічної і та негідродинамічної складових товщини мастильного шару.....	190
4.1.3. Вплив проковзування на реологічні і антифрикційні властивості контакту.....	192

4.1.4. Вплив структури сталі на кінетику зміни енергетичного параметра при терті.....	194
4.2. Оцінка вплив змінного градієнта швидкості зсуву на реологічні і протизношувальні властивості контакту.....	197
4.2.1. Вплив ступеня проковзування контактних поверхонь на змащувальні і антифрикційні властивості олив.....	198
4.2.2. Механізми структурної пристосовуваності з позицій кінетики зміни енергетичних і реологічних властивостей контакту.....	200
4.2.3. Вплив механо–хімічних процесів при терті кочення з різною величиною проковзування на зносостійкість контактних поверхонь.....	206
Висновки до розділу 4.....	210
РОЗДІЛ 5. КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ В ДИНАМІЧНИХ УМОВАХ НАВАНТАЖЕННЯ.....	213
5.1. Вплив ступеня проковзування при коченні з ковзанням на зносостійкість контактних поверхонь в екстремальних умовах тертя.....	213
5.1.1. Оцінка впливу властивостей вторинних структур на знос елементів трибоспряжень.....	214
5.1.2. Вплив швидкості ковзання на характер розподілу мікротвердості поверхневих шарів металу по глибині.....	219
5.2. Методика прогнозування оптимальної структури поверхневих шарів в процесі експлуатації елементів трибоспряжень.....	223
5.3. Оцінка температурного чинника як основного критерію при схоплюванні контактних поверхонь.....	229
5.4. Вплив структурно–фазових перетворень в поверхневих шарах металу при терті на зносостійкість контактних поверхонь	243
Висновки до розділу 5.....	249
РОЗДІЛ 6. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНОШУВАННЯ ПАР ТЕРТЯ В НЕСТАЛИХ УМОВАХ РОБОТИ.....	252

6.1. Термо–кінетична модель оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно–енергетичних параметрів фрикційного контакту.....	252
6.1.1. Оцінка активаційних параметрів області багатоциклової втоми.....	254
6.1.2. Оцінка активаційних параметрів дебрис–шару.....	266
6.2. Апробація методики оцінки триботехнічних властивостей контакту верхнє компресійне кільце – гільза циліндра двигуна внутрішнього згоряння.....	276
6.3. Моделювання оцінки величини максимальних дотичних напружень та глибини їх залягання залежно від триботехнічних характеристик контакту.....	281
Висновки до розділу 6.....	291
РОЗДІЛ 7. ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ТА МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ.....	294
7.1. Аналіз триботехнічних характеристик самофлюсуючих покриттів в умовах кочення з ковзанням при нестационарному навантаженні.....	295
7.1.1 Вплив товщини покриття самофлюсуючого порошку на триботехнічні властивості контакті.....	298
7.1.2. Механізми структурної пристосованості з позиції активації поверхневих шарів металу.....	302
7.2. Триботехнічні характеристики чавуну з покриттям зі сталі в мастильному середовищі при несталих режимах тертя.....	306
7.2.1. Оцінка роботоздатності покриттів з позицій змащувальних, реологічних і антифрикційних властивостей контакту.....	307
7.2.2. Вплив кінетики зміни питомої роботи тертя на протизношувальні властивості покриття при структурній пристосованості в умовах динамічного навантаження.....	312

7.3. Апробація методики оцінки температурної і механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу на контактних поверхнях, зміцнених за методом термоциклічного іонного азотування.....	315
Висновки до розділу 7.....	326
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ.....	330
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	336
ДОДАТКИ.....	385

ВСТУП

Надійність та довговічність машин і механізмів пов'язана з питанням підвищення ресурсу їх деталей. В результаті накопичення в тонких поверхневих шарах пар тертя дефектів, поява яких обумовлена впливом навантажувальних, швидкісних і температурних факторів, а також мастильного матеріалу і режимів експлуатації, відбувається їх руйнування і зниження ресурсу. На сучасному етапі розвитку трибології ще недостатньо розроблені питання, що відображають мікромеханіку руйнування твердих тіл в парах тертя. Процеси накопичення і розвитку мікропошкоджень в результаті впливу циклічних навантажень за схемою «стиск – зсув» є важливою складовою питання щодо підвищення надійності трибосистеми. При циклічному навантаженні пар тертя відбувається повторення макропластичних зрушень в протилежних напрямках, що призводить до розрихлення, стирання і утворення «аморфного шару» по площинах ковзання. Це пов'язано з порушенням рівноваги внутрішньокристалічних зв'язків і початком утворення втомних мікротріщин.

Одним з важливих аспектів вирішення питання надійності зубчастих передач є визначення зон максимального місцевого зносу даних контактних поверхонь. Нерівномірність розподілу зносу по робочому профілю поверхні зуб'ів зубчастих передач яскраво виражена при всіх видах зношування. Це пов'язано з повторним деформуванням мікрооб'ємів поверхневого шару матеріалу, яке призводить до виникнення тріщин і відокремлення частинок зносу. Цей процес відображено в стандартизованому визначенні видів зношування як втомне зношування поверхневого шару. Розроблення методики оцінки енергії активації руйнування контактних поверхонь в середовищі мастильного матеріалу та в критичних режимах тертя на основі оцінки енергетичних показників контакту надасть можливість прогнозувати інтенсивність зношування пар тертя в залежності від властивостей дисипативних структур щодо накопичення енергії до критичного рівня.

В умовах контактного циклічного навантаження в тонкому поверхневому шарі елементів трибоспряжень руйнування контактних поверхонь пов'язано зі зміною

структури матеріалів. Це відбувається при високих швидкостях, температурах, навантаженнях і інтенсивних деформаціях, сконцентрованих в локальних поверхневих і підповерхневих об'ємах матеріалу пар тертя. Високі температури в фрикційному контакті обумовлюють виникнення структурних і фазових перетворень. З огляду на те, що нагріті зони мають локальний характер, а швидкості нагрівання та охолодження контактних поверхонь в умовах локального приросту температури дуже високі, катастрофічного руйнування не відбувається. Для розвитку та прояву цих руйнівних процесів необхідний час для накопичення, концентрації та поширення зон руйнування. Напрямами, які потребують подальших досліджень, є визначення тривалості протікання процесів структурно – фазових перетворень, їх якісна оцінка, межі прояву їх змін та тривалості стабільності утворених структур до динамічних умов навантаження.

Плівка мастильного матеріалу, яка формується на контактних поверхнях, забезпечує екранування щодо проникнення тепла в поверхневі шари металу. Однак в екстремальних умовах тертя, при домінуючому прояві граничного та напівсухого режимів мащення, відбувається руйнування граничної плівки. З урахуванням цих процесів, для якісної оцінки впливу температурного чинника в зоні фрикційного контакту необхідно застосовувати різний підхід при визначенні розрахункової температури залежно від режимів мащення.

В локальних контактних об'ємах поверхневих шарів металу, за умов порушення цілісності граничної екрануючої плівки мастильного матеріалу, при циклічних навантаженнях відбувається різке збільшення, а слідом за ним – різкий спад температури, що призводить до протікання структурних та фазових перетворень, які пов'язані з утворенням аустеніту тертя, мартенситу деформації, вибірковою дифузійною елементів в приповерхневих деформованих об'ємах, прискореним рухом дислокацій та ін.. Актуальним, в зв'язку з цим, є питання управління процесами фазових і структурних перетворень за рахунок створення умов, що забезпечують утворення стабільних дисипативних структур в процесі структурної пристосованості матеріалів контактних поверхонь та мастильного матеріалу. Одним із шляхів вирішення цього

питання, є дослідження складу вторинних структур та типу граничних плівок, що формуються в процесі експлуатації пар тертя.

Утворення пітингу пов'язано з поняттям термічного ефекту – сукупності факторів, виникнення яких обумовлено впливом циклічних дотичних та термічних напружень з градієнтним розподілом по глибині металу. У загальному випадку руйнування починається на ділянках контактної поверхні з неоднорідним напружено-деформованим станом тонкого поверхневого шару. Прогнозування зміни дотичного напруження, що визначає небезпечний стан матеріалу в залежності від кінетики зміни нормальних та тангенціальних сил при терті, включаючи сили диференціального проковзування, режими мащення в контакті, енергоємність трибосистеми та локальний приріст температури, дозволить визначити оптимальний діапазон роботи елементів трибоспряження з урахуванням триботехнічних характеристик контакту.

Руйнування граничних мастильних шарів при терті відбувається при критичному тиску в контакті. Даний процес по-різному проявляється в зоні фрикційного контакту та призводить до різкого зростання коефіцієнту тертя і підвищення інтенсивності зношування. Величина критичного тиску в рівній мірі залежить як від складу мастильного матеріалу, так і від фізико-механічних і фізико-хімічних властивостей активованого тертя металу. Управління процесами поверхневої активності контактних поверхонь в процесі їх активації при терті, застосування мастильного матеріалу з поверхнево-активними речовинами, протизношувальними та антизадирними присадками, антифрикційними добавками може забезпечити значне підвищення критичного тиску та початкової температури руйнування граничного шару та вторинних структур, що буде сприяти подовженню терміну експлуатації пар тертя.

Залежність коефіцієнта тертя від швидкості ковзання в граничному режимі мащення може бути спадаюча або зростаюча. У першому випадку спостерігаються механічні релаксаційні коливання трибосистеми, а в другому випадку вони відсутні. На міцність граничного мастильного шару істотно впливає твердість поверхневого шару контактних поверхонь. Структура граничних мастильних шарів близька за своїми властивостями до смектичних фаз, ретикулярних утворень, засклованого

стану. Метиленові ланцюги органічних молекул мінеральних та синтетичних олив, що утворюють такі структури, працюють в умовах підвищених контактних навантажень на осьове та всебічне стиснення, інтенсивний дотичний зсув. При високих швидкостях ковзання, характерних для швидкохідних зубчастих передач, значно зростає як температура в контакті, так і градієнт швидкості зсуву граничних змащувальних шарів. За таких умов відбувається порушення протікання статично рівноважних процесів адсорбції і десорбції граничних шарів, що призводить до домінування явищ десорбції молекул з поверхонь трибосопряжень за менш ніж 20 мкс. Це, в свою чергу, обумовлює інтенсифікацію руйнівних процесів в фрикційному контакті. Розроблення методик оцінки температурно-механічної стійкості граничних шарів в екстремальних умовах мащення дозволить надати обґрунтовані рекомендації щодо вибору матеріалу контактних поверхонь та мастильних матеріалів, які зможуть розширити діапазон оптимальної роботи пар тертя за рахунок формування стійких граничних шарів в умовах підвищених температур та високих градієнтів швидкості зсуву.

Для створення високонадійних машин і механізмів велике значення мають коректні розрахункові методи прогнозування довговічності деталей машин, що використовуються на етапі проектування машин і механізмів. Необхідна розробка фізично адекватних моделей еволюції дисипативних структур в поверхневих шарах матеріалів при їх терті та зношуванні. Враховуючи швидкоплинність кінетики зміни триботехнічних характеристик контакту, постає необхідність в створенні автоматизованих триботехнічних комплексів. Застосування сучасних програм реєстрації та обробки вихідних параметрів, що характеризують зміну фізико-механічного стану фрикційного контакту в реальному масштабі часу з частотою опитування менше 0,1с, дозволяє виконувати статистичну обробку результатів експерименту, а також аналізувати кінетику розвитку трибологічних процесів, що відбуваються в зоні контакту пар тертя залежно від часу напрацювання елементів трибосопряжень. Достовірні методи розрахунку на довговічність дозволяють розробляти критерії оцінки експлуатаційної пристосованості елементів трибосопряження, вибирати оптимальні поєднання матеріалів пар тертя, фізико-

хімічний склад базових олив, тип присадок і добавок для заданих умов експлуатації вузла тертя.

Актуальність теми. Надійність та довговічність багатьох машин і механізмів різних галузей промисловості, і, зокрема, транспортного машинобудування, значною мірою характеризуються працездатністю трибосистем, умови роботи яких визначаються високими значеннями контактних навантажень, сумарних швидкостей кочення і температур в зоні фрикційного контакту.

Видатні вчені Ребіндер П.А., Костецький Б.І., Ахматов А.С., Райко М.В., Бершадський Л.І., Дроздов Ю.М., Запорожець В.В., Матвеєвський Р.М. та ін. внесли значний внесок в теорію і практику розвитку фундаментальних основ оцінки процесів динамічної рівноваги при утворенні і руйнуванні вторинних структур і метастабільного стану контактних поверхонь в процесі самоорганізації трибосистеми.

Рішення проблеми зносостійкості матеріалів триботехнічного призначення на нанорівні вимагає систематичних досліджень, які дозволили б вирішити важливу науково-технічну проблему мінімізації зносу і підвищення ресурсу трибосистеми з позиції управління процесами самоорганізації вторинних структур в присутності граничного шару мастильного матеріалу.

Виходячи з цього, виникає необхідність в розробці принципово нових методик оцінки кінетики зміни триботехнічних характеристик мастильних матеріалів і вторинних структур (утворення, зміна і руйнування) в процесі контактної взаємодії. Впровадження автоматизованих методів і засобів контролю триботехнічних параметрів і випробування контактних поверхонь в реальному масштабі часу в режимах, максимально наближених до експлуатаційних, є складовою частиною завдання щодо підвищення точності і достовірності при використанні отриманих експериментальних результатів в реальних вузлах тертя.

Таким чином, науковою проблемою є управління процесами самоорганізації дисипативних структур, забезпечення мінімізації зносу і підвищення ресурсу пар тертя шляхом розробки методик оцінки і вибору мастильних матеріалів з урахуванням структурно-енергетичних і реологічних факторів, спрямованих на

зменшення інтенсивності накопичення енергії руйнування контактних поверхонь та мастильного шару, створення градієнтності міцнісних характеристик внаслідок локалізації деформаційних процесів в тонкому поверхневому шарі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково-дослідної роботи Національного авіаційного університету та інших організацій. Автор був співвиконавцем держбюджетних тем. Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи №ДЗ/499-2009 (0109U007638) в Національному транспортному університеті за програмою Державне замовлення на наукові та науково-технічні розробки та державні цільові програми. Автором створена технологія компаундування композицій товарних олив з поліфункціональними присадками та нанодисперсними добавками та розроблені рекомендації щодо удосконалення існуючих або створення нових композицій моторних олив.

Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи ДБ№67 (0109U002144) в Національному транспортному університеті за бюджетною програмою "Прикладні дослідження і розробки за напрямками науково-технічної діяльності вищих навчальних закладів та наукових установ" (КПКВ 2201040). Автором розроблені методики оцінки ефективності мастильної дії олив в несталих умовах роботи трибосистеми.

Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи ДБ№85 (0110U000124) в Національному транспортному університеті за бюджетною програмою "Прикладні дослідження і розробки за напрямками науково-технічної діяльності вищих навчальних закладів та наукових установ" (КПКВ 2201040). Автором проведена оцінка кінетики формування та структури граничних адсорбційних шарів залежно від фізико-хімічних властивостей мастильного матеріалу та механо-фізико-хімічних змін поверхневих і приповерхневих шарів металу.

Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи №789-ДБ12 (0112U002057) в Національному авіаційному університеті за напрямом Новітні ресурсозберігаючі технології. Автором розроблені програмно-апаратний

комплекс та методики оцінки для дослідження триботехнічних характеристик трибоелементів в несталих умовах роботи.

Дисертаційні дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи №865-ДБ13(0113U000084) в Національному авіаційному університеті згідно Державній цільовій програмі прогнозування науково-технологічного та інноваційного розвитку України за напрямом Найважливіші проблеми фізико-математичних і технічних наук. Автором розроблені математичні моделі прогнозування оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно-енергетичних параметрів в умовах змащування при несталих режимах роботи.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення зносостійкості вузлів тертя машин і механізмів на етапах їх проектування, експлуатації та ремонту шляхом підбору сумісності трибоелементів на основі науково-обґрунтованого вибору застосування методик оцінки триботехнічних характеристик контактних поверхонь, мастильного матеріалу та довговічності зношуваного шару при самоорганізації дисипативних структур в несталих умовах тертя.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувались наступні завдання:

- розробити термо-кінетичну модель оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно-енергетичних параметрів в умовах змащування при несталих режимах роботи за кінетикою зміни енергії активації руйнування областей багатоциклової контактної втомленості та дебрис-шару з позицій термофлуктуаційної теорії міцності твердих тіл;

- створити автоматизований комплекс та розробити методологію оцінки триботехнічних характеристик елементів трибоспряження в реальному масштабі часу в несталих умовах тертя;

- розробити методику оцінки температурно – механічної стійкості граничних шарів мастильних матеріалів при навантаженнях, що обумовлюють появу пружньо-пластичних деформацій приповерхневих шарів контактних поверхонь;

- встановити закономірності зміни змащувальних, реологічних, антифрикційних та протизношувальних властивостей олив при формуванні

мастильними матеріалами ретикулярних граничних шарів на активованих тертях поверхневих шарах металу;

– дослідити та провести комплексну оцінку впливу питомої роботи тертя, інтенсивності тепловиділення, типу вторинних структур, інтенсивності насичення активними елементами приповерхневих шарів металу на зносостійкість пар тертя в лінійному контакті в різних режимах змащувальної дії;

– визначити закономірності зношування та розробити методику прогнозування оптимальної структури поверхневих шарів металу при технологічній та експлуатаційній модифікації на основі оцінки ефективної («інтегральної») мікротвердості, яка враховує мікротвердість поверхневих шарів металу в процесі структурної пристосованості при терті та градієнтність розподілу мікротвердості по глибині деформованого шару;

– визначити вплив граничних змащувальних шарів, структурно-фазових перетворень, макронапружень стиснення та мікронапружень, інтенсивності розчинення атомів втілення у кристалічній ґратці приповерхневих деформованих шарів металу на зносостійкість контактних поверхонь в умовах кочення з проковзуванням в діапазоні 3 – 40%;

– розробити рекомендації по застосуванню покриттів самофлюсуючого гранульованого порошку ПГ-АН9 та порошкового дроту ПП-Нп-30ХГСА при виготовленні та зміцненні, ремонті та відновленні зубчастих коліс та шестерен на основі експериментальної оцінки змащувальних, антифрикційних та протизношувальних властивостей сформованих в процесі тертя захисних дисипативних структур;

– створити методику розрахунку основних трибологічних характеристик пари ковзання верхнє компресійне кільце – гільза циліндра двигуна внутрішнього згоряння, яка дозволяє спрогнозувати ефективність мащення та ступінь зношування контактних поверхонь.

Об'єкт дослідження – процеси тертя та зношування дисипативних структур елементів трибоспряжень в режимі кочення з проковзуванням та ковзання в несталих умовах роботи.

Предмет дослідження – закономірності впливу змащувальних, реологічних та енергетичних параметрів дисипативних структур на антифрикційні та протизношувальні властивості контактних поверхонь в несталих умовах роботи.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконані на підставі фундаментальних положень трибології, термодинамічної теорії прогнозування та руйнування твердих тіл, концепції самоорганізації та зносостійкості трибосистем, структурно-енергетичної пристосованості матеріалів, нерівноважної кінетики фазових переходів першого роду, положень трибохімії і реології мастильного шару. Лабораторні та стендові випробування виконувались на основі теорії моделювання та планування експерименту. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана із застосуванням комп'ютерних технологій з використанням методів математичного аналізу, методів скінченних елементів та математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розроблена термо-кінетична модель оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно-енергетичних параметрів в умовах змащування при несталих режимах роботи, яка включає методику оцінки активаційних характеристик матеріалів, що характеризують довговічність області багатоциклової втоми і області малоциклової втоми debris-шару. Встановлено вплив напружено-деформованого стану матеріалу контактних поверхонь, ступеня зміцнення приповерхневих шарів, типу вторинних структур і граничних плівок мастильного матеріалу на енергію активації руйнування при терті, яка становить 110 – 300 кДж/моль для різних марок сталей. Вперше встановлено, що параметр зовнішнього середовища ΔG може змінювати енергію активації руйнування від -10 до +35 кДж/моль залежно від типу мастильного матеріалу, питомої роботи тертя, ступеня зміцнення – знеміцнення контактних поверхонь.

2. Вперше розроблена методика розрахунку інтенсивності зношування елементів трибоспряджень, що працюють в умовах кочення з проковзуванням, яка враховує кінетику зміни антифрикційних, реологічних, енергетичних характеристик контакту та довговічність debris-шару. Мінімальна інтенсивність зношування на рівні

10^{-10} - 10^{-11} в діапазоні контактного навантаження 100 – 500 МПа характерна для пар тертя, які експлуатуються в умовах кочення з проковзуванням 10 – 20%.

3. Вперше розроблено математичну модель оцінки локалізації вектору максимальних дотичних напружень при переході трибосистеми від гідродинамічного до граничного режиму мащення на підставі експериментально встановленої зміни напружено-деформованого стану поверхонь в результаті появи зон локального підвищеного зносу, градієнтного розподілу мікротвердості поверхневих шарів металу по глибині і моделювання напружено-деформованого стану поверхневих шарів методом скінченних елементів.

4. Вперше встановлено залежність зносостійкості контактних поверхонь від структурно-фазових перетворень у поверхневих шарах металів при терті в умовах кочення з різним ступенем проковзування. Результатом комбінованого впливу динамічного навантаження, дотичних напружень зсуву, питомої роботи тертя і збільшення локальної температури при граничному режимі мащення є зростання міжплощинних відстаней, формування макронапружень стиснення, зміна кристалографічної текстури у поверхневому шарі внаслідок інтенсивної деформації при терті. Формування в поверхневому шарі дрібнозернистої структури з розмірами зерен 40 – 60 нм, утворення вторинних структур, насичених оксидом Fe_2O_3 , формування макронапружень стиснення на рівні -380...-500 МПа призводить до зміцнення поверхневих шарів металу при терті та підвищення їх зносостійкості в умовах кочення з проковзуванням 10 – 20%.

5. Встановлено механізми залежності інтенсивності зношування трибоелементів від зміни енергоємності контакту при структурній пристосованості вторинних структур на основі оцінки температурної і механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу і міцності матеріалу контактних поверхонь. Формування мастильними матеріалами граничних хемосорбційних та хімічно модифікованих шарів товщиною 0,5 – 2 мкм обумовлює зниження питомої роботи тертя в контакті в 1,7...4 рази, зменшення деформованого об'єму металу в 1,3...2,3 рази. Збільшенню періоду нормальної роботи трибоспряжень до проявів ознак схоплювання в 1,7 – 3,8 раз в екстремальних режимах мащення сприяє введення в

базову основу олів протизношувальних присадок, зміцнення контактних поверхонь за технологією імпульсного термоциклічного іонного азотування.

6. Вперше теоретично і експериментально обґрунтований механізм прояву процесу схоплювання контактних поверхонь з позицій фазових переходів першого роду в граничних шарах мастильного матеріалу. Коливальний характер стрімкого збільшення або зменшення товщини мастильного шару (0,2...4 мкм), коефіцієнта тертя (0,004...0,68) і питомої роботи тертя (2000 – 12000 Дж/мм²) при схоплюванні обумовлений переходом упорядкованих твердокристалічних шаруватих ретикулярних структур мастильного матеріалу в рідку фазу при збільшенні локальної температури в контакті до 125 – 400⁰С і градієнта швидкості зсуву до $(0,67-86) \cdot 10^6 \text{с}^{-1}$.

7. Встановлено механізми, які визначають зміну реологічних характеристик граничних змащувальних шарів при надбанні мастильним матеріалом неньютоновських властивостей. Визначено вплив гідродинамічної і негідродинамічної складової товщини мастильного шару на кінетику зміни вектору дотичних напружень, адгезійної складової коефіцієнта тертя, ступеня зміцнення - знеміцнення поверхневих шарів елементів трибоспряжень при переході гідродинамічного режиму мастильного дії до граничного або напівсухого.

8. Розроблено модель оцінки триботехнічних характеристик трибоспряження верхнє компресійне кільце - гільза циліндра двигуна внутрішнього згорання в залежності від параметрів конструкції двигуна, матеріалів пар тертя, умов роботи ДВЗ і властивостей мастильного матеріалу. Створена методика оцінки змащувальних, антифрикційних, реологічних та протизношувальних характеристик мастильного матеріалу, яка представляє собою систему алгебраїчних рівнянь, що описують кінетику зміни основних показників контакту залежно від робочого циклу в двигуні внутрішнього згорання. Вперше в алгоритмі розрахунку товщини мастильного шару встановлена кінетика зміни динамічної в'язкості та п'єзокоефіцієнту в'язкості мастильного матеріалу в контакті залежно від *i*-го кута повороту кривошипа. Методика апробована для широкого спектру моделей двигунів транспортних засобів.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблено і впроваджено в практику експериментальних випробувань програмно-апаратний комплекс для оцінки триботехнічних характеристик фрикційного контакту. Програмні засоби комплексу забезпечують реєстрацію, збереження та обробку кінетики зміни змащувальних, антифрикційних, реологічних та енергетичних параметрів в реальному часі в несталих умовах роботи (пат. №88748, опубл. 25.03.14, бюл.№6).

2. Розроблено спосіб припрацювання контактних поверхонь в нестационарних умовах тертя на основі оцінки завершення етапу припрацювання за кінетикою зміни питомої роботи тертя, антифрикційних характеристик контакту та змащувальних і полімеризаційних властивостей мастильного матеріалу (пат. №92071, опубл. 25.07.14, бюл.№14).

3. Розроблено спосіб оцінки динамічної ефективної в'язкості мастильних матеріалів при формуванні гідро- та негідродинамічної складових товщини мастильного шару в несталих умовах тертя (пат. №89261, опубл. 10.04.14, бюл.№7).

4. Розроблена методика оцінки температурно-механічної стійкості граничних шарів мастильного матеріалу в екстремальних режимах тертя при контактних напруженнях, що призводять до пружно-пластичної деформації контактних поверхонь і швидкостях ковзання, що обумовлюють появу високих градієнтів швидкості зсуву змащувальних шарів.

5. Запропонована методика оцінки величини енергії активації руйнування поверхневих та приповерхневих шарів контактних поверхонь при несталій роботі пар тертя з урахуванням тривалості напрацювання до прояву перших ознак схоплювання елементів трибоспряжень та локального підвищення температури в зоні контакту.

6. Створені рекомендації щодо товщини, фізико-механічних властивостей та структурної пристосованості зносостійких покриттів з урахуванням локалізації максимальних дотичних напружень зсуву при різних режимах мащення.

7. Розроблена методика оцінки триботехнічних показників трибоспряження верхнє компресійне кільце – гільза циліндра двигуна внутрішнього згоряння залежно від робочого процесу.

Розроблений програмно–апаратний комплекс, програмне математичне забезпечення, способи і методики використовуються при проведенні наукових досліджень, виборі складу, структури та технологій нанесення зносостійких покриттів і удосконаленні мастильних матеріалів різного експлуатаційного призначення на підприємствах та установах: Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України (м. Київ), Херсонський державний завод «Палада» (м. Херсон), ТОВ «Стокхолдер» (м. Кіровоград), ТОВ ЗТМ «Аріан» (м. Фастів), Національний авіаційний університет (м. Київ) (Додаток Д). У співавторстві розроблені та впровадженні в навчальний процес методичні вказівки до виконання лабораторних робіт та курсової роботи з курсу «Триботехніка» (Національний транспортний університет, м. Київ).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові й теоретичні положення та практичні результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. Без співавторів опубліковано наукові праці – [14, 24, 26, 46, 50]. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем, а саме: проведена оцінка кінетики зміни ефективної в'язкості, напружень зсуву олив та коефіцієнту тертя в контактi – [1]; визначена інтенсивність зношування та кінетика зміни мікротвердості контактних поверхонь – [2]; одержані рівняння множинної регресії для оцінки товщини граничних шарів – [3]; проведена обробка емпіричних даних динаміки змащувального процесу – [4]; розроблена математична модель оцінки ефективності мащення олив – [5]; проаналізована кінетика зміни товщини адсорбційних шарів в період пуску – [6]; проведена оцінка зміни шорсткості, контурної та фактичної площі контактних поверхонь – [7]; проаналізовано вплив контактного навантаження та режиму мащення на фактичну площу контакту – [8]; проведена оцінка складових товщини мастильного шару залежно від шорсткості – [9]; виконаний аналіз кореляційних зв'язків між інтенсивністю зношування та шорсткістю – [10]; виконані дослідження змащувальних, протизношувальних та антифрикційних властивостей олив – [11]; досліджено вплив присадки на адсорбційну активність оливи в трибоконтаті – [12]; визначені закономірності зміни мікротвердості поверхневих шарів сталі ШХ-15 при

напрацюванні в широкому діапазоні навантажень – [13]; проаналізована кінетика формування гідро- та негідродинамічної складової товщини мастильного шару – [15]; проведена апробація методики прогнозування інтенсивності зношування гільзи циліндра для різних типів двигунів – [16]; проаналізовано результати стереологічного аналізу пористості газотермічного покриття – [17]; проаналізовано кореляційний зв'язок між триботехнічними властивостями мастильного матеріалу та енергоємністю контакту – [18]; проведені дослідження змащувальних, антифрикційних характеристик олиव та питомої роботи тертя – [19]; встановлена залежність інтенсивності зношування від кінетики зміни питомої роботи тертя та структурного стану поверхонь – [20]; встановлений градієнтний розподіл мікротвердості по глибині та розглянуті триботехнічні інваріанти – [21]; проведена оцінка ефективності припрацювання моторних та синтетичних олив в нестационарних умовах тертя – [22]; проаналізована кінетика зміни питомої роботи тертя залежно від величини проковзування в контакті – [23]; встановлений взаємозв'язок змащувальних, антифрикційних та енергетичних характеристик з зносостійкістю самофлюсуючого покриття – [25]; досліджено кінетику зміни мікротвердості поверхневих шарів сталі та чавуну в нестационарних умовах тертя – [27]; розроблено методику оцінки кінцевого терміну припрацювання пар тертя – [28]; досліджені протизношувальні властивості сталі 40X та ШХ-15 в умовах кочення з проковзуванням – [29]; проаналізовано вплив реологічних та енергетичних параметрів на коефіцієнт тертя в критичних режимах мащення – [30]; проаналізовані результати спектрального аналізу розподілу елементів та розподіл мікротвердості деформованої зони по глибині – [31]; встановлено взаємозв'язок між процесами тепловиділення в триботехнічному контакті та зносостійкістю пар тертя – [32]; визначені триботехнічні властивості олив на мінеральній та синтетичній базових фракціях – [33]; досліджені змащувальні, антифрикційні та протизношувальні властивості олив в несталих умовах тертя – [34]; встановлений механізм підвищення зносостійкості пари тертя чавун – сталь при використанні нанодисперсної добавки – [35, 38]; проаналізована товщина плівки в ЕГД-контакті залежно від в'язкості олив та навантаження – [36]; розроблений алгоритм розрахунку товщини мастильного шару та інтенсивності зношування пари

тертя поршневе кільце - гільза циліндра – [37]; проведені дослідження розподілу мікротвердості поверхневих шарів по глибині – [39]; досліджено пористість газотермічних сталевих покриттів – [40]; проаналізована зносостійкість напиленого покриття сталі 30ХГСА на чавуні при змащуванні трансмісійною оливою – [41]; розроблений алгоритм розрахунку безрозмірних параметрів швидкості, матеріалу та навантаження – [42]; досліджено вплив навантаження на зміну ефективної в'язкості базових олів – [43]; проаналізовано вплив навантаження на частоту руйнування граничних змащувальних шарів – [44]; досліджено триботехнічні властивості самофлюсуючого порошку в умовах ступеневого підвищення навантаження – [45]; отриманий взаємозв'язок між кінетикою формування граничної плівки та ефективною в'язкістю олів – [47]; визначена кінетика зміни товщини мастильного шару, моменту тертя та питомої роботи тертя для олів в режимі пуск-зупинка – [48]; проведено дослідження мікротвердості зміцненого шару – [49].

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на: XVII Міжнародній конференції „Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych” (Rzeszów, 2006 p.); LXV, LXVI, LXVII наукових конференціях професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету (Київ, 2009, 2010, 2011 p.); Міжнародній науково-технічній конференції „Полимерные композиты и трибология” (Гомель, 2009 p.); Міжнародних науково-практичних конференціях „Ольвійський форум-2011 (2012): стратегії України в геополітичному просторі” (Ялта, 2011 p.; Севастополь, 2012 p.); 15-й Міжнародній науково-технічній конференції „Инженерия поверхности и реновация изделий” (Затока, 2015 p.); науково-практичній конференції „Трибология, энерго- та ресурсозбереження” (Миколаїв, 2016 p.); XI, XII Міжнародних науково-технічних конференції „Авіа-2013”, „Авіа-2015” відповідно (Київ, 2013, 2015); Міжнародній науково-технічній конференції молодих науковців „Сучасні технології в механіці” (Хмельницький, 2016p.); The seventh world congress „Aviation in the XXI-st century”: „Safety in Aviation and Space Technologies” (Kyiv, 2016 p.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 50 наукових праць, у тому числі: 27 статей у фахових виданнях переліку МОН України, з них 14 у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; 5 статей у закордонних періодичних виданнях; 13 матеріалів та тез доповідей на науково-технічних конференціях; 4 патенти на винахід та 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, семи розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 416 сторінок. Обсяг анотації складає 27 сторінок. Дисертація містить 107 ілюстрацій (із них тих, що займають повну сторінку – 8), 23 таблиці (із них тих, що займають повну сторінку – 4). Список використаних джерел із 465 найменувань займає 48 сторінок. Додаток містить 31 сторінку. Обсяг основної частини дисертації становить 298 сторінок.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ОЦІНКИ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФРИКЦІЙНОГО КОНТАКТУ З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГЕТИЧНИХ, РЕОЛОГІЧНИХ І СТРУКТУРНО-ФАЗОВИХ ПАРАМЕТРІВ

1.1. Механізми зношування зубчастих передач по профілю зуб'їв.

Механізм зносу евольвентного зачеплення досить складний. Робочі поверхні піддаються абразивному, адгезійному, механо – хімічному, окислювальному і іншим видам зносу. В даний час немає точного аналітичного методу розрахунку довговічності зубчастих передач по зносу внаслідок значної складності протікаючих при цьому процесів і різноманіття факторів, які впливають на інтенсивність зношування [241, 266, 307, 406, 428].

Зубчасті передачі відносяться до елементів трибоспряжень, в яких умови зношування не зберігаються постійними для всіх точок контактуючих поверхонь. Це є причиною нерівномірного зносу пар тертя. Найбільш поширеними видами руйнування поверхонь тертя зубчастих коліс є контактне втомне викришування та знос [367, 384]. Закордонні дослідження в області зносостійкості зубчастих коліс проводяться за стандартом DIN 3990 частина 5, який визначає порядок проведення досліджень зубчастих передач і визначення межі витривалості для різних видів матеріалів, включно таких як термічно і механічно зміцнених зубчастих коліс [425]. Механізм розрахунку зубчастих коліс, відповідно до вищезгаданого стандарту, заснований на опорі викришуванню у зубчастих колесах. Втома поверхневого шару (викришування) є найбільш значущим параметром для розрахунку вантажної здатності.

Поверхневі шари в процесі експлуатації відкритих зубчастих коліс руйнуються в результаті циклічної дії згинальних напружень і зношування, яке обумовлене проковзуванням контактуючих поверхонь шестерні і колеса. При цьому максимальні напруги вигину концентруються в основі зуба і в зоні виходу, де виникає

концентрація напружень. Для прямозубих зубчастих коліс коробок передач максимальні напруження вигину досягають 850 МПа [88], а для цементованих важконавантажених зубчастих коліс – до 2500 МПа [5]. Перевищення фактичних напружень вигину їх допустимих значень призводить до поломки зуб'ів.

Детальне дослідження процесів тертя – зношування зубчастих передач представлені у статті [458]. Глибина зносу від бокових поверхонь зубчастих передач розраховується з використанням розробленої математичної моделі. Комплексне поверхневе пошкодження зубчастих передач не представляється можливим визначити детермінованим чином. Взаємодія окремих процесів пошкодження не однакова для різних рівнів напруження, для різних матеріалів, термічного і механічного зміцнення, мастила і т.д. Ця взаємодія є стохастичною і може бути представлена за допомогою статистичних моделей і параметрів.

Розрахунок зуб'ів на контактну міцність в даний час добре відомий, в той час як надійний розрахунок зуб'ів на стирання, внаслідок дуже великої складності протікаючих фізико-хімічних процесів і різноманіття факторів, що впливають на знос, в літературі відсутній.

В роботі [14] розглядається можливість оцінки зносостійкості циліндричних прямозубих зубчастих передач, ґрунтуючись на отриманих закономірностях окисного зношування матеріалів поверхонь тертя.

Авторами [15] застосований кінетичний підхід до розкриття показників механо-хімічного зношування. Суть методу полягає в тому, що швидкість руйнування поверхневих структур визначається за швидкістю їх утворення, оскільки ці два процеси знаходяться в динамічній рівновазі. Це дозволяє інтерпретувати сам процес зношування як складну трибохімічну реакцію між металом і киснем. Згідно [15], швидкість окисного зношування матеріалу елементів тертя, які не перебувають постійно в зоні фрикційного контактування, залежить як від середніх концентрацій окислювача в межах поверхневої зони металу і поза нею (відповідно C_1 і C_2), так і від параметрів хімічної активності поверхонь тертя.

Спряження робочих поверхонь зуб'ів шестерні і колеса характеризуються як відносним проковзуванням профілів в зоні контактування, хімічно активованих

поверхневих шарів матеріалу, так і рухом зони контакту за профілями зуб'ів в цілому. Причому останній визначає швидкість доставки мастильного матеріалу, що містить активні компоненти, в зону тертя.

У моделі [15] швидкість зношування шестерні і колеса знаходиться з виразу:

$$\gamma = [(-k_b C_1) + k_b C_2] \mu t A / \rho, \quad (1.1)$$

де ρ – щільність металу; μ – молярна вага молекулярного кисню; t – стехіометричний коефіцієнт, що дорівнює ваговому відношенню заліза і кисню, які містяться в продуктах зносу.

Вихідними даними для розрахунку швидкостей зношування в роботі [238] є наступні параметри: властивості матеріалів і навколишнього середовища, навантажувально– швидкісні і геометро– кінематичні параметри. На рис. 1.1а представлені експериментальні та теоретичні епюри зносу зуб'ів шестерні прямозубої передачі.

Згідно з розрахунком, у полюсній зоні, де ковзання відсутнє, при прийнятих передумовах зносу зуб'ів не повинно бути. Однак пластичні деформації, а також спотворення евольвентного профілю при зносі, обумовлене ковзанням, сприяють формозміні і в цій зоні. Цим же пояснюються значні розбіжності експериментальних і розрахункових зносів в полюсній зоні. Про наявність пластичних деформацій в зазначеній зоні можна судити і за результатами щодо високого ступеня наклепу матеріалу [104, 191, 327] (рис. 1.1б).

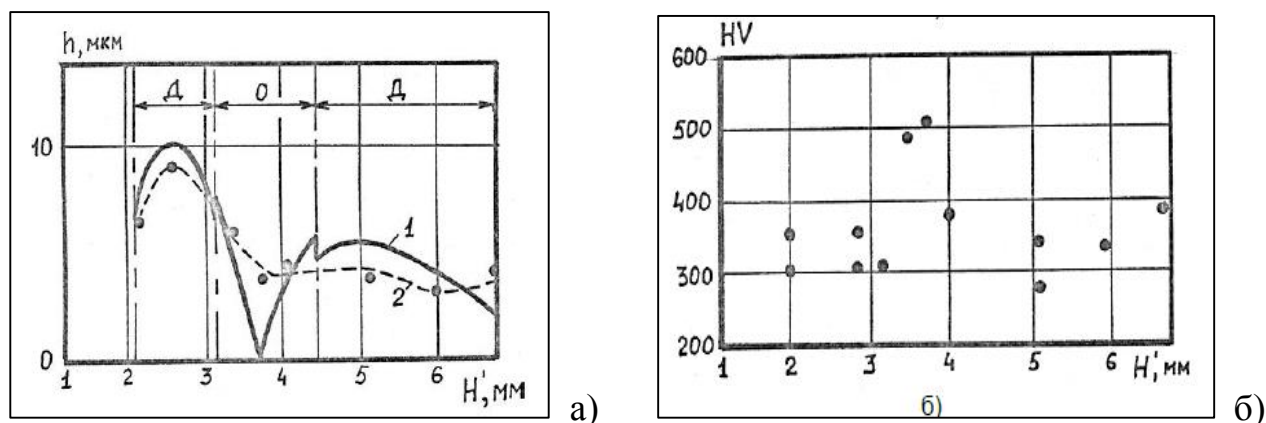


Рис. 1.1. Теоретичний (1) і експериментальний (2) знос (а) і мікротвердість (б) робочої поверхні зуба шестерні в функції висоти зуба. D – ділянка двопарного контакту, O – ділянка однопарного зачеплення [238].

Однією з найбільш навантажених ділянок профілю зубчастого колеса є перехідна зона від евольвентної зони до впадини [124]. У роботах [53, 56, 266, 314, 324] показано практичне застосування алгоритму моделювання плоского зачеплення при зносі профілів зубів від стирання. Алгоритм моделювання плоского зачеплення при зносі включає мультиплікативні критерії зносу, що залежать від швидкості ковзання і контактних напружень [241].

Встановлено, що в найбільш прилеглих до полюсної зони ділянках виникають два різноспрямованих неколінеарних вектори швидкості ковзання з нульовими значеннями в полюсі і відповідні їм різноспрямовані неколінеарні дотичні напруження від сил тертя, що розтягують тіло зуба в полюсній зоні [242]. Контакт полюсних ділянок супроводжується дрейфом полюса з точки P_2 в точку P_3 (рис. 1.2). Протягом усіх наступних циклів розташування точок змінюється, що призводить також до зносу і в приполюсній зоні. По мірі зношування, середнє положення полюса зміщується вздовж міжосьової лінії в напрямку від точки O_1 до точки O_2 (рис. 1.2).

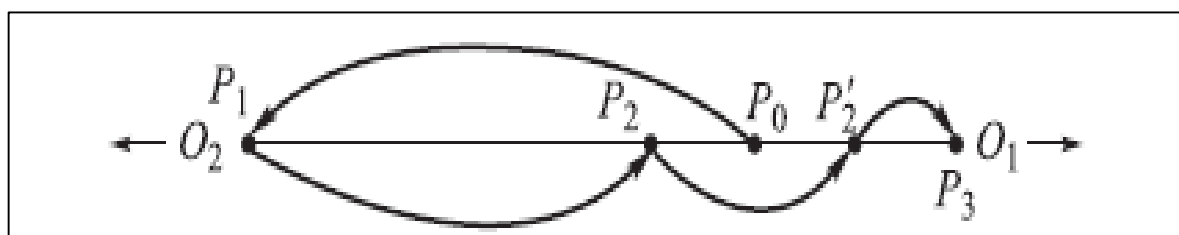


Рис. 1.2. Переміщення полюса в зачепленні зношеного профілю (згідно [242]).

Викришування – це результат процесу втомленості на поверхневому шарі зубчастой передачі. Згідно [425], розвиток тріщини може початись між впадинами по шорсткості поверхні чи під поверхневим шаром (рис. 1.3). Відповідно розподілу тиску за Герцем, зона локалізації максимального навантаження розташована нижче поверхневого шару (рис. 1.3а). Шар мастильного матеріалу впливає на зниження герцівського розподілу тиску і створює умови щодо змінити локалізації ділянки максимального тиску, виводячи її на поверхню (рис. 1.3б). Автор [425] доводить, що у випадку кращого змащування тріщини виникають між нерівностями по зонах шорсткості контактних поверхонь. Для прояву та реалізації цього процесу необхідно

проводити велике число циклів напрацювання при певному навантаженні. Шорсткість та профіль відхилень при мікрОВикришуванні (рис. 1.3б) спочатку збільшується, надалі характеризується повільним зростанням, що поступово призводить до відділення великої кількості матеріалу від бокових поверхонь. Цей процес може бути припинений або сповільнений шляхом усунення мікрОВикришування тертям–ковзання. У випадку переходу трибосистеми в критичні режими мащення, при домінуванні напівсухого або граничного режимів мастильної дії, тріщини виникають під поверхневим шаром і для прояву цього процесу потребується менша кількість циклів навантаження (рис. 1.3а). Ці тріщини можуть збільшуватися і ставати дуже великими, їх складно виявити при терті–ковзанні. Даний глибинний тип викришування може проявлятися після відносно малих циклів навантаження для матеріалів з невисокою твердістю і після значно вищих циклів навантаження для сталевих зміцнених поверхонь.

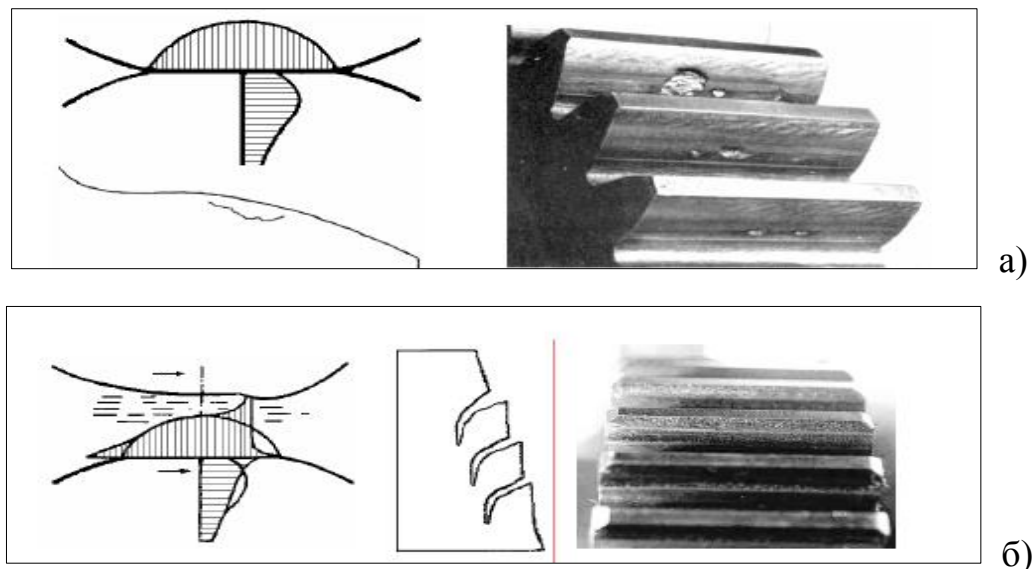


Рис. 1.3. Умови викришування зубчастих передач: а) герцівський розподіл напружень і розвиток викришування, б) ефект змащування при розподілі напружень і розвиток викришування (згідно [425]).

У роботах [93, 94, 95] розглянуто процес зношування зуба біля полюсної зони. Встановлено, що знос в зоні полюса пов'язаний з неточністю виготовлення і монтажу, з вібрацією зуб'ів, їх жорсткістю, зносом евольвентного профілю головки і ніжки

зуб'ів і т.п. Використовуючи варіаційні принципи механіки і принцип мінімуму виробництва ентропії для відкритих систем, з урахуванням дисипації енергії, отримані вирази, що визначають форму "природного" зносу біля полюсної зони. Теоретично обґрунтовано появу виїмки на зубі шестерні (провідний елемент) і валика на сполучному зубі колеса. Наявність виїмки на провідному елементі і валика на відомому призводить до зменшення зони ковзання зуб'ів і збільшення зони "перекочування" – кочення, що призводить до деякого підвищення ККД передачі і зниження темпу зношування за рахунок заміни тертя ковзання тертям кочення.

Дослідження [121, 125] показали, що знос від проковзування сталевих 45Х кульок був незначним за наявності в фрикційному контакті низьких показників ступеня проковзування (0,4%). При застосуванні в якості тіл кочення циліндричних роликів і встановлення коефіцієнту проковзування на рівні 17,7%, процеси зношування контактних поверхонь до початку виникнення пітингу починали домінувати, порівняно з пластичною деформацією поверхневого шару. У відкритих зубчастих передачах знос від проковзування ще більше у зв'язку з зростанням ймовірності попадання пилу та іншого абразиву в зону тертя. Знос при цьому за період експлуатації досягає сотні або тисячі мікрометрів і зубчасті колеса виходять з ладу не від прояву процесів пітингу, а від зносу і втомного руйнування зуб'ів при вигині.

Дослідження авторів [107, 139] показують, що максимальні напруження при контактних навантаженнях і вигині виникають в поверхневих шарах, що призводить до виникнення мікротріщин і руйнування як поверхні, так і конструкції в цілому в результаті розвитку і поширення мікротріщин з поверхні в серцевину.

Тому для підвищення зносостійкості і довговічності конструкційних елементів і, зокрема зубчастих коліс, слід зміцнювати як поверхневий шар, так і серцевину, але з різними фізико–механічними характеристиками – великими на поверхні і меншими в серцевині [124]. Тобто, характеристики зміцнених шарів повинні відповідати градієнтним показникам відповідно до напружено–деформованого стану, що виникає в деталі при експлуатації.

При зносі відбувається перерозподіл (за профілем зуба) величин питомого ковзання і питомої роботи тертя, причому максимумами їх зменшуються в заплюсній зоні і зсуваються в бік полюса зачеплення, що призводить до інтенсифікації зносу в цій зоні [265]. Таким чином, на відміну від евольвентного незношеного зачеплення, питоме ковзання і питома робота тертя в приплюсній зоні зношених профілів не наближаються до нуля, а можуть мати максимальні значення.

1.2. Фактори, що впливають на силу тертя при граничному режимі мащення.

На процес зовнішнього тертя впливає велика кількість чинників: напружено-деформований стан, механічні та фізико-хімічні властивості контактуючих тіл, навколишнє середовище, режим роботи і т.д.

Згідно молекулярно-механічній теорії тертя І.В. Крагельського, сила тертя визначається адгезійною і деформаційною складовими [146]. Взаємодія твердих тіл полягає в подоланні сил молекулярного тяжіння (адгезії) між контактуючими тілами по площі фактичного контакту, а також в формозміні рельєфу контактних поверхонь в результаті пружно-пластичних деформацій їх приповерхневих шарів.

Тангенціальне зусилля, необхідне для зсуву двох тіл, має подолати молекулярні сили зчеплення [371]. У разі різнорідних металів з сильними зв'язками зчеплення, міцність на зсув міжфазних зв'язків може перевищувати міцність на зсув більш м'якого з двох металів. При цьому статична сила тертя (F_s) буде залежати від міцності на зсув більш м'якого матеріалу (τ_m) і площі контакту (A). З точки зору статичного тертя, статичний коефіцієнт тертя (μ_c), згідно [400], визначається зі співвідношень:

$$F_s = \mu_c N = \tau_m A, \quad (1.2)$$

$$\mu_c = \left(\frac{\tau_m A}{N} \right) A, \quad (1.3)$$

де N – навантаження.

Лінійна залежність сили тертя від міцності зсувного зчеплення на межі розділу фаз матеріалів контактуючих поверхонь характеризується позитивними проявами при наявності плівок оксидів і граничних плівок мастильних матеріалів.

Наявність окисного шару перешкоджає збільшенню зон схоплювання металів. Однак, при видаленні даного шару, наприклад, нагріванням у вакуумі, зони схоплювання розростаються до тих пір, поки площа фактичного контакту не досягає номінальної площі і не відбувається повного схоплювання поверхонь [36].

Як відомо з роботи [340], напруга зсуву (τ) прямо пропорційна контактному навантаженню (σ_n), що впливає на контактні поверхні:

$$\tau = \tau_0 + \alpha \cdot \sigma_n. \quad (1.4)$$

Згідно з даними [345], залежність дотичного напруження при нормальному контактному навантаженні, що не перевищує 200 МПа, характеризується співвідношенням:

$$\tau = 0,85\sigma_n. \quad (1.5)$$

Якщо нормальний тиск перевищує 200 МПа, то для визначення дотичного напруження використовується залежність:

$$\tau = 50 + 0,6\sigma_n. \quad (1.6)$$

Наведені формули справедливі для широкого діапазону матеріалів різної твердості і пластичності [345].

При граничному режимі мащення проявляється ефект тонких плівок мастильного матеріалу, що призводить до зниження тертя і (або) зносу. Практичний досвід показує, що рідкий мастильний матеріал, який проходить через зону тертя, зазнає певних змін. Мастильний матеріал насичується металевими частинками і продуктами руйнування вторинних структур, що утворюються на поверхні тертя в результаті взаємодії поверхні твердого тіла з навколишнім і проміжним (олива, повітря) середовищами. Утворений в результаті тертя модифікований шар сприяє поліпшенню триботехнічних характеристик контактних поверхонь. Вважається [399], що зростання коефіцієнту тертя при підвищених навантаженнях обумовлено частковим розривом мастильної плівки і утворенням металевих контактів.

Згідно [168], трансмісійні оливи, які застосовуються в даний час, забезпечують необхідну довговічність гіпоїдних передач тільки в певних навантажувальних діапазонах. У важконавантажених транспортних засобах через великі показники контактних тисків, які досягають величини до 4000 МПа, локальна температура може

досягати 1000 градусів Цельсія, що призводить до розриву мастильної плівки і неминучого металевих контакту, внаслідок чого відбувається стрімке зростання дотичних напружень. Довговічність гіпоїдних передач значною мірою залежить від напруженого стану в фрикційному контакті, який в свою чергу визначається рівнем дотичних складових зовнішніх сил.

Дотичні навантаження є функцією сил тертя, величина яких визначається властивостями мастильних матеріалів, які застосовуються в конкретних експлуатаційних умовах. Зниження сил тертя за рахунок поліпшення властивостей мастильних матеріалів шляхом додавання в них твердих порошкових добавок істотно впливає на розподіл контактних тисків, зниження температури, запобігання задирів і захоплення контактуючих поверхонь.

Модель граничного режиму мащення. Домінуюче значення поверхневих шарів стає особливо очевидним в тих випадках, коли тертя металів відбувається в умовах граничної змащувальної дії, так як мастильного матеріалу вистачає тільки для утворення адсорбційної плівки товщиною, що співвідноситься з молекулярними розмірами складових компонентів оливи. Згідно [36], адсорбційна плівка знижує тертя за рахунок зменшення площі, по якій здійснюється істинний високоміцнісний металевий контакт. При цьому виконується така умова для граничного режиму мащення:

$$F = A[\alpha\tau - (1 - \alpha)\tau_{cm}], \quad (1.7)$$

де A – площа фактичного контакту; α – частка загальної поверхні A , по якій здійснюється істинний металевий контакт; τ – міцність на зсув більш м'якого металу; τ_{cm} – міцність на зсув мастильної плівки.

Згідно з даними роботи [462], сила тертя при граничному режимі мащення визначається як:

$$F = A_r[\alpha \cdot s_m + (1 - \alpha)s_l] + F_f, \quad (1.8)$$

де A_r – фактична площа контакту; α – частка загальної поверхні, по якій здійснюється істинний металевий контакт, яка дорівнює відношенню номінальної площі контакту до фактичної; s_m – міцність на зрушення більш м'якого металу; s_l – міцність на зрушення мастильної плівки, F_f – сила пропахування.

Складовими сили тертя при цьому є сили тертя на ювенільних поверхнях, сили адгезійного зчеплення на ділянках, покритих граничними плівками, і сили пропахування [462].

Якщо прийняти, що навантаження $N = A_r \sigma_s$, де σ_s – межа плинності більш м'якого матеріалу, то коефіцієнт тертя (f_m) при граничному режимі мащення може бути отриманий за допомогою рівняння [408, 465]:

$$f_m = \frac{F}{N} = \alpha \frac{s_m}{\sigma_s} + (1 - \alpha) \frac{s_l}{\sigma_s}. \quad (1.9)$$

При дотриманні умови $\alpha = 0$, вся ділянка контакту покрита граничною плівкою. При граничному режимі мащення сила тертя може бути апроксимована:

$$F = A_r s_l; \quad f_m = s_l \sigma_s. \quad (1.10)$$

Отримано залежність коефіцієнта тертя при граничному режимі мащення з урахуванням уявлень про термофлуктуаційну природу міцності тонкої плівки мастильного матеріалу як структурованого квазітвердого середовища, що знаходиться під дією нормальних і зсувних напружень [285, 286]. За таких умов коефіцієнт тертя може бути розрахований за формулою:

$$f = 2\eta_0 \exp(\alpha p_r) v_0 \exp\left(\frac{E_a - \gamma p_r}{RT}\right) p_r^{-1} \sinh\left(\frac{\gamma p_r}{RT}\right) \quad (1.11)$$

Ця формула справедлива при $p_r < p_c$. Якщо тиск p_r перевищує критичне значення p_c , то будемо вважати, що в'язкість мастильного матеріалу не залежить від тиску, а кількісна оцінка в'язкості відповідає величині, що досягається при критичному тиску.

На рис. 1.4, згідно [285], показана залежність коефіцієнта тертя при граничному режимі мащення від енергії активації руйнування адгезійних зв'язків компонентів оливи з поверхнею твердого тіла при наступних даних: $h_0 = 0,4 \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$, $a = 1.33 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{Н}$, $g = 10^{-27} \text{ м}^3$, $p_r = 3 \cdot 10^8 \text{ Н}/\text{м}^2$, $T = 320 \text{ К}$.

За представленим графіком (рис. 1.4) можливо знайти енергію активації експериментальним шляхом за виміряним коефіцієнтом тертя при контрольованих в експерименті факторах, що входять в рівняння (1.11).

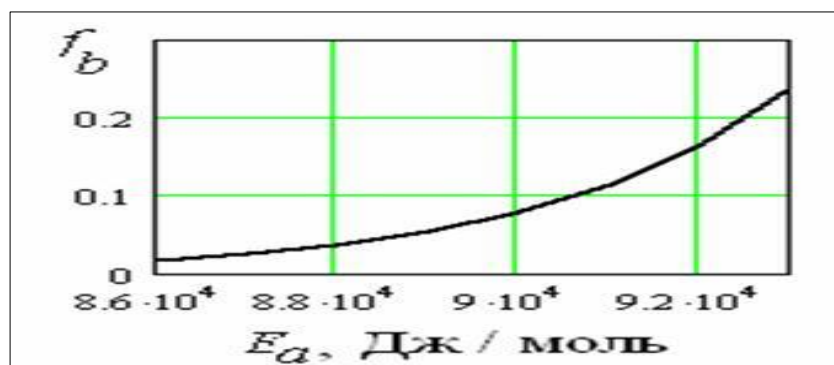


Рис.1.4. Залежність коефіцієнта тертя при граничному режимі мащення від енергії активації руйнування адгезійних зв'язків оливи з поверхнею твердого тіла.

Вплив в'язкості мастильного матеріалу на антифрикційні властивості трибоконтакту.

Вплив тиску на зміну в'язкості мастильного матеріалу виражається в аналітичній формі наступним чином (формула Баруса):

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p), \quad (1.12)$$

де η_0 – в'язкість при атмосферному тиску, α – п'езокоефіцієнт в'язкості, p – тиск.

Однак, ця формула справедлива до певної товщини мастильного матеріалу, коли тиск не перевищує критичного значення p_c [287].

В роботі [288] розглянуто квазітвердий стан мастильної плівки під високим тиском. Передбачається, що плівка має блочну (кластерну) структуру, яка знаходиться в русі під дією зовнішньої зсувної сили. При невеликій величині зсуву проявляється самоузгоджений рух окремих блоків, який в певний момент переходить в стадію формування консолідованих блоків, руйнування яких вимагає збільшення зсувного зусилля. Після руйнування області консолідованих блоків в плівці знову відбувається самоузгоджений рух блоків. Наявність таких переходів є одним з пояснень стрибкоподібного характеру руху поверхонь тертя.

В'язкість структурованого середовища визначається виразом:

$$\eta = \frac{\tau}{2\nu_0 \sinh(\tau V/RT)}. \quad (1.13)$$

В наведеній залежності ν_0 – частота коливань атомів ($\nu_0 = 10^{13} \text{ c}^{-1}$), $\sinh(\tau V/RT)$ – гіперболічний синус.

Прийнявши залежність між напругою зсуву і тиском у вигляді: $\tau = fp$, де f – коефіцієнт тертя, можна використовувати формулу (1.13) для визначення коефіцієнта тертя при граничному режимі мащення.

Кількість переходів в прямому і зворотному напрямках, яке визначається зовнішньою питомою силою зсуву, можна оцінити, замінивши τ на p_r з урахуванням співвідношення $\frac{\tau V}{RT} \propto \gamma p_r / RT$, де \propto – символ пропорційності, γ – структурно-чутливий коефіцієнт, який має розмірність об'єму і є інтегральною характеристикою стану мікрооб'ємів навантаженого тіла в термофлуктуаційній теорії міцності [250].

В роботі [286] передбачається, що структура плівки мастильного матеріалу складається принаймні з двох відмінних один від одного шарів, а саме, з QL– і QS– шарів. Характерні відмінності цих шарів полягають у наступному. QL– шар є шаром адсорбованих молекул (по W. Hardy). Модуль пружності цього шару залежить від товщини шару молекул, а коефіцієнт Пуассона близький до 0,5. На відміну від цього шару, QS– шар, який безпосередньо прилягає до поверхні твердого тіла, не передає гідростатичного тиску. Його структура в більшій мірі залежить від особливостей будови поверхні твердого тіла. При підвищених навантаженнях QL– шар видавлюється з контактної зони, і несуча здатність контакту визначається квазітвердим QS– шаром.

Методами молекулярної динаміки виявлено, що обмежені твердими поверхнями ультратонкі шари мастильних матеріалів проявляють фазові переходи першого роду між твердим і рідким станами [436]. Такі переходи обумовлюють прояв переривчастого режиму руху, що спостерігається експериментально для простих ізотропних рідин, затиснутих між двома кристалічними тілами [405, 452]. Методами комп'ютерного моделювання показано, що в переривчастому режимі руху реалізується "плавлення зсувом", коли при перевищенні зсувними напруженнями критичного значення відбувається розупорядкування структурованих компонентів мастильного матеріалу [336, 390].

В роботі [199] запропонована нерівноважна еволюційна термодинамічна модель, що описує процеси, які відбуваються в граничному режимі мащення. Для опису стану мастильного матеріалу введений параметр надлишкового об'єму, який

приймає мінімальні значення при твердоподібній структурі мастильного матеріалу, і збільшує свої значення при плавленні граничної плівки мастильного матеріалу. Експериментально встановлено, що якщо під час плавлення об'ємних мастильних шарів зростання додаткового об'єму становить кілька відсотків, то для граничних змащувальних шарів при зсуві поверхонь тертя в динамічному режимі, і їх подальшому русі після плавлення мастильного матеріалу його об'єм може збільшуватися більш ніж в 2 рази, в порівнянні з твердоподібним станом [164].

Структуризація мастильного матеріалу істотно впливає на антифрикційні властивості контакту. В роботі [164] розкриті механізми зміни сили тертя з позицій фазових переходів (рис. 1.5).

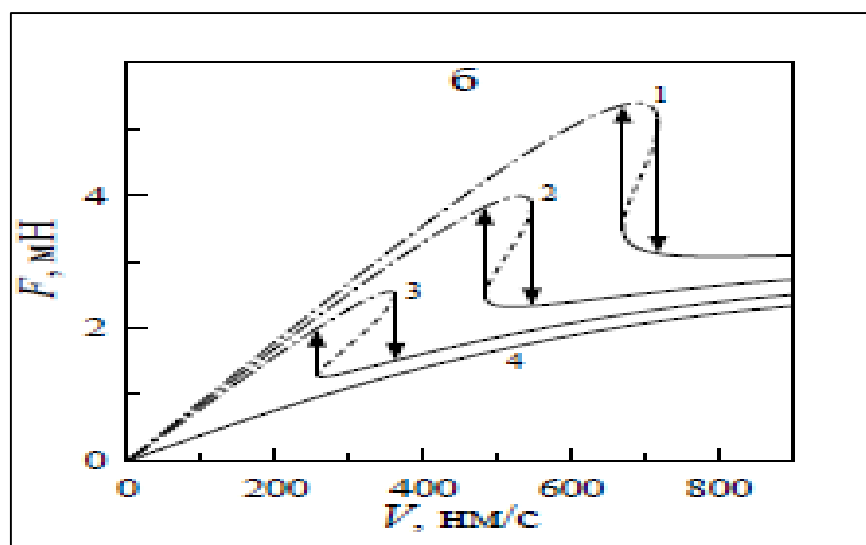


Рис. 1.5. Залежність сили тертя від швидкості зсуву (V) і температури мастильного матеріалу (T): 1 – 200К, 2 – 245К, 3 – 280К, 4 – 310К (згідно [164].)

При низьких швидкостях зсуву пружні напруження зсуву (τ) високі внаслідок твердоподібного стану мастильного матеріалу, реалізується сухе тертя, яке характеризується низькими антифрикційними властивостями. Подальше підвищення швидкості зсуву обумовлює плавлення мастильного матеріалу в фрикційному контакті, пружні напруження зсуву істотно зменшуються, що призводить і до кореляційного зменшення сили тертя. З подальшим збільшенням швидкості зсуву сила тертя зростає як за рахунок в'язкої складової сили тертя, так і за рахунок

зростання пружних напружень внаслідок збільшення пружних деформацій. Слід зазначити, що при перевищенні швидкістю зсуву критичної позначки, пружні напруги стануть дорівнюють нулеві – подальше зростання сили тертя буде здійснюватися за рахунок збільшення швидкості зсуву.

Слід зауважити, що зміна структурного стану плівки мастильного матеріалу під впливом стискаючого і зсувного навантажень мало вивчено. Для більш повного обґрунтування отриманих залежностей необхідне проведення додаткових досліджень і надійна інтерпретація отриманих результатів.

1.3. Механізми утворення вторинних структур, які характеризуються ефективними протизношувальними властивостями.

Розвиток сучасної техніки пред'являє все більш зростаючі вимоги до робочих характеристик конструкційних матеріалів, до зниження металоємності деталей, підвищення їх економічності і якості. У комплексі проблем підвищення надійності і довговічності машин особливе місце займає питання зносостійкості і, відповідно, твердості деталей [267, 269, 311, 332, 362, 374].

Ресурс роботи, надійність в експлуатації, конструктивна міцність, техніко-економічні показники роботи деталей машин і механізмів багато в чому визначаються механічними властивостями сталей і сплавів, з яких вони виготовляються. Тому поліпшення якості поверхні деталей машин і механізмів підвищує ресурс роботи, особливо якщо він визначається механічними і триботехнічними властивостями поверхні [129,130, 280, 282].

Основні зміни матеріалу при терті локалізуються в тонкому (до декількох мікрометрів) поверхневому шарі. Локалізація напруг і їх імпульсний характер при терті призводять до генерації деформаційних дефектів (точкових дефектів, дислокацій, смуг ковзання та ін.) [30, 138, 156, 232]. Ці дефекти, зароджуючись на поверхні, переміщуються згодом на деяку глибину, обумовлюючи розвиток пластичної деформації і дислокаційної субмікроструктури в поверхневому шарі.

Основи теорії структурної пристосованості, перехідних станів і самоорганізації трибосистем були сформульовані Л.І. Бершадським, подальший розвиток основних положень цієї теорії з урахуванням метастабільного стану вторинних структур і їх структурно-енергетичного стану в результаті пристосованості представлено в роботах Б.І. Костецького [24, 25, 142, 227].

Активовані в процесі тертя поверхневі шари металу знаходяться в нестійкому метастабільному стані, наявність активних компонентів мастильного середовища і кисню повітря сприяють інтенсифікації протікання реакцій пасивації [16, 68, 143, 378, 429]. В роботі [366] відзначається, що при терті можливі три види процесів пасивації поверхонь: взаємодія матеріалу з активними елементами середовища, і як результат— утворення плівок хімічних сполук (вторинні структури); взаємодія з матеріалом контртіла (схоплювання); внутрішня перебудова структури поверхневих шарів. Процес зовнішнього тертя сталевих поверхонь передбачає реалізацію першого виду пасивації, який протікає при наявності активних компонентів навколишнього середовища [378]. При цьому утворюються структури окисного походження, які захищають основний матеріал від руйнування. Надалі, по мірі зростання цих структур, вони самі стають регенерованими об'єктами руйнування. Зв'язок пропорційності між кількістю поглиненого кисню повітря поверхневими шарами елементів трибоспряження і їхнього зносу, представлений в ряді робіт [16, 429, 430], переконливо доводить про поверхневий механізм зношування. У всіх випадках при терті металів вторинні структури представляли собою окисли заліза стабільного нестехіометричного складу з нестачею по кисню типу $\text{FeO}_{0,3}$ на глибину до 1 мкм. При цьому, ні режими тертя, ні навантаження не змінювали стехіометричного складу [16].

Згідно молекулярно—механічній теорії тертя, зовнішнє тертя реалізується з мінімальною роботою в тому випадку, коли міцність адгезійного зв'язку між контактуючими поверхнями менше міцності нижчерозташованих поверхневих шарів, тобто коли має місце позитивний градієнт механічних властивостей по глибині. У цьому випадку вся деформація при терті буде зосереджуватися в тонкому поверхневому шарі. За реалізації таких умов в контакті не передбачається

катастрофічного руйнування і глибинного викиду матеріалу пар тертя. В зв'язку з цим широке застосування знаходять тверді мастильні матеріали (сульфіди, селеніди, фториди, фосфіди і т.д.), які утворюють на поверхні тертя захисні плівки (вторинні структури) і характеризуються збереженням працездатності вузлів в великому діапазоні швидкостей і навантажень, в тому числі і в екстремальних умовах [41, 55].

Дослідження матеріалів Fe – Mo – MoS₂ при утворенні вторинних структур в процесі тертя показали, що поверхнева плівка формується в процесі припрацювання [181]. З формуванням на поверхнях тертя вторинних структур коефіцієнт тертя знижується, а з утворенням стійкої плівки – стабілізується. Вторинні структури взаємодіють з поверхнею основної фази і утворюють плівки товщиною до 0,05 мкм, забезпечуючи тим самим працездатність матеріалу, так як при такій товщині плівки число орієнтованих моношарів атомів може досягати декількох десятків. Наприклад, для графіту – 70 ... 80, для дисульфиду молібдену – 30 ... 40 і т.д. [34, 297]. При низьких навантаженнях і швидкостях ковзання час формування плівки збільшується. При великих навантаженнях, що перевищують межу пружності матеріалу, основа матеріалу піддається пластичній деформації, і плівка руйнується. В екстремальних умовах тертя між контактуючими поверхнями виникають міжмолекулярні і міжатомні сили взаємодії, отже, активізуються дифузійні процеси, і матеріал втрачає працездатність. Проведено дослідження впливу фазового складу антифрикційних матеріалів на механізм утворення вторинних структур [297]. При вмісті твердих мастильних речовин (< 15% об.) плівка формується не по всій робочій поверхні. Надмірна ж кількість твердих мастильних компонентів (> 25% об.) також характеризується негативним впливом, знижуючи фізико-механічні властивості зносостійких антифрикційних порошкових матеріалів (ЗАПМ), і може бути зарахована до "продуктів зносу". Експериментально встановлено, що оптимальна товщина сформованої плівки складає 0,1 ... 0,2 мкм.

Високі ступені деформації контактуючих поверхневих шарів середньовуглецевих сталей при терті обумовлені ротаційним деформуванням, яке нерідко супроводжується вихровою пластичною течією матеріалу. В результаті таких деформацій утворюється фрагментована структура з відносним розворотом її

високодисперсних фрагментів в площині, перпендикулярній поверхні тертя і паралельній вектору швидкості ковзання [29]. В роботі [243] представлені результати, отримані при випробуваннях зразків нормалізованим методом. Умови випробувань були підібрані таким чином, щоб реалізовувався втомний механізм зношування при граничному режимі навантаження. Тому більшість поверхневих шарів контактних поверхонь містили втомні пошкодження у вигляді мікротріщин, поодиноких і групових впадин. В окремих випадках спостерігалось відшарування поверхневого шару. Причина такого руйнування полягає в різному ступені деформації поверхневого шару і основи. Абразивна обробка і процес тертя істотно змінюють структуру приповерхневих шарів, які характеризуються надбанням вищої мікротвердості, формуючи, таким чином, концентратор напружень. Він і обумовлює відшарування приповерхневих шарів. Особливо яскраво це проявляється у неіржавої сталі, у якій може відшаруватися відразу кілька приповерхневих шарів. Збільшення навантаження на зразки призвело до інтенсифікації захоплювання поверхонь, переважно у зразків з неіржавої сталі, внаслідок утворення локальних адгезійних зв'язків, що сприяють відділенню частинок наклепаного матеріалу з поверхні тертя. Очевидно, це пояснюється з складними процесами утворення на поверхні таких сталей окисних плівок, що перешкоджають захопленню. Зі збільшенням температури в зоні тертя змінюється мікро- і наноструктура, фізико-механічні властивості матеріалу. Досить часто при фрикційному розігріві поверхневих шарів середньовуглецевих сталей утворюються вторинні структури, в тому числі і окисні [243].

В роботі [119] визначені параметри градієнтної структури сталі 35ХГС на різних етапах механічної обробки. Встановлено, що поверхневий шар дослідженої заготовки має повністю фрагментовану структуру, яка складається з мікрозернистої ферито-перлітної суміші. Після проведення механічної обробки у всіх зразках присутні феритні зерна в двох станах: нефрагментовані і у фрагментованому стані. Перлітні зерна присутні трьох видів. Весь перліт є дефектним. Об'ємні частки кожної структурної складової на різних етапах виготовлення виробу різні. У перлітних зернах термомеханічна обробка вже на першому етапі виготовлення виробу призвела

до зміни в структурі перліту. Це проявляється у зміні морфології перліту і руйнуванні цементиту в перліті. Дослідження, виконані методом РЕМ, показали, що зерна перліту і фериту після різних етапів виготовлення, як і в початковому зразку, розташовуються один щодо одного випадковим чином.

Перспективним матеріалом для використання в важконавантажених вузлах тертя є швидкоріжуча сталь [375]. Згідно [331, 421, 427] це обумовлено більшою здатністю карбідів і матриці до окислення. У парі тертя сталь Р6М5 – сталь ШХ15 встановлено дві області катастрофічного зношування покриття при швидкостях ковзання 2,4 і 3,6 м/с і навантаженнях 60 і 100 Н відповідно [58]. В інтервалі навантажень 20 ... 40 і 60 ... 80 Н спостерігаються дві області сталого зносу. Процеси зношування контактних поверхонь, що реалізуються при швидкостях 1,2 м/с в усьому діапазоні навантажень і при швидкостях 2,4 і 3,6 м/с в інтервалі навантажень 20 ... 40Н, пов'язані з домінуванням механізмів пластичного відтиснення і мікрорізання поверхневих шарів металу продуктами зносу. Зі збільшенням навантаження при швидкості 1,2 м/с спостерігається інтенсифікація викришування частини карбідної евтектичної сітки, що пов'язано із надбанням матеріалу в процесі тертя властивостей крихкості за рахунок часткового перетворення залишкового аустеніту в мартенсит деформації. Другий інтервал втомного зносу (60 ... 80 Н) обумовлений формуванням практично суцільного окисного шару на поверхні покриття, який з ростом навантаження до 100 Н починає руйнуватися, що обумовлює розвиток другої області катастрофічного зношування. Для пари тертя «сталь Р6М5 + 20% WС» – сталь ШХ15 встановлено значне зниження інтенсивності зношування композиційного покриття (в 2 – 3 рази), в порівнянні з покриттям на основі стали Р6М5. Це обумовлено одночасним збільшенням об'ємних часток карбідної фази та залишкового аустеніту матриці. При швидкостях ковзання 2,4 і 3,6 м/с інтенсивність зношування композиційного покриття лінійно зростає з навантаженням, що в основному пов'язано з розвитком окисного зношування. Ділянки окисного шару починають формуватися вже при 20 Н.

Зниженню коефіцієнта тертя сприяє створення умов, при яких міцність виникаючих молекулярних зв'язків на поверхні тертя була б менше міцності

нижчерозташованих шарів. Це досягається введенням на поверхню тертя металевих плівок з олова, міді, бронзи, алюмінію, свинцю і їх сплавів, полімерних матеріалів [113].

При терті можливий прояв процесів утворення поверхневої плівки вторинних структур, в якій реалізується механізм деформації, що протікає без накопичення дефектів, що обумовлюють руйнування матеріалу [254]. Проведені дослідження утворених в процесі структурної пристосованості вторинних структур для контактної пари тертя ковзання: антифрикційний алюмінієвий сплав марки А020–1 – чавун марки ВЧ [197]. Встановлено, що між чавунним роликком і антифрикційним матеріалом колодки на поверхні контакту починається масопереніс матеріалу і утворення плівки вторинних структур, яка характеризується складним хімічним складом: склад окремих ділянок плівки змінюється як якісно, так і кількісно. Світла ділянка являє собою малолеговані окисли і карбіди алюмінію, кремнію, заліза. Її геометричні розміри по товщині і площі дуже незначні, вона починає утворюватися в тих місцях, де поверхня характеризується дефектною структурою: пори, мікроподряпини, наявність чіткої межі зерен і фазових областей, дефекти кристалічної будови тощо. Зміни умов в контакті, пов'язані з ростом номінального тиску і температурою, обумовлюють розвиток процесів дисипації енергії, в результаті яких відбувається насичення плівки легуючими елементами з навколишнього середовища і елементами, які входять до складу контактуючих матеріалів. Наслідком цих процесів є зростання товщини плівки, яка характеризується переходом до більш темного кольору. Пластична фазова складова, яка виділяється на поверхні поблизу ділянок фактичного контакту, для алюмінієвих сплавів це олово, яке сприяє заліковуванню дефектів поверхні і поліпшенню умов тертя, зменшуючи тим самим ймовірність утворення задирів.

В роботі [17] досліджено вплив топографії контактних поверхонь на процеси самоорганізації при терті. При механо-хімічному зношуванні досягнення оптимальної товщини утвореної плівки вторинних структур відбувається завдяки прояву двох протилежних нелінійних процесів. При товщині плівки менше оптимального значення спостерігається її прискорене зростання завдяки високій

активності підкладки та малому опору дифузії. При великій товщині плівка механічно і фізично екранує доставку активних компонентів до місця реакції. Товсті плівки є механічно нестабільними внаслідок комплексу невідповідностей з основним матеріалом. При механічній дії вони руйнуються. До ефектів нестійкої самоорганізації можна віднести встановлений факт регулярних коливань зовнішніх параметрів за умов тертя, близьких до заїдання. Дане явище пояснюється з позицій одночасного протікання зустрічних процесів. При жорстких режимах тертя швидкість доставки активних компонентів середовища виявляється недостатньою для повної пасивації поверхонь. При цьому спостерігаються явища мікросхоплювань зі збільшенням шорсткості поверхонь тертя. Перехідний опір при цьому різко падає, збільшується амплітуда окремих імпульсів акустичного випромінювання, падає його частота. Інтегральний коефіцієнт тертя характеризується зростанням. Збільшення шорсткості контактних поверхонь обумовлює підвищення контактного зазору і, як наслідок, прискорення швидкості витрати активних речовин із зовнішнього середовища. Завдяки достатній кількості реагентів процес зовнішнього тертя відновлюється, відбувається процес припрацювання зі зменшенням шорсткості. Початкове зменшення швидкості призводить до зниження темпів дезорганізації граничного шару (зворотний процес), а процеси, спрямовані на самоорганізацію (формування вторинних структур, прямий процес) ще деякий час продовжують діяти, що призводить до ще більшого впорядкування фрикційного контакту і, як наслідок, зменшення сили тертя. Таким чином, особливістю процесу граничного режиму мащення є тенденція до впорядкування, що обумовлена потоком організованої механічної енергії. Ця тенденція проявляється в утворенні різних високоорганізованих структур, які характеризуються високими антифрикційними та протизношувальними властивостями.

Формування граничних шарів мастильного матеріалу, вторинних структур, зміна структурно-фазового стану приповерхневих шарів, утворення дефектів кристалічної будови при терті контактних поверхонь обумовлені циклічним проявом процесів зміцнення і знеміцнення поверхневого шару в результаті структурної пристосованості [26, 35, 175, 231, 360, 449]. Як правило, перехід від інтенсивного

зношування до помірного супроводжується істотним поверхневим зміцненням [167, 179, 198, 306, 326, 449].

З метою вивчення закономірностей розвитку процесів структурних перетворень і зміни механічних властивостей поверхневого шару в роботі [157] досліджували зразки цементованої і термічно обробленої сталі 18X2H4BA при терті в парі ролик-ролик. При цьому спостерігалися такі перетворення і зміни властивостей:

– утворюється вторинна структура – аустеніт тертя, в першу чергу, на ділянках поверхні з вихідним залишковим аустенітом у вигляді відокремлених однорідних полів з вкрапленнями голчастого мартенситу;

– протягом усього періоду напрацювання періодично відбувається коливальний процес підвищення і зниження мікротвердості (етап різкого падіння мікротвердості збігається з часом закінчення розпаду вихідного і залишкового аустеніту; з появою нової структури – аустеніту тертя знову спостерігається різкий підйом мікротвердості);

– після досягнення максимального значення мікротвердості на якомусь етапі роботи в поверхневих шарах металу проявляється розрихлення структури, за яким слідує різке зниження твердості, що свідчить про початок руйнування.

Таким чином, процес тертя супроводжується послідовними етапами відносно рівномірного зношування. На початку спостерігається зміцнення до деякого максимуму, потім, коли вичерпується здатність матеріалу сприймати пластичну деформацію, починається різке знеміцнення і руйнування (знос). Величина зносу і частота відповідних максимумів при повторюваних циклах (зміцнення – знеміцнення) залежать від природи матеріалів і умов тертя [157]. Під терміном «зміцнення» розуміється формування нового комплексу фізико–механічних властивостей в матеріалі, що призводить до підвищення зносостійкості останнього, а не тільки до підвищення однієї твердості в результаті вторинного загартовування.

Зміцнення поверхні при терті відбувається в результаті пластичної деформації, фазових (структурних) перетворень і утворення хімічних сполук (окислів і ін.). В умовах тертя одночасно йдуть два конкуруючі процеси: на одних ділянках поверхні

спостерігається зміцнення, на інших – знеміцнення. Ці ділянки розподілені по поверхні статистично рівномірно.

В роботі встановлено [157], що ділянки підвищених значень коефіцієнта тертя відповідають появі на поверхні тертя вюститу FeO . За нормальних умов роботи елементів трибоспряжень на тих же ділянках спостерігаються окисли Fe_2O_3 та Fe_3O_4 .

Як зазначалося вище, процеси зміни мікротвердості поверхневих шарів залежать від структурно–фазових перетворень, які протікають в поверхневих шарах пар тертя. Залежність вмісту аустеніту має 2 періоди з різною кінетикою структурних перетворень: несталий (перші 15–20 хв) і сталий, квазістаціонарний період. Для першого періоду характерне зростання вмісту аустеніту (рис.1.6).

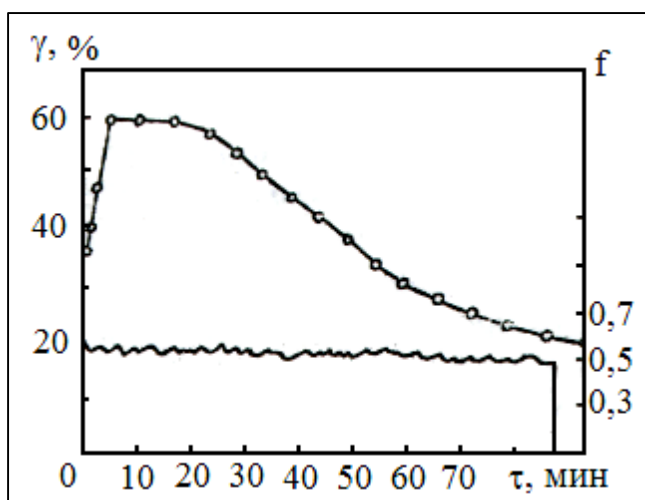


Рис. 1.6. Залежність вмісту аустеніту (γ) і коефіцієнта тертя (f) від тривалості випробування (за [157]).

При цьому спостерігається звуження ліній рефлексів, обумовлене зниженням рівня мікростворень решітки і виділенням вуглецю з мартенситу, випаданням і коалісценцією карбідів, які збігаються з початком утворення окислів. Другий період характеризується поступовим зменшенням вмісту аустеніту. У той же час мікростворення решітки практично не змінюються або навіть незначно збільшуються, кількість карбідів і окислів продовжує зростати і досягає максимуму.

Жорсткість режимів призводить до інтенсифікації процесів, що виражаються в більш різкій зміні вмісту аустеніту в початковий період і в стрибкоподібній

структурній зміні при знятті навантаження. При меншому вихідному вмісті аустеніту спостерігається збільшення його кількості в активному шарі на початку випробування. Зі зменшенням контактного тиску зміна структури протікає більш плавно, але характер зміни залишається тим же. При цьому переважаючим оксидом стає магнетит Fe_3O_4 , а кількість вюститу FeO зменшується. Мартенсит, ферит і карбіди (продукти розпаду аустеніту) окислюються легше аустеніту, тому після розпаду аустеніту поверхня додатково окислюється і весь цикл повторюється.

В роботі [289] представлені результати дослідження утворених вторинних структур на поверхнях тертя сталі 45 в парі з поліуретановими колодками, що містять в якості наповнювачів металеві порошки різного об'єму і складу. Процес утворення вторинних структур при терті характеризується перерозподілом активних елементів на поверхнях тертя і в об'ємній фазі. Сформовані вторинні структури характеризуються зменшенням кількості заліза, істотним збільшенням вмісту м'яких елементів, таких як сірка, мідь, магній, кальцій, також збільшується вміст кисню і гідроксильної групи. В роботі встановлено вплив вторинних структур на зниження енерговитрат в трибоконтаті, що є свідченням відсутності в дослідженій області значних внутрішніх напружень.

Залежно від навантажувально–швидкісних і температурних умов, існує тенденція перенесення окремих частинок вздовж контактної поверхні. При цьому окремі елементи по-різному впливають на створення вигідних вторинних структур в зоні тертя. Частина елементів, які можна назвати трибоактивними, легко утворюють подібні вторинні структури. До них відносяться: плівки легкоплавких металів (олово, свинець або евтетики на їх основі); хімічно активні елементи, які здатні утворювати захисні фази в результаті хімічних реакцій; елементи, які легко утворюють тверді розчини з матеріалом матриці і інтерметалідні фази як стехіометричного складу згідно діаграми стану, так і метастабільні, що не відповідають діаграмі стану, але більш вигідні з синергетичної точки зору [187, 256, 290]. При цьому слід зазначити, що чим більше є в зоні тертя елементів, тим більше ступенів свободи у трибосистемі у виборі оптимального процесу створення вторинних структур.

1.4. Триботехнічні та реологічні властивості граничних змащувальних шарів.

При граничному режимі мащення взаємодія між двома поверхнями здійснюється в місцях зіткнення нерівностей в фрикційному контакті. Проявом контактування елементів трибоспряжень по нерівностях шорсткості може бути широкий спектр появи термо-механо-хімічних перетворень – від пружної деформації до пластичної, аж до руйнування матеріалу; підвищення потужності тертя і інтенсифікації тепловиділення в контакті, збільшення швидкості протікання хімічних реакцій. Внаслідок реалізації цих процесів є утворення на поверхнях тертя органічних і неорганічних плівок.

Механізми утворення і будови граничних змащувальних шарів досліджувалися У.Б. Харді, А.С. Ахматовим, Ф. Боуденом, Д. Тейбором, Г.В. Виноградовим, Б.В. Дерягіним, Р.М. Матвієвським, І.А. Буяновським, В.А. Годлевським, М.В. Райко та ін. [8, 11, 59, 60, 169, 337].

Дослідження широкого спектру триботехнічних граничних шарів показало, що деякі з них характеризуються протизношувальними і захисними властивостями, а деяким притаманна руйнівна дія [386]. Хоч і процеси фізико-хімічної взаємодії мастильних компонентів з активованими в процесі тертя поверхневими шарами металу різноманітні, важкі для опису і до сих пір не до кінця зрозумілі, існує безліч моделей, що враховують процеси контактної механіки, хімії мастильних матеріалів, молекулярної динаміки, які сприяють розкриттю механізмів формування граничних плівок мастильного матеріалу в триботехнічному контакті [334, 352, 398, 446, 461].

Забруднення, легуючі елементи, компоненти мастильного матеріалу часто дифундують до поверхні, що призводить до більш високої концентрації другорядних елементів поблизу поверхні, ніж в об'ємному матеріалі. При цьому атоми в твердому тілі пов'язані між собою різними силами: ковалентними, іонними, металевими і Ван-дер-Ваальсовими силами взаємодії. Відповідно, існування різних сил взаємодії між компонентами граничних змащувальних шарів і утворених в процесі тертя вторинних структур зумовлює потребу в різній кількості енергії, щоб розірвати їх. Для окремих

кристалічних твердих тіл різні кристалічні площини часто демонструють різні фізичні, механічні, і хімічні властивості. Фрикційні дослідження показали, що для різних кристалічних фаз характерні відмінні показники опору ковзанню при терті в аналогічних умовах, що свідчить про їх анізотропні властивості [343].

В роботі [163] проаналізовані трибологічні властивості сухого, рідинного та граничного режимів мащення. Показано, що при сухому терті з ростом частоти зовнішнього періодичного впливу в залежності координати нижнього блоку тертя від часу зменшується кількість гармонік, поки при перевищенні граничної частоти не настає повне прилипання поверхонь, після чого вони рухаються як єдине ціле. У гідродинамічному випадку проаналізовані характеристики пари тертя з мастильним матеріалом, що характеризується властивостями ньютонівської рідини, а також псевдопластичних і ділатантних неньютонівських рідин. Встановлено, що псевдопластичні рідини і гранична плівка мастильного матеріалу в широкому діапазоні параметрів призводять до переривчастого режиму тертя, який є однією з основних причин руйнування деталей.

Сучасні мастильні матеріали складаються з мінеральних або синтетичних базових фракцій і пакету поліфункціональних присадок або добавок. Нафтові базові компоненти, як правило, складаються з молекул, що містять від 18 до 40 атомів вуглецю та відносяться до трьох основних типів вуглеводнів: парафіни, ароматичні вуглеводні і нафтени (циклопарафіни) [387]. Більшість молекул є змішаного типу, які містять дві або більше основні вуглеводневі структури. Зазначені базові компоненти також містять невеликий відсоток з'єднань з гетероатомами, такі як сірка, азот, кисень або трансформуються в різні стереохімічні вуглеводневі структури. Це являється однією з причин складності ідентифікації структури сформованих граничних плівок. У типових базових компонентах, масова частка ароматичних вуглеводнів зазвичай коливається в межах від 5 до 40% із середнім вмістом близько 20%, парафінів з прямим ланцюгом міститься в діапазоні від 10 до 20% і циклопарафіни складають решту. Молекули, що містять гетероатоми (N, S, O), як правило, знаходяться в базовій основі в діапазоні від 0,5 до 4% в залежності від нафти, технології обробки та класу в'язкості.

Існує багато досліджень в напрямку вивчення фізико-хімічних властивостей граничних змащувальних плівок [339, 349, 422]. Результати цих досліджень свідчать про те, що хімічний склад плівок, в основному мікронних і субмікронних частинок заліза і оксидів заліза, переплітався з високою молекулярною вагою металоорганічних з'єднань від 3000 до 100000 [370, 376]. Зовнішній вигляд і морфологія плівок може бути неоднорідними, безперервними або дискретними, і виявляють різні кольорові відтінки – від зеленого до коричневого або чорного [109, 184, 195].

За останні кілька десятиліть багато дослідників спробували виміряти міцність плівки. При дослідженні міцності на зсув тонких плівок при різних рівнях високого тиску (МПа до ГПа) встановлено, що в діапазоні цих тисків міцність на зсув збільшилася з підвищенням тиску для плівок стеарату кальцію, міді і поліетиленових плівок [341, 342]. Як правило, міцність плівки зростає зі збільшенням навантаження для базових рідин, дитіофосфатів цинку і сульфонатів кальцію, але зменшується з навантаженням у разі застосування модифікаторів тертя [9, 50, 75, 173, 453]. Підвищення температури знижує міцність на зсув мастильних шарів [108, 234, 364].

У роботах [385, 417] досліджено, що існує оптимальний діапазон прояви ефективних змащувальних властивостей при формуванні плівки мастильним матеріалом на контактних поверхнях, який залежить від зовнішніх факторів і міцності зчеплення плівки по відношенню до поверхні. Дослідження структуризації граничних плівок мастильного матеріалу показали, що на швидкість протікання окислювальних реакцій і полімеризаційних процесів істотно впливає поверхня елементів трибосопряжень, яка є складовою частиною реагуючої системи [404, 423].

Удосконалення контрольно–вимірювальних приладів і швидкий розвиток обчислювальної техніки забезпечують реальну можливість вперше досліджувати трибологічні процеси утворення дисипативних структур при терті на атомарному і молекулярному рівнях. Наприклад, комплекс SFA дозволяє вимірювати товщину плівки до 0,1 нм і фіксувати вкрай малі поверхневі сили, що надає йому значних переваг, в порівнянні з іншими приладами, та дозволяє використовувати в якості

основного інструменту при дослідженні реологічних, змащувальних і антифрикційних властивостей трибоконтакту на нанорівні [392, 393, 463].

При розрахунку сил тертя враховується залежність в'язкості оливи від тиску. Мастильний матеріал в граничному шарі характеризується анізотропними властивостями: в тангенціальному напрямку молекулярні шари легко згинаються і при певній товщині шару ковзають один по одному; по нормалі до твердої поверхні плівка характеризується високим опором стисненню. При цьому дотичні напруження на випереджаючій поверхні в умовах кочення з проковзуванням будуть визначатися за формулою [100]:

$$\tau = \mu_0 \exp^{\alpha p} \frac{U_{\Sigma}}{h} \left(3 \frac{h-h_0}{h} + \frac{V_s}{U_{\Sigma}} \right), \quad (1.14)$$

де μ_0 – динамічна в'язкість мастильного матеріалу на вході в контакт, α – п'езокоефіцієнт в'язкості, p – контактний тиск, U_{Σ} – сумарна швидкість кочення, V_s – швидкість ковзання, h – товщина мастильної плівки, h_0 – мінімальна товщина мастильної плівки в контакті ($h_0 = 0,8h$).

Однак при високому тиску в контакті дотичні напруження, що визначаються за цієї залежності, стають нереально завищеними. Для усунення цього рекомендується використовувати такі припущення: використовується гіпотеза граничних дотичних напружень ($\tau \leq \tau_{\text{пред}}$); при розрахунку в'язкості мастильного матеріалу використовується гіпотеза затвердіння оливи ($\mu \leq \mu_0 \exp(\alpha p_{\text{затв}})$); використовуються моделі неньютонівської поведінки рідини; застосовуються напівемпіричні залежності для розрахунку коефіцієнта тертя [100].

У роботах [51, 185, 209] досліджена мастильна здатність олив різного експлуатаційного призначення в нестационарних умовах тертя з урахуванням гідродинамічної і негідродинамічної складової товщини мастильного шару. Встановлено, що в нестационарних умовах тертя режим мащення за розрахунковим параметром λ визначається негідродинамічною складовою товщини мастильного шару: зміна шорсткості та приріст товщини в період пуску не залежали від складу мастильного матеріалу (відхилення, в середньому, 5 – 10%), а товщина граничних плівок коливається в межах 0,0014 – 5,77 мкм, що складає 0,024 – 100% [76, 83, 173].

Природа граничних адсорбційних шарів та їх формування залежать від фізико-хімічного складу мастильних матеріалів: підвищення концентрації ненасичених та насичених високомолекулярних вуглеводнів, дипольних молекул, ефірів дикарбонових кислот, поліальфаолефінів, ріпакової олії та добавок мілкодисперсних компонентів прискорює час адаптації граничних шарів в 1,6 – 5 разів, а наявність крупнодисперсних добавок призводить до збільшення цього параметру в 1,5 рази [96, 109, 132, 184, 193].

Встановлена лінійна кореляційна залежність між коефіцієнтом тертя та напругою зсуву масляного шару. Найефективнішими антифрикційними властивостями характеризуються адсорбційні шари фізичної природи з ламелярною структурою (мінеральні масла при $\sigma_{\max} = 250$ МПа), полімеризаційні плівки нанодисперсної добавки фулерену C_{60} та текстуровані шари MoS_2 [132, 195].

Властивості граничних шарів мастильних матеріалів значно відрізняються від їх об'ємних характеристик, що обумовлено надмолекулярною самоорганізацією граничних плівок. Такі шари відіграють значну роль в процесах дисипації енергії в вузлах тертя, що працюють в режимах змішаного і граничного режимах мащення. Крім типу поверхні і її матеріалу, що визначають характер і інтенсивність взаємодії на межі розділу тверде тіло – рідина, процесу структуризації рідини сприяє введення в мастильний матеріал присадок, які підвищують протизношувальні властивості мастильних матеріалів, що зумовлено утворенням полімолекулярних мезоморфних епітропно-рідкокристалевих структур [91, 92, 99, 202].

Використання методики вимірювання в'язкості квазікристалевих шарів моторних олів за допомогою ротаційного віскозиметра дозволило змодельовати процеси, що відбуваються в парі тертя вал – вкладиш судового дизеля S6A2, зокрема швидкість зсуву і товщину мастильного шару [166]. В результаті проведених досліджень було встановлено залежність в'язкості від швидкості зсуву, яка підтвердила «неньютонівські» властивості мастильного матеріалу у вузькому зазорі пари тертя (вал-вкладиш підшипника). Крім того, отримані результати підтвердили твердження про те, що прилягаючі до металевої поверхні тріади тертя граничні змащувальні шари більш в'язкі і характеризуються орієнтаційною впорядкованістю

молекул [174]. Для опису стану мастильного матеріалу в роботі [166] введений параметр надлишкового об'єму, що виникає за рахунок хаотизації структури твердого тіла в процесі плавлення. Цей параметр зростає зі збільшенням загальної внутрішньої енергії при плавленні граничної плівки.

Між реологічними (зокрема в'язкістю ν) і рідкокристалічними (товщиною граничного шару і ступенем орієнтаційної впорядкованості молекул $d_s \Delta n_{cp}$) характеристиками моторної оливи існує кореляційна залежність, яка визначається експериментальним шляхом. Залежність $\nu = f(d_s \Delta n_{cp})$ лінійна для діапазону швидкостей зсуву γ (100, 150 c^{-1}). При збільшенні швидкостей зсуву запропонована залежність в'язкості носить експоненціальний характер. Збільшення швидкості зсуву призводить до зниження рідкокристалічних характеристик мастильного матеріалу і, як наслідок, до зниження в'язкості оливи в граничному змащувальному шарі. Це пояснюється «зрізанням» структурованих молекулярних шарів при підвищенні частоти обертання колінчастого валу, що призводить до зменшення несучої здатності масляної плівки [255].

В роботі [89] на основі фізичної моделі тертя при граничному режимі мащення і основних термодинамічних положень стосовно відкритих трибологічних систем визначено основні підходи щодо створення структурно-термодинамічної моделі тертя при граничному режимі мащення. Процеси утворення і руйнування адсорбованих і хімічно модифікованих плівок при граничному режимі мащення слід розглядати як процеси самоорганізації в термодинамічній системі тертя. При цьому запропоновані в даній роботі рівняння перехідних температур, що використовуються для опису процесів, які протікають в трибосистемах з граничним режимом мащення, носять нелінійний характер. Якісні переходи на нові стійкі рівні відбуваються при відхиленні від рівноваги критичних параметрів системи з подальшою самоорганізацією на новому рівні. Спроби представлення спільних структурно-динамічних принципів при граничному режимі мащення були проведені в роботі [73].

В роботі [302] запропоновані реологічна і термодинамічна моделі, які описують плавлення ультратонкої мастильної плівки, яка знаходиться між атомарно-гладкими твердими поверхнями. Плавлення ультратонкої плівки мастильного матеріалу при

терті представлено як результат дії спонтанно виникаючих напружень зсуву, яке обумовлено зовнішнім надкритичним нагріванням. Встановлено, що критична температура поверхонь тертя, яка призводить до плавлення мастильного матеріалу, збільшується зі зростанням характерного значення зсувної в'язкості і зменшується зі зростанням модуля зсуву оливи лінійним чином. Побудована термодинамічна модель плавлення тонкого шару мастильного матеріалу. Плавлення і затвердіння мастильного матеріалу представлені як фазові переходи першого роду. Залежно від параметрів можлива реалізація трьох випадків: або мастильний матеріал в процесі тертя завжди твердоподібний, або знаходиться в рідкому стані, або реалізуються періодичні переходи плавлення / затвердіння, які приводять до переривчастого руху пар тертя [165].

Отримані залежності сили тертя, відносної швидкості поверхонь тертя при зсуві, а також пружної компоненти напружень зсуву в мастильному матеріалі від часу показують, що в рідинному стані модуль зсуву оливи і пружні напруги приймають нульове значення [162]. Описано експериментально спостережуваний переривчастий (stick–slip) режим тертя, при якому встановлено, що з ростом температури оливи зменшуються частота фазових переходів між її структурними станами, а також амплітуда повної сили тертя і пружних напружень. При перевищенні температурного показника або пружних деформацій критичних значень відбувається плавлення оливи, і встановлюється кінетичний режим ковзання, в якому пружна компонента сили тертя дорівнює нулю. Показано [161], що в процесі руху мастильний матеріал прагне прийняти однорідну по площині ковзання структуру, що призводить до періодичності залежності основних параметрів від часу в переривчастому режимі.

В роботі [20] отримані функціональні залежності процесу термоокислення мінеральних, частково синтетичних і синтетичних олив різного призначення при статичних і циклічних температурах випробування, що дає можливість кількісно оцінити вплив базової основи і присадок на процеси окислення, а інтенсивність утворення продуктів окислення і швидкість термоокислювальної реакції запропоновані в якості показників потенційного ресурсу олив для їх ідентифікації та класифікації по групам експлуатаційних властивостей. Встановлено механізм

термоокислення мастильного матеріалу, який характеризує перерозподіл поглиненої теплоти та виступає в якості показника утворення продуктів окислення і їх летючості. Показана можливість використання цих показників в якості критеріїв оцінки теплових перетворень в мастильному матеріалі і процесів самоорганізації при термоокисленні.

Проаналізовано, що активація температурного чинника на відстаючій поверхні в умовах кочення з проковзуванням може призвести до антагоністичних процесів: підвищення інтенсивності зношування внаслідок проявів ефектів Ребіндера (розчин олеїнової кислоти, олива для автоматичних коробок передач на основі дистилятних фракцій), інтенсифікації окисних реакцій із збільшенням градієнту температур (I–40, розчини бутилкаучуку, петролатуму) та зменшення ступеня текстурування площин легкого ковзання (суспензії MoS_2 , графітів); збільшення зносостійкості в результаті інтенсифікації полімеризаційних та механо–хімічних процесів на поверхні металу (суспензії фулерену C_{60} та RVS) [9, 20, 75, 184, 195].

Проведений огляд досліджень в області структурно–реологічних властивостей граничних змащувальних шарів показав, що з огляду на складний процес формування / руйнування граничних плівок в триботехнічному контакті не існує єдиних критеріїв оцінки сформованих на контактних поверхнях граничних плівок. Розробка структурно–динамічних моделей, що характеризують вплив граничних змащувальних шарів на триботехнічні властивості контакту, кінетику формування вторинних структур в процесі структурної пристосованості трибоелементів при терті дозволить спрогнозувати кінетику зміни триботехнічних властивостей пар тертя і їх довговічність роботи.

1.5. Вплив деформаційних процесів і структурно-фазових перетворень на зносостійкість контактних поверхонь.

Домінуючим фактором, що визначає опір зношуванню деталей машин, є рівень міцності їх контактних поверхонь. У роботах Ф. Боудена, М.М. Хрущова та інших авторів було показано наявність пропорційної залежності між вихідною міцністю

(твердістю) металевих матеріалів і їх опором щодо різних видів зношування [33, 303, 310, 407].

Однак, до теперішнього часу накопичений великий експериментальний матеріал, який показує, що між вихідної твердістю матеріалів і їх опором зношуванню в ряді випадків відсутній прямий зв'язок. Встановлено, що зносостійкість сталей і сплавів визначається не тільки їх вихідної міцністю, але і рівнем ефективної міцності їх поверхні, який досягається в процесі експлуатації [149].

При терті відбуваються істотні зміни в матеріалі приповерхневого шару під впливом пружно-пластичної деформації (внаслідок дії навантаження) і теплоти (при нагріванні, при переході механічної енергії в теплову). Прояв цих змін можливий на макро– і мікрорівнях. Макрозміни поверхневого шару полягають у встановленні експлуатаційної шорсткості контактних поверхонь, видаленні матеріалу поверхневих шарів при зношуванні, утворенні виривів, зламів, лунок на етапі катастрофічного зносу. Мікрозміни характеризують якісні і кількісні зміни структури і фазового стану поверхневого шару при терті – утворення вторинних структур, аморфізацію приповерхневих шарів, накопичення дефектів, щільність дислокацій і т.д.

Спільна дія нормальних і дотичних напружень в поверхневому шарі матеріалу при терті призводить до створення об'ємного напруженого стану. В таких умовах навіть високоміцнісні матеріали набувають достатню пластичність [65, 358]. Однією з основних причин зміни фізико-механічних властивостей поверхневого шару при терті є нерівномірна пластична деформація. Частина енергії пластичної деформації витрачається на формування залишкових напружень, які обумовлені дією максимальних нормальних напружень на поверхні і максимальних дотичних напружень на деякій глибині.

Енергія, що поглинається при пластичній деформації, генерується в основному в напруженнях третього роду, які є наслідком порушення геометрії кристалічної ґратки. Значна частина напружень деформації ґратки зосереджена навколо дислокацій [176]. Дислокація оточена полем пружних напружень, яке взаємодіє з такими ж полями сусідніх дислокацій. Характер силового впливу на дану дислокацію від зовнішніх навантажень і від оточуючих дислокацій однаковий. Дислокація

характеризується зміщенням атомів в ній самій; крім того, виникають пружні зміщення в правильній ґратці, яка оточує дислокацію. Відповідно до цього розподіляються і напруження. Іншим джерелом напружень третього роду, що охоплюють ділянки меншого, ніж у дислокацій, порядку, є атоми втілення.

Специфічною особливістю роботи матеріалів в вузлах тертя є підвищення кінетичної енергії атомів в поверхневих шарах контактуючих пар, розрив міжатомних зв'язків в результаті протікання процесів пружної і пластичної деформації. Зростання енергетичного потенціалу атомів, що проявляється в підвищенні температури поверхонь тертя, призводить до зміни фізико–механічних та інших характеристик, які були властиві матеріалу в початковому стані, і, крім того, активує ряд незворотних процесів [228].

Зародження і розвиток первинних зсувів в поверхневих шарах пар тертя, відповідно до сучасних уявлень фізичної мезомеханіки, обумовлено їх пониженою зсувною стійкістю і наявністю концентраторів напружень у вигляді мікронерівностей контактних поверхонь [86, 213]. Ступінь деформації приповерхневих шарів і характер поширення деформації по глибині залежать від міцнісних властивостей, структури металу, наявності покриття та його адгезійною силою взаємодії з матеріалом основи [44, 212].

У процесі структурної пристосованості матеріалів контактних поверхонь при терті утворюються вторинні структури. Визначальний вплив на кінетику утворення вторинних структур створює час контактної взаємодії сполучених мікронерівностей [157]. Швидкості нагрівання і охолодження на ділянках локального контакту можуть досягати дуже високих значень. Так, за даними Б.Д. Грозіна [65] при імпульсному підводі тепла швидкість нагріву шару завтовшки 100 мкм дорівнює $4 \cdot 10^5 \dots 10^4$ °C/с, швидкість охолодження – $10^3 \dots 10^4$ °C/с. На зміну зазначених параметрів впливають вміст вуглецю, вихідна структура (перліт, троостит, сорбіт або мартенсит), а також температуропровідність. Особливістю процесів, що протікають при цьому, є утворення специфічних структур: вторинного аустеніту, який утворюється з вихідної структури при терті (аустеніту тертя) і вторинного мартенситу – мартенситу тертя. По суті, структура, що ідентифікується при дослідженні в оптичному мікроскопі як

аустеніт тертя це аустеніто-мартенсито-карбідна структура зі значним переважанням аустеніту. Кількість аустеніту в поверхневих шарах визначається структурою і хімічним складом, концентрацією вуглецю, тиском в фрикційному контакті. Існує деяке порогове значення тиску, нижче якого аустеніт тертя не утворюється [136]. Стабілізація його відбувається, головним чином, при імпульсному (одноразовому або циклічному) впливі температури, тобто при різко нестаціонарному тепловому режимі тертя або в умовах, коли стаціонарність теплового режиму виявляється порушеною (наприклад, внаслідок поганого припрацювання поверхонь тертя).

Рентгенографія поверхні тертя [157] в процесі зношування показала, що максимальні температури виникають не одночасно по всій поверхні контакту, а на окремих ділянках („гарячі плями”). При цьому, в результаті точкового загартування можлива аустенізація мікрообластей глибиною до декількох мікрометрів. При багаторазовому проходженні деталями зони контакту кількість таких стовбчастих аустенізованих ділянок приблизно однакової глибини зростає, так що вони поступово заповнюють всю робочу поверхню. По суті утворюється оборотна $\alpha - \gamma$ структура і ця оборотність визначає працездатність останньої. До тих пір, поки зберігається динамічна рівновага, яка має місце при α і γ структурних перетвореннях, працездатність поверхні тертя практично не змінюється. Пошкодження відбуваються тоді, коли воно порушується і, у міру збільшення числа циклів, починають накопичуватися незворотні відхилення. За даними Б.Д. Грозіна [65] процес тертя супроводжується локальними структурними перетвореннями в тому випадку, коли температура поверхні перевищує критичні точки (наприклад, A_c для сталі). Якщо температура нижче критичної, то в малих об'ємах загартованої сталі може відбуватися відпуск.

Поняття про динаміку процесів, що протікають при терті, включає не тільки зміну структури і властивостей матеріалу для окремих його мікрооб'ємів, але і, як наслідок цього, в ряді випадків зміну самого процесу зношування. У загальному випадку процес тертя слід розглядати як накопичення умов, які призводять до зміни структури і фізико-механічних властивостей матеріалу, і як послідовність переходів

матеріалу з одного стану в інший [159]. Все це призводить до зміни вихідної структури поверхні тертя і, як наслідок, до зміни зносостійкості останньої [158].

Швидкість пластичної деформації визначається щільністю рухливих дислокацій та швидкістю їх руху. Згідно [176], енергія активації початку руху дислокацій в поверхневому шарі при пластичній деформації в 2,0 – 2,5 рази менше, ніж в об'ємі тіла. Особлива роль поверхневого шару в процесі пластичної деформації пояснюється більшою щільністю рухливих дислокацій та більш високою швидкістю їх руху. В результаті вже в початковий період навантаження на поверхні створюється зміцнений шар. На наступних етапах проявляється бар'єрний ефект – гальмування руху дислокацій у поверхні. Тому всі стадії деформації в об'ємних шарах металу запізнюються, в порівнянні з розвитком процесів в поверхневих шарах.

Глибина поширення деформаційних процесів на ділянках фактичного контакту на початковій стадії фрикційної взаємодії знаходиться в діапазоні від сотих часток до декількох мікрометрів [183]. Деформаційне зміцнення, взаємодія і перекриття окремих ділянок пластичної течії можуть призводити до поширення деформацій на глибину до 10 – 100 мкм. У роботах [54, 368] при аналізі еволюції мікроструктури металів і сплавів при втомному зношуванні встановлено, що при терті зі збільшенням деформації розподіл приповерхневих дислокацій стає менш випадковим з утворенням витягнутих в напрямку ковзання осередків і субзерен з незначною щільністю дислокацій в них. Дослідження в цьому напрямку показали, що відбувається подрібнення мікроструктури поверхневого шару [42, 43, 232], проявляється неоднорідність ступеня деформації, спостерігається різна орієнтація окремих зерен, щільність дислокацій на межах розділу досягає 10^{15} м^{-2} (всередині зерен – $10^8 - 10^{10} \text{ м}^{-2}$). Розмір зерен визначається фізико–механічними властивостями матеріалу, а оскільки щільність енергії на межі між зернами стає такою, що наближається до величин поверхневої енергії матеріалу, подальше деформування обумовлює фрагментацію матеріалу і інтенсифікує знос [431].

В роботах [150, 412] встановлено вплив енергії міжатомних взаємодій, дефектів упаковки, параметрів мікроструктури на зносостійкість контактних поверхонь.

У загальному балансі напруженого стану при терті чималу роль відіграють напруження, що формуються під дією градієнта температур в приповерхневих шарах металу. Залежно від енергії, що виділяється при терті, крім процесів пластичної деформації і зносу, зосереджених в приповерхневих шарах металу, можуть проявлятися дифузійні процеси, поліморфні перетворення, процеси рекристалізації і відпочинку, розчинення і виділення надлишкової фази і ін. [157].

Опір матеріалу поверхневого шару, його адгезійні сили і механізм зносу безперервно змінюються під впливом зовнішніх факторів. Тому загальний стан робочого поверхневого шару можна охарактеризувати як своєрідний перехід з одного фізичного стану в інший, що відповідає певним умовам динамічної рівноваги в контакті. Основна суть такого переходу визначається фізико-хімією поверхневих явищ і закономірностями деформації матеріалів [228].

В роботі [6] встановлено, що кожній температурі, при якій відбувається деформування, відповідає певна критична ступінь деформації ϵ^k , при якій пластична течія відбувається переважно в поверхневих шарах кристалу. Підвищення температури обумовлює збільшення товщини шару з підвищеною щільністю дислокацій, що свідчить про поширення і локалізацію пластичних деформацій в глиб кристалу.

В роботі [157] приведено розподіл залишкових напружень в цементованому шарі при терті в умовах чистого кочення і кочення з проковзуванням. Встановлено, що найбільші зміни залишкових напружень в поверхневому шарі відбуваються на деякій глибині, в зоні дії максимальних дотичних напружень (рис.1.7).

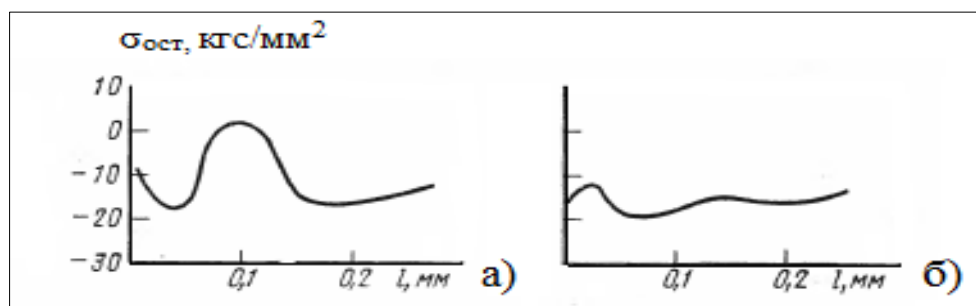


Рис.1.7. Зміна залишкових напружень в поверхневому шарі на глибині (l) при чистому коченні (а) і коченні з проковзуванням (б) при роботі елементів трибоспряження 100 хв (згідно [157]).

Згідно [176], залишкові напруження в умовах тертя обумовлені дією максимальних нормальних напружень на поверхні і максимальних дотичних напружень на деякій глибині під поверхнею. Частка пластичної деформації в підповерхневому шарі з ростом питомих навантажень і швидкостей тертя зменшується, так як в цьому випадку значна частина роботи сил тертя витрачається на пружні і пластичні деформації і зношування в зонах фактичного контакту.

З енергетичної точки зору, висока зносостійкість забезпечується за умов, коли основна частина роботи сил тертя перетворюється в теплоту при реалізації високого релаксаційного внутрішнього тертя в певних навантажувально-швидкісних інтервалах зовнішнього тертя [271]. Безпосередньо в процесі тертя може розвинути процес релаксації напружень в результаті динамічного деформаційного старіння (ДДС), що збільшує енергоємність сталей, знижує динамічну напруженість контактних поверхонь, і зменшує ймовірність пошкодження сталі [361, 435, 440].

Можливість фазових перетворень при терті, до яких відноситься утворення аустеніту внаслідок вторинного загартування, реалізується за умов: на ділянках мікроконтакту здійснюється нагрів до температури вище критичної і охолодження до кімнатних температур з великою швидкістю; під дією деформацій можливе зниження критичних точок; дрібнодисперсна структура полегшує структурні перетворення – гомогенізацію аустеніту, розчинення і виділення карбідів, інтенсивну дифузію в мікрооб'ємах і т.д. [157]. Стабілізація аустеніту може відбуватися при збільшенні швидкості деформації. Підвищення стійкості аустеніту проти мартенситного перетворення при терті спостерігається при імпульсному (одноразовому або циклічному) впливі температури, тобто при різко нестационарному тепловому режимі тертя. В умовах нестационарного теплового режиму тертя стабілізація аустеніту відбуватиметься як внаслідок концентраційної неоднорідності аустеніту по вуглецю, так і в результаті фазового наклепу.

В роботі [97] при рентгеноструктурному дослідженні поверхневого шару зношених ГЦ (гільз циліндрів) виявлено аустеніт тертя. Найбільша його кількість утворюється в зоні максимальних зносів – зона зупинки верхнього компресійного кільця у верхній мертвій точці (ВМТ). Товщина його досягає 10 мкм, що призводить

до зменшення мікротвердості на поверхні ГЦ. При дослідженні ГЦ, що не піддавалися загартуванню і працювали в аналогічних умовах, аустеніту не виявлено. Отриману відмінність для ГЦ з мартенситною і перлітною структурами можна пояснити значно вищою швидкістю переходу мартенситу в аустеніт внаслідок того, що вже є готові зародки, якими є ділянки залишкового аустеніту в загартованих ГЦ. При дослідженні місцевих зносів на ділянках поверхні ГЦ, покритих „білим шаром”, було отримано зростання темпів зношування на кілька порядків, в порівнянні з іншими ділянками. Це пояснюється тим, що „білий шар” утворюється на поверхні у вигляді окремих розрізнених ділянок, слабо зв'язаних з основним металом. Автори припускають, що структурні зміни, пов'язані з утворенням вторинного аустеніту і особливо „білого шару”, є характерними ознаками мікроконтактного захоплення, тому отримані результати дозволяють стверджувати, що зношування, принаймні загартованої ГЦ і верхнього компресійного кільця, відбувається в результаті спільної дії абразиву і захоплення. Зміна кількості вторинного аустеніту, а отже і площі поверхні, зайнятої ним, з 10 до 20% призвело до збільшення зносу ГЦ в 2,7 рази.

За даними [136, 141] утворення вторинного аустеніту відбувається в тому випадку, коли сумарна поверхнева температура досягає точки початку аустенітного перетворення, яка складає 780°C для дослідженого низьколегованого сірого чавуну. Внаслідок цього при терті на ділянках фактичного контакту розвиваються температури, які істотно змінюють властивості поверхонь і призводять до руйнування граничного змащувального шару [152, 206]. Подальше підвищення температури і питомого тиску призводить до більш глибокого перетворення, що супроводжується утворенням специфічної структури – „білого шару”. Вона характеризується високою твердістю і поганим протравленням в звичайних реактивах. Твердість „білого шару”, виявленого на ГЦ, досягає 13000 МПа.

При вивченні впливу вмісту вуглецю в сталях (від 0,38 до 1,35 ваг. %) на зносостійкість і деформаційне зміцнення в умовах тертя ковзання виявлено, що між деформаційним зміцненням вуглецевих сталей і величиною їх зносу відсутня пряма залежність [272]. Мартенсит, що містить 0,35-0,5% вуглецю (сталі 35 і 50), характеризується найбільшою здатністю до деформаційного зміцнення при

адгезійному зношуванню, що обумовлено його підвищеною здатністю до інтенсивної пластичної деформації в розглянутих умовах фрикційного навантаження. Однак, висока твердість поверхонь тертя щодо „м'яких” сталей не забезпечує ефективного опору адгезійному схоплюванню внаслідок руйнування матеріалу по його глибинним, менш міцним ділянкам. Відзначено, що фрикційне окислення підвищує опір вуглецевих сталей адгезійному схоплюванню, проте в умовах втомного зношування насичення поверхневого шару киснем призводить до збільшення крихкості металу і, відповідно, зниження зносостійкості. У даній роботі показана можливість формування високоміцних і теплостійких нанокристалевих мартенситних структур в поверхневих шарах вуглецевих (0,38–1,35 ваг. % C) сталей при терті. Встановлено, що з ростом концентрації вуглецю міцність таких структур підвищується, проте знижується їх теплостійкість.

Температура, що розвивається в зоні фрикційного контакту, залежить також від параметрів режиму тертя (контактного тиску, швидкості ковзання або кочення) і властивостей контактуючих матеріалів. Наприклад, в парах тертя, де обидві деталі виготовлені зі сплавів на основі заліза, поверхневі температури, відповідного фазового перетворення $\alpha\text{Fe} \rightarrow \gamma\text{Fe}$, досягаються при легших режимах тертя, тобто при менших тисках і швидкостях, ніж для пар тертя, де одна з деталей виготовлена зі сплаву на основі міді або нікелю [198, 444].

Дифузія і самодифузія практично починаються в металах при температурі $T \geq 0,3 T_m$, де T_m – абсолютна температура плавлення металу [175]. В умовах тертя в ряді випадків може проявлятися механізм мікродифузії, запропонований Л.С. Палатніковим. Відповідно до цього механізму, при високій швидкості нагріву, охолодження і існування температурного градієнта перетворення при терті можуть йти мікродифузійним шляхом. Наближена оцінка проміжку часу, необхідного для мікродифузійного перетворення, розраховується за формулою $\tau = L^2/D$, де L – довжина шляху дифузії, D – коефіцієнт дифузії. З цього випливає, що навіть за короткий проміжок часу (близько $10^{-3} - 10^{-4}$ с) атоми можуть дифундувати на відстань близько 1 мкм.

Окислювальні процеси, що протікають внаслідок взаємодії поверхні тертя з киснем повітря, сприяють утворенню окисних плівок, стирання яких призводить до окисно–механічного зношування контактних поверхонь. Відсутність або недостатня кількість кисню на поверхні тертя ускладнює або повністю виключає утворення окисних плівок, що призводить до розвитку процесів захоплювання або аварійного зносу. Роль кисню залишається значною не тільки при терті в повітряному середовищі, а й при терті з мастильним матеріалом. Так, при терті за умов відсутності кисню в газовому середовищі різко знижується мастильна дія вуглеводних матеріалів, тому що мастильний матеріал не містить продуктів їх окислення [228].

В роботі [147] методами електронної мікроскопії встановлено, що при введенні порошку сірки в зону тертя в початковий період на сталевих поверхнях тертя утворюється сульфід заліза, феросульфат, а при сталому терті утворюється плівка моногідроксиду $FeO(OH)$ з гексагональною кристалічною ґраткою, що забезпечує низький коефіцієнт тертя. Однак, окислення поверхонь тертя сприяє створенню позитивного впливу на трибологічні властивості тільки до певного рівня. Необхідно враховувати комплекс властивостей окисної плівки: міцність, крихкість, міцність зв'язку з поверхнею основного металу. Тому оксиди не всіх металів покращують антифрикційні властивості пари тертя.

Застосування методів, спрямованих на зміцнення або зміну поверхневого шару, дозволяє запобігти процесу зародження деформаційних дефектів, що забезпечує підвищення зносостійкості контактних поверхонь [441]. В роботі [264] встановлено досягнення максимуму пластичної деформації на межі поділу покриття - основа, а зі збільшенням відстані від поверхні тертя величина пластичної деформації монотонно знижується: при товщині покриття 50 мкм пластична деформація матеріалу основи під покриттям на порядок менше за величиною, ніж при товщині 2 мкм, а товщина пластифікованого підповерхневого шару становить близько 7 мкм.

Таким чином, важливе практичне значення має питання оптимізації структурних перетворень і процесів деформаційного зміцнення в металевих матеріалах при терті з метою досягнення якомога вищого рівня зміцнення поверхні, що буде сприяти підвищенню зносостійкості елементів трибоспрямижень.

1.6. Вплив дотичних напружень зсуву при терті на зносостійкість контактних поверхонь.

Багато деталей машин приладів (шарики і ролики підшипників кочення, зуб'я зубчастих коліс, кулачки, ролики і зірочки ланцюгових передач, фрикційні катки і т. д.) зазнають вплив змінних навантажень в місцях силового контакту. При цьому в зонах, прилеглих до контактних площадок, виникають змінні напруги з великою амплітудою. При досить великій кількості циклів може виникнути втомне руйнування матеріалу, який викришується з утворенням на контактній поверхні віспин [239].

Причиною викришування є втома найтонших поверхневих шарів, яка залежить від втомної міцності матеріалу, від в'язкості мастильного матеріалу, шорсткості робочих поверхонь зуб'їв, а також від величини і напрямку швидкості ковзання. Відповідний знос обумовлений тертям кочення при навантаженнях, що перевищують межу текучості поверхневих шарів металу. Він відбувається в результаті стиснення, зміцнення і знеміцнення поверхневих шарів металу. Виникаючі при цьому напруження стиснення і явища втоми обумовлюють утворення мікроскопічних тріщин в поверхневих шарах металу.

Тріщина може зародитися на глибині і на поверхні в залежності від співвідношення між нормальною і тангенціальною складовими сили в контакті і від змін фізико–механічних властивостей матеріалу в поверхневому шарі [214]. Часто тріщина починається на поверхні, на межі зерен. Якщо тріщина зародилася на глибині, то на певній стадії її розвитку вона може вийти на поверхню. Первинна тріщина поширюється, незалежно від пункту її зародження, похило до поверхні відповідно до напрямку приведенного напруження і надбаної завдяки пластичній деформації анізотропії матеріалу. У тріщину з поверхні проникає мастильний матеріал. Коли відкритий кінець тріщини вступає в контакт з сполученою поверхнею, вихід для оливи закривається. По товщині мастильної плівки під навантаженням в контакті виникає високий тиск, що розпирає стінки тріщини. При повторних

навантаженнях тріщина поглиблюється, а потім виходить на поверхню, відокремлюючи викришений об'єм металу.

Втомне руйнування зуб'ів при вигині виникає під дією змінних багаторазово повторюваних (циклічних) навантажень. Вихід з ладу деяких видів коліс (провідні циліндричні зубчасті колеса автомобіля) з цієї причини складає до 70% всіх поломок. Напруження вигину можуть досягати значних величин. Так, в деяких шестернях коробки передач автомобілів ЗІЛ вони перевищують 600 МПа [19, 300].

Проектування зубчастих передач в даний час ведеться на основі найбільших нормальних контактних напружень σ_{H0} в полюсі зачеплення, величина яких визначається за формулою Г. Герца. У сучасній стандартній формі, згідно ГОСТ 21354-87 «Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность», її можна представити в наступному вигляді:

$$\sigma_{H0} = Z_H Z_E Z_\varepsilon Z_\beta \sqrt{\frac{F_t}{b_u d_1} \frac{u+1}{u}} \leq \frac{\sigma_{Hmin}}{S_{Hmin}} Z_R Z_\vartheta Z_L Z_\omega Z_N. \quad (1.15)$$

У формулі (1.15) об'єднуються лише механічні та деякі геометричні властивості коліс з нормальним навантаженням [46]. Навантаження зсуву в контакті відбивається опосередковано і епізодично. Наприклад, коефіцієнт, що враховує вплив мастильного матеріалу (Z_L), рекомендується згідно ГОСТ 21354-87 [62] приймати рівним одиниці для всіх умов навантаження. А коефіцієнт, що враховує окружну швидкість (Z_ω), обчислюється в залежності від твердості зуб'ів тільки для оцінки їх припрацювання. Коефіцієнт (Z_R) має всього три значення – 0,9; 0,95 і 1 для всіх існуючих класів шорсткості. Таким чином, введення в даній формі коефіцієнтів Z_L , Z_ω , и Z_R в залежність Г. Герца свідчить про відсутність безпосереднього врахування впливу тертя на втомне руйнування поверхонь зуб'ів.

Величину контактних напружень на неконформних поверхнях можна оцінити за допомогою аналітичних рівнянь на основі теорії пружності, розробленої Герцем. Його математичні залежності добре узгоджуються з результатами пізніших досліджень (Н. М. Беляєв, Н. А. Динник, А. С. Кравчук, А. В. Чигарев і ін.) [72, 112, 145].

Відповідно до цієї теорії, в місці контакту виникає напруження стиску, розподіл якого по площі контакту відбувається за законом еліпса.

При розрахунку на контактну міцність для спрощення замість стиснення зубів розглянемо стиснення двох циліндрів, радіуси яких R_1 і R_2 рівні радіусам кривизни профілів зубів колеса (ρ_k) і шестерні ($\rho_{ш}$) в точці контакту.

Деформація кожного циліндра (y) пропорційна навантаженню (N) і обернено пропорційна модулю пружності матеріалу (E):

$$y_1 = \lambda \frac{N}{E_1}, \quad (1.16)$$

$$y_2 = \lambda \frac{N}{E_2}, \quad (1.17)$$

де λ – безрозмірний коефіцієнт пропорційності.

Як видно з рис.1.8, $y_1 + y_2 = x_1 + x_2$.

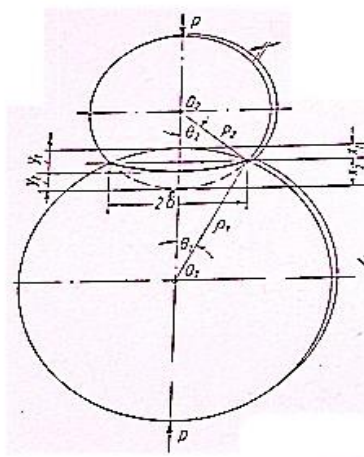


Рис.1.8. До розрахунку контактних напружень при зовнішньому зачепленні в зуб'ях.

При цьому $x_1 = R_1(1 - \cos Q_1)$, де $\sin Q_1 = \frac{b}{R_1}$. Так як b значно менше R_1 , то

$$Q_1 \approx \frac{b}{R_1} \text{ і } x_1 \approx R_1 \left[1 - \left(1 - \frac{Q_1^2}{2} \right) \right] = \frac{b^2}{2R_1}.$$

Аналогічно $x_2 \approx \frac{b^2}{2R_2}$. Тоді:

$$\lambda N \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) = \frac{b^2}{2} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right), \quad (1.18)$$

$$b = \sqrt{2\lambda N \rho_{\text{пр}} \frac{E_2 + E_1}{E_2 \cdot E_1}}, \quad (1.19)$$

де E_1, E_2 – модулі пружності, МПа, $\rho_{\text{пр}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$ – приведений радіус кривизни, мм.

Згідно [292] для двох циліндрів з паралельними вісями (поверхні випуклі) напівширина площадки контакту (b):

$$b = 1,128 \sqrt{\frac{N}{l} \rho_{\text{пр}} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}, \quad (1.20)$$

де l – робоча довжина площі контакту, мм; ν – коефіцієнт Пуассона.

Максимальні контактні напруження стиску (σ_{max}) по формулі Герца:

$$\sigma_{\text{max}} = 0,564 \sqrt{\frac{N/l}{\rho_{\text{пр}} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}}. \quad (1.21)$$

Згодом проф. Беляєв Н.М. вніс доповнення, роз'яснивши природу напружень, що виникають в точці контакту. Фактично, напруження розподіляються по ширині площі дотику поверхонь нерівномірно і, відповідно до теорії пружності, крім нормальних напружень, виникнуть також максимальні контактні дотичні напруження τ в площині, перпендикулярній до площини zy і нахилений під кутом 45° до вісей z і y (рис. 1.9).

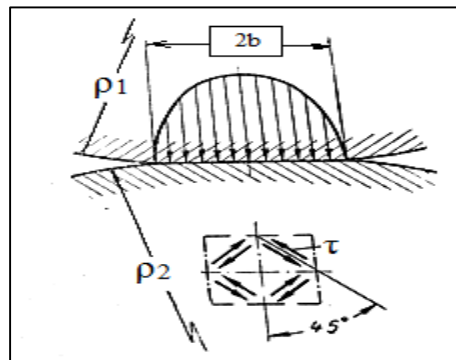


Рис.1.9. Розподіл дотичних напружень в металі навантажених зуб'їв (за [27]).

Дотичні напруження τ , згідно теорії пружності:

$$\tau = \frac{\sigma_z - \sigma_y}{2}. \quad (1.22)$$

Величина максимальних дотичних напружень, по Беляєву:

$$\tau = 0,304 \sigma_{\text{max}} \quad (1.23)$$

або

$$\tau = 0,177 \sqrt{\frac{N/l}{\rho_{\text{пр}} \left(\frac{1-v_1^2}{E_1} + \frac{1-v_2^2}{E_2} \right)}}. \quad (1.24)$$

Максимальних значень τ досягає на деякій глибині (h) від поверхні металу, яка становить

$$h=0,78b, \quad (1.25)$$

де b – напівширина площадки контакту.

Дотичні напруження, які за своєю природою є зрізаючими, спрямовані під кутом 45° до площини контакту.

Згідно 3-й теорії міцності, ці дотичні напруження повинні бути руйнівними. На практиці, втома зуб'їв проявляється у вигляді пітингу на їх поверхні. Нахил граней ділянок руйнування при пітингу свідчить про їх локалізацію під кутом 45° , що вказує на руйнівний вплив дотичних напружень. Аналіз робіт вітчизняних і зарубіжних вчених (Е. Бакінгем, С. Вей, Т. Нісіхара, Т. Кобаясі, М. М. Саверін, Г. К. Трубін і ін.), дає підставу свідчити, що нормальні контактні напруження лише побічно впливають на основні види руйнування зубчастих передач [10, 45, 70, 148, 222, 223, 293]. Відповідальними за виникнення і розвиток пошкоджень слід вважати максимальні дотичні напруження (τ_{max}), які діють в зоні контакту активних поверхонь зуб'їв.

Умова контактної міцності зуб'їв вимагає, щоб

$$\tau_{max} \leq |\tau|, \quad (1.26)$$

де $|\tau|$ – допустимі напруження.

Для прямозубих зуб'їв при розрахунку максимальних дотичних напружень, що призводять до викришування, використовують формулу [27]:

$$\tau_{max} = 0,177 \sqrt{\frac{P_{\text{дин}}}{l_1} \frac{4}{\sin \alpha} \frac{E_1 E_2}{D_1 A_1 (E_1 + E_2)}}, \quad (1.27)$$

де $P_{\text{дин}}$ – динамічне навантаження на зубі, l_1 – довжина зуба; D_1 – діаметр діленої окружності малої шестерні; α – кут зачеплення; A_1 – фактор передавального числа..

Згідно [27], сили тертя, що виникають між зуб'ями, переводять максимальні дотичні напруження на поверхню контактної площадки і збільшують їх величину на 15% (при коефіцієнті тертя $f = 0,2$).

В роботах [47, 203, 210, 304, 365, 394] показано, що при циклічному контактному навантаженні величина дотичних напружень і глибина їх залягання відіграють важливу роль в утворенні та розвитку мікротріщин. Дослідження зон утворення пітингу показали, що глибина залягання максимальних дотичних напружень збігається з локалізацією зон викришування контактних поверхонь кочення [325].

Сила тертя викликає зміни в полі напружень триботехнічного контакту, створюючи тим самим великий вплив на контактну втому. Серед моделей, які описують коефіцієнт тертя для зубчастих коліс в контакті, основну увагу слід приділити DIN 3990, ISO 6336, моделям, запропонованим в роботах Winter H., Michaelis K., Castro M.J.D., Seabra J. і ін. [347, 357, 391, 460]. Як відомо з досліджень, проведених Honh, сила тертя також в значній мірі залежить від типів добавок, присутніх в мастильних матеріалах [383]. Інший важливий фактор, згаданий Honh пов'язаний з типом покриттів передач. Таким чином, можна стверджувати, що розрахунки за запропонованими моделям можуть показати деякі неточності і зміни при роботі з зубчастими колесами, так як в них не враховуються дані фактори.

При віддаленні зони контакту від полюсної лінії зуба напруги τ_{\max} ростуть по величині і наближаються до поверхневих шарів, інтенсифікуючи в них процеси руйнування. У свою чергу, ще інтенсивніше ростуть найбільші поверхневі дотичні напруження $\tau_{\max n}$, величина яких може і перевищити величину τ_{\max} [46]. Напрямок взаємодії цих напружень також створює реальні умови для виникнення і розвитку втомних тріщин. Навантаження зсуву, як необхідна умова для зростання і зближення глибинних напружень з поверхневими напруженнями, враховується величиною реалізованого коефіцієнта зчеплення $f_{зч}$. Для визначення величини $f_{зч}$ (на розрахунковій частині поверхонь зуб'ів) використовуються результати досліджень Г.К. Трубіна, А.І. Петрусевича, Ю.Н. Дроздова, І. В. Крагельського і цілого ряду інших вітчизняних і зарубіжних вчених [10, 45, 70, 148, 222, 223, 293].

У роботах [122, 123] досліджено вплив характеристик і фізико-механічних властивостей покриттів (товщини, модуля пружності і градієнта властивостей по глибині) на величину і характер розподілу дотичних напружень в матеріалі деталі при

контактному навантаженні. На площі контакту $2b = 0,4\text{мм}$ діяло рівномірно розподілене навантаження $q = f(x)$, яке змінювалося за законом $q = \alpha(1 - 0,25x^2)$, де α - коефіцієнт навантаження ($-0,2 \leq x \leq 0,2$), і дотичне навантаження $F = \mu q$, де μ - безрозмірний коефіцієнт ($\mu < 1$). Дослідження показали, що при значеннях $\mu < 0,1$ максимальні дотичні напруження τ_{xy} знаходяться на глибині $0,5b$ з симетричним їх розташуванням щодо вісі Y . При різних варіантах моделей покриттів ця закономірність зберігається. Зі збільшенням μ точка максимального виникнення τ_{xy} переміщується до поверхні і центру площадки контакту і при $\mu = 0,4$ знаходиться на поверхні в центрі площадки контакту. Встановлено, що збільшення товщини покриття призводить до незначного (до 5%) підвищення $\tau_{xy\text{max}}$. Однак суттєвим є зона локалізації максимальних дотичних напружень – в покритті, що має більш високі фізико–механічні характеристики або в основі з меншими фізико–механічними властивостями: товщина покриття повинна бути більшою, ніж глибина виникнення максимальних дотичних напружень. Найбільш несприятливим з точки зору працездатності покриття і довговічності композиції "покриття–основа" є випадок, коли максимальні дотичні напруження виникають на стику покриття і основи, де межа адгезійної міцності значно менше межі когезійної міцності, особливо в покриттях, отриманих методом осадження без перехідної дифузійної зони [123].

В роботах [126, 127, 128] представлені результати розрахунку НДС в умовах кочення для двох варіантів: цементована поверхня кочення і нецементована. Для цементованої поверхні величина залишкових нормальних тангенціальних напружень стиску становить $600 \div 650$ МПа. Безпосередньо під зоною контакту напруження мінімальні. Області стискаючих і розтягуючих напружень є суміжними. Максимуми стискаючих і розтягуючих напружень в поверхневому шарі товщиною $0,05 \div 0,1$ мм зміщені від ділянки контакту приблизно на $1 \div 2$ мм. Зміцнення поверхні цементацією не створює істотного впливу на розподіл дотичних напружень. Графік має майже симетричний вид щодо вісі, яка проходить через точки центру тіла кочення і ділянки контакту. Мінімум дотичних напружень приходить на ділянку контакту. У міру віддалення від поверхні контакту величина дотичних напружень збільшується, проходячи через максимум $150 - 200$ МПа.

В роботі [46] для перевірного розрахунку на контактну втому активних поверхонь зуб'їв циліндричних передач пропонується використовувати залежність:

$$\tau_{\max \Pi} \leq [\tau_{\max \Pi}], \quad (1.28)$$

де $\tau_{\max \Pi} = c_1 \sigma_{H\pi}$, $c_1 = 1,3 f_{\text{сц}}$ – коефіцієнт приведення нормальних контактних напружень до максимальних поверхневих дотичних напружень, $f_{\text{сц}}$ – коефіцієнт зчеплення, $\sigma_{H\pi}$ – найбільші нормальні контактні напруження в розрахунковій зоні зачеплення, $[\tau_{\max \Pi} = 0,13 c_2 \sigma_{H\pi p}]$ – допустимі максимальні поверхневі дотичні напруження, c_2 – коефіцієнт надійності, $\sigma_{H\pi p}$ – допустимі нормальні контактні напруження при розрахунку на попередження втомного викришування на робочих поверхнях зуб'їв закритих, добре змашувальних циліндричних передач.

В роботі [438] проведені дослідження локалізації вектору максимальних дотичних напружень в ЕГД–контакті в залежності від ступеня проковзування контактних поверхонь і навантажувально-швидкісних параметрів. Встановлено, що збільшення величини проковзування з 1 до 60% обумовлює підвищення дотичних напружень в 2,5 – 3 рази.

Контактна міцність матеріалу при коченні може оцінюватися за умов сухого тертя, тертя при граничному режимі мащення і при суцільній плівці мастильного матеріалу, яка розділяє робочі поверхні і утворена відповідно до законів пружності та гідродинаміки [61, 196]. Якщо при сухому терті і терті при граничному режимі мащення розподіл напружень можна визначити на основі відповідних рішень конкретних задач теорії пружності, то при наявності масляного шару та з урахуванням зміни в'язкості (від тиску, температури, градієнту швидкості зсуву) змінюється не тільки розподіл тиску на контакті, а й все поле напружень в матеріалі поблизу контакту. У комп'ютерній моделі [81] розглядався контакт, що виникає при коченні з проковзуванням ролика по твердій поверхні при граничному режимі мащення. В цьому випадку дотичні і нормальні навантаження будуть пов'язані залежністю:

$$|\tau(x)| = \mu \cdot |p(x)| \quad (1.29)$$

де $\tau(x)$ – тангенціальна напруженість на ділянці контакту; $p(x)$ – нормальне напруження; μ – коефіцієнт тертя.

Згідно з отриманими результатами моделювання, при наявності на ділянці ковзання сили тертя точка, в якій дотичні напруження досягають максимального значення, переміщається до поверхні, в напрямку дії сили тертя. З огляду на те, що напруження розтягу мають найбільшу величину, абсолютний максимум зрізаючих напружень розташовується безпосередньо на поверхні або на невеликій глибині під нею. Тому втомне руйнування починається з поверхні тертя. Його можна зменшити застосуванням мастильних матеріалів, які, поряд зі зниженням сили тертя, модифікують поверхні тертя, знижуючи контактні навантаження, а отже, і напруженість в матеріалі.

Максимальні дотичні напруження, пов'язані зі збільшенням сили тертя, підвищують значення нормальних напружень на ділянці контакту. Таке зростання призводить до появи втомного зношування поверхонь [98, 160]. При цьому швидкість процесу зношування буде залежати від властивостей мастильного матеріалу і товщини мастильної плівки [82]. Для мастильних композицій був обраний пластичний мастильний матеріал Літол–24. Концентрація ультрадисперсного порошку алмазоподібного графіту (УДПАГ) в базовій основі бралася в діапазоні від 0,5 до 5 ваг.%. Результати комп'ютерного моделювання встановили, що абсолютний максимум зрізаючих напружень розташовується безпосередньо на поверхні або на невеликій глибині під нею. При використанні мастильних композицій з ультрадисперсним алмазографітом величина поверхневих дотичних напружень на доріжці кочення зменшується, при цьому збільшується глибина, на якій діють максимальні дотичні напруження. Як показують результати моделювання, наявність в зоні контакту пластичного мастила з добавкою УДПАГ знижує величину нормального напруження, в порівнянні з мастилами–основами, на 13 ... 15%.

Якість обробки поверхні впливає на довговічність шестерні, а шорсткість характеризується як фактор концентрації напружень для ініціювання тріщини [322]. Викришування також залежить від шорсткості поверхні [21, 283]. При випробуваннях сталевих шліфованих циліндричних зразків на контактну втому було встановлено, що

зі збільшенням висоти хвиль від 0,1 ... 0,4 мкм до 1 ... 2,5 мкм їх стійкість знизилася в 3 рази [87].

Проведені дослідження шестерень із загартованої сталі AISI 8620, мастильний матеріал ISO VG 100 показали, що по лінії контактування зуб'ів, коефіцієнт тертя характеризується зниженням в області чистого кочення між коренем і верхньою частиною зуба [450]. Проте, слід зазначити, що максимальні напруження стиску зсувається в напрямку ковзання. Тангенціальна сила ковзання (сила тертя) створює значний вплив на збільшення дотичних напружень (τ_{max}) в контакті, які пов'язані з коефіцієнтом тертя (f) залежністю:

$$\tau_{max} = -f \cdot \sigma_{max} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}. \quad (1.30)$$

Відповідно до [211, 426], пластична деформація навантаженого тіла пов'язана з локальною втратою його зсувної стійкості і за своєю природою є релаксаційним процесом. Найменшу зсувну стійкість в навантаженому тілі має його поверхневий шар, тому первинні зрушення зароджуються на поверхні, генеруючи в об'єм матеріалу всі види деформаційних дефектів. В роботах [114, 115, 318, 359] показано, що вектори зсувів на поверхні деформованого тіла переважно спрямовані уздовж напрямків, пов'язаних з дією максимальних дотичних напружень τ_{max} . Найбільш імовірним механізмом розвитку первинних поверхневих зсувів в напрямку τ_{max} є механізм Бейна, виявлений в матеріалах з мартенситним перетворенням [37]. В даному механізмі зсув локальних структурних складових здійснюється перетворенням однієї атомної конфігурації в іншу переважно в напрямку τ_{max} .

Важлива роль у локалізації максимальних контактних напружень при терті в умовах кочення і кочення з ковзанням відводиться мастильним матеріалам. Застосування мастильних матеріалів забезпечує зменшення тертя і зносу контактних поверхонь, відведення виділеного при терті тепла і захист поверхонь від зношування і корозії. Однак, найбільш важливим з властивостей мастильних матеріалів є зменшення сил тертя в зоні контакту. При цьому механізм мастильного дії може бути різним і залежати від умов контактування. Умови мащення можуть створювати суттєвий вплив як на втомне викришування, так і на інші види зносу. Очевидно, що

проявляється наявність певного зв'язку між експлуатаційними властивостями мастильних матеріалів, зношуванням контактуючих поверхонь і контактними навантаженнями. Ефективні антифрикційні властивості сприяють зниженню коефіцієнта тертя, сприяючи тим самим зменшенню дотичних напружень. А це, в свою чергу, знижує схильність поверхонь до викришування.

1.7. Енергетичні аспекти руйнування поверхневих шарів елементів трибоспряжень при терті.

Руйнування матеріалів протікає при термоактивованому процесі атомно-молекулярних перегрупувань, які обумовлюються деформацією, флуктуаціями теплової енергії в поле діючих напружень. Енергія активації деформації (руйнування) в моделях представляється експоненційною функцією, запропонованою С.Н. Журковим [101, 102], яка характеризує довговічність твердого тіла під навантаженням.

Термофлуктуаційна теорія міцності стосовно до руйнування поверхонь в результаті їх зношування знайшла розвиток в роботах [277, 278, 279, 295, 296], в яких було показано, що рівняння С.Н. Журкова підходить для оцінки довговічності матеріалів при різних механізмах пошкоджуваності і видах напружено-деформованого стану матеріалів, в тому числі і для оцінки зносостійкості поверхневих шарів з урахуванням специфіки їх функціонування. Однак завдання аналізу міцності і довговічності матеріалу поверхневого шару, що деформується в процесі тертя, являє собою досить важке завдання, оскільки вивчення активаційних характеристик руйнування поверхневих шарів в результаті тертя ускладнене впливом на їх довговічність безлічі одночасно протікаючих і конкуруючих синергетичних процесів.

Експериментальні дослідження процесів зношування показують, що при втомному зношуванні формується дві зони накопичення пошкоджуваності: перша зосереджена в тонкому поверхневому шарі (дебрис-шарі), який накопичує дефекти і руйнується в режимі малоциклової втоми при нормальному втомному зношуванні;

друга - поширюється на більшу глибину і відповідає за кінетику розвитку контактної втоми, що протікає в багатоцикловому режимі [110, 111]. Крім того, ряд авторів акцентує особливу увагу на підповерхневій локалізації втомних процесів, при якій поверхня на ділянках фактичного дотику, зазнає пружних та пластичних деформацій, транслюючи механічні напруження в більш глибокі шари, де під дією знакозмінних навантажень будуть накопичуватися втомні мікропошкодження [137].

На основі аналізу і узагальнення розрахункових моделей втомного зношування, синергетичного підходу до інтерпретації фізичних механізмів втомного руйнування поверхонь при терті авторами [110, 270] запропоновано ввести в рівняння довговічності змінну ΔG , яка має розмірність енергії і характеризує вклад немеханічних зворотних сил в подоланні енергетичного бар'єру U_0 . Ці сили, відповідно до принципу найменшого примусу Ле-Шательє – Брауна, з'являються в результаті взаємодії вільної поверхні з середовищем і спрямовані на зменшення руйнівних впливів.

Авторами [250, 251, 252] для оцінки енергії активації руйнування використовувався метод випробувань на тривалу міцність. В результаті досліджень було встановлено, що рівняння довговічності С.Н. Журкова дозволяє розрахувати час до руйнування зразка незалежно від схеми напруженого стану (стиск, розтяг, зсув або їх комбінації) і природи матеріалу. Крім того, автори [250, 251, 252] стверджували, що енергія активації залежить тільки від властивостей матеріалу, але не залежить від його структури, ступеня зміцнення і наявності домішок.

Подальші дослідження кінетики деформації показали, що активаційні параметри здатні змінюватися. Було встановлено, що кожна зміна параметрів відповідає зміні домінуючого дисипативного механізму. Вперше цей ефект був виявлений Дорном при дослідженні повзучості металів, коли для різних механізмів деформації був отриманий спектр значень енергії активації [396]. Величина енергії активації в істотній мірі залежить від природи діючого механізму руйнування. Тому кожен матеріал має стільки значень енергій активації руйнування, скільки існує механізмів цього процесу.

При дослідженні активаційних характеристик була встановлена їх залежність від створюваної при випробовуваннях схеми напружено-деформованого стану. При терті створюється складний напружено-деформований стан матеріалу поверхневого шару при дії нормальних і дотичних напружень, пружних і пластичних деформацій контактуючих тіл. Експериментальні дослідження температурної залежності мікропроцесів руйнування від тривалості напруження, втоми і повзучості твердих тіл різної природи [250] дозволили встановити характер залежності енергії активації деформації від напруги і температури, оцінити значення параметрів U_0 і τ_0 матеріалів.

З огляду на особливості визначення активаційних параметрів, авторами [2] було запропоновано оцінювати енергію активації пластичної деформації матеріалу поверхневого шару за результатами вимірювання мікротвердості, а в роботі [220] для аналізу анізотропії механічних властивостей при спільній дії нормальних і дотичних напружень на поверхні при терті запропоновано використовувати метод склерометрії.

В роботі [315] методом склерометрії оцінювали питому енергію деформації U_{def} [Дж/мм³] поверхневих шарів зразків з поширених конструкційних матеріалів при різних видах і режимах механічної і термічної обробки, а також її зміну (накопичені значення) в процесі тривалого напруження на знос. Відзначено циклічні зміни величини питомої енергії деформації за часом в процесі зношування в діапазоні 10 ... 27 Дж/мм³, які характеризують кінетику взаємопов'язаних процесів накопичення пошкоджень при зносі поверхонь, що деформуються при терті. Встановлено, що мінімізація рівня енергії деформації при обробці забезпечує запас пластичності матеріалу, збільшує період накопичення пошкоджень до настання граничного стану матеріалу деталей пар тертя.

Поверхневу енергію для більшості інженерних поверхонь важко визначити. В роботі [432] припущено, що поверхнева енергія твердого тіла може бути апроксимована за допомогою поверхневої енергії в рідкому стані при температурі плавлення матеріалу. З термодинамічної точки зору, чим вище енергія поверхні, тим більше реакційною здатністю буде характеризуватися поверхня. Отже, знаючи енергію поверхні, можливо спрогнозувати про потенційну хімічну реакційну здатність матеріалу по відношенню до кисню, води, активних компонентів

мастильних матеріалів. В процесі тертя інтенсифікується утворення високоенергетичних ділянок, на яких переважно протікають реакції адсорбції, хімічної модифікації, каталізу [355].

Лінійний зв'язок для більшості матеріалів між поверхневою енергією і зносостійкістю дозволяє враховувати поверхневу енергію в якості одного з критеріїв зносостійкості матеріалів. У роботах [275, 316] для сталей різних структурних класів була проведена оцінка характеру зміни поверхневої енергії і зносостійкості в залежності від температури відпуску. Аналіз отриманих залежностей показав, що в кожному структурному класі сталей спостерігається взаємозв'язок між поверхневою енергією, зносостійкістю і температурою відпуску, яка побічно враховує стан структури сталей.

При пластичній деформації відбувається збільшення щільності дислокацій у сталей, які не пройшли відпуск, з $10^6 \dots 10^8$ до $5,5 \cdot 10^{11} \dots 11,5 \cdot 10^{11}$ см^{-2} , а для загартованих сталей вона досягає 10^{13} см^{-2} [237]. Це є наслідком не тільки пластичної деформації, а й розпадом залишкового аустеніту і його перетворенням в мартенсит при одночасному збільшенні об'єму. Обидва види зміцнення накладаються один на одного. Як тільки щільність дислокацій досягне граничної величини, здатність кристалічної ґратки до подальшої деформації виявиться вичерпаною. Тому подальше збільшення числа циклів контактування призводить до перенаклепу, знеміцнення поверхні при одночасному зниженні поверхневої енергії, що обумовлює інтенсифікацію руйнування [23, 313].

Оскільки руйнування є кінетичним процесом, що відбувається по термофлуктуаційному механізму при термічному, механічному і термомеханічному впливові з проявом каталітичної дії поверхонь контакту і зміною енергії активації елементів трибосистеми (поверхонь контакту і мастильного матеріалу), необхідно враховувати енергію активації руйнування контактних поверхонь і мастильного матеріалу [177, 178]. Найбільш характерні значення енергії активації руйнування поверхневого шару для ряду металів і енергії активації деструкції різних мастильних матеріалів при термічному впливі наведені в роботі [22]. Енергія активації руйнування поверхневого шару металів становить: для сталі 40Х 41 ... 120 кДж/моль,

сталі ШХ-15 72 ... 150 кДж/моль, міді 10 ... 45 кДж/моль. Значення енергії активації деструкції різних мастильних матеріалів при термічному впливі складає 10 – 60 кДж/моль, причому найменші показники відповідають найслабшим нековалентним зв'язкам в молекулі мастильного матеріалу, які в першу чергу піддаються руйнуванню [237].

В роботі [457] встановлено, що розсіювання енергії є основним параметром, що характеризує інтенсивність зношування: об'єм зношеного матеріалу може бути поєднаний з кумулятивною енергією лінійною залежністю.

Енергетичний підхід до зносу контактних поверхонь був застосований в роботах [323, 328, 413, 443], в яких встановлено існування кореляційного зв'язку між зносом і дисипацією енергії для пар тертя в широкому діапазоні навантажень, швидкостей, режимів мащення. При цьому кількісну оцінку дисипації енергії можна розглядати як показник змін механічних та структурно–фазових властивостей контактуючих тіл.

В роботі [320] розглянуто еволюцію підсистем третього рівня, до яких відносяться мікрооб'єми контактної і приконтактної зони, охопленої структурно–енергетичними змінами трибопроцесу. Компонентом підсистеми третього порядку є одне твердофазне утворення, еволюція структури якого відбувається за рахунок пронизуючих його потоків енергії і речовини. Контактну взаємодію при терті з енергетичної точки зору можна представити як сукупність процесів взаємодії поверхні з потоком механічної енергії, закон розподілу якої на площині тертя адекватний епюрам дотичних напружень і відносних швидкостей ковзання. В результаті дії зазначених чинників відбувається зміна внутрішнього структурно–енергетичного стану контактних шарів і мікрогеометрії контакту, при цьому велика частина потоку механічної енергії трансформується в тепло. Недисипативна складова механічної енергії витрачається на формування вторинних структур і здійснення роботи по зносу контактних поверхонь. З енергетичної точки зору це проявляється в зміні хімічного потенціалу вторинних структур і здійсненні роботи диспергування [319].

Зношування є найбільш радикальним способом відновлення балансу між енергією, яка підводиться ззовні та її дисипативними видами [320]. При зношуванні дисипативний процес включає спад внутрішньої енергії частинками зносу і енергетичні витрати на здійснення роботи утворення нових поверхонь (диспергування). Зношування і супутні йому процеси структурних перетворень частинок зносу представляють дисипації пружної енергії деформації в незворотні для даної підсистеми форми, хоча по своїй фізичній природі ці енергетичні стани ще мають потенційні можливості подальшої деградації до теплового рівня.

Висновки до розділу 1. Обґрунтування наукового напрямку досліджень.

1. Встановлення механізмів утворення вторинних структур на поверхнях елементів трибоспряжень дозволяє керувати вибором оптимальних поєднань триботехнічних властивостей контактних поверхонь і мастильних матеріалів в залежності від умов експлуатації вузлів тертя, забезпечуючи умови їх сумісності. Важливе практичне значення має питання оптимізації структурних перетворень і процесів деформаційного зміцнення в металевих матеріалах при терті з метою досягнення якомога вищого рівня зміцнення поверхні, що буде сприяти підвищенню зносостійкості елементів трибоспряжень.

2. Для досягнення максимальної зносостійкості при структурній пристосованості елементів трибоспряжень необхідно використовувати засоби зменшення активації поверхневих шарів металу, зниження роботи тертя, регулювання пасивації і управління температурою. Розробка методів оцінки ефективності триботехнічних характеристик контакту в нестационарних умовах тертя є перспективним напрямком при визначенні діапазону працездатності матеріалів контактних поверхонь і мастильного матеріалу при їх експлуатації в динамічних умовах навантаження.

3. При оцінці працездатності зубчастої передачі важливо знати не тільки інтегральну величину зносу зуб'ів, але і встановити закономірності зміни таких параметрів, як питомої швидкості ковзання і питомої роботи тертя, оскільки дані

параметри створюють домінуючий вплив на зміну геометричної форми профілів зуб'ів в процесі експлуатації.

4. Одним з напрямків підвищення надійності сучасних машин і механізмів є розробка і створення таких режимів їх експлуатації, при яких забезпечується домінуюче прояв умов зовнішнього тертя. Комплексний підхід до вирішення завдань в цьому напрямку повинен полягати в аналізі та обліку багатьох факторів, кінетика зміни яких зумовлює мінливість антифрикційних та протизношувальних властивостей контакту. Величина адгезійної складової коефіцієнта тертя, обумовлена молекулярною взаємодією контактних поверхонь, залежить від дотичних напружень на межі розділу твердих тіл. Проте, в існуючих роботах не наводиться критеріїв оцінки локалізації вектору дотичних напружень при переході трибосистеми від гідродинамічного до граничного режиму мастильного дії.

5. Для аналізу кінетики зміни стану поверхневого шару можна прийняти синергетичний підхід і структурно-енергетичну теорію, в яких критичний стан матеріалу пов'язано з досягненням щільності внутрішньої енергії до величини енергії активації руйнування, яку можна розглядати як характеристику міцності матеріалів. Однак, необхідна розробка коректних фізичних і розрахункових моделей зношування, заснованих на результатах теоретичних і експериментальних досліджень кінетики пошкоджуваності і руйнування поверхневих шарів в конкретних умовах експлуатації елементів трибоспрямижень.

6. В умовах переходу трибосистеми в критичні режими роботи, до яких відносяться підвищені навантаження, високі швидкості ковзання, нестационарні умови роботи (режим пуск – зупинка), виникає ймовірність порушення цілісності мастильного шару. При цьому в контакті можливий перехід від гідро- і еластогідродинамічних режимів до граничного режиму мащення. В таких умовах значно порушується тепловідведення із зони тертя, в контакті виникають локальні ділянки, що характеризуються різким підвищенням температури. У зв'язку з дискретністю фрикційного контакту, в процесі тертя на фактичних ділянках дотику утворюються фрикційні зв'язки, які можуть існувати протягом дуже малого проміжку часу і зникають з порушенням контакту в даному місці. Таким чином, саме в зоні

фактичного контакту виникають фізичні процеси, що зумовлюють силу тертя і пов'язані з нею теплові явища і знос. Існуючі методики визначення інтенсивності тепловиділення в триботехнічному контакті не враховують можливість періодичної зміни режимів тертя, що відбуваються при переході трибосистеми в критичні режими роботи. Тому актуальним є питання, що стосується вибору високоточних чисельних методів для інтерпретації результатів практичних досліджень з метою подальшої апробації даних методів в реальних вузлах тертя. Зокрема, встановлення взаємозв'язку процесів інтенсивності тепловиділення в триботехнічному контакті зі зношуванням пар тертя є важливим завданням, що дозволяє вирішити питання, пов'язані з прогнозуванням ресурсу роботи пар тертя з локальною формою контакту.

7. Контактні умови являються визначальним чинником в плані прогнозування зародження та розвитку тріщин безпосередньо на поверхні або в приповерхневих шарах металу. Процеси поширення та розвитку тріщин можуть призвести до підвищення ймовірності прояву відмов внаслідок пітингу, відшарування або злому кромки зуба. В екстремальних умовах тертя внаслідок складного напруженого стану поверхневих шарів металу при одночасній дії нормальних та дотичних напружень, деформація поверхневих шарів йде переважно в напрямку дії тангенціальних сил. Навантаження, швидкість ковзання та величина проковзування контактних поверхонь створюють істотний вплив на глибину залягання максимальних дотичних напружень та на їх величину. Однак, в існуючих моделях не враховується вплив мастильного матеріалу на величину та вектор залягання дотичних зсувних напружень. Моделювання механізмів тертя в граничному та змішаному режимах мащення, які домінують при нестационарній роботі пар тертя, з метою оцінки локалізації дотичних напружень як ведучого руйнівного чинника при терті, являється перспективним напрямком в плані прогнозування кінетики зміни властивостей елементів трибоспряжень при експлуатації.

8. Підвищення довговічності і міжремонтного ресурсу деталей машин і механізмів може бути отримано шляхом застосування нових матеріалів, покриттів і обробок, що поліпшують триботехнічні характеристики контактних поверхонь і сприяють підвищенню їх зносостійкості. Перспективним напрямком підвищення

ефективності використання деталей різного призначення при економії матеріальних і паливно–енергетичних ресурсів є організація відновлення зношених деталей машин. Поява нових технологій для наплавлення, термомеханічної і хімічної обробок, покриття і зниження шорсткості контактуючих поверхонь дозволяє знаходити різні варіанти їх поєднання як при ремонті, так і при проектуванні нових зубчастих передач для підвищення їх довговічності в умовах експлуатації. У той же час, перевірка якості технологій зміцнення та / або відновлення повинна експериментально здійснюватися в лабораторних умовах на зразках, навантажених відповідно до основних експлуатаційних вимогах; при цьому також необхідно приділяти увагу і вибору мастильного матеріалу.

Таким чином, на базі фундаментальних положень трибології, термодинамічної теорії прогнозування та руйнування твердих тіл, структурно–енергетичної пристосованості матеріалів, положень нерівноважної кінетики фазових переходів першого роду, трибохімії і реології мастильного шару постає необхідність оцінки та прогнозування процесів самоорганізації дисипативних структур та зносостійкості трибосистем в несталих умовах роботи, які можуть складати до 70 – 80% їх загальної роботи. Це дає можливість сформулювати в обраному напрямку досліджень наступні задачі:

- створити програмно–апаратний комплекс для дослідження триботехнічних змін в фрикційному контакті з метою оцінки кінетики зміни швидкоплинних процесів самоорганізації дисипативних структур в реальному режимі роботи елементів трибоспряжень;

- розробити методику припрацювання контактних поверхонь з урахуванням кінетики зміни моменту тертя, питомої роботи тертя, гідро– та негідродинамічної складових товщини мастильного шару;

- розробити методику оцінки температурної і механічної стійкості граничних шарів в екстремальних умовах тертя;

- розробити методику оцінки локалізації максимальних дотичних напружень при терті в умовах кочення з різним ступенем проковзування з урахуванням триботехнічних характеристик контакту;

- розробити структурно–енергетичні параметри оцінки активаційних характеристик матеріалів, що характеризують довговічність області багатоциклової втоми і області малоциклової втоми debris–шару;
- розробити методику визначення триботехнічних характеристик пари тертя перше компресійне кільце – гільза циліндра ДВЗ залежно від робочого процесу;
- провести аналіз реологічних і антифрикційних властивостей трибоспряжень з позиції самоорганізації змащувальних граничних плівок;
- дослідити вплив природи граничних змащувальних шарів на адгезійну складову коефіцієнта тертя;
- провести оцінку кінетики зміни енергоємності контакту з позицій структурної пристосованості вторинних структур;
- дослідити вплив структурно–фазових перетворень в поверхневих шарах металу на зносостійкість контактних поверхонь;
- дослідити роботоздатність різних типів покриттів, які використовуються для зміцнення і відновлення зубчастих передач з позицій змащувальних, реологічних, антифрикційних властивостей контакту з урахуванням кінетики зміни питомої роботи тертя при структурній пристосованості в умовах динамічного навантаження.

Виконання поставлених задач дасть змогу досягти мети дослідження – підвищення зносостійкості вузлів тертя машин і механізмів на етапах їх проектування, експлуатації та ремонту шляхом підбору сумісності трибоелементів на основі науково–обґрунтованого вибору застосування методик оцінки триботехнічних характеристик контактних поверхонь, мастильного матеріалу та довговічності зношеного шару при самоорганізації дисипативних структур в несталих умовах тертя.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНКИ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФРИКЦІЙНОГО КОНТАКТУ В НЕСТАЛИХ УМОВАХ РОБОТИ

2.1. Загальні аспекти вибору методик трибологічних досліджень і моделювання процесів тертя.

Структурна пристосованість і еволюція трибологічної системи в процесі експлуатації можуть істотно змінити вихідні параметри, які використовуються при прогнозуванні ресурсу вузла тертя. Чисельне моделювання механізмів тертя в граничному і змішаному режимах мащення, домінуючих при нестационарній роботі елементів трибоспряжень, є перспективним напрямком в плані оцінки зміни властивостей конструкційних матеріалів при експлуатації. В роботі [409] з використанням комбінованих чисельних і експериментальних підходів наведено результати моделювання прояву мастильним матеріалом в'язко-пружних властивостей при впливі тиску в закритих локальних ділянках, що утворюються на поверхні металу.

Для отримання достовірних результатів досліджень елементів трибоспряжень, відтворюваності та збіжності результатів при повторних експериментах, необхідна чітка структура методики трибологічних досліджень (рис.2.1). Вона повинна включати: експериментальні засоби для проведення експерименту (схема і конструкція установки), об'єкти дослідження (матеріали, конструкція, точність виготовлення), умови проведення експерименту (навантаження, кінематичні і температурні фактори), контрольно-вимірювальні засоби, методи обробки результатів експериментального дослідження.

Розвиток комп'ютерної техніки, а також програмних засобів дозволяє широко розповсюджувати методи моделювання для багатьох інженерних задач. Моделювання трибологічних процесів на основі емпіричних даних дозволяє розробляти адекватні заходи в управлінні трибосистеми [442].

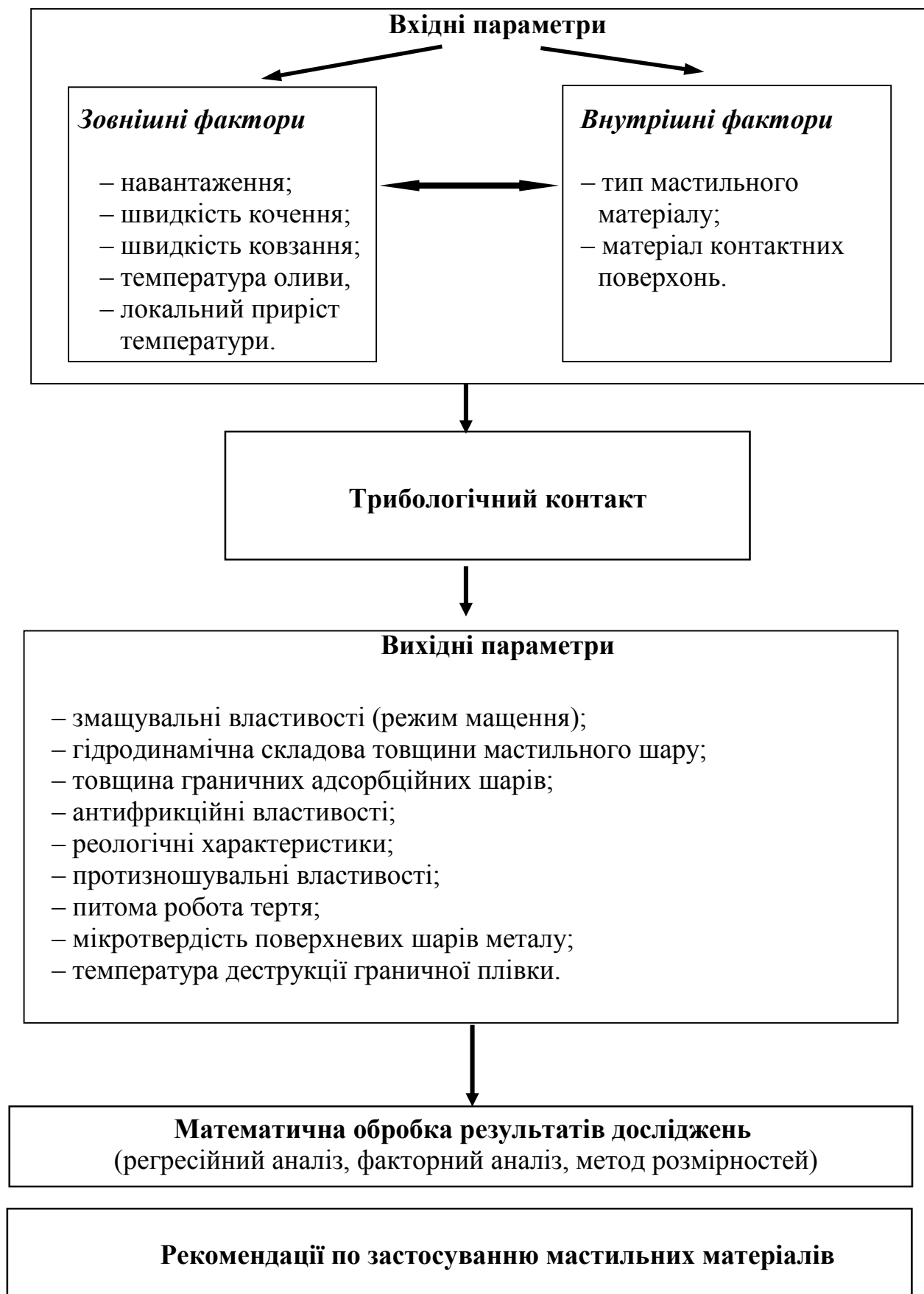


Рис.2.1. Схема оцінки триботехнічних параметрів в контакті.

Знання, отримані таким чином, в поєднанні з практичним досвідом в галузі трибології будуть застосовуватися для поліпшення трибосистем в промисловості, де можливо виділити основні завдання:

- оптимізувати технологічні процеси проектування і виготовлення матеріалів триботехнічного призначення з метою створення високоефективних фізико–механо–хімічних властивостей для конкретних умов експлуатації,
- безперервність у виробничому процесі з урахуванням оптимізації конструкції трибосистем з метою підвищення зносостійкості пар тертя для забезпечення високого рівня надійності продукції,
- отримання ефективних характеристик сумісності конструкційних елементів за триботехнічними показниками для конкретних умов експлуатації на основі інструментальних методик моделювання на базі розрахунків контактної механіки з урахуванням динамічних моделей поширення тріщин, глибиною поширення термічних напружень, інтенсивності протікання трибохімічних реакцій,
- прогнозування терміну служби трибосистем з урахуванням масштабних змін їх триботехнічних властивостей при експлуатації на нано–, мікро–, макро– рівнях.

При інтерпретації процесів тертя і зношування використовують математико-фізичне моделювання [64, 69, 200]. В силу того, що технічні пристрої і системи стають все більш складними і для експериментального моделювання потрібні значно більші матеріальні і часові ресурси, частку фізичного моделювання прагнуть максимально зменшити. Сучасні методи чисельної математики та обчислювальної техніки дозволяють зменшити частку фізичного моделювання і математично описати процеси, що відбуваються на фрикційній контакт.

2.2. Програмно-апаратний комплекс (ПАК) для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів.

ПАК представляє собою комплекс, до складу якого входить установка тертя (УТ), електронний блок (ЕБ), програмне забезпечення (ПЗ) «Тертя», встановлене на персональному комп'ютері (ПК) типу ІВМ РС та комплект кабелів (рис.2.2). ПАК

призначений для проведення науково–дослідних робіт для визначення триботехнічних властивостей фрикційного контакту.

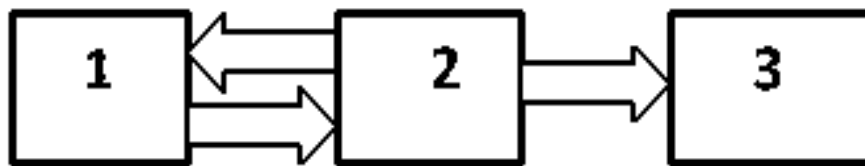


Рис.2.2. Блок – схема ПАК: 1 – установка тертя; 2 – електронний блок установки тертя; 3 – інтерфейс ПЗ «Тертя».

Мета, що постає перед створенням ПАК, – одержання більш достовірних результатів досліджень, проведення випробувань в умовах кочення, ковзання, реверсу без переобладнання пристрою, розширення діапазону коефіцієнта проковзування між контактуючими тілами кочення, зменшення матеріалоємності.

Поставлена мета вирішується за рахунок того, що ПАК складається з двох кінематично незалежних приводів. Нижній ролик обертається від шагового електродвигуна, статор якого нерухомо закріплений на мотор–вагах, які шляхом рухомого підвішування зовнішнього вала на двох опорах з конічними підшипниками до внутрішнього вала, з'єднаного з ротором, через втулку зі шпонкою сполучаються по одній геометричній вісі з валом, на якому кріпиться дослідний зразок. До мотор–вагів кріпиться тензодатчик реєстрації моменту тертя. Верхній ролик приводиться в обертальний рух від другого шагового електродвигуна, нерухомо закріпленого до зовнішнього вала, який з'єднаний через обойму з противагами для повороту вала при зміні дослідного зразка. Посадкові місця дослідних роликів ізолювані від маси пристрою, що дозволяє реєструвати зміну падіння напруги в мастильному шарі при визначенні товщини мастильного шару в контакті за методом падіння напруги в режимі нормального тліючого розряду [245]. Керування шаговими електродвигунами здійснюється програмуванням електронного блоку, що дозволяє проводити дослідження в умовах ковзання, кочення, кочення з проковзуванням (від 0 до 100%), реверса. Навантажування здійснюється за принципом важільно–маятникового врівноважування, прикладеного до вісі вала навантаження.

В нижній частині масляної ванни знаходяться два термотени, температура мастильного матеріалу визначається термопарою; для візуального спостереження за дослідними зразками з торцьової та верхньої сторін вставлені оглядові скельця.

На рис.2.3 зображена функціональна схема ПАК для оцінки триботехнічних характеристик пар тертя. ПАК містить два привода 5, 6, на вихідних валах яких кріпляться дослідні ролики 7, 8; обертання приводів здійснюється шляхом програмування керуючим блоком 2 шагових електродвигунів 3, 4, що з'єднані з джерелом живлення 1. Шаговий електродвигун 3 закріплений на мотор-вагах, до яких кріпиться тензодатчик реєстрації моменту тертя 9. Нижній дослідний зразок 7 занурений в мастильний матеріал 10, що знаходиться в ванні 11, до нижнього корпусу якої входять два термотени 12, термопара 13 прикріплена до стрижня 14. Навантажувальний засіб складається з системи важелів з навантаженням 15 та противагами 16.

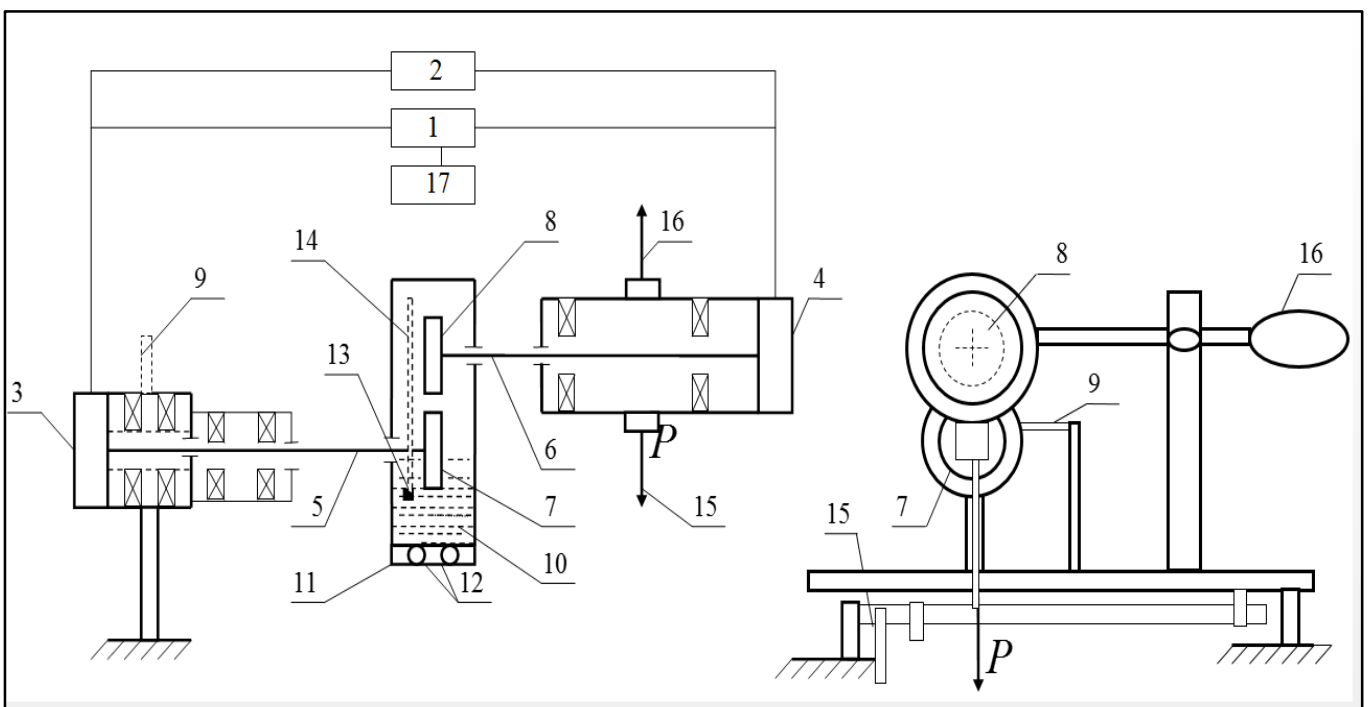


Рис.2.3. Схема ПАК для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів.

ПАК працює наступним чином. Трибосистема, яка складається з двох рухомих роликів 7, 8, що контактують в процесі тертя, та мастильного матеріалу 10, розміщена в ванні 11. Трибосистема з допомогою навантажувального засобу 15 навантажується заздалегідь визначеним зусиллям P і обертальними приводами 5, 6 приводяться в рух

ролики. Режими обертання (ковзання, кочення, кочення з проковзуванням, реверс) програмуються електронним блоком 2.

Електронний блок установки тертя призначений для:

- формування і передачі керуючих сигналів установки тертя;
- прийому і первинної обробки даних датчиків установки тертя;
- передачі результатів на ПК для подальшої обробки програмним забезпеченням.

До складу електронного блоку входить набір плат і модулів, розташованих всередині збірної металевої корпусу (Додаток А).

Момент тертя, частота обертання роликів, температура мастильного матеріалу, падіння напруги в мастильному шарі в контакті записуються та обробляються на ПК в реальному часі з графічним зображенням їх змін.

ПЗ призначене для прийому даних від електронного блоку установки тертя, автоматичного контролю і обробки триботетехнічних параметрів досліджуваних зразків. ПЗ складається з двох підпрограм:

- підпрограма прийому даних «ПРИЙОМ» ;
- підпрограма обробки даних «ОБРОБКА».

Підпрограма прийому даних працює в складі ПАК а також в автономному режимі. Від ЕБ по RS–232 каналу підпрограма приймає коди зміни напруження в контакті при 2 та 4А (U_k), крутного моменту (M), частоту обертання зразків (n_1, n_2), об'ємної температури оливи (T_o) (рис. 2.4).

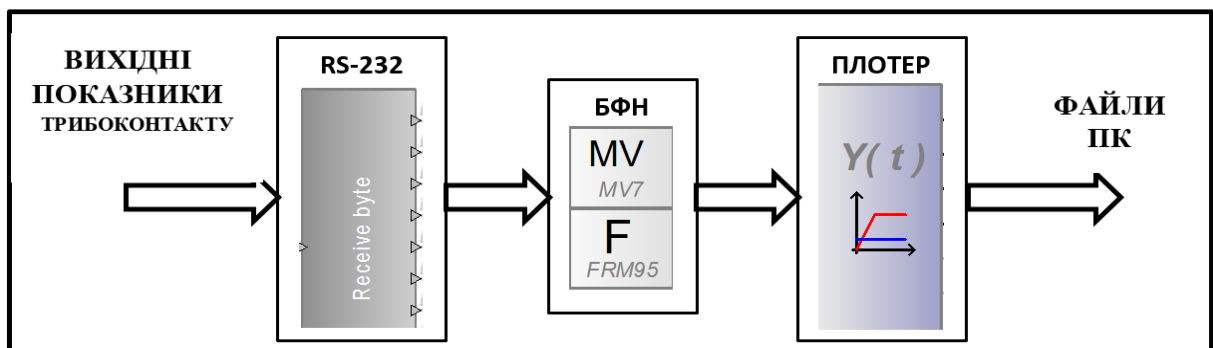


Рис.2.4. Функціональна схема підпрограми «ПРИЙОМ»: RS–232 – послідовний канал прийому даних; БФН – програмний блок фільтрації і нормування вхідних сигналів; плотер – графічне представлення фізичних величин вхідних сигналів.

Прийняті коди надходять на програмний блок фільтрації і нормування (БФН), призначений для блокування помилково прийнятих сигналів, згладжування і перетворення кодів в реальні фізичні величини.

Для графічного подання фізичних величин вхідних сигналів в підпрограмі встановлений програмний модуль плотер. Після закінчення експерименту графіки зберігаються для подальших обчислень триботехнічних параметрів підпрограмою обробки даних.

Досліджувані нестационарні умови тертя характеризуються циклічністю проведення експериментів в режимі запуск – стаціонарна робота – гальмування – зупинка (рис. 2.5).

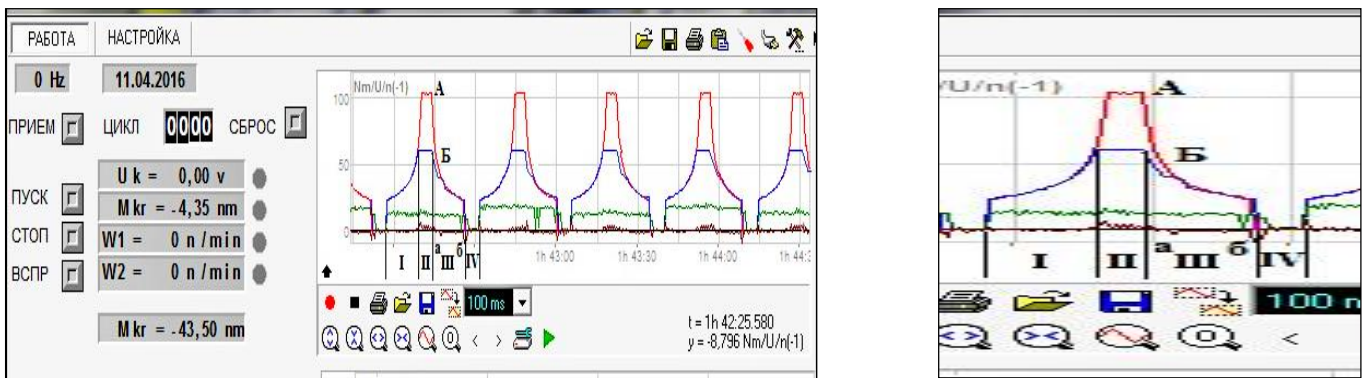


Рис. 2.5. Схема роботи трибосистеми в нестационарних умовах тертя: ділянка I – запуск; ділянка II – стаціонарна робота; ділянка III – гальмування; ділянка IV – зупинка.

Ділянка I відповідає початковому періоду роботи пар тертя і характеризується поступовим збільшенням швидкості кочення роликів, при цьому $V_{\text{ковз}} = 0$. На ділянці II досягається заданий максимальний рівень проковзування роликів, швидкості кочення пар тертя на ділянці II постійні. Ділянка III відповідає гальмуванню, для якого характерні два періоди: початкове зменшення швидкості кочення роликів зі збереженням заданого проковзування в точці A і поступовим зменшенням ступеня проковзування до нуля в точці B (IIIa). Подальше гальмування відбувається в умовах одночасного зменшення швидкості кочення обох роликів при збереженні умови $V_{\text{ковз}} = 0$ (IIIб). Ділянка IV відповідає зупинці. Якщо спроектувати обраний цикл на зубчасте евольвентне зачеплення, то полюсна зона зачеплення відповідає ділянкам I

і Шб, приполюсна зона – ділянці Ша, крайні точки зачеплення з максимальним проковзуванням – ділянці П.

Максимальна частота обертання для випереджаючої поверхні складала 1000 об/хв. В роботі використовувались режими з проковзуванням відстаючої поверхні 3, 10, 20, 30 і 40%.

Інтерфейс підпрограми обробки даних зображений на рис. 2.6. Перед запуском підпрограми необхідно: ввести вихідні дані (зона 1); вибрати тип мастильного матеріалу (зона 2); при необхідності скинути лічильник – таймер (зона 3); при необхідності очистити таблиці вхідних даних і результатів роботи підпрограми (зона 11, 12); відкрити файл з графіками, збереженими підпрограмою «ПРИЙОМ» (зона 5). Після натискання PLAY (зона 4) дані від модуля графічного відображення результатів надходять на програмний модуль фільтрації і нормування вхідних сигналів. Програмний модуль визначення максимального, мінімального та сталого крутного моменту запускає таймер-лічильник для визначення часових інтервалів максимального, мінімального та сталого крутних моментів, які формують імпульси для збереження поточних значень напруження в контакті при 2 та 4А (U_k), крутного моменту (M), частоти обертання зразків (n_1, n_2), об'ємної температури оливи (T_o) (Додаток А).

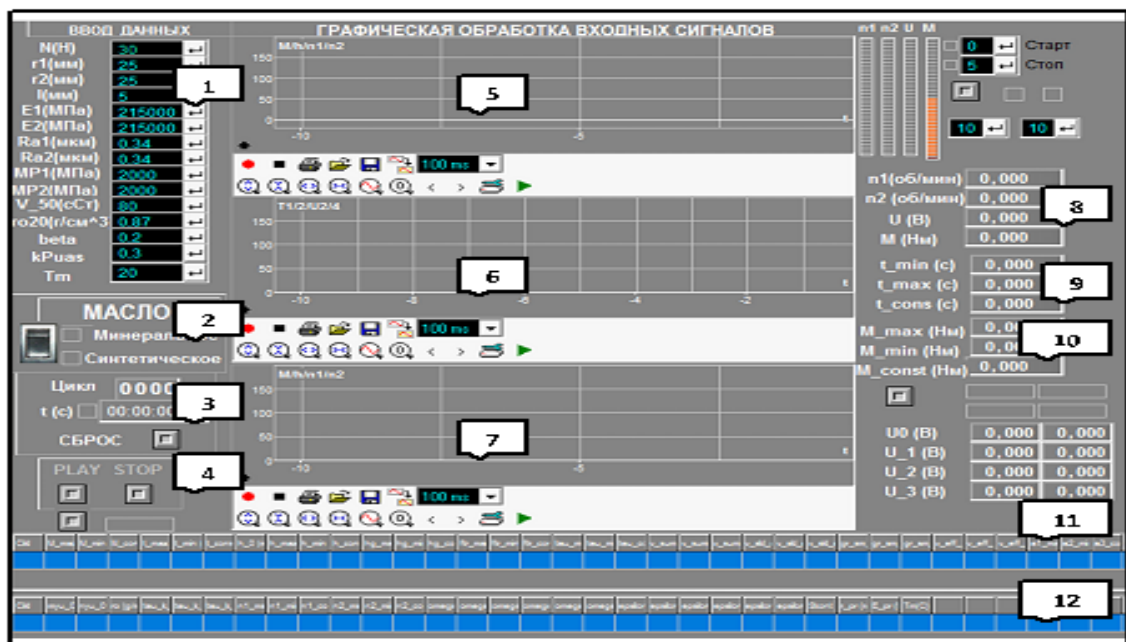


Рис.2.6. Інтерфейс підпрограми обробки даних.

Програмний блок математичної обробки даних виконує обчислення за заданим алгоритмом розрахунку. В створеній програмі є окремий канал для візуальної оцінки кінетики зміни основних триботехнічних показників трибоконтакту в режимі on-line (рис. 2.7).

The screenshot displays a control interface for the 'OBROBKA' program, organized into several sections:

- Суммарная скорость качения (Summary Rolling Velocity):** Parameters include v_{k1_max} , v_{k1_min} , and v_{k1_const} , all set to 0.000.
- Напряжение сдвига (Shear Stress):** Parameters include τ_{s_max} and τ_{s_const} , both set to 0.000.
- Касательные напряжения (Tangential Stresses):** Parameters include τ_{k_max} and τ_{k_const} , both set to 0.00E+00.
- Суммарная линейная скорость (Summary Linear Velocity):** Parameters include v_{sum_max} and v_{sum_const} , both set to 0.000.
- Коэффициент трения (Friction Coefficient):** Parameters include f_{pr_max} and f_{pr_const} , both set to 0.000.
- Эффективная вязкость (Effective Viscosity):** Parameters include η_{eff_max} , η_{eff_min} , and η_{eff_const} , all set to 0.00E+00.
- Пьезокоэффициент вязкости (Piezoviscosity Coefficient):** Parameters include α_1 , α_2 , and α_3 , all set to 0.00E+00.
- Градиент скорости смещения (Velocity Gradient):** Parameters include g_{r_max} and g_{r_const} , both set to 0.00E+00.
- Приведенный радиус (Reduced Radius):** Parameter r_{pr} is set to 0.000.
- Кинематическая вязкость (Kinematic Viscosity):** Parameter ν_{k_T} is set to 0.000E+00.
- Плотность (Density):** Parameter ρ is set to 0.000.
- Приведенный модуль упругости (Reduced Modulus of Elasticity):** Parameter E_{pr} is set to 0.000000E+00.
- Площадь контакта (Contact Area):** Parameter S is set to 0.000.
- Динамическая вязкость (Dynamic Viscosity):** Parameter η is set to 0.000E+00.
- Время (Time):** Parameter t_{h_0} is set to 0.000.
- Максимальное контактное напряжение (Maximum Contact Stress):** Parameter σ_{hm_max} is set to 0.00E+00.

The interface is divided into two main sections for test rigs **ДВ1** and **ДВ2**:

- ДВ1 Parameters:**
 - Radius of specimen: r_1 (mm) = 0.050
 - Microhardness: MP_1 (MPa) = 0.000
 - Modulus of elasticity: E_1 (MPa) = 0.00000E+00
 - Surface roughness: Ra_1 (mm) = 0.000
 - Rotational speed: $n1_max$, $n1_min$, $n1_const$ (1/min) = 0.000
 - Linear velocity: $v1_max$, $v1_min$, $v1_const$ (m/s) = 0.000
 - Angular velocity: ω_{max1} , ω_{min1} , ω_{const1} (1/s) = 0.000
 - Angular acceleration: ϵ_{max1} , ϵ_{min1} , ϵ_{const1} (1/s²) = 0.000
- ДВ2 Parameters:**
 - Radius of specimen: r_2 (mm) = 0.000
 - Microhardness: MP_2 (MPa) = 0.000
 - Modulus of elasticity: E_2 (MPa) = 0.00000E+00
 - Surface roughness: Ra_2 (mm) = 0.000
 - Rotational speed: $n2_max$, $n2_min$, $n2_const$ (1/min) = 0.000
 - Linear velocity: $v2_max$, $v2_min$, $v2_const$ (m/s) = 0.000
 - Angular velocity: ω_{max2} , ω_{min2} , ω_{const2} (1/s) = 0.000
 - Angular acceleration: ϵ_{max2} , ϵ_{min2} , ϵ_{const2} (1/s²) = 0.000

Рис. 2.7. Интерфейс канала контролю работы подпрограмми «ОБРОБКА».

Результати обчислень після закінчення кожного циклу випробувань зберігаються в табличному вигляді. Після обробки всіх циклів результати обчислень з таблиць експортуються в програму EXCEL для подальшого аналізу.

2.2.1. Методика визначення триботехнічних характеристик вузла тертя.

Змащувальні властивості (гідродинамічна і негідродинамічна складові товщини мастильної плівки) визначаються методом падіння напруги в режимі нормального тліючого розряду. Згідно з цією методикою, вимірюється падіння напруги в змащувальному шарі при силі струму 2 і 4 А, потім за тарувальними таблицями проводиться визначення товщини мастильного шару:

$$h = \frac{2U_{2A} - U_{4A}}{k}, \quad (2.1)$$

де U_{2A} і U_{4A} – падіння напруги в змащувальному шарі при силі струму 2 и 4 А, k – коефіцієнт, що залежить від типу мастильного матеріалу.

Розрахунок коефіцієнта тертя проводиться за формулою:

$$f = \frac{2M}{dN}, \quad (2.2)$$

де M – крутний момент, d – діаметр зразка, N – навантаження.

Визначення реологічних характеристик мастильного матеріалу включає розрахунок градієнта швидкості зсуву (γ) і напружень зсуву (τ) змащувальних шарів, ефективної в'язкості в контакті (η_{ef}) за наступними залежностями:

$$\gamma = \frac{V_{ковз}}{h}, \quad (2.3)$$

$$\tau = \frac{f \cdot N}{S}, \quad (2.4)$$

$$\eta_{ef} = \frac{\tau}{\gamma}, \quad (2.5)$$

де $V_{ковз}$ – швидкість ковзання, S – площа контакту.

При частих пусках – зупинках на контактних поверхнях формуються граничні адсорбційні шари мастильного матеріалу негідродинамічної природи, товщина яких визначається в момент зупинки, в період пуску спостерігається приріст товщини мастильного шару та його стабілізація при досягненні заданого режиму обертання за рахунок формування загальної товщини мастильного шару в контакті, яка містить гідро– та негідродинамічну складові. Розрахунок динамічної ефективної в'язкості проводять при першому вимірюванні триботехнічних показників під час пуску (через 0,01с), що відповідає динамічній ефективній в'язкості структурованих граничних шарів мастильного матеріалу на активованій тертям поверхні металу, та при вимірюванні при пуску під час стабілізації моменту тертя, швидкості обертання роликів та падіння напруги в мастильному шарі, що відповідає загальній динамічній ефективній в'язкості.

Спосіб визначення питомої роботи тертя в контакті при нестационарних умовах навантаження.

Технічною задачею, на розв'язання якої спрямована дана методика, є підвищення достовірності та точності оцінки реєстрації моменту тертя та визначення кінетики зміни питомої роботи тертя в нестационарному режимі роботи трибоелементів в довільний час тривалості циклу. Поставлена задача реалізується за рахунок того, що на ПК в режимі реального часу нестационарної роботи трибоелементів через визначені короткі рівні проміжки часу одночасно фіксуються момент тертя в контакті, який реєструється тензодатчиком, та частота обертання контактних поверхонь. Розрахунок питомої роботи тертя проводять шляхом інтегрування площі, обмеженої кривою моменту тертя, та вибору довільного діапазону інтегрування по осі абсцис за координатою часу напрацювання елементів трибоспряження, по якій визначається кут повороту контактних поверхонь за зафіксованою їх частотою обертання в певний обраний час наробітки, з урахуванням кінетичної енергії обертальних деталей за формулою:

$$A = \left[\left| \int_0^{t_i} M_i(t) \cdot 2\pi n_i(t) dt - \frac{1}{2} \sum_0^{i=n_{ti}} J_{Pi} \cdot \omega_i^2 \right| \right] / F, \quad (2.6)$$

де M – момент тертя; n, ω – відповідно частота обертання та кутова швидкість обертання однієї контактної поверхні при ковзанні та чистому коченні (при проковзуванні обчислюється середнє арифметичне значення даних параметрів для двох елементів трибоспряження); t – час тривалості циклу; J_{Pi} – полярний момент інерції обертальних деталей триботехнічної установки, які впливають на точність вимірювання моменту тертя в контакті; F – номінальна площа контакту по Герцу.

Вимірювання моменту тертя здійснюється чотирма тензодатчиками (для підвищення чутливості та компенсування похибки вимірювання), які включаються в електричний ланцюг за мостовою схемою (рис.2.8).

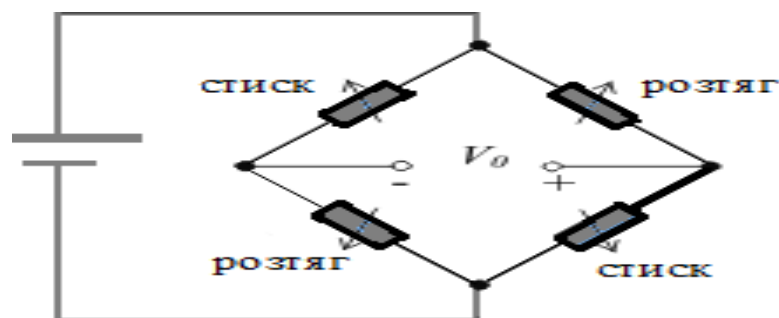


Рис.2.8. Мостова схема вимірювання моменту тертя.

Тензодатчики наклеєні на балку з двох сторін (два датчика на стиск – знизу, два датчика на розтяг – зверху), що дозволяє реєструвати різні за напрямом деформації та визначати крутний момент незалежно від направлення прикладання сили тертя при розгоні, стаціонарній роботі та гальмуванні дослідних зразків. Балка одним кінцем консольно закріплена до нерухомої станіни пристрою, іншим кінцем вона фіксується через блоки підшипників, які нерухомо закріплені до мотор – вагів. В умовах примусового гальмування направлення сили тертя та напрям деформації балки змінюються, крутний момент реєструється як від'ємний, що враховується в розрахунковій формулі шляхом обчислення його зміни за модулем.

2.2.2. Методика оцінки температурно-механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу в критичних режимах тертя.

Розробивши температурний метод оцінки змащувальної здатності оливи при граничному режимі мащення Р.М. Матвеєвський використовував його для систематичних досліджень процесу граничних шарів мастильних матеріалів різного експлуатаційного призначення [131, 414, 416]

На одержуваних цим методом залежностях коефіцієнта тертя від температури чітко фіксуються всі перехідні температури, які проявляються при терті:

- перша критична температура, яка реалізується внаслідок того, що при її перевищенні швидкість руйнування граничного шару починає домінувати над швидкістю його утворення;

- температура хімічної модифікації поверхні, при якій поверхні тертя розділяються модифікованим шаром, що утворюється в результаті трибохімічної взаємодії хімічно активних компонентів мастильного середовища з матеріалами поверхневих шарів елементів трибоспряження;

- друга критична температура, при перевищенні якої швидкість зношування модифікованого шару починає домінувати над швидкістю його утворення.

Було доведено, що при перевищенні певної для кожної досліджуваної оливи температури (температурі переходу) коефіцієнт тертя різко підвищувався, причому ця температура практично не відрізняється від сумарної критичної температури,

отриманої при варіюванні діючих факторів для тієї ж оливи. Одночасно була підтверджена гіпотеза Хрущова, згідно з якою перехідна температура по Тейбору, що характеризує перехід безперервного, «гладкого» тертя до стрибкоподібного при граничному режимі мащення, являє собою не що інше, як критичну температуру переходу до заїдання по Блоку в реальних вузлах тертя, яка не залежить від режиму роботи цих вузлів [118, 344, 415].

Р.М.Матвеевський також показав, що величини критичних температур мастильних матеріалів, визначених запропонованим методом, різко знижуються при пластичних деформаціях зразків в процесі тертя. Тому в його дослідженнях оцінка значень критичних температур проводиться при контактних тисках, які практично виключають пластичну деформацію поверхневих шарів елементів трибоспряження в фрикційному контакті.

У реальних вузлах тертя більшості механізмів фрикційна взаємодія пар тертя відбувається при тисках, що призводять до пружно–пластичної деформації контактних поверхонь, і швидкостях ковзання, що обумовлюють появу високих градієнтів швидкості зсуву змащувальних шарів. Тому в роботі розроблена методика оцінки температурно–механічної стійкості граничних плівок, яка полягає в наступному:

- провести припрацювання контактних поверхонь в нестационарних умовах тертя (режим пуск – зупинка);
- при контактному тиску по Герцу (100 – 500 МПа) в умовах кочення з різним ступенем проковзування (від 3 до 40%) створити умови достатнього надходження досліджуваного мастильного матеріалу в зону тертя;
- провести напрацювання до стабілізації основних триботехнічних показників контакту (товщини мастильного шару на стоянці, в пусковий період і в період, який відповідає обраним максимальним швидкостям кочення випереджаючої і відстаючої поверхонь; коефіцієнта тертя; питомої роботи тертя), які характеризують формування стабільного граничного шару компонентами мастильного матеріалу;
- припинити подачу мастильного матеріалу в зону тертя, видалити залишки мастильного матеріалу з контактних поверхонь;

– фіксувати зміну основних триботехнічних показників контакту до прояву перших ознак схоплювання контактних поверхонь.

В умовах роботи контактних поверхонь без подачі мастильного матеріалу ефективність змащувальних властивостей контакту визначається виключно стійкістю граничних шарів, сформованих на активованих тертях контактних поверхнях в гідро– та еластогідродинамічних умовах мащення.

На рис.2.9 наведена загальна схема методики оцінки стійкості граничних шарів мастильного матеріалу до підвищення температури і градієнта швидкості зсуву змащувальних шарів в контакті.

2.2.3. Методика оцінки величини енергії активації руйнування поверхневих та приповерхневих шарів металу.

В роботі запропонована наступна методика оцінки величини енергії активації провідного механізму руйнування:

– проводять випробування зразків матеріалів в обраному діапазоні навантажень при контактному тиску по Герцу (100 - 500 МПа) в умовах кочення з різним ступенем проковзування (від 3 до 40%);

– випробування в нестационарному режимі розгін – стаціонарна робота – гальмування – зупинка проводять за наступною схемою: припрацювання в середовищі мастильного матеріалу; напрацювання до стабілізації основних триботехнічних показників контакту (товщини мастильного шару на стоянці, в пусковий період і в період, який відповідає обраним максимальним швидкостям кочення випереджаючої і відстаючої поверхонь; коефіцієнта тертя; питомої роботи тертя), які характеризують формування стабільного граничного шару компонентами мастильного матеріалу;

– створити умови припинення подачі мастильного матеріалу в зону тертя і фіксувати зміну основних триботехнічних показників контакту до прояву перших ознак схоплювання контактних поверхонь;

– визначити довговічність роботи елементів трибоспряжень $\tau_p = N \cdot t_{ц}$ по працездатності пар тертя при ряді значень температур і навантажень;

Методика діагностики температурної та механічної стійкості граничних змащувальних шарів

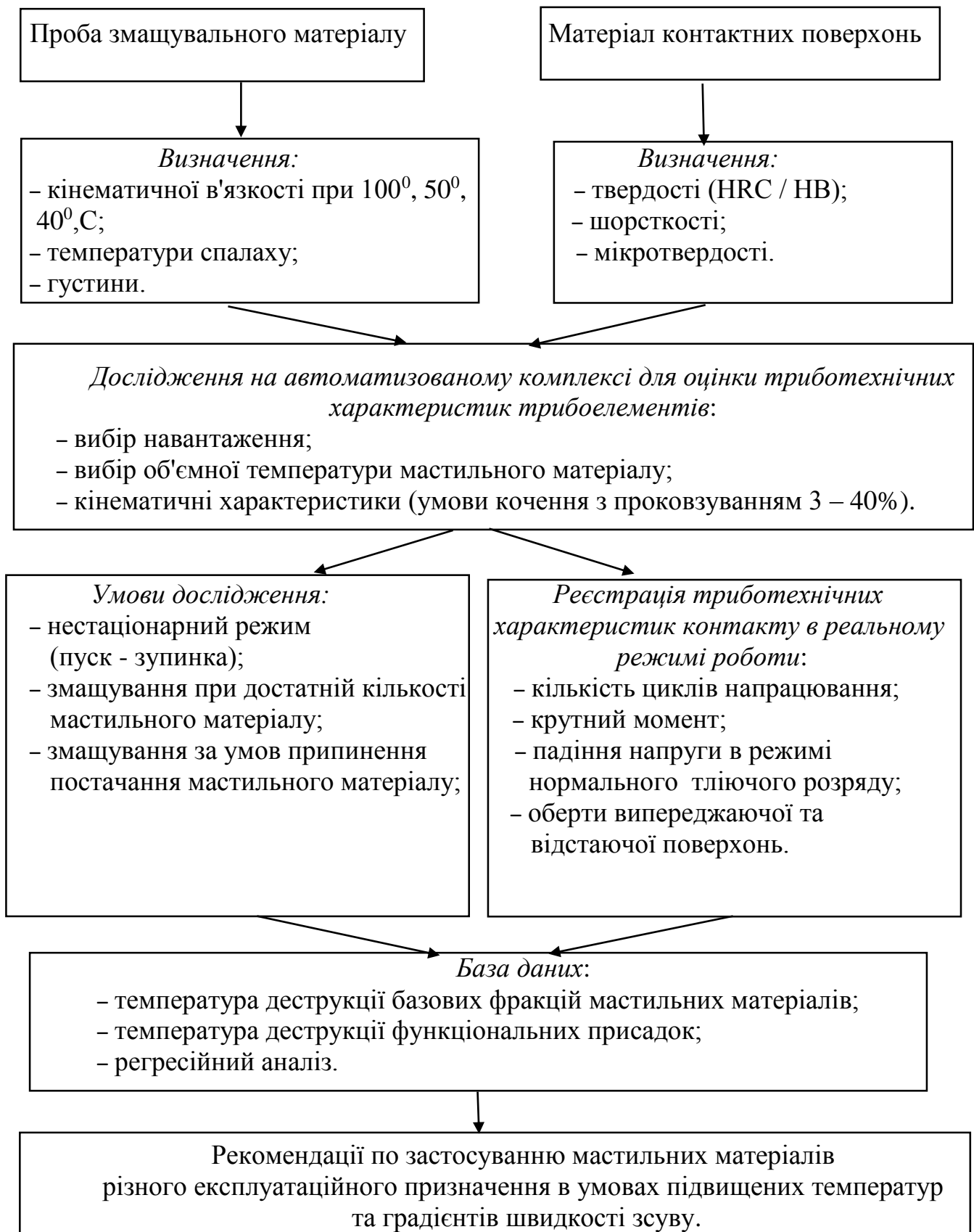


Рис.2.9. Схема методики діагностики температурної та механічної стійкості граничних змащувальних шарів.

– розрахувати критичну температуру в зоні контакту елементів трибоспряжень, яка виражається залежністю: $T_{\sigma} = t_0 + \vartheta$, де t_0 – температура поверхонь до входу в зону контакту, ϑ – температура спалаху по Блоку, яка представляє локальне миттєве підвищення температури, при якій відбувається заїдання.

На підставі отриманих експериментальних даних щодо зміни τ_p и T в залежності від контактного тиску визначити значення енергію активації руйнування за формулою:

$$U_{\sigma} = RT_{\sigma} \ln \frac{\tau_p}{\tau_0}, \quad (2.7)$$

де U_{σ} – енергія активації руйнування, кДж/моль; τ_{σ} – напрацювання пар тертя протягом часу, с; τ_0 – постійна часу, що дорівнює періоду атомних коливань в тілі $10^{-13} \dots 10^{-12}$ с; R – газова постійна, Дж/(К моль); T_{σ} – абсолютна температура, К.

2.3. Методика визначення послідовного зносу субшарів трибологічного шару.

Як відзначають автори [135] найбільш поширеними видами руйнування зуб'їв зубчастої пари є втомне, абразивне, адгезійне, корозійно–механічне зношування контактних поверхонь, а також руйнування при схоплюванні. Серед основних факторів, які найбільш істотно впливають на механізм, характер і швидкість зношування зубчастих коліс слід виділити контактні навантаження, температуру, властивості мастильних матеріалів.

Результати досліджень [135] вказують на те, що основним чинником, що визначає ресурс зубчастих передач сільськогосподарських, дорожніх, будівельних, гірських машин є знос. Також до зносу схильні більшість типів тихохідних, відкритих зубчастих передач.

Складність розрахункової оцінки зубчастих передач полягає в необхідності узагальнення в єдиній моделі процесів, які характеризуються різною природою поверхневого руйнування.

При моделюванні процесів зношування в якості основних моделей часто використовуються моделі механіки руйнування, які засновані на аналізі кінетики накопичення пошкоджень в поверхневих шарах в процесі зношування, а швидкість зношування ототожнюється зі швидкістю накопичення пошкоджень [354, 377, 433].

Аналіз кінетики руйнування поверхневих шарів, в процесі зношування, дозволив сформулювати основні положення деламінаційної теорії зношування [447], яка описує механізм поетапного пошарового руйнування поверхні в процесі тертя за рахунок накопичення пошкоджень в поверхневому шарі під впливом деформаційних процесів. При досить якісному описуванні процесів зношування, теорія дає суттєві похибки в кількісних оцінках зносу. А саме, вказувалося, що мікротріщини в поверхневому шарі можуть утворюватися в будь-якому місці сильно деформованої зони і можуть залягати набагато глибше, ніж передбачала деламінаційна теорія. Мікротріщини існують на різних глибинах і злиття їх відбувається по шляху, який визначається рядом факторів, які впливають на трибосистему і не обов'язково дія цих факторів проявляється в одній площині. Це призводить до деяких суперечностей, що стосуються форми частинок і механізму утворення частинок при зношуванні контактних поверхонь.

Незважаючи на існуючі недоліки, теорія пояснює два важливих явища зношування, а саме, що мікротріщини, особливо поблизу включень, а також їх подальший розвиток і злиття відіграють важливу роль в генерації часток зносу, і те, що механізм виникнення і розвитку адгезійного зношування, фретинг-зносу і втомного зношування може бути єдиним.

В зв'язку з цим, від моменту появи перших публікацій, що описують деламінаційну теорію зношування в 1973 році, і до теперішнього часу тривають роботи над її вдосконаленням і розвитком [395, 397].

В процесі розвитку деламінаційної теорії зношування, авторами [395] запропонована модель, яка дозволяє розрахувати приріст деформації зсуву, яку отримує кожен субшар трибологічного шару в процесі пластичного деформування під дією періодичного навантаження контактним тиском (рис.2.10).

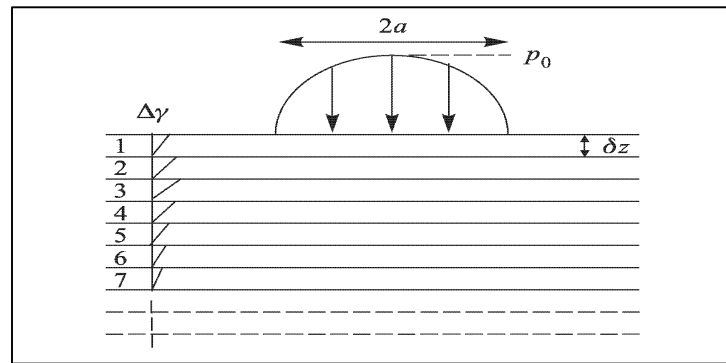


Рис. 2.10. Трибологічний шар контактної поверхні при зношуванні, що складається з субшарів (згідно [395]).

Приріст деформації, яка накопичується в субшарах в процесі тертя, визначається багатьма зовнішніми і внутрішніми факторами: пружними та пластичними властивостями матеріалу, контактним тиском, коефіцієнтом тертя і т. п.

Слід враховувати, що відповідно до [204] властивості трибологічного шару істотно відрізняються від властивостей загального об'єму матеріалу, що, безумовно, позначається на швидкості зношування. При цьому в трибологічному шарі відбувається зміна твердості, деформаційне зміцнення (знеміцнення), зміна коефіцієнта тертя в результаті домінування різних режимів мащення в несталіх умовах роботи, зміна властивостей матеріалу по глибині трибологічного шару, зміна температури в зоні фрикційного контакту. Крім того, при моделюванні процесів зношування слід враховувати, що процеси зношування є за своєю суттю випадковими процесами кумулятивного типу внаслідок впливу на них великої кількості випадкових факторів [31].

Виходячи з вищевказаного, можна запропонувати два можливих підходи для опису зношування з урахуванням формування трибологічного шару на поверхні тертя в процесі самовпрорядкування.

Перший підхід заснований на використанні складних визначальних рівнянь, які включають вищезазначені ефекти, протікання яких спостерігається в трибологічному шарі. Однак, застосування моделей даного рівня для розрахунку реальних трибосполучень складної конфігурації є надзвичайно складним, а в більшості

випадків, з огляду на складність процесів, що відбуваються в зоні тертя і їх недостатній ступінь вивченості на фізичному рівні, практично не реалізованим.

Альтернативний варіант вирішення проблеми може бути заснований на феноменологічному підході, що використовує спрощені моделі і методи аналізу, які дають результати, що не суперечать експериментальним даним. Для аналізу кінетики процесу зношування на макрорівні ефективним є використання феноменологічних моделей, в яких приймається відомим співвідношення, що встановлює зв'язок між характеристиками зносу поверхні і рядом параметрів, які характеризують властивості фрикційного контакту та умови взаємодії.

З огляду на вищезазначене, для опису процесів зношування зубчастих передач доцільно побудувати феноменологічну ймовірнісну модель послідовного зносу субшарів трибологічного шару.

Для опису процесів накопичення кумулятивних пошкоджень авторами [31, 273] досить ефективно використовуються марковські випадкові процеси з дискретними часом і станами (ланцюги Маркова).

Для побудови феноменологічної ймовірнісної моделі послідовного зносу субшарів трибологічного шару в зубчастому зачепленні використаємо методологію, запропоновану в роботі [274], для опису процесів зношування.

Зношування трибологічного шару розглядається як випадковий процес марковського типу з дискретним часом і станами.

Для використання термінології математичного апарату теорії марковських випадкових процесів визначимо деякі поняття, а саме – системи і стану системи. Під системою будемо розуміти трибологічний шар. Під станом системи приймаємо знос шару на величину, кратну товщині субшару δz (рис.2.10). Таким чином, вираз «система знаходиться в i -му стані» означає, що $i-1$ субшар (рис.2.10) зношений, і величина зносу трибологічного шару становить $(i-1) \cdot \delta z$. Відповідно, вираз «ймовірність переходу системи зі стану в стан $i + 1$ » означає ймовірність зносу i -го субшару.

Відповідно до математичного апарату ланцюгів Маркова, в момент часу $t = 1$ ймовірності знаходження системи в тому чи іншому стані визначаються як добуток

вектора початкових станів $[\pi_i]$ на матрицю перехідних ймовірностей (МПЙ) $[\mathbf{W}_{ij}]$:

$$[\pi_i(t=1)] = [\pi_i(t=0)][\mathbf{W}_{ij}], \quad i, j = 1, 2, \dots, K, \quad (2.8)$$

де $[\pi_i(t=0)]$ – вектор початкових станів; $[\pi_i(t=1)]$ – вектор безумовних ймовірностей знаходження системи в i -х станах ($i = 1, \dots, K$) в момент часу $t = 1$; $[\mathbf{W}_{ij}]$ – матриця перехідних ймовірностей; K – кількість субшарів трибологічного шару.

Ймовірності станів системи в момент часу $t > 1$ визначаються як добуток $[\pi_i(t-1)]$ вектору безумовних ймовірностей в момент $t-1$ на МПЙ, що задає поведінку системи в момент часу t :

$$[\pi_i(t)] = [\pi_i(t-1)][\mathbf{W}_{ij}], \quad i, j = 1, 2, \dots, K. \quad (2.9)$$

Компоненти вектору початкових станів $[\pi_i(t=0)]$ визначаються з припущення, що в початковий момент часу система не мала зносу, таким чином знаходилась в першому стані:

$$[\pi_i(t=0)] = [1, 0, 0, \dots, 0]. \quad (2.10)$$

Для опису процесів накопичення трибопошкоджень, які відносяться до класу кумулятивних пошкоджень, автори [31, 273] ефективно використовували МПЙ з одиничними стрибками вгору і наявністю поглинаючого стану, яка досить повно відображає сутність процесу зношування, а саме послідовне руйнування субшарів трибологічного шару:

$$[\mathbf{W}_{ij}] = \begin{bmatrix} w_{11}(t) & w_{12}(t) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_{22}(t) & w_{23}(t) & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

Під поглинаючим станом трибосистеми розуміється стан повного зносу трибологічного шару.

Компоненти $w_{ij}(t)$, згідно [31, 273] визначаються:

$$w_{ij}(t) \cong \lambda_I(t) \Delta t, \quad (2.12)$$

де інтенсивність потоку зношування $\lambda_I(t) = V_I(t) / \delta z$; Δt – проміжок часу, що визначає тривалість однієї контактної взаємодії зуб'їв; $V_I(t)$ – швидкість зношування в момент часу t .

Значення величини зносу шару визначається через математичне очікування \bar{m}_t знаходження системи:

$$z_t = (\bar{m}_t - 1) \delta z, \quad (2.13)$$

де математичне очікування $\bar{m}_t = \sum_{i=1}^K i \pi_i(t)$, $i = 1, 2, \dots, K$; $\pi_i(t)$ – безумовні ймовірності станів системи.

Для того, щоб визначити параметри матриці перехідних ймовірностей системи необхідно знати швидкість зношування системи $V_I(t)$.

Швидкість зношування $V_I(t)$ – відношення абсолютного зносу деталі (або випробовуваного зразка) до часу, протягом якого відбувалося випробування. Розрізняють лінійну ($V_I(t)h$), об'ємну ($V_I(t)V$) та вагову ($V_I(t)m$) швидкості зношування:

$$V_I(t)_h = \frac{\Delta h}{\Delta t}, \quad V_I(t)_V = \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad V_I(t)_m = \frac{\Delta m}{\Delta t}. \quad (2.14)$$

Вимірювання зносу дослідних зразків проводилось методом штучних баз. Відбитки на поверхню сталі наносились за допомогою приладу ПМТ-3 (рис. 2.11).



Рис. 2.11. Відбитки піраміди при визначенні лінійного зносу контактних поверхонь.

Глибина відбитку піраміди при куті $\alpha = 136^\circ$ розраховується за формулою:

$$h = \frac{d}{7}. \quad (2.15)$$

Величина лінійного зносу контактної поверхні визначається як різниця глибин відбитка до початку зносу і після закінчення цього процесу:

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \frac{(d_1 - d_2)}{7}, \quad (2.16)$$

де Δh – лінійний знос; h_1 – глибина відбитка вихідної поверхні; h_2 – глибина відбитка після експерименту; d_1 – довжина діагоналі відбитка квадратної піраміди вихідної поверхні; d_2 – довжина діагоналі відбитка після експерименту.

Таким чином побудована феноменологічна ймовірнісна модель зношування зубчастої пари, представленої у вигляді випадкового процесу Маркова з дискретним часом і станами. Для визначення компонентів матриці перехідних ймовірностей в моделі використовуються експериментальні залежності інтенсивності зношування від комплексів основних факторів, що визначають перебіг процесів зношування.

2.4. Методика встановлення функціональних взаємозв'язків трибопроцесів для пар тертя з локальним контактом

Фрикційну взаємодію в більшості випадків неможливо з необхідною повнотою і точністю описувати виключно за допомогою моделей механіки, внаслідок складності і різноманіття фізико–хімічних процесів, які їх супроводжують.

Неповнота інформації про явища, що супроводжують триботехнічні процеси в контакті, і, як результат, недостатня точність при їх моделюванні і розрахунках, істотно ускладнюють проектування елементів конструкцій і вузлів, які працюють в умовах фрикційного контакту. Структурна пристосованість і зміна трибологічної системи в процесі експлуатації можуть істотно змінити вихідні параметри, які використовуються при прогнозуванні ресурсу вузла тертя.

Одним із способів вирішення цієї наукової проблеми є спільне використання експериментальних досліджень з подальшим встановленням аналітичних залежностей, які описують особливості трибоконтракту. При фізичному моделюванні трибологічних процесів важливо використовувати методику випробувань, яка може оцінити роботу трибосистеми в реальних умовах експлуатації, виявити

закономірності впливу складу, будови, стану структурних компонентів на характер контактної взаємодії і триботехнічні властивості контактних поверхонь, встановити кінетику зношування при нелінійній залежності швидкості зносу від контактних параметрів. Математичне моделювання трибологічних процесів включає отримання критеріїв подібності і застосування критеріальних залежностей для прогнозування трибологічних характеристик вузла тертя при експлуатації [38, 90].

При експериментально-теоретичному підході щодо опису фрикційної взаємодії тіл в конкретних умовах експлуатації важливо не тільки встановити кількісні взаємозв'язки між досліджуваними величинами, але й побудувати узагальнені залежності. Дані залежності не тільки підтверджують встановлені кількісні експериментальні взаємозв'язки, але й дозволяють прогнозувати поведінку трибокострукцій при зміні режимів їх роботи [78, 186].

На даний момент сформувалися два підходи до вирішення завдань моделювання і ідентифікації складних систем: змістовне моделювання (*hard modeling*) і формалізоване моделювання (*soft modeling*) [363].

В першому випадку на основі відомих базових уявлень про закономірності процесів будується система диференціальних рівнянь, рішення якої дозволяє досліджувати особливості поведінки досліджуваного об'єкта. Другий підхід використовується тоді, коли ідентифікація фізико-хімічних процесів в досліджуваному об'єкті занадто складна або неможлива. При цьому найбільш ефективним на даний момент підходом є підхід, який базується на побудові функціональних наближень процесів тертя та зношування елементів трибоспряження за допомогою трибологічних інваріантів [84].

На даний момент виділяють три основні групи трибологічних інваріантів: 1 – описують механічну взаємодію тіл; 2 – враховують фізико-хімічні процеси в контакті; 3 – представляють теплові фактори, що виникають при терті і зношуванні.

Для аналізу механічної взаємодії тіл, в літературі прийнято такі інваріанти:

Φ_a – комплекс, що характеризує напружений стан тіл в зоні контакту ($\Phi_a = \frac{P}{HB}$ або $\Phi_a = \frac{f \cdot P}{HB}$, де P – нормальне контактне навантаження, f – коефіцієнт тертя, HB – твердість матеріалу);

Φ_{3M} – комплекс, який визначає відносну товщину мастильного шару (h – товщина мастильного шару, $\Phi_{3M} = \lambda = \frac{h}{\sqrt{(R_{a1}^2 + R_{a2}^2)}}$, де R_{a1}^2 , R_{a2}^2 – середньоквадратичні відхилення шорсткості);

$\Phi_y = \frac{\xi \cdot P}{\sigma_{-1}}$ інваріант, який використовується для характеристики втомної міцності поверхонь тертя (ξ – коефіцієнт, який залежить від коефіцієнту тертя f і напруженого стану в контакті, σ_{-1} – межа втомленості матеріалу в даних умовах роботи);

$\Phi_{ш}$ – інваріант, який характеризує шорсткість поверхні тертя, він має різний вигляд:

1. $\Phi_{ш} = \frac{r}{R_a}$, де r – середній радіус мікронерівності;

2. $\Phi_{ш} = \frac{S_{ш}}{R_a}$, де $S_{ш}$ – середній крок нерівностей;

3. $\Phi_{ш} = \frac{R_{\max}}{b^{1/\nu}}$, де R_{\max} – найбільша висота нерівностей профілю, $b^{1/\nu}$ – параметр опорної кривої.

При розгляді особливостей контактної взаємодії вираз, що описує напружений стан в зоні контакту істотно спрощено, оскільки необхідно також враховувати не тільки твердість безпосередньо на поверхні, але і її 3-D функціональний розподіл (градієнтність), яка може істотно змінюватися в результаті конструктивної, технологічної або експлуатаційної модифікації.

Для обліку просторової нелокальності твердості поверхні пропонується, відповідно до роботи [52], замість HB ввести усереднене значення, яке обчислюється за формулою:

$$\langle HB \rangle = \frac{1}{V^*} \int_{V^*} HB(x) dx, \quad (2.17)$$

де V^* – локальна ділянка зміни твердості приповерхневих шарів контактуючих поверхонь на деяку глибину, яка зазнає найбільшого впливу пружно-пластичних деформацій.

З урахуванням [61], приймемо що $V^* \approx (1.2 \dots 1.3) \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3$, де d – діаметр одиничної плями контакту.

При аналізі фізико-хімічного впливу середовища розглядаються наступні інваріанти:

$\Phi_{\text{кін}} = \frac{pV\tau_0}{HBd_\phi}$ – комплекс, що характеризує часовий чинник фізико-хімічних перетворень в області контакту (p – контактний тиск, V – відносна швидкість переміщення в області контакту, τ_0 – характерний тиск, d_ϕ – середній діаметр плями контакту);

$\Phi_{\text{гр.ад.}} = \frac{RT}{Q}$ – комплекс, який описує властивості граничної плівки адсорбційної природи (R – газова постійна, T – абсолютна температура в контакті, Q – теплота абсорбції змащувальних шарів).

При врахуванні впливу на інтенсивність зношування теплових факторів розглядаються наступні інваріанти:

$\Phi_{\text{к.т.}} = \frac{t}{t_{\text{кр}}}$ – комплекс, який враховує вплив контактної температури (t – температура в зоні контакту тіл, $t_{\text{кр}}$ – критична температура, яка характерна для заданих умов контакту тіл);

$\Phi_{\text{к.т.с.}} = \frac{q\delta_T}{\lambda t_{\text{кр}}}$ – комплекс, який характеризує вплив температурного градієнта і теплового потоку в граничному шарі (q – щільність теплового потоку, δ_T – товщина теплового шару, λ – коефіцієнт теплопровідності);

$\Phi_{\text{т.н.}} = \frac{E\alpha\Delta t}{(1-\nu)\sigma_{\text{кр}}}$ – комплекс, який визначає термонапружений стан поверхневих шарів (E – модуль пружності, α – температурний коефіцієнт лінійного розширення, Δt – приріст температури, ν – коефіцієнт Пуассона, $\sigma_{\text{кр}}$ – критичний рівень напружень);

$\Phi_{cx} = \rho c / K$ – комплекс, що характеризує здатність до схоплювання пар тертя, який виражається як відношення теплоємності матеріалу при нагріванні і температури контактного плавлення до пластичної постійної (ρ – густина, c – питома теплоємність, K – пластична постійна матеріалу); в деяких випадках його можна представити у вигляді $\Phi_{cx} = \frac{\rho c \Delta t}{\sigma_T}$, де Δt – приріст температури до контактного плавлення, σ_T – межа плинності матеріалу.

Розробка методики оцінки експлуатаційних характеристик трибосистем.

Математична обробка експериментальних даних залежності поведінки фрикційної системи від трибологічних інваріантів пропонується проводити за допомогою методів регресійного аналізу за наступним алгоритмом:

1. Вибір і побудова математичної моделі відгуку досліджуваної системи (лінійної і нелінійної).
2. Константне наповнення моделі за допомогою методу найменших квадратів.
3. Встановлення похибки математичної моделі і експериментальних даних.
4. Оцінка моделі за допомогою сукупності критеріїв якості.
5. Прогнозування поведінки досліджуваної системи за допомогою побудованої моделі.

Розглянемо вищенаведений алгоритм докладніше.

Вибір математичної моделі будемо проводити в загальному випадку в наступному вигляді [244]:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 f_1(x_1) + \dots + b_k f_k(x_k) + \dots + b_n f_n(x_i, x_j) + \dots + b_h f_h(x_1, \dots, x_k), \quad (2.18)$$

де b_0, \dots, b_h - шукані коефіцієнти математичної моделі, x_1, \dots, x_k - керовані чинники, f_1, \dots, f_h - відомі базисні функції від керованих параметрів.

Константне наповнення (пошук коефіцієнтів b_0, \dots, b_h) будемо проводити за допомогою модифікованого методу найменших квадратів, який зводиться до наступного виразу:

$$R = \sum_{i=1}^N (\hat{y}(x_1^i, \dots, x_k^i) - y_i)^2 \cdot \alpha_i(x_1^i, \dots, x_k^i) \rightarrow \min, \quad (2.19)$$

де $\alpha_i(x_1^i, \dots, x_k^i)$ – задані вагові функції, $\hat{y}(x_1^i, \dots, x_k^i)$ – значення які одержуються в результаті модельного наближення, y_i – значення, що отримуються в результаті експерименту.

У разі, якщо $\alpha_i(x_1^i, \dots, x_k^i)$ для $i=1 \dots N$ вираз (2.19) перетворюється в класичний метод найменших квадратів.

Функціонал (2.19) еквівалентний наступній системі:

$$\begin{cases} \frac{\partial R}{\partial b_0} = 0 \\ \dots \\ \frac{\partial R}{\partial b_h} = 0 \end{cases}, \quad (2.20)$$

яка є базовою для пошуку коефіцієнтів b_0, \dots, b_h .

Критеріями якості побудованої математичної моделі приймемо такі показники:

1. Середнє абсолютне відхилення (Mean Absolute Derivation, MAN):

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |\varepsilon_t|, \quad (2.21)$$

де ε_t – похибка (відхилення) між розрахунковими (модельними) і експериментальними даними в точці t , n – число експериментальних даних.

2. Середньоквадратична помилка (Mean Squared Error, MSE):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \varepsilon_t^2. \quad (2.22)$$

3. Сума квадратів помилки (Sum Squared Error, SSE):

$$SSE = \sum_{t=1}^n \varepsilon_t^2. \quad (2.23)$$

4. Середня абсолютна помилка у відсотках (Mean Absolute Percentage Error, MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|\varepsilon_t|}{Y_t}, \quad (2.24)$$

де Y_t – експериментальні дані в точці t .

5. Середня процентна помилка (Mean Percentage Error, MPE):

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{\varepsilon_t}{Y_t} \cdot 100. \quad (2.25)$$

6. Коефіцієнт детермінації:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2}, \quad (2.26)$$

де $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Y_t$. Чим ближче R^2 до 1, тим краще модель описує реальні дані. Модель вважається адекватною, якщо $R^2 > 0,75$.

7. Скоригований коефіцієнт детермінації (СКД):

$$СКД = 1 - \frac{n-1}{n-r-1} (1-R^2), \quad (2.27)$$

де r - розмірність моделі.

8. Стандартна помилка оцінки визначається за формулою:

$$s = \sqrt{\frac{SSE}{n-r-1}} = \sqrt{MSE}. \quad (2.28)$$

9. Величина корельованості факторів характеризується парним коефіцієнтом кореляції:

$$r_{ij}(x_i, x_j) = \frac{\sum_{t=1}^n (x_{it} - \bar{x}_i)(x_{jt} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (x_{it} - \bar{x}_i)^2 (x_{jt} - \bar{x}_j)^2}}, \quad (2.29)$$

де x_{it}, x_{jt} - значення i -го, j -го фактора в t -му досліді, $\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_{it}$, $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x_{jt}$.

10. Зв'язок між статистикою F і значенням R^2 описується співвідношенням:

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \left(\frac{n-r-1}{r} \right). \quad (2.30)$$

При рівні значущості α гіпотеза про значення коефіцієнтів b_0, \dots, b_h приймається, якщо $F > F_\alpha$.

Для прийняття рішення на основі всієї сукупності критеріїв пропонується наступний узагальнений адитивний функціонал:

$$G_0 = \sum_{i=1}^q G_i \cdot \beta_i, \quad (2.31)$$

де $G = 1$ - якщо значення задовольняють i -му критерію, $G = 0$ - в іншому випадку; β_i - вагові значення функції G_i , q - кількість критеріїв.

Якщо $G_0 < G_0^{kp}$, то запропоноване модельне наближення неадекватно описує дані, якщо $G_0 \geq G_0^{kp}$, то ми маємо адекватне модельне наближення. В останньому випадку, ми можемо використовувати функцію виду (2.18) для інтерполяції та екстраполяції даних (рис.2.12).

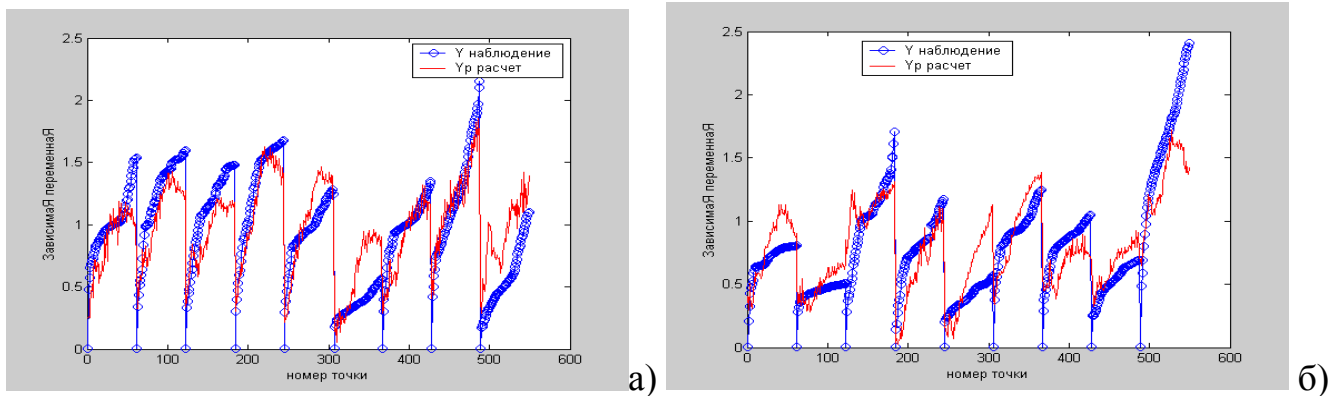


Рис. 2.12. Знос випереджаючої (а) і відстаючої (б) поверхонь в умовах кочення з проковзуванням в режимі пуск - зупинка.

Таким чином, використання запропонованої методики обробки емпіричних даних дозволить виділити найбільш значущі фактори, що впливають на змащувальні, реологічні, антифрикційні та протизношувальні властивості трибоконтракта. Побудова математичних залежностей на підставі цих даних дозволить прогнозувати кінетику зміни триботехнічних властивостей контакту на стадії проектування вузлів тертя.

2.5. Методика прогнозування триботехнічних характеристик пари тертя верхнє компресійне кільце - гільза циліндра ДВЗ залежно від робочого процесу

Створення високонадійних механізмів та машин можливо тільки за рахунок високого ступеня відповідності низки показників стану триботехнічного вузла вимогам, які забезпечують його нормальну експлуатацію. Сучасні тенденції в двигунобудуванні характеризуються подальшим збільшенням потужності двигунів внутрішнього згорання. Це, у свою чергу, супроводжується збільшенням газових і теплових навантажень як на деталі циліндропоршневої групи, так і на двигун в

цілому. При цьому забезпечення необхідної надійності (безвідмовності і довговічності) двигунів багато в чому залежить від того, наскільки ефективні заходи щодо вибору мастильного матеріалу, який проявляє високі змащувальні властивості в широкому діапазоні зміни навантажувальних, температурних та швидкісних чинників.

Якісна організація змащувального процесу і правильний їх підбір зменшують знос деталей машин і механізмів. Найбільш важливою практичною стороною еластогідродинамічної задачі для лінійного контакту являється визначення центральної товщини змащувального шару всередині контакту, так як підтримання необхідної товщини плівки має вагоме значення для роботоздатності деталей трибомеханічних систем.

Розроблена методика розрахунку товщини мастильного шару в трибоспряженні верхнє компресійне кільце – гільза циліндра двигуна внутрішнього згоряння представляє собою систему алгебраїчних рівнянь, які описують кінетику зміни основних показників контакту залежно від робочого циклу в двигуні внутрішнього згоряння. Запропонована методика розрахунку адаптується до конкретного типу двигуна, на якому перевіряється її адекватність за ефективними показниками або за показниками, що характеризують робочий процес, і можуть бути визначені експериментально. Створена методика базується на основі розробок [170, 172, 221, 258, 260, 261, 262, 263].

Застосування мастильних матеріалів різноманітного типу – один зі шляхів реалізації зовнішнього тертя, без якого неможлива робота трибоспряжень. Стан мастильного матеріалу дає інформацію не тільки про його роботоздатність, але й відображує процеси, що відбуваються в трибосистемі в цілому. На сучасному етапі розвитку трибології щодо ефективності мащення елементів трибоспряження двигуна внутрішнього згоряння відсутня єдина точка зору щодо характеру змащувальної дії, що, імовірно, пов'язано з відсутністю загальної теорії змащування, яка б характеризувала усі існуючі режими мащення – від граничного до гідродинамічного, з урахуванням багаточисельних перехідних зон, структури змащувального шару, його реологічних характеристик. Всі перераховані чинники істотно впливають на

антифрикційні та протизношувальні властивості пар тертя ковзання двигуна внутрішнього згоряння [3, 77, 192].

Найбільш важливою практичною стороною еластогідродинамічної задачі для лінійного контакту являється визначення центральної товщини змащувального шару всередині контакту, так як підтримання необхідної товщини плівки має вагоме значення для роботоздатності деталей трибомеханічних систем. Створена методика розрахунку трибологічних параметрів двигуна внутрішнього згоряння адаптується до конкретного типу двигуна, на якому перевіряється її адекватність за ефективними показниками або за показниками, що характеризують робочий процес, і можуть бути визначені експериментально [259].

Вихідними параметрами для розрахунку триботехнічних показників контакту ковзання є: параметри конструкції двигуна, параметри матеріалів кільце-циліндр; умови роботи (режими), фізико-хімічні властивості змащувальної рідини (в'язкість, індекс в'язкості, густина, температура спалаху, температура застигання, наявність поліфункціональних присадок та ін.).

2.5.1. Розрахунок товщини мастильного шару між першим компресійним кільцем та гільзою циліндра при робочому процесі двигуна внутрішнього згоряння.

Товщина мастильного шару між першим компресійним кільцем та гільзою циліндра залежно від кута повороту кривошипа визначається за наступною формулою:

$$h_i = 3,63 \cdot 10^6 \cdot U_i^{0,5} \cdot G_i^{0,5} \cdot W^{-0,073} \cdot Z \cdot R_{пр} , \quad (2.32)$$

де U_i – безрозмірний параметр швидкості; G_i – безрозмірний параметр матеріалу; W – безрозмірний параметр навантаження; Z – параметр мікрогеометрії контактних поверхонь; $R_{пр}$ – приведений радіус кривизни контактних поверхонь; i – кут повороту кривошипа.

Безрозмірний параметр швидкості залежно від i -го кута повороту кривошипа обчислюється за формулою:

$$U_i = \frac{\eta_i \cdot V_i}{E_{np} \cdot R_{np}}, \quad (2.33)$$

де η_i – динамічна в'язкість мастильного матеріалу в контактi залежно від i -го кута повороту кривошипа, [Па·с]; V_i – лінійна швидкість поршня, що відповідає i -му куту повороту кривошипа, [м/с]; E_{np} – приведений модуль пружності матеріалів гільзи циліндра та компресійного кільця, [Па]; R_{np} – приведений радіус кривизни пари гільза – кільце, [м].

Розрахунок динамічної в'язкості мастильного матеріалу залежно від умов роботи двигуна внутрішнього згорання при i -му куті повороту кривошипа проводять за формулою:

$$\eta_i = \eta_0 \cdot \exp\left(\frac{(P_{max} + 0,05 \cdot P_i)/10^6}{\alpha_i} - (T_i - 273)^{0,5}\right), \quad (2.34)$$

де η_0 – динамічна в'язкість мастильного матеріалу при 40°C, [Па·с]; P_{max} – максимальне контактне навантаження по Герцу в зоні компресійного кільця, [Па]; P_i – тиск газів в циліндрі залежно від i -го кута повороту кривошипа, [Па]; T_i – температура стінки циліндра залежно від i -го кута повороту кривошипа, [К]; α_i – п'єзокоефіцієнт в'язкості мастильного матеріалу, який залежить від i -го кута повороту кривошипа, [МПа].

Залежність п'єзокоефіцієнта в'язкості мастильного матеріалу в контактi, який залежить від i -го кута повороту кривошипа:

$$\alpha_i = 0,497 \cdot (19,7 + \nu_{150})^{0,15} \cdot V_i^{0,19} \cdot P'_{max}{}^{0,51}, \quad (2.35)$$

де ν_{150} – кінематична в'язкість мастильного матеріалу при 150°C, [мм²/с]; V_i – лінійна швидкість поршня, що відповідає i -му куту повороту кривошипа, [м/с]; P'_{max} – максимальне контактне навантаження по Герцу в зоні верхнього компресійного кільця розраховується за формулою:

$$P'_{max} = P_{max} \cdot 10^{-6}, \quad (2.36)$$

Приведений модуль пружності матеріалів гільзи циліндра та компресійного кільця обчислюється:

$$E_{\text{пр}} = \frac{2E_{\text{ц}} \cdot E_{\text{к}}}{E_{\text{ц}} + E_{\text{к}}}, \quad (2.37)$$

де $E_{\text{ц}}$ – приведений модуль пружності матеріалу гільзи циліндра – чавуну, [Па]; $E_{\text{к}}$ – приведений модуль пружності матеріалу компресійного кільця – сталі, [Па].

Приведений радіус кривизни пари гільза-кільце становить:

$$R_{\text{пр}} = \frac{R_{\text{ц}} \cdot R_{\text{к}}}{R_{\text{ц}} + R_{\text{к}}}, \quad (2.38)$$

де $R_{\text{ц}}$ – радіус гільзи циліндра, [м]; $R_{\text{к}}$ – радіус компресійного кільця, [м].

Безрозмірний параметр матеріалу G_i залежно від i -го кута повороту кривошипа визначається за формулою:

$$G_i = \frac{E_{\text{пр}} \cdot 10^{-6}}{\alpha_i}, \quad (2.39)$$

Безрозмірний параметр навантаження становить:

$$W = \left(\frac{P_{\text{max}}}{0,418} \right)^2 \cdot \frac{R_{\text{пр}}}{E_{\text{пр}}}, \quad (2.40)$$

В формулі (2.32) параметр мікрогеометрії контактних поверхонь Z обчислюється наступним чином:

$$Z = 1 - \exp^{-0,68k}, \quad (2.41)$$

$$k = 1,03 \left(\frac{R_{\text{ц}}}{R_{\text{к}}} \right)^{0,64}. \quad (2.42)$$

2.5.2. Вплив параметрів робочого процесу двигуна внутрішнього згорання на інтенсивність зношування гільзи циліндра.

Знос гільзи циліндра є однією з причин передчасної відмови двигуна внутрішнього згорання. Прогнозування інтенсивності зношування деталей ДВЗ в залежності від конструктивних та робочих параметрів з використанням розрахунково-аналітичних методів має велике практичне значення. Відомо, що інтенсивність зношування трибоспряжень залежить від теплових процесів, напруженого стану в зоні контакту та тривалості роботи. Окрім цього, на

інтенсивність зношування гільз циліндра впливає якість палива та мастильного матеріалу, фізико-механічні властивості матеріалу та режим технічної експлуатації.

Інтенсивність зношування гільзи циліндра залежно від робочого процесу ДВЗ розраховується за залежністю:

$$I_i = Q_{Ti} \cdot Pe_i \cdot T_{об} , \quad (2.43)$$

де Q_{Ti} – безрозмірний критерій, який характеризує температурні умови на поверхні тертя (контакт: верхнє компресійне кільце – гільза циліндра);

Pe_i – число Пекле, що характеризує відношення осьового та поперечного теплових потоків в зоні контакту пари тертя;

$T_{об}$ – критерій, який характеризує нагрів контактних поверхонь при згорянні палива в циліндрі.

Критерій Q_{Ti} обчислюється за формулою:

$$Q_{Ti} = \frac{(T_i - 273)^{0,5} \cdot f_i \cdot (P_i \cdot 10^{-6}) \cdot H_k}{\lambda_{ц} + \lambda_k} , \quad (2.44)$$

де T_i – температура стінки циліндру залежно від i -го кута повороту кривошипа, [K]; f_i – коефіцієнт тертя між верхнім компресійним кільцем та гільзою циліндра залежно від i -го кута повороту кривошипа; P_i – тиск газів в циліндрі залежно від i -го кута повороту кривошипа, [Па]; H_k – висота верхнього компресійного кільця, [м]; $\lambda_{ц}$ – коефіцієнт теплопровідності гільзи циліндра, [Вт/м·°C]; λ_k – коефіцієнт теплопровідності верхнього компресійного кільця, [Вт/м·°C]; i – кут повороту кривошипа, [градус].

Число Пекле становить:

$$Pe_i = \frac{V_i^{0,1} H_k}{\alpha_{ц}} , \quad (2.45)$$

де V_i – лінійна швидкість поршня, що відповідає i -му куту повороту кривошипа, [м/с]; H_k – висота верхнього компресійного кільця, [м]; $\alpha_{ц}$ – температуропровідність стінки циліндра, [м²/с].

Критерій $T_{об}$ розраховується за формулою:

$$T_{об} = \frac{V_{p.t.}}{H_k \cdot S} , \quad (2.46)$$

де $V_{P.T.}$ – об’єм робочого тіла в циліндрі, [м³]; H_k – висота верхнього компресійного кільця, [м]; S – площа тепловідводу поверхні, [м²].

Об’єм робочого тіла в циліндрі визначається:

$$V_{P.T.} = \frac{\pi \cdot D_{ц}^2 \cdot L}{4}, \quad (2.47)$$

де $D_{ц}$ – діаметр гільзи циліндра, [м]; L – хід поршня, [м].

Площа тепловідводу поверхні:

$$S = 2\pi \cdot \frac{D_{ц}}{2} \cdot L, \quad (2.48)$$

Згідно приведеному алгоритму розрахунку товщини мастильного шару та інтенсивності зношування, одержані числові характеристики контакту будуть мати закономірність, наведену на рис.2.13.

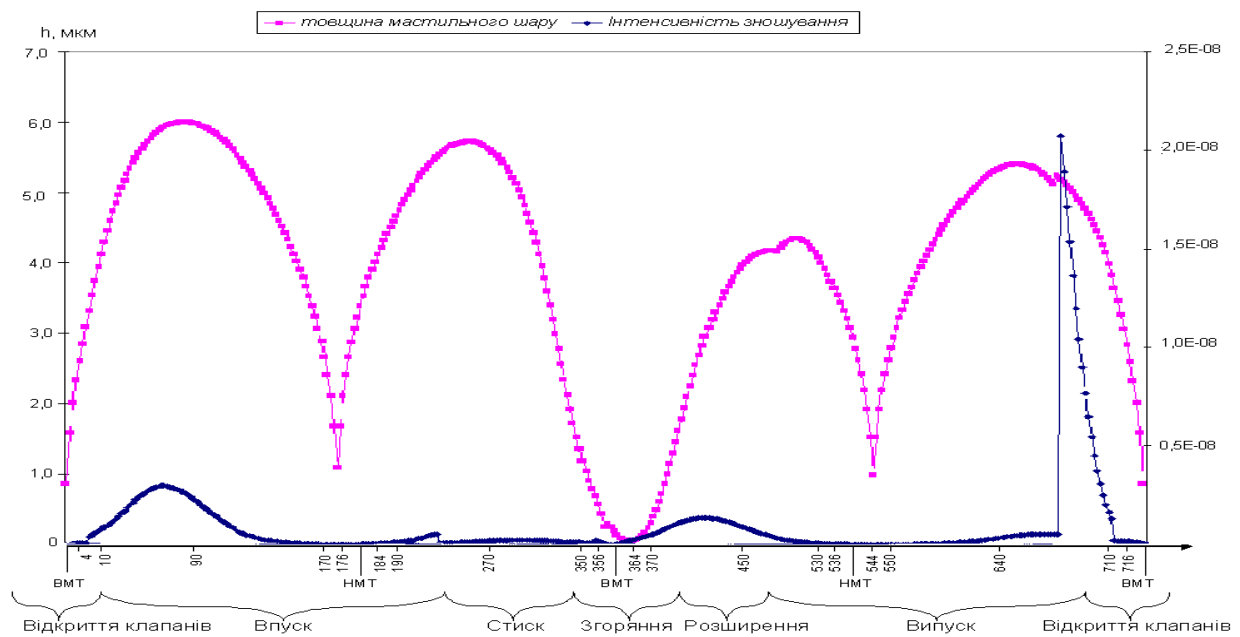


Рис. 2.13. Зміна товщини мастильного шару в трибоспряженні верхнє компресійне кільце – гільза циліндра та динаміка зношування гільзи залежно від кута повороту кривошипа.

Таким чином, створена методика розрахунку основних трибологічних характеристик пар ковзання двигуна внутрішнього згоряння дозволяє спрогнозувати ефективність мащення та ступінь зношування контактних поверхонь залежно від робочого процесу.

Висновки до розділу 2.

1. Для отримання достовірних результатів досліджень елементів трибоспряжень, відтворюваності та збіжності результатів експериментів створена комплексна методика моделювання трибологічних процесів на основі емпіричних залежностей та спеціального програмного забезпечення, що дозволяє розробляти адекватні заходи в управлінні процесами, які протікають в фрикційному контакті трибосистеми.

2. Для оцінки триботехнічних характеристик контакту створено програмно-апаратний комплекс, до складу якого входить установка тертя, електронний блок, програмне забезпечення «Тертя», встановлене на ПК типу IBM PC, що дозволяє проведення випробувань в умовах кочення, ковзання, реверсу, розширення діапазону коефіцієнту проковзування (від 0 до 100%) між контактуючими тілами тертя. В створеній програмі є окремий канал візуальної оцінки кінетики зміни основних триботехнічних показників контакту в режимі on-line.

3. Розроблена методика визначення питомої роботи тертя в контакті при нестационарних умовах навантаження шляхом інтегрування площі, обмеженої кривою моменту тертя, та вибору довільного діапазону інтегрування по осі абсцис за координатою часу напрацювання елементів трибоспряження, по якій визначається кут повороту контактних поверхонь за зафіксованою їх частотою обертання в певний обраний час наробітки, з урахуванням кінетичної енергії обертальних деталей.

4. Розроблена методика оцінки температурно-механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу в критичних режимах тертя при контактних напруженнях, що призводять до пружно-пластичної деформації контактних поверхонь і швидкостях ковзання, що обумовлюють появу високих градієнтів швидкості зсуву змащувальних шарів.

5. Розроблена методика оцінки величини енергії активації руйнування поверхневих та приповерхневих шарів контактних поверхонь при несталій роботі пар тертя на підставі отриманих експериментальних даних щодо зміни тривалості

напрацювання до прояву перших ознак захоплення елементів трибоспряжень та критичної температури в зоні контакту.

6. Побудована феноменологічна імовірнісна модель зношування поверхневого шару в несталих режимах, яка ґрунтується на прояві випадкового процесу Маркова з дискретним часом і станами. Для визначення компонентів матриці перехідних ймовірностей в моделі використовуються експериментальні залежності інтенсивності зношування від комплексів основних факторів, що визначають перебіг процесів зношування.

7. Проаналізовано сучасний стан опису фрикційної взаємодії контактних поверхонь з урахуванням локальних контактних навантажень. Проведено вибір трибологічних інваріантів, які характеризують особливості фізико-механічних процесів, що проявляються в умовах тертя. Запропоновано методика, що дозволяє проводити експериментальну обробку емпіричних даних, а також функціонал, який за сукупністю заданих критеріїв оцінює адекватність побудованої математичної моделі.

8. Розроблена методика розрахунку товщини мастильного шару в трибоспряженні верхнє компресійне кільце – гільза циліндра двигуна внутрішнього згоряння, яка представляє собою систему алгебраїчних рівнянь, що описують кінетику зміни основних показників контакту залежно від робочого циклу. Вперше запропонований розрахунок кінетики зміни динамічної в'язкості і п'єзоефіцієнта в'язкості мастильного матеріалу в контакті залежно від i -го кута повороту кривошипа. Запропонована методика адаптується до конкретного типу двигуна, на якому перевіряється її адекватність за ефективними показниками або показниками, що характеризують робочий процес і можуть бути визначені експериментально. Методика дозволяє спрогнозувати ефективність мащення та ступінь зношування контактних поверхонь залежно від робочого процесу.

РОЗДІЛ 3

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ЗМАЩУВАЛЬНИХ, РЕОЛОГІЧНИХ ТА АНТИФРИКЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ.

3.1. Оцінка ефективності припрацювання пар тертя в нестаціонарних умовах роботи.

Довговічність і навантажувальна здатність трибомеханічних систем сучасних механізмів та машин може бути значно підвищена шляхом їх попереднього припрацювання, в результаті якого змінюються шорсткість, фактична площа контакту і, відповідно, величина діючих напружень. Однак припрацювання полягає не тільки у формуванні специфічного шару поверхонь тертя [135], зміні його фізико-хімічних властивостей, що проявляється у зміні перерахованих вище показників, але і в не менш важливому процесі формування самого мастильного шару, що розділяє поверхні тертя [308, 353].

Існує багато класичних сучасних методик припрацювання контактних поверхонь.

Відомий спосіб припрацювання кінематичних пар тертя ковзання [1], згідно з яким припрацювання кінематичних пар відбувається в середовищі мінеральної оливи з присадками поверхнево-активних речовин в режимі пуск-зупинка за два періоди, один з яких реалізується при навантаженні 15–20% від заданого протягом 1–2 хвилин, другий – при заданому навантаженні протягом 2–3 хвилин. Однак, недоліками даного способу є: фіксована тривалість періодів припрацювання, незалежно від типу матеріалу контактних поверхонь; відсутність реєстрації триботехнічних параметрів, за кінетикою зміни яких можливо прогнозувати умови досягнення експлуатаційних характеристик контактних поверхонь в період припрацювання.

В роботі [235] розглянуто методика припрацювання поверхонь тертя під навантаженням. Згідно з даною методикою, дослідні зразки, які працюють в умовах ковзання та кочення з проковзуванням (до 15%), поступово навантажують протягом рівних проміжків циклів навантаження тривалістю 15 хвилин, а закінчення періоду

припрацювання на кожній ланці навантаження безперервно та автоматично фіксують за стабілізацією моменту тертя, температур поверхонь тертя та сумарного зносу дослідних зразків, температури мастильного матеріалу.

Кінцевий термін припрацювання зазвичай закінчується стабілізацією значень коефіцієнта тертя і зносу. Необхідно відзначити, що тільки змащувальна дія визначає сприятливий перебіг припрацювання [79]. Причому процес припрацювання буде протікати успішно в тому випадку, коли він закінчиться утворенням несучого мастильного шару певної товщини і структури, оптимальної мікрогеометрії контакту, які забезпечать задовільну зносостійкість припрацьованих поверхонь тертя, а, отже, і їх довговічність. У ході припрацювання слід підтримувати необхідний режим мастильної дії за допомогою контролю товщини мастильного шару, яка виключала б можливість виникнення схоплювання (заїдання).

Роль процесу утворення мастильного шару, як основного еластогідродинамічного і граничного аспекту, враховується мало і, безумовно, представляє безперечний інтерес для підвищення надійності та навантажувальної здатності сучасних машин [108, 364].

Метою роботи є підвищення достовірності результатів визначення кінцевого терміну припрацювання елементів трибоспряження за кінетикою зміни триботехнічних показників контакту.

3.1.1. Оцінки кінцевого терміну припрацювання контактних поверхонь за кінетикою зміни триботехнічних показників контакту.

Запропонована методика припрацювання реалізується за рахунок того, що на ПК в режимі реального часу роботи трибоелементів, навантажених заздалегідь обраним зусиллям, в умовах частих пусків–зупинок, тривалість яких визначається керуючим блоком, через визначені короткі рівні проміжки часу одночасно фіксуються момент тертя в контакті, частота обертання контактних поверхонь, питома робота тертя, температура мастильного матеріалу, товщина мастильного шару, а кінцевий час припрацювання визначається за умов досягнення сталих значень всіх показників, які реєструються, при максимальному моменті тертя в період пуску

та стабілізації товщини граничних шарів мастильного матеріалу, утворених на активованих в процесі тертя контактних поверхнях, на зупинці [218].

Припрацювання пар тертя в нестационарних умовах роботи реалізується наступним чином. Матеріал дослідних зразків, швидкість обертання контактних поверхонь та умови їх відносного переміщення (ковзання, реверс, кочення з проковзуванням (від 0 до 100%)), контактного навантаження, тип та температура мастильного матеріалу вибираються відповідно до експлуатаційних умов. Пару тертя навантажують заздалегідь обраним зусиллям, змащують досліджуванним мастильним матеріалом, задають відносне переміщення елементів трибоспряження шляхом програмування керуючим блоком частоти обертання кожного дослідного зразка, здійснюють тертя в режимі частих пусків–зупинок. Через 0,01с від початку роботи, безперервно, на кожному циклі пуск–зупинка, реєструють момент тертя тензометричним методом, частоту обертання кожної контактної поверхні цифровим блоком, температуру мастильного матеріалу за допомогою термопари та товщину мастильного шару методом вимірювання падіння напруги в режимі нормального тліючого розряду. За показниками вимірювання будують залежності моменту тертя (рис.3.1а), який різко зростає до максимуму в пусковий період з подальшим зниженням, коливанням та стабілізацією в кожному циклі напрацювання, частоти обертання контактних поверхонь (рис.3.1б), температури мастильного матеріалу та загальної товщини мастильного шару в період пуску і товщини граничних шарів мастильного матеріалу на зупинці (рис.3.1в). Розрахунок питомої роботи тертя проводять шляхом інтегрування площі, обмеженої кривою моменту тертя, та відповідного часу напрацювання при пуску, якому відповідає певна частота обертання контактних поверхонь, з урахуванням кінетичної енергії обертальних деталей (рис.3.1г). Період закінчення припрацювання визначається по одночасній стабілізації протягом 5–10 циклів наробітки максимального моменту тертя, питомої роботи тертя, температури мастильного матеріалу та загальної товщини мастильного шару ($h_{\text{заг}}$), що відповідає часу t_1 в пусковий період кожного циклу, та стабілізації товщини граничних шарів ($h_{\text{адс}}$) мастильного матеріалу, що відповідає часу t_2 в середній термін зупинки в кожному циклі (рис.3.1).

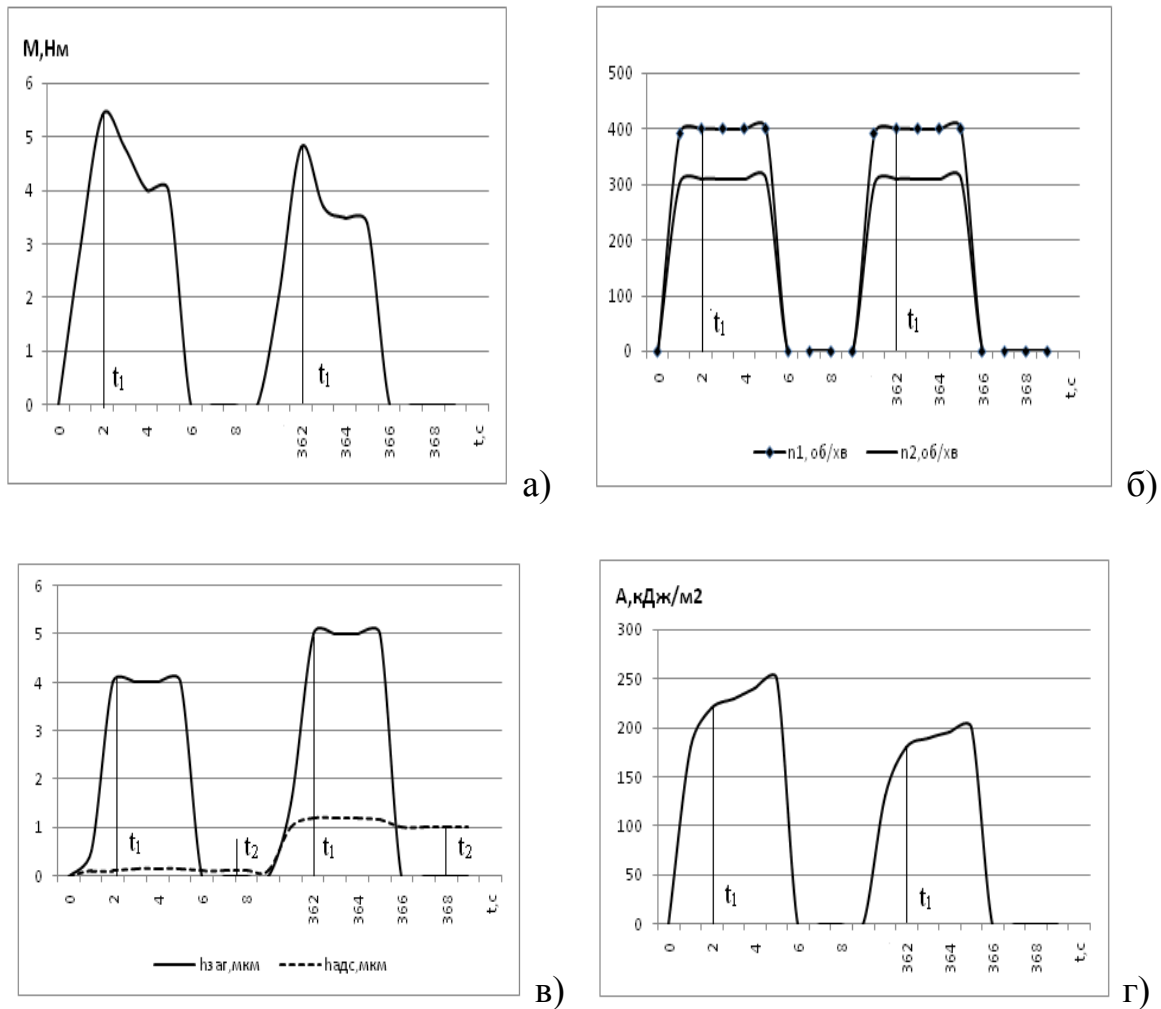


Рис. 3.1. Залежність моменту тертя (а), частоти обертання дослідних зразків в умовах їх роботи кочення з проковзуванням (б), загальної товщини мастильного шару і товщини граничних шарів мастильного матеріалу (в), питомої роботи тертя (г) від часу роботи трибосистеми.

Для оцінки ефективності припрацювання елементів трибоспряджень залежно від типу матеріалу пар тертя та мастильних матеріалів різного експлуатаційного призначення були обрані наступні умови: матеріал пар тертя – сталь 45 (HRC 38); мастильні матеріали – моторна мінеральна олива без присадок MC-20 (SAE – 50), дистилатна олива з малосірчаної нафти селективного очищення I-40 (ISO VG 68) та синтетична поліальфаолефінова олива PAO-8 (ISO VG 68); об'ємна температура олів 16⁰C та 70⁰C; контактне навантаження – $\sigma_{\text{max}}=400$ та 570 МПа; тривалість циклу – пуск – 4с, зупинка – 3,5с.

3.1.2. Оцінка ефективності мащення мінеральних та синтетичних олив залежно від температури та контактного навантаження.

З підвищенням контактної напруги до 570 МПа, при об'ємній температурі олив 16⁰С досліджувані оливи характеризуються зменшенням основних параметрів ефективності змащувального процесу. Для мінеральних олив встановлено переважання змішаного режиму мащення з домінуючим впливом граничного, а для синтетичної оливи РАО–8 характерний граничний режим мащення.

В умовах багатоциклічних дій на 20% зростає частота руйнування адсорбційних шарів для МС–20, в порівнянні із ступенем їх руйнування при $\sigma_{\max} = 400$ МПа, проте, скорочується час адаптації – при $N \geq 400$ формується стабільний граничний шар, що забезпечує ефективне мащення з переважанням гідродинамічного режиму (табл.3.1, 3.2). Реалізація цього механізму забезпечується за рахунок збільшення товщини адсорбційних шарів на 50% і утворення хемосорбційних плівок ($h_{\text{соп}} = 0,057 - 0,354$ мкм).

Менш в'язка мінеральна олива І–40 по мірі напрацювання $N \geq 440$ також формує стабільні адсорбційні шари, а на 70% площі контакту утворюються самогенеруючі органічні плівки (СОП) або полімери тертя, товщина яких складає 0,014 – 0,048 мкм.

З підвищенням навантаження для оливи РАО–8 спостерігається руйнування змащувальних адсорбційних шарів в 60% циклів, адаптація граничного шару відбувається лише у міру напрацювання $N \geq 530$, а товщина СОП, в порівнянні з хемосорбційними шарами, сформованими оливою при $\sigma_{\max} = 400$ МПа, зменшується на 70% ($h_{\text{соп}} = 0,014 - 0,051$ мкм).

При збільшенні об'ємної температури олив до 70⁰С встановлено зменшення приросту товщини змащувального шару в період пуску для олив МС–20, І–40 і РАО–8 відповідно на 40% : 20% : 20%. Для мінеральної оливи МС-20 адаптація адсорбційного шару відбувається значно раніше, ніж при 16⁰С, у міру напрацювання

Триботехнічні характеристик оливи МС-20 ($\sigma=570$ МПа, $t=16^{\circ}\text{C}$).

N	$h_{\text{адс}}, \text{МКМ}$	$h_{\text{max}}, \text{МКМ}$	$\eta_{\text{еф}} \cdot 10^2, \text{Па с}$	$\gamma \cdot 10^4, \text{с}^{-1}$	$\tau, \text{МПа}$	λ
4	0,002	2,002	19,822	1,998	39,605	1,820
50	0,001	2,001	17,364	1,999	34,710	1,819
80	0,113	2,113	15,750	1,893	29,815	2,150
112	0,001	2,001	13,134	1,999	26,255	1,819
117	0,243	2,243	14,725	1,783	26,255	2,551
160	0,150	2,150	14,116	1,860	26,255	2,269
195	0,114	2,114	13,877	1,892	26,255	2,151
275	0,000	2,000	11,570	2,000	23,140	1,818
400	0,014	2,014	9,635	1,986	19,135	1,860
442	0,263	2,263	10,823	1,768	19,135	2,299
487	1,432	3,432	16,411	1,166	19,135	6,058
565	0,412	2,412	11,541	1,658	19,135	4,763
640	0,971	2,971	14,216	1,346	19,135	3,031

Таблиця 3.2

Параметри змащувального процесу при для МС-20 ($\sigma=570$ МПа, $t=70^{\circ}\text{C}$)

N	$h_{\text{адс}}, \text{МКМ}$	$h_{\text{max}}, \text{МКМ}$	$\eta_{\text{еф}} \cdot 10^2, \text{Па с}$	$\gamma \cdot 10^4, \text{с}^{-1}$	$\tau, \text{МПа}$	λ
4	0,171	0,871	9,012	4,592	41,385	1,500
50	0,000	0,900	9,313	4,444	41,385	1,510
80	0,002	0,902	8,916	4,442	39,605	1,509
112	0,043	0,943	8,183	4,242	34,710	1,621
117	0,094	0,994	8,626	4,024	34,710	1,789
160	0,041	0,941	6,176	4,251	26,255	1,638
195	0,001	0,901	5,613	4,440	24,920	1,510
275	0,570	1,470	8,504	2,721	23,140	3,239
400	0,282	1,182	6,049	3,384	20,470	2,030
442	0,713	1,613	8,613	2,480	21,360	3,738
487	0,041	0,941	4,816	4,250	20,470	1,638
565	0,480	1,380	9,057	2,899	26,255	2,960
640	0,332	1,232	6,304	3,247	20,470	2,522

$N \leq 250$, а товщина хемосорбційних шарів зменшується на 20% ($h_{\text{соп}} = 0,061 - 0,175$ мкм) (табл. 3.2).

Якісно інший процес змащувальної дії встановлений для оливи І-40. В несталому режимі роботи з підвищенням температури руйнування адсорбційних шарів збільшується в 2 рази, у міру напрацювання не зафіксовано адаптації граничних шарів. Слід зазначити, що товщина СОП збільшується на 40% ($h_{\text{соп}} = 0,032 - 0,060$ мкм), але формування даного виду плівок відбувається лише на 20% площі контакту.

Аналогічна змащувальна дія встановлена і для синтетичної оливи РАО-8 – в початковий період припрацювання при граничному режимі мащення не відбувається адаптації адсорбційних шарів, в подальшому товщина хемосорбційних плівок збільшується на 0,022 мкм, але формування СОП зафіксовано на 60% площі поверхні контакту пар тертя.

В таблиці 3.3 представлені остаточні терміни стабілізації антифрикційних та змащувальних властивостей контакту при припрацюванні елементів трибоспряження в середовищі мінеральних олів МС-20 та І-40 і синтетичної оливи РАО-8.

Таблиця 3.3

Час стабілізації триботехнічних характеристик контакту при припрацюванні

Контактна напруга, МПа	Об'ємна температура оливи, °С	Мастильний матеріал		
		МС-20	І-40	РАО-8
400	16	470 циклів/59хв	500 циклів/63хв	350 циклів/44хв
	70	350 циклів/44хв	550 циклів/69хв	250 циклів/31хв
500	16	400 циклів/50хв	440 циклів/55хв	530 циклів/66хв
	70	250 циклів/31хв	–	–

Для більш в'язкої оливи МС-20 підвищення контактного навантаження, незалежно від температури оливи, скорочує термін припрацювання контактних поверхонь, в середньому, в 1,2 рази. Для менш в'язкої оливи І-40 аналогічне прискорення припрацювання встановлене лише при її об'ємній температурі 16°С. Однак, для синтетичної оливи РАО-8 зростання тиску призводить до протилежного

ефекту – термін припрацювання контактних поверхонь зростає в 1,5 рази при температурі оливи 70°C не відбувається стабілізації триботехнічних характеристик контакту в досліджуваному інтервалі часу.

3.1.3. Кінетика зміни реологічних та антифрикційних показників базових олів при припрацюванні.

Вплив контактного навантаження, сумарної швидкості кочення і температури оливи на формування і адаптацію адсорбційних шарів, які суттєво впливають на тривалість припрацювання, повною мірою відображає кінетика зміни реологічних та антифрикційних характеристик олів.

При контактній нарузі 570 МПа і об'ємній температурі олів 16°C реологічні характеристики досліджуваних мінеральних олів істотно відрізняються від синтетичної РАО–8. Якщо для МС–20 і І–40 збільшення ефективної в'язкості в контакті (η_{ef}) і напруги зсуву мастильного матеріалу (τ) складає, в середньому 68%, то РАО–8 характеризується збільшенням τ на 72%, а зміни η_{ef} в контакті не встановлено, в порівнянні із η_{ef} і τ при $\sigma_{\text{max}} = 400$ МПа.

Головним чинником, що впливає на реологічні властивості олів, є приріст товщини змащувального шару при пуску із збільшенням частоти обертання. Для МС–20 цей параметр із збільшенням σ_{max} до 570 МПа не змінюється, для І–40 зменшується на 20%, а для РАО–8 – на 60%. Внаслідок цього в 2,85 рази збільшується градієнт швидкості зсуву масляного шару (γ) синтетичної оливи, що призводить до часткової деструкції молекул. Радикали, які утворюються, є джерелом формування граничної плівки, проте, при циклічному навантаженні, в результаті частих мікропластичних зсувів і дії знакозмінних дотичних напружень, збільшується час адаптації адсорбційних шарів і значно знижується товщина сформованих СОП (на 70%). Проте, незважаючи на вищезгадані процеси, граничні адсорбційні шари обумовлюють зниження напруги зсуву масляного шару в 2 рази. У міру напрацювання $N \geq 400$, при адаптації граничного шару, зафіксовано значне підвищення антифрикційних властивостей - коефіцієнт тертя зменшується з 0,093 до 0,043 (рис. 3.2).

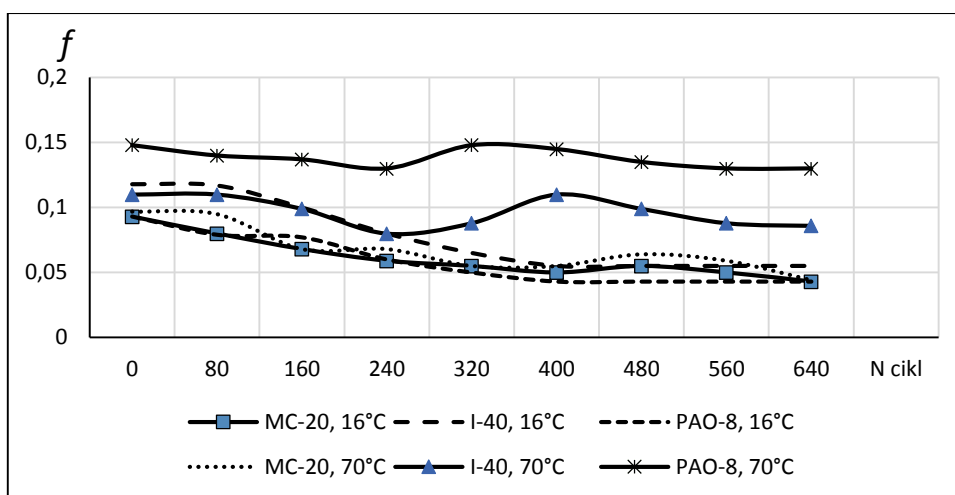


Рис. 3.2. Зміна коефіцієнта тертя при припрацюванні контактних поверхонь в нестационарному режимі при σ_{\max} 570 МПа.

Для мінеральних олів при багатоциклічному режимі навантаження, на наш погляд, реалізується інший механізм формування СОП. Інактивні вуглеводні парафінових, нафтових і ароматичних класів, потрапляючи в електричне поле поверхонь тертя, набувають певний дипольний момент, що прискорює модифікацію поверхонь металу внаслідок утворення на них смолоподібних продуктів органічного походження темно-коричневого кольору [305].

У роботі [299] встановлена інтенсифікація утворення СОП із збільшенням вмісту ароматичних з'єднань, а дослідженнями інших авторів [133] зафіксовано зростання товщини СОП з підвищенням молекулярної ваги парафінованого класу. MS-20 за фракційним складом, на відміну від I-40, містить парафінову фракцію з більшою молекулярною вагою вуглеводнів, на 10% збільшується вміст ароматичних з'єднань і на 4% смолоподібних компонентів [155]. При σ_{\max} 570 МПа, 16°C встановлено зростання товщини СОП мінеральними олівами на 70%, що пов'язано з більш інтенсивною активацією металу поверхонь тертя з підвищенням навантаження. Слід зазначити, що формування хемосорбційних плівок оливою I-40 відбувається на 70% поверхні тертя, що обумовлено як іншим вуглеводневим складом масляної фракції, так і меншою η_{ef} в контакті.

Тверді плівки, які характеризуються анізотропією механічних властивостей, проявляють низький опір до дії знакозмінних дотичних напружень – напруга зсуву

масляного шару у міру напрацювання знижується в 2 рази, забезпечуючи значне зниження коефіцієнта тертя (f). У міру адаптації граничних шарів встановлено зменшення f для МС–20 з 0,093 до 0,043, а для І–40 – з 0,118 до 0,055 (рис.3.2).

Основним критерієм ефективності антифрикційних властивостей при σ_{\max} 570МПа, 70⁰С є, на наш погляд, здатність оливи формувати хемосорбційні плівки на активованій поверхні металу. Так, для МС–20 зафіксовано прискорення адаптації граничних шарів (у міру напрацювання $N \geq 250$) і формування СОП на всій площі контакту, що забезпечує зменшення напруги зсуву масляного шару в 2 рази. Із збільшенням температури до 70⁰С товщина СОП зменшується на 20%, в порівнянні з $h_{\text{соп}}$ при 16⁰С, проте напруга зсуву масляного шару залишається стабільною.

Менш в'язкі оливи І–40 і РАО–8 в умовах динамічного навантаження не проявляють ефективною змащувальною дії при 70⁰С – впродовж всього експерименту не встановлено адаптації адсорбційних шарів: товщина СОП збільшується на 40%, але формування хемосорбційних плівок, стабільних до дії знакозмінних дотичних напружень, відбувається на 20% площі контакту для І–40 і на 60% поверхні для РАО–8.

У роботі [419] розглядається нестабільність мащення при граничному терті, пов'язана з руйнуванням плівки, обумовленим розплавленням її з підвищенням температури. Проте, критична температура дезорієнтації молекул олів граничних шарів І–40 і РАО–8 становить 140⁰С [133, 151]. Ми вважаємо, що руйнування хемосорбційних шарів відбувається в результаті інтенсивного стирання в режимі частих пусків-зупинок в результаті значного збільшення градієнта швидкості зсуву з підвищенням температури (γ підвищується в 2,5 рази для І–40 і в 4 рази для РАО–8), що призводить до дезорієнтації і десорбції молекул.

Встановлені високі експериментальні значення напруги зсуву масляного шару для олів І–40 і РАО–8 обумовлені, імовірно, деформацією змащувальної плівки в результаті заклинювання між контактуючими поверхнями тертя при проковзуванні. Аналогічні результати про деформацію граничного шару представлені в роботі [337].

Таким чином, при десорбції граничного шару руйнуються хемосорбційні шари, внаслідок чого не забезпечується ефективною змащувальною дії оливами І–40 і РАО–8

в умовах динамічного навантаження при σ_{max} 570 МПа, $t = 70^{\circ}\text{C}$; домінує граничний режим мащення, що характеризується високими значеннями коефіцієнтів тертя впродовж всього експерименту, що унеможливило визначення кінцевого терміну припрацювання контактних поверхонь.

3.2. Вплив навантаження на триботехнічні показники контакту.

При розробці конструкційних і мастильних матеріалів, зносостійких покриттів одним з етапів визначення їх триботехнічних властивостей є проведення прискорених випробувань шляхом моделювання процесу тертя на лабораторних установках. Простота випробувального обладнання, експресність методів, порівняно невелика вартість випробувань роблять їх найбільш раціональними при визначенні якості нових розроблюваних виробів.

При моделюванні триботехнічних процесів необхідно дотримуватися певного співвідношення між умовами лабораторних випробувань і умовами, в яких протікають реальні процеси тертя і зношування при експлуатації деталей машин і конструкцій.

При цьому розробка раціональних циклів випробувань є однією з необхідних умов оптимізації і підбору пар тертя. Особливу увагу заслуговує вивчення несталих режимів роботи на триботехнічні характеристики вузла тертя [188].

В якості зразків використовувалися ролики із сталі 9ХС (HRC = 60), припрацьовані контактні поверхні до $Ra = 0,22$ мкм. Мастильний матеріал – трансмісійна мінеральна всесезонна олива ТЕп–15 (за міжнародною класифікацією API – GL–2).

Дослідження змащувальних властивостей оливи проходило в режимі пуск – зупинка за наступною схемою: розгін за умов чистого кочення контактних поверхонь (12,5с) – робота в умовах 20% проковзування (4с) – гальмування за умов чистого кочення контактних поверхонь (12,5с).

Контактне навантаження (σ_{max}) на 100, 200 та 300 циклах наробітки становило відповідно 100, 140 та 170 МПа.

3.2.1. Роль товщини мастильного шару в прояві антифрикційних властивостей олив за умов чистого кочення.

При дослідженні максимального моменту тертя при страгуванні контактних поверхонь в період пуску в умовах чистого кочення при сумарній швидкості кочення 1,3м/с встановлено, що підвищення контактної напруги з 100 до 140 МПа призводить до зростання даного параметру, в середньому в 1,46 разів, а при подальшому збільшенні контактної напруги до 170МПа максимальний момент тертя зменшується в 1,72 рази. Кінетика зміни цього параметру при напрацюванні протягом 100 та 200 циклів наробітки в нестационарному режимі мащення свідчить про його зменшення, в середньому, на 3 – 5% при 100 та 140 МПа, а при 170 МПа простежується протилежна закономірність – момент тертя зростає на 2 – 3% (рис.3.3).

Лінійне рівняння апроксимації кінетики зміни моменту тертя при страгуванні в умовах чистого кочення при досліджуваних контактних напругах становить:

$$M_{100} = -0,0033x + 2,4672 \text{ (достовірність апроксимації – } R^2 = 0,84\text{);}$$

$$M_{140} = -0,0014x + 3,6853 \text{ (достовірність апроксимації – } R^2 = 0,91\text{);}$$

$$M_{170} = 0,0014x + 2,0902 \text{ (достовірність апроксимації – } R^2 = 0,912\text{).}$$

Найкращі антифрикційні властивості оливи при 170 МПа обумовлені її здатністю формувати найбільшу товщину мастильного шару ($h_{\text{заг}}$) в контакті, яка становить, в середньому, 6,15мкм, що на 11% перевищує аналогічні значення даного параметру при менших контактних навантаженнях (рис. 3.4).

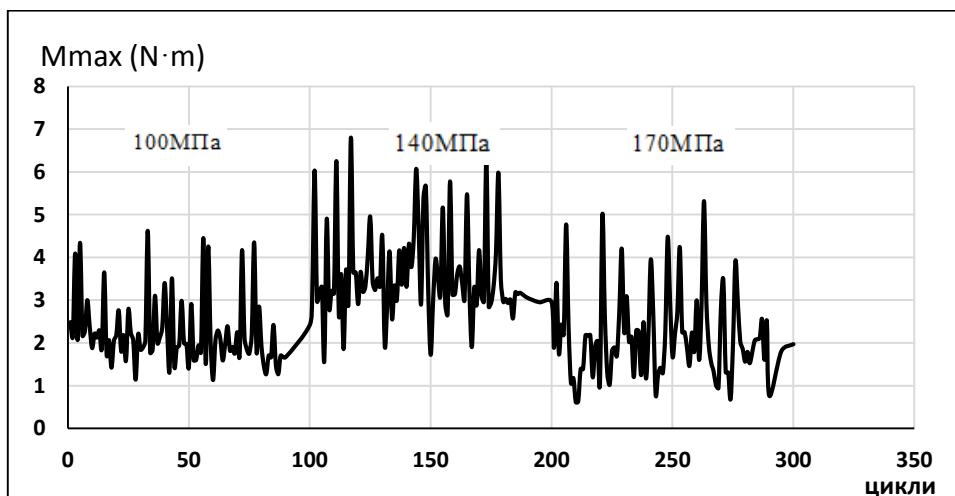


Рис.3.3. Кінетика зміни моменту тертя при чистому коченні за умов поступового збільшення контактного навантаження.

Слід зазначити, що змащувальна здатність оливи ТЕп–15 характеризується високою ефективністю в усьому діапазоні досліджуваних навантажень – контактні поверхні при максимальному моменті тертя в початковий пусковий період повністю розділені шаром мастильного матеріалу, реалізується гідродинамічний режим мащення, а розрахунковий критерій λ [80] становить, в середньому 10 – 16.

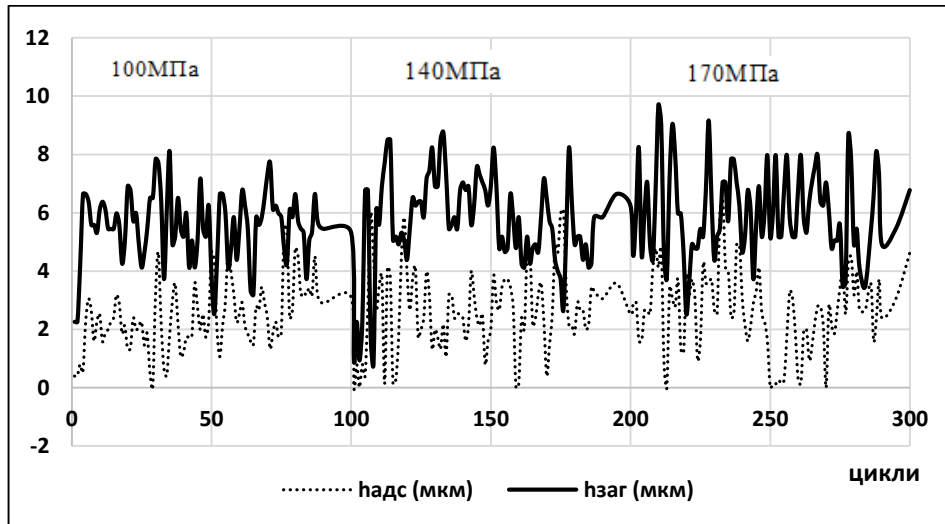


Рис.3.4. Динаміка формування загальної товщини мастильного шару ($h_{\text{заг}}$) та товщини граничних адсорбційних шарів ($h_{\text{адс}}$) в нестационарних умовах.

Так як дослідження проводились в режимі пуск – зупинка, розглянемо кінетику формування граничних адсорбційних шарів на активованих тертях контактних поверхнях. При σ_{max} 100 МПа простежується утворення стійких граничних шарів, товщина яких при напрацюванні зростає на 47% (рис.3.4). Підвищення контактної напруги до 140 МПа призводить до часткового стирання сформованих граничних шарів, в 5% циклів спостерігається зрив мастильного шару на зупинці, що обумовлює металевий контакт поверхонь та підвищення моменту тертя при пуску, в середньому, в 1,7 разів. Однак, граничні плівки характеризуються високою адаптаційною здатністю – при напрацюванні їх товщина зростає, в середньому, на 20%, а з підвищенням σ_{max} до 170 МПа не встановлено суттєвої зміни товщини граничних шарів при напрацюванні. Лише в діапазоні наробітки 250 – 270 циклів зафіксовано часткове руйнування граничних шарів та короткочасне зниження антифрикційних властивостей контакту. Аналіз кінетики зміни граничних адсорбційних шарів при динамічному навантаженні дозволяє стверджувати про високу несучу здатність

ароматичних залишкових компонентів та дистильованої оливи, що входять до складу трансмісійної оливи ТЕп-15, а протизношувальна присадка з активними елементами фосфору ($\geq 0,06\%$) та сірки ($\approx 2,5\%$), яка міститься в досліджуваній оливі, ефективно протидіє захопленню контактних поверхонь в періоди часткового стирання граничних шарів при зростанні навантаження.

3.2.2. Оцінка енергоємності контакту при структуризації граничних шарів мастильного матеріалу.

В роботі [154] зазначається, що здатність металів незворотно поглинати енергію деформації, яка оцінюється показником інтегральної роботи, може бути використана в якості чутливого критерію при дослідженні металів в умовах циклічного пружно-пластичного деформування. Так як при динамічній деформації частка прихованої енергії, що запасається в металі, може становити до 20–25% від всієї розсіяної енергії [298], то чим більшою здатністю буде характеризуватися мастильний матеріал щодо зменшення питомої роботи тертя, тим нижче стане й енергонапруженість контакту, відповідно, тим вищим має бути опір руйнуванню елементів трибоспряжень.

Проаналізована кінетика зміни питомої роботи тертя в контакті. Встановлено, що при 100 та 140 МПа енергоємність контакту характеризується високими показниками – питома робота тертя, в середньому, становить 37 Дж/мм², а в 30% циклів даний параметр перевищує середні значення в 3–4 рази (рис.3.5). Однак, при зростанні контактної напруги до 170 МПа спостерігається стрімкоподібне зниження питомої роботи тертя в 4 рази.

Ми вважаємо, що поступове зменшення даного параметру при напрацюванні обумовлено здатністю мастильного матеріалу формувати на контактних поверхнях стійкі граничні шари, які характеризуються високою адаптаційною здатністю до динамічного навантаження. Перш за все, зростання контактного навантаження призводить до стрімкого підвищення ефективної в'язкості в контакті, в порівнянні з динамічною в'язкістю оливи за атмосферних умов, мастильний матеріал набуває неньютонівських властивостей (рис.3.6).

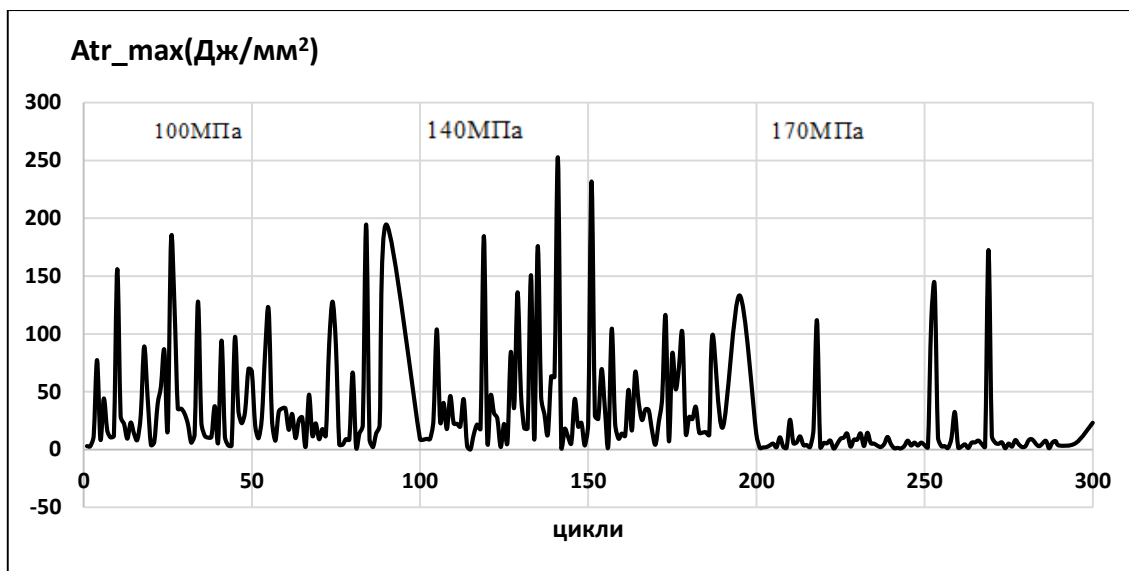


Рис.3.5. Кінетика зміни питомої роботи тертя в пусковий період в умовах поступового зростання навантаження.

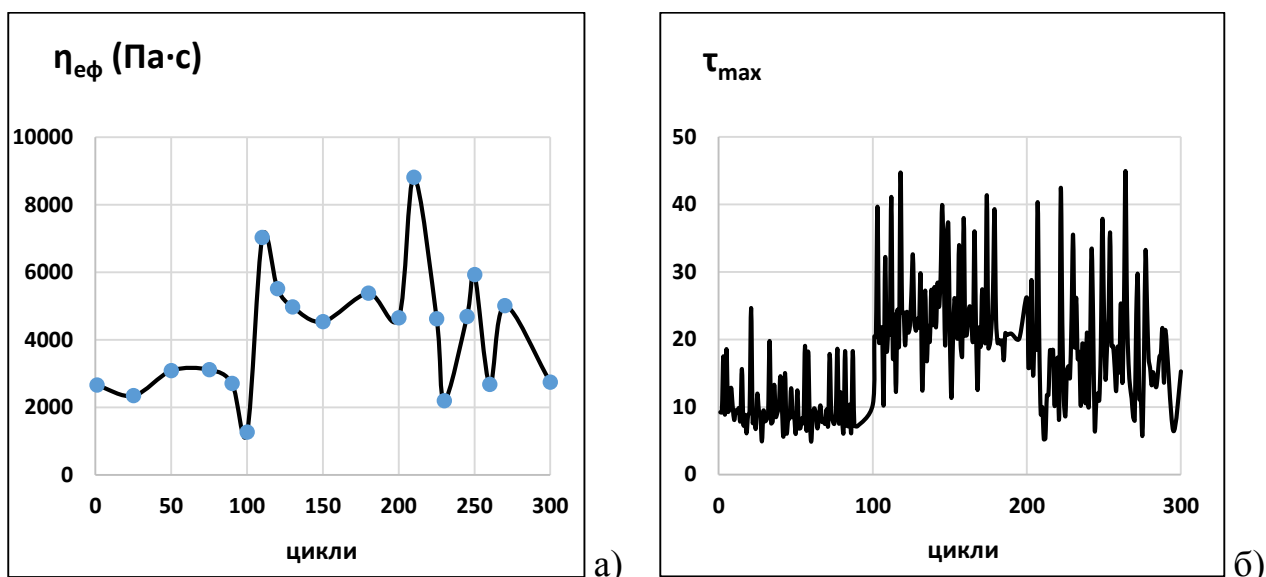


Рис.3.6. Зміна ефективної в'язкості в контакті (а) та напруг зсуву масляного шару (б) при поступовому зростанні навантаження.

При σ_{max} 100 МПа робота тертя витрачається на структуризацію граничних адсорбційних шарів на активованих тертям контактних поверхнях, адже, як зазначалось вище, товщина граничних шарів при напрацюванні 100 циклів зростає на 47%. При σ_{max} 140 МПа в 2,5 рази зростає ефективна в'язкість в контакті, відбувається зміна природи граничних адсорбційних плівок – напруга зсуву масляного шару зростає втричі, отже і питома робота тертя залишається на високому

рівні. Однак, при подальшому підвищенні σ_{max} до 170 МПа напруга зсуву масляного шару адаптованих граничних плівок зменшується, в середньому, в 1,5 рази, проявляються ефективні демпфуючі властивості граничних плівок щодо впливу динамічного навантаження, що обумовлює значне зниження енергонапруженості контакту. З рис. 3.5 видно стрімке зростання питомої роботи тертя при 250 – 270 циклах наробітки, що відповідає частковому стиранню сформованих граничних шарів на контактних поверхнях, однак їх швидке оновлення на активованій тертям поверхні призводить до стабілізації енергетичного показника контакту.

3.3. Реологічні властивості змащувальних шарів та енергоємність триботехнічної системи при змінних контактних напругах

Проблема підвищення надійності пар тертя являється багатофункціональною. Відносно сумісності матеріалів вона може вирішуватись або за рахунок вибору та створення більш зносостійких антифрикційних матеріалів для заданих конструкцій, режимів навантаження та умов експлуатації, або за рахунок підбору чи створення більш ефективних за змащувальною здатністю олив та мастил для певних режимів експлуатації, або шляхом оптимізації параметрів тертя та умов експлуатації елементів трибоспряження з наступною їх регламентацією [18]. Тертя – процес перетворення енергії, а закономірності цього перетворення визначаються структурним станом матеріалів пари тертя та його змінами [140]. В ході цих змін утворюються нові вторинні структури, що представляють нову фазу, яка спонтанно утворюється при терті в результаті взаємодії матеріалів пар тертя. Вторинні структури характеризуються екстремальними фрикційними та міцністними властивостями, нормалізуючи тертя та знос. Тонкі плівки вторинних структур за складом, будовою та властивостями суттєво відрізняються від вихідних матеріалів пар тертя. Формування вторинних структур, як і граничних шарів мастильного матеріалу, – термодинамічно неминучий процес пасивації активованих тертям поверхневих шарів контактних поверхонь. При пасивації вирішальною величиною, від якої залежить діапазон навантажень при нормальному терті, є енергія, необхідна для утворення

вторинних структур на поверхнях тертя. Тому важливим питанням сучасних досліджень є розробка кінетичної теорії формування третього тіла (захисного шару на поверхні тертя), існування якого слід розглядати як результат конкуруючих процесів стирання, зміни і відновлення плівки [253].

Метою проведених досліджень було визначення кореляційного впливу змащувальних, антифрикційних та реологічних характеристик мастильного матеріалу на енергонавантаженість контакту в умовах динамічних навантажень.

В якості зразків використовувалися ролики із сталі 9ХС (HRC = 60), припрацьовані контактні поверхні до Ra = 0,22 мкм. Мастильний матеріал – трансмісійна мінеральна всесезонна олива ТЕп–15 (за міжнародною класифікацією API – GL–2).

Дослідження змащувальних властивостей оливи проходило в режимі пуск – зупинка за наступною схемою: розгін за умов чистого кочення контактних поверхонь (12,5с) – робота в умовах 20% проковзування (4с) – гальмування за умов чистого кочення контактних поверхонь (12,5с).

Контактне навантаження (σ_{max}) на 100, 200 та 300 циклах наробітки становило відповідно 100, 140 та 170 МПа.

3.3.1. Вплив напруг зсуву масляного шару на антифрикційні показники контакту.

За умов зміни чистого кочення на кочення з проковзуванням, максимальні значення якого досягають 20%, змащувальні властивості мінеральної трансмісійної оливи ТЕп–15, незважаючи на зниження товщини мастильного шару, в середньому, на 10%, залишаються на високому рівні в усьому діапазоні заданих контактних навантажень – в контакті реалізується гідродинамічний режим мащення, при якому параметр мащення λ досягає 10 – 12. Однак, проковзування призводить до появи високих градієнтів швидкості зсуву (γ) масляних шарів порядку $0,5 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, що проявляється в зниженні антифрикційних властивостей оливи – момент тертя при σ_{max} 100, 140 та 170 МПа зростає в 1,2 : 1,3 : 1,9 разів відповідно (рис. 3.7).

За Біргером [27], сили тертя, які виникають між зуб'ями в зубчастих передачах, переводять максимальні дотичні напруги на поверхню площини контакту. Так як в умовах експерименту між контактними поверхнями формується товщина мастильного шару, яка значно перевищує максимальні нерівності профілю елементів трибоспряження, то дотичні напруги локалізуються в мастильному матеріалі. За умов проковзування напруга зсуву мастильного матеріалу (τ) зростає аналогічно підвищенню моменту тертя – в 1,25 : 1,4 : 2,0 рази при σ_{max} 100, 140 та 170 МПа відповідно (рис. 3.8).

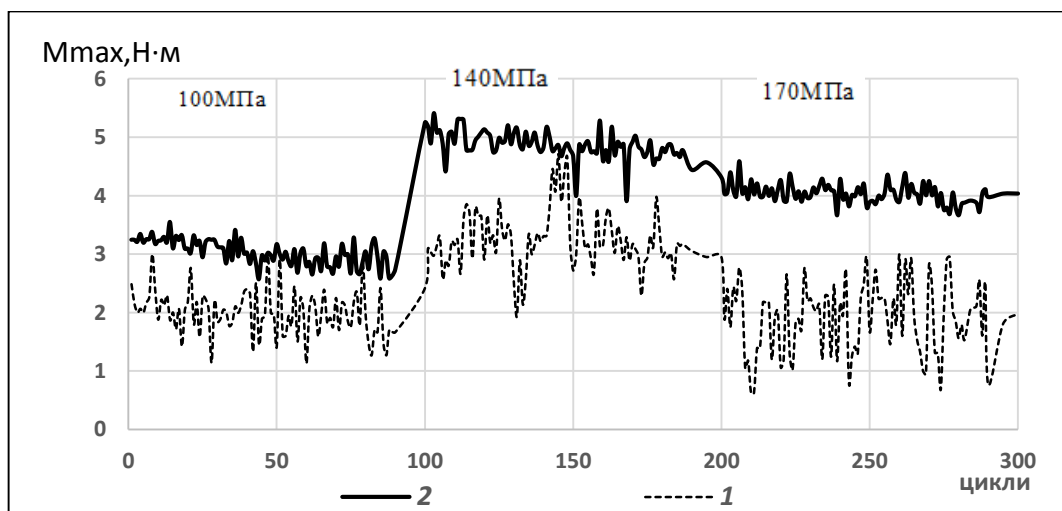


Рис.3.7. Кінетика зміни моменту тертя при чистому коченні (1) та коченні з проковзуванням (2) в умовах збільшення контактної навантаження.

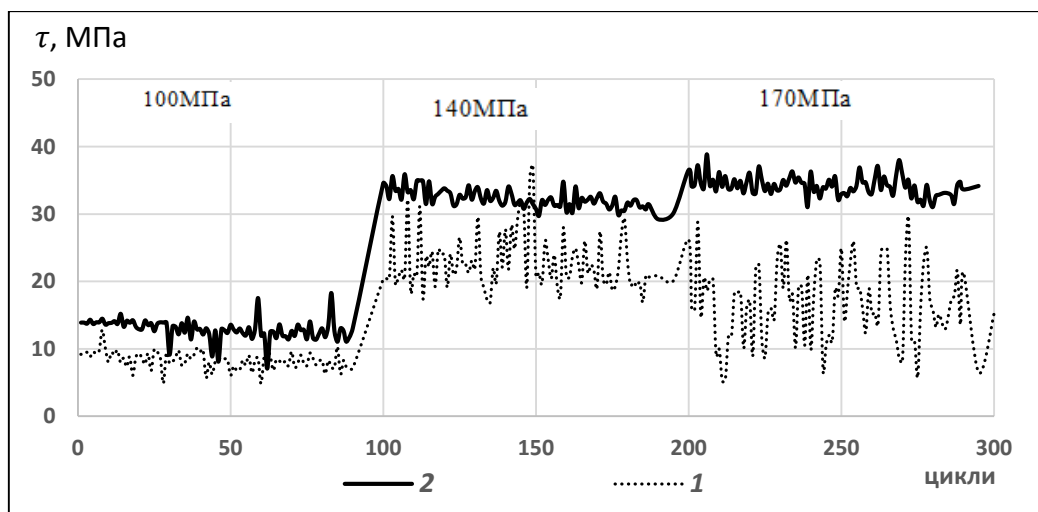


Рис.3.8. Зміна напруг зсуву масляного шару при чистому коченні (1) та коченні з проковзуванням (2) в умовах збільшення контактної навантаження.

Розглянемо коефіцієнт пропорційності (k) між дотичною напругою зсуву (τ) та нормальним навантаженням (σ_{max}) (табл. 3.4), запропонований в роботах [4, 110]:

$$k = \frac{\tau}{\sigma_{max}} \quad (3.1)$$

Таблиця 3.4

Вплив навантаження та умов кочення на коефіцієнт опору деформуванню масляної плівки

k	σ_{max} , МПа		
	100	140	170
За умов чистого кочення $V_{\Sigma\text{КОЧ}} = 1,3\text{м/с}$	0,105	0,17	0,104
За умов кочення з проковзуванням $V_{\Sigma\text{КОЧ}} = 4,8\text{м/с};$ $V_{\text{КОВЗ}} = 0,6\text{м/с}$	0,13	0,23	0,20

Діапазон встановлених нами значень коефіцієнта опору деформуванню масляної плівки співпадає з одержаними даними в роботі [110] щодо коефіцієнту опору пластичному деформуванню для різних конструкційних матеріалів, який лежить в межах 0,15 – 0,25. Це свідчить про високі демпфуючі властивості граничних змащувальних шарів, які формуються на контактних поверхнях, зміну реологічних властивостей оливи при структуризації в контакті, надбання мастильним матеріалом пружних властивостей з високим модулем зсуву, що також встановлено в роботі [12].

3.3.2. Кінетика зміни енергоємності контакту з позицій структурної пристосованості вторинних структур.

За обраною нами схемою проведення досліджень в умовах пуск – зупинка, внаслідок реалізації граничного режиму мащення в контакті в моменти страгування та гальмування елементів трибоспряження, відбувається інтенсивна активація поверхневих шарів металу. На активованих тертях контактних поверхнях формуються граничні адсорбційні шари різної природи товщиною 2 – 4 мкм, які характеризуються неньютонівськими властивостями та різким зростанням їх ефективної в'язкості. Отже, сформована товщина мастильного шару в період

проковзування (при $V_{\Sigma\text{КОЧ}} = 4,8\text{м/с}$; $V_{\text{КОВЗ}} = 0,6\text{м/с}$) складається з товщини граничних плівок та приросту гідродинамічної товщини мастильного шару. Стрімке зростання градієнту швидкості зсуву за наявності проковзування в контактi призводить до часткової дезорієнтації граничних адсорбованих шарів мастильного матеріалу, що проявляється в зниженні ефективної в'язкості ($\eta_{\text{еф}}$) в 25 : 16 : 12 разів при σ_{max} 100, 140 та 170 МПа відповідно. При цьому проявляється чітка залежність ефективної в'язкості від градієнта швидкості зсуву, що підтверджує твердження про надбання мастильним матеріалом неньютонівських властивостей (рис.3.9).

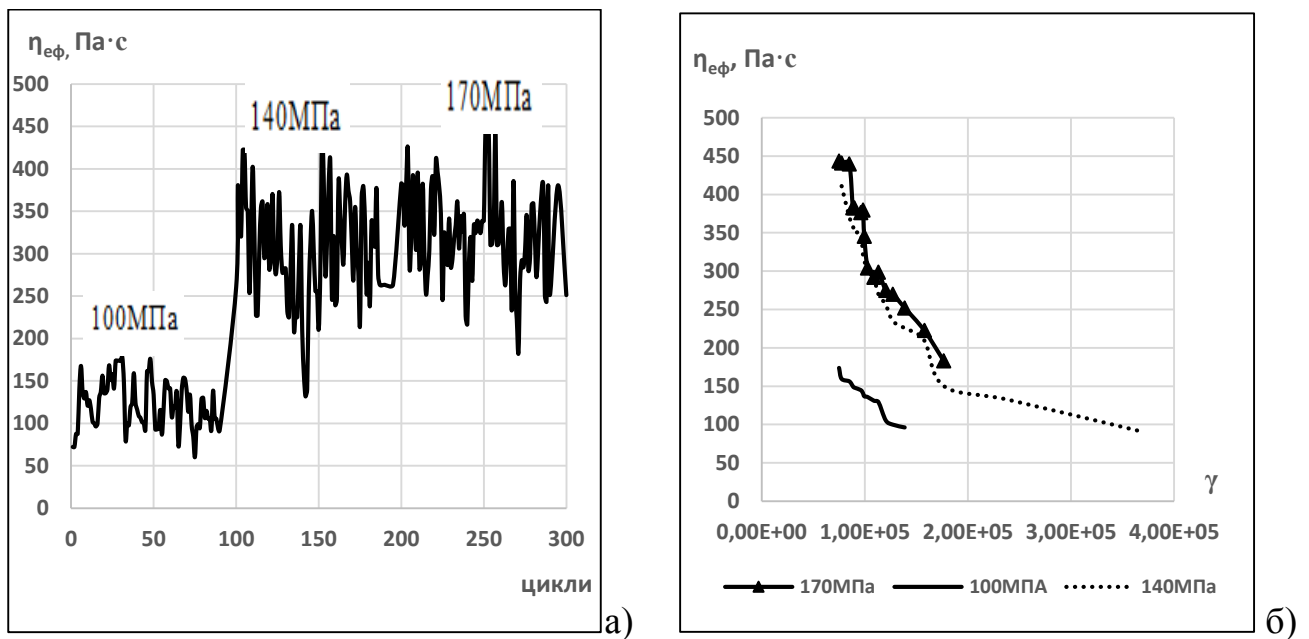


Рис.3.9. Залежність ефективної в'язкості оливи від навантаження (а) та градієнту швидкості зсуву (б).

Найсуттєвіше зменшення $\eta_{\text{еф}}$ в період проковзування при 100 МПа свідчить про слабкі когезійні зв'язки між структурованими компонентами мастильного матеріалу на активованих тертях контактних поверхнях, що проявляється в несуттєвому зростанні напруг зсуву масляного шару, в порівнянні з чистим коченням. Однак вже при 140 і 170 МПа τ збільшується майже втричі, що опосередковано підтверджує зростання опору деформування мастильного шару внаслідок утворення стійких когезійних зв'язків між структурними компонентами мастильного матеріалу. При цьому слід зазначити, що енергонавантаженість контакту підтверджує залежність

цього параметру від адаптації граничних шарів до динамічних навантажень. Зокрема, кінетика зміни питомої роботи тертя (A_{mp}) в період наробітки контактних поверхонь за наявності проковзування, представлена на рис. 3.10, свідчить про зростання даного параметру, в порівнянні з умовами чистого кочення, в 160 разів при 100 та 140 МПа та в 100 разів при подальшому зростанні контактної напруги до 170 МПа.

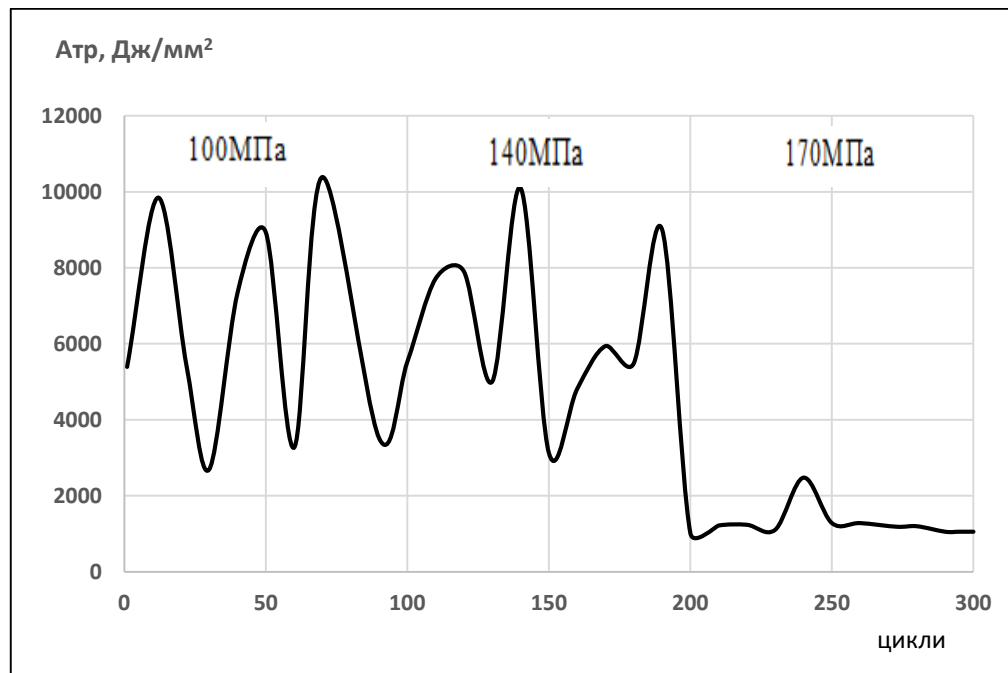


Рис.3.10. Зміна питомої роботи тертя при напрацюванні контактних поверхонь в умовах поступового зростання навантаження.

Коливальний процес зміни питомої роботи тертя з великим амплітудним діапазоном (3000 – 10000 Дж/мм²) при 100 та 140 МПа свідчить про періодичний характер процесу утворення та руйнування вторинних структур. Внаслідок дискретності контакту в режимі пуск – зупинка, неоднорідності епюри навантаження в часі та в просторових координатах, періодичній зміні умов чистого кочення на кочення з проковзуванням, на різних ділянках поверхні тертя одночасно протікають різні фази локально – періодичних процесів. При цьому мікротвердість контактних поверхонь (H_{100}) знижується, в середньому, на 700 МПа, в порівнянні з мікротвердістю вихідної поверхні сталі 9ХС, відбувається знеміцнення поверхневих шарів металу, а інтенсивність зношування становить $I=10^{-8}$. Однак, наявність активної хімічної протизношувальної присадки в досліджуваній трансмісійній оливі

забезпечує формування захисних екрануючих граничних шарів на активованих тертям контактних поверхнях, що призводять до формування вторинних структур з високою міцністю – відбувається зміцнення поверхневих шарів металу, H_{100} зростає, в середньому, на 550МПа, в порівнянні з вихідною мікротвердістю сталі, а інтенсивність зношування зменшується до $I=10^{-9}$ (рис. 3.11).

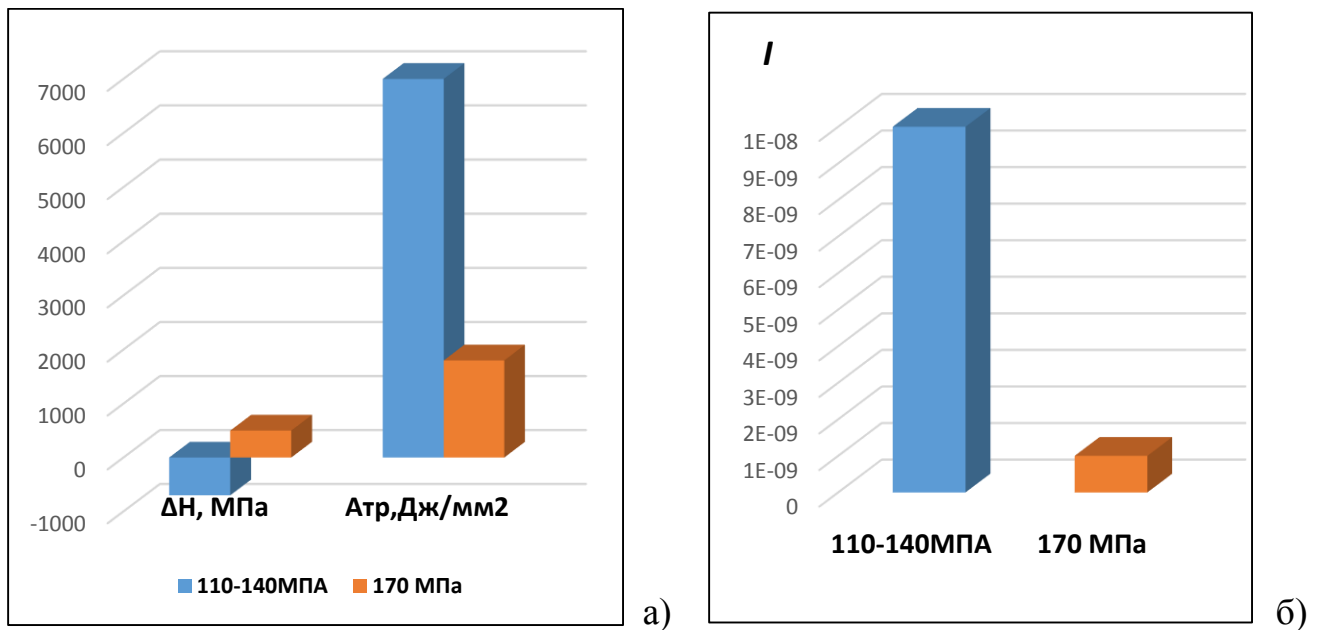


Рис.3.11. Зміна мікротвердості (ΔH_{100}) поверхневих шарів металу, питомої роботи тертя ($A_{тр}$) (а) та інтенсивності зношування (I) (б) при контактних навантаженнях 110 – 170 МПа.

Саме найменший приріст питомої роботи тертя при 170 МПа підтверджує зниження енергоємності контакту за рахунок структурної пристосованості вторинних структур внаслідок підвищення їх міцнісних характеристик при терті. В роботі [226] також одержані дані щодо стабілізації значень електродного потенціалу, питомої роботи тертя та метастабільного значення площі вторинних структур при збільшенні питомого навантаження до деякого критичного значення. Адже метастабільний стан, за Костецьким Б.І., – це результат рівноваги процесів руйнування та відновлення вторинних структур, а також локалізації руйнування в цих структурах.

3.4. Вплив природи граничних змащувальних шарів на адгезійну складову коефіцієнта тертя.

3.4.1. Аналіз факторів, що впливають на реалізацію умов зовнішнього тертя.

Зовнішнє тертя визначається структурою і властивостями поверхневих шарів металу [105], напружено–деформованим станом контактних поверхонь [343, 382], структурою граничних змащувальних шарів [410], режимами роботи елементів трибоспрямижень і т.д. Невід'ємною складовою триботехнічної системи є мастильний матеріал, самоорганізація якого при різних навантажувально–швидкісних режимах є важливою умовою прояву зовнішнього тертя в контакті і підвищення його експлуатаційної надійності.

На поріг зовнішнього тертя істотний вплив створюють дотичні напруження, зумовлені міжмолекулярною взаємодією поверхонь в зонах фактичного контакту [434]. Наявність мастильного матеріалу в зоні контакту, окисних плівок, адсорбованих парів і газів забезпечує істотне зниження адгезійної складової коефіцієнта тертя як за рахунок в'язкої течії в об'ємі третього тіла, так і за рахунок зменшення площі, по якій виникає металевий контакт поверхонь при переході трибосистеми в граничний режим мащення [424, 456]. Однак, питання, пов'язані з формуванням на поверхнях металу граничних плівок різного хімічного складу, які істотно відрізняються напругою зсуву і антифрикційними характеристиками, в даних роботах не розглядаються. Існуючі реологічні моделі мастильного матеріалу в умовах ковзання дозволяють враховувати вплив напруги зсуву граничних шарів на силу тертя при високому тиску і температурах [294, 369]. Комплексні дослідження реологічних властивостей мастильних матеріалів не охоплюють умов кочення з різним ступенем проковзування, характерних для зубчастих передач.

Для прогнозування експлуатаційних характеристик оливи важливими показниками є ефективна в'язкість в діапазоні температур 130 – 180⁰С і градієнта швидкості зсуву $10^5 - 10^7 \text{ c}^{-1}$, властивості граничних шарів і здатність хімічно модифікувати поверхневі шари металу [116]. Тонкі поверхневі шари продуктів

взаємодії активних компонентів мастильного матеріалу з матеріалами контактних поверхонь проявляють знижений опір зсуву і характеризуються більш високою температурною і механічною стійкістю [134]. В роботі [257] встановлено фазовий перехід фізично адсорбованого в хемосорбований шар при посиленні навантажувального режиму випробування мастильного матеріалу, що забезпечує підвищення міцнісних властивостей і зниження антифрикційних показників граничних змащувальних шарів. Слід зазначити, що в вищезгаданих роботах дослідження граничних плівок мастильних матеріалів проводилося в умовах рясної подачі оливи в зону контакту. Це сприяє формуванню товщини мастильного шару, яка включає дві складові – гідродинамічну і негідродинамічну. Об'ємні, антифрикційні та реологічні властивості граничних плівок суттєво відрізняються від аналогічних показників рідкої фази мастильного матеріалу. Тому створення експериментальних умов, в яких виключається вплив гідродинамічної складової товщини мастильного шару на триботехнічні властивості контакту, є важливим напрямком в дослідженні граничних плівок [189, 389].

Величина адгезійної складової коефіцієнта тертя, обумовлена молекулярною взаємодією контактних поверхонь, залежить від дотичних напружень на межі розділу твердих тіл [236]. У разі недостатнього надходження мастильного матеріалу в зону контакту дотичні напруження локалізуються на деякій глибині, що призводить до виникнення тріщини під поверхневим шаром металу [425]. Однак достатня кількість мастильного матеріалу створює передумови для виходу дотичних напружень на поверхню, при цьому початок розвитку тріщин відбувається в місцях впадин по нерівностям шорстких поверхонь. Проте, в даних роботах не наводиться критеріїв оцінки локалізації вектора дотичних напружень при переході трибосистеми від гідродинамічного до граничного режиму мащення.

На підставі вищевикладеного, вплив структури граничних змащувальних шарів і їх реологічних властивостей на довговічність пар тертя з локальною формою контакту не досить досліджений. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки комплексних методик триботехнічних випробувань, які б охоплювали різноманіття ефектів взаємодії компонентів мастильних матеріалів з активованою поверхнею

металу. Дослідження процесу утворення мастильного шару як основного еластогідродинамічного і граничного аспекту, безумовно, представляє перспективу в плані підвищення надійності і несучої здатності сучасних машин і механізмів.

3.4.2. Зміна змащувальних, антифрикційних і реологічних властивостей трибосистеми в екстремальних умовах тертя.

Метою досліджень було встановлення залежності кінетики зміни коефіцієнта тертя в умовах припинення подачі мастильного матеріалу від змащувальних та реологічних властивостей граничних плівок, сформованих на активованих тертям поверхневих шарах металу.

Максимальна частота обертів для випереджаючої поверхні складала 1000 об/хв. У роботі імітувалося проковзування 3, 10, 20, 30 і 40%. Максимальне контактне напруження по Герцу – 250 МПа.

В якості зразків використовувались ролики зі сталі 45 (HRC 38, Ra 0,57 мкм). Змащування контактних поверхонь здійснювалося зануренням нижнього ролика в ванночку з оливою. В якості мастильного матеріалу використовувалась мінеральна трансмісійна олива для механічних коробок передач і головних передач легкових і вантажних автомобілів Okko GL–4 80w/90. Об'ємна температура оливи – 20°C.

Припрацювання контактних поверхонь тривалістю 100 циклів і подальша робота пар тертя протягом 400 циклів здійснювалася в умовах рясного мащення, після чого припинялася подача мастильного матеріалу. Загальна кількість циклів в кожному експерименті складала: 500 (рясне мащення шляхом занурення нижнього ролика в ванночку з оливою), 400 (імітація режиму масляного голодування за рахунок припинення регулярної подачі мастильного матеріалу з ванночки в зону контакту), 100 (примусове видалення мастильного матеріалу з контактних поверхонь шляхом витирання роликів).

В умовах роботи контактних поверхонь без подачі мастильного матеріалу ефективність змащувальних властивостей контакту визначається виключно стійкістю граничних шарів, сформованих на активованих тертям контактних поверхнях в умовах рясного мащення. До 400 циклів напрацювання при пуску спостерігається

приріст товщини мастильного шару на 0,5 – 2 мкм за рахунок вільного мастильного матеріалу, який завдяки адгезійним і когезійним силам взаємодії знаходиться по всій площі контакту. В умовах рясної подачі оливи в зону контакту реалізовувався гідродинамічний режим мащення. Припинення подачі мастильного матеріалу створює передумови для переходу трибосистеми до більш жорстких умов роботи. При цьому виявляються різні режими мащення – від напівсухого до гідродинамічного (табл. 3.5).

Таблиця 3.5

Ефективність мащення при різному ступені проковзування пар тертя

Проковзування, %	Товщина мастильного шару, мкм	Режим мащення за параметром λ
до 3	0,2 – 5,1	0 – 10,86 (напівсухий – гідродинамічний)
10	0,35 – 4,0	0,5 – 7,2 (напівсухий – гідродинамічний)
20	0,2 – 3,8	0,5 – 6,7 (напівсухий – гідродинамічний)
30	0,15 – 2,1	0,5 – 5,4 (напівсухий – гідродинамічний)
40	0 – 1,9	0 – 2,7 (напівсухий – змішаний)

Зменшення гідродинамічної складової товщини мастильного шару, в середньому на 70%, по-різному впливає на антифрикційні властивості контакту.

На ділянці I при пуску в умовах чистого кочення f не змінюється для поверхонь з подальшим проковзуванням 10 – 20%, а для контактних поверхонь з подальшим проковзуванням 30 і 40% f підвищується в 1,8 і 1,2 рази відповідно. Більш істотне збільшення коефіцієнта тертя (в 1,22 – 2,4 рази) встановлено після 400 циклу напрацювання, при примусовому видаленні вільного мастильного матеріалу із зони контакту. Виключення встановлено для контактних поверхонь, що працюють в подальшому з мінімальним проковзуванням 3%: зменшення товщини мастильного шару не впливає на антифрикційні властивості контакту. Коефіцієнт тертя знаходиться в діапазоні 0,006 – 0,008, як і в умовах рясного мащення.

На ділянці II, в умовах роботи контактних поверхонь при коченні з проковзуванням встановлено різке підвищення коефіцієнта тертя, в середньому, в 3

рази для умов ковзання 10 – 40%. Виняток знову ж склали контактні поверхні з мінімальним проковзуванням – антифрикційні властивості контакту залишаються незмінними (рис. 3.12).

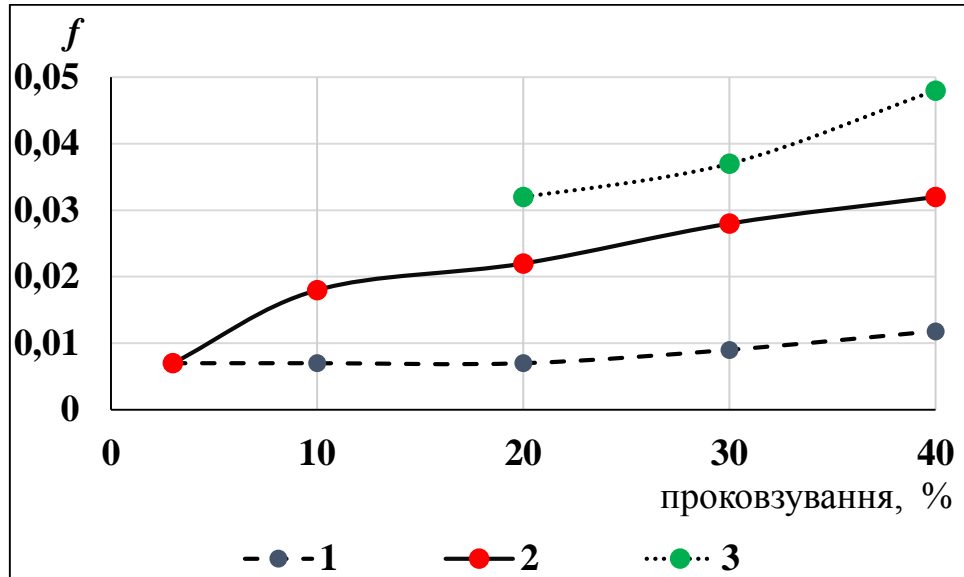
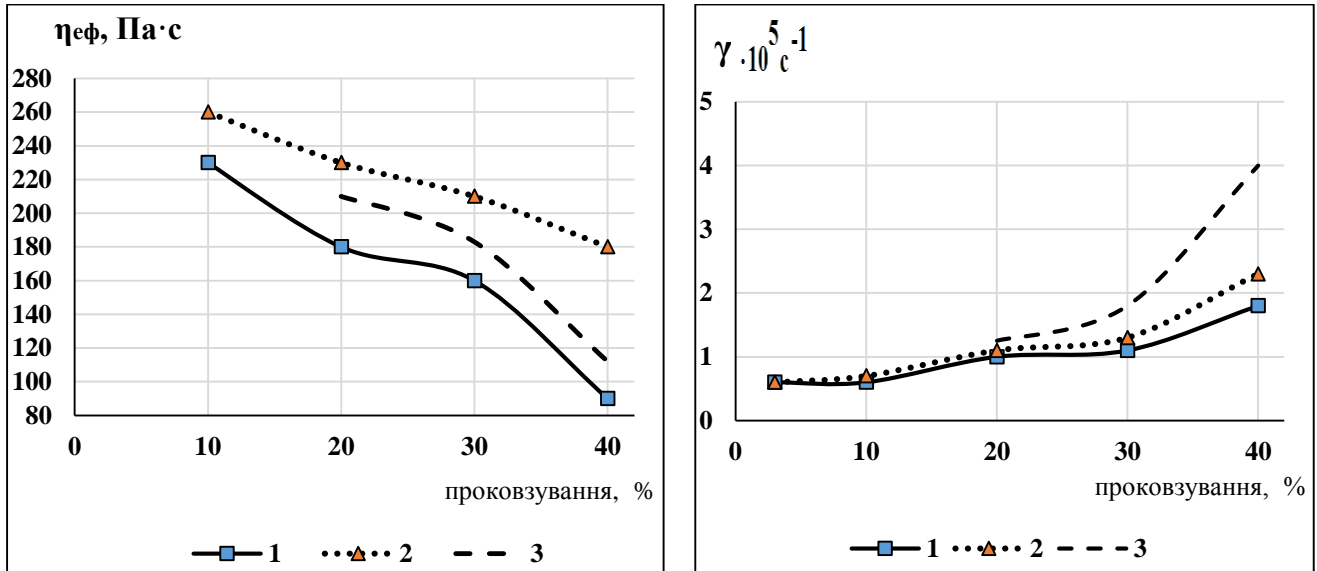


Рис. 3.12. Залежність коефіцієнта тертя від величини проковзування в умовах обмеженого мащення: 1 – режим чистого кочення при пуску; 2 – режим кочення з ковзанням; 3 – момент схоплення в режимі кочення з проковзуванням.

Умова відсутність додаткового мастильного матеріалу не чинить істотного впливу на градієнт швидкості зсуву (γ) – підвищення даного параметра склало 1,02 – 1,1 рази незалежно від ступеня проковзування контактних поверхонь. Збільшення проковзування з 3 до 40% зумовлює зростання градієнта швидкості зсуву мастильних шарів в 4,6 раз (рис. 3.13, б). Саме цей параметр впливає на стійкість сформованих граничних плівок: підвищення γ з $3 \cdot 10^5$ до $2,3 \cdot 10^5$ с^{-1} при зростанні проковзування з 20 до 40% призводить до повного стирання сформованих граничних шарів в 30% циклів напрацювання на поверхнях з максимальним проковзуванням (рис. 3.14).

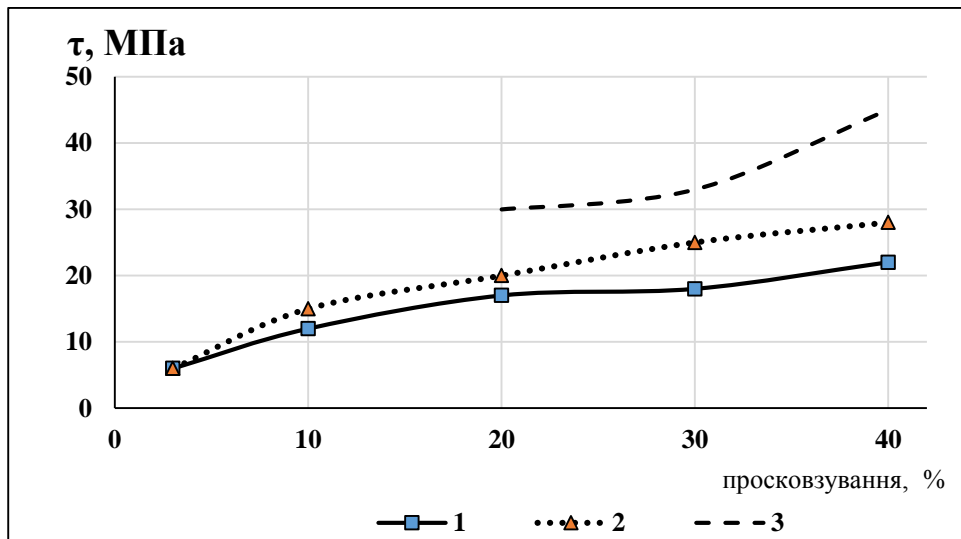
При збільшенні ступеня проковзування з 10 % ($\gamma = 0,5 \cdot 10^5$ с^{-1}) до 40 % ($\gamma = 2,3 \cdot 10^5$ с^{-1}) ефективна в'язкість в контакті знижується з 260 Па·с до 180 Па·с (рис. 3.13а). До 400 циклів напрацювання, коли олива примусово не видалялась з досліджуваних поверхонь, напруження зсуву змащувальних шарів в умовах проковзування 10 – 40 % підвищується, в середньому, в 1,25 раз, в порівнянні з рясною подачею мастильного

матеріалу. В умовах обмеженої подачі оливи, яка призводить до зменшення товщини мастильного шару в контакті, встановлено збільшення ефективної в'язкості мастильного матеріалу, яке склало 1,13:1,27:1,31:2 рази для проковзування 10, 20, 30 і 40 % відповідно (рис. 3.13а).



а)

б)



в)

Рис. 3.13. Вплив ступеня проковзування на реологічні характеристики мастильного матеріалу: 1 – рясне мащення; 2 – обмежена кількість мастильного матеріалу; 3 – примусове видалення мастильного матеріалу; а – зміна ефективної в'язкості (η) в контакті; б – зміна градієнта швидкості зсуву (γ) мастильних шарів; в – зміна напружень зсуву (τ) мастильного матеріалу.

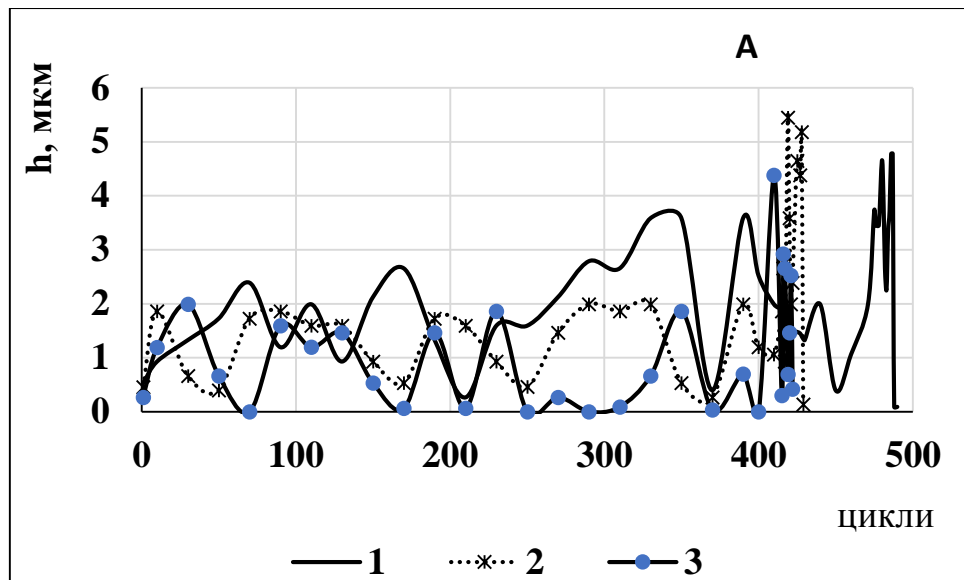


Рис. 3.14. Кінетика зміни товщини мастильного шару в режимі пуск – зупинка при коченні з проковзуванням 20 % (1), 30 % (2), 40 % (3). В точці А – примусове видалення мастильного матеріалу.

Після 400 циклів напрацювання мастильний матеріал примусово віддалявся з поверхонь тертя шляхом витирання роликів. Для контактних поверхонь з проковзуванням 3 і 10% до 500 циклу напрацювання встановлена нормальна робота трибоспряжень, коефіцієнт тертя стабільний, що свідчить про високі антифрикційні властивості граничних змащувальних плівок. Збільшення ступеня проковзування до 20, 30 і 40% призводить до скорочення періоду нормальної роботи контактних поверхонь – проявляються перші ознаки захоплення, які відповідають 490, 430 і 415 циклам напрацювання відповідно. У таких екстремальних умовах спостерігається різка зміна антифрикційних характеристик контакту, яка проявляється в періодичному зростанні і зниженні коефіцієнта тертя (рис. 3.15).

Для контактних поверхонь, які працюють в умовах мінімального проковзування 3%, не встановлено суттєвих змін реологічних властивостей граничних змащувальних шарів при переході трибосистеми в режим припинення подачі мастильного матеріалу: стабільність напруги зсуву мастильних шарів свідчить про слабкість когезійних сил взаємодії.

Однак, при напрацюванні $400 < N < 500$ циклів, в умовах примусового видалення мастильного матеріалу, ознак захоплення контактних поверхонь не встановлено,

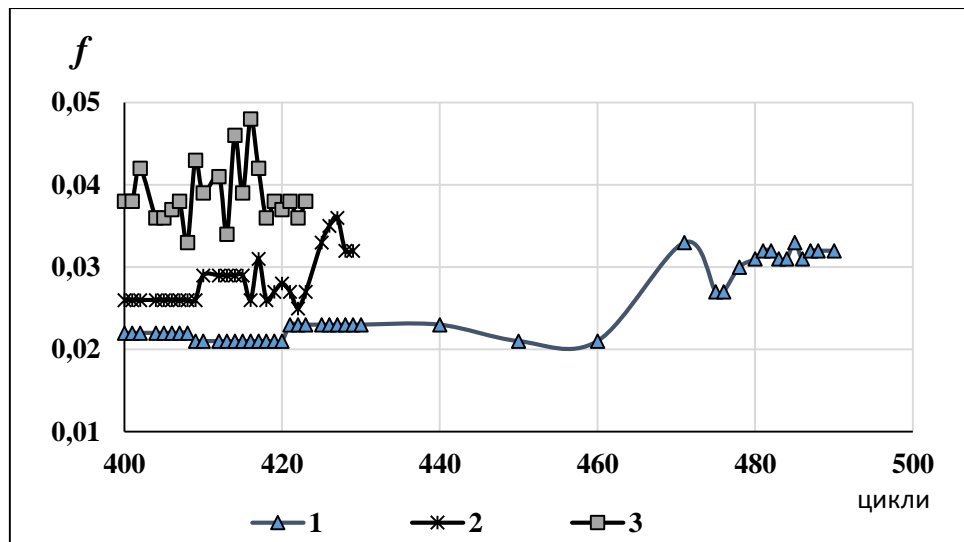


Рис. 3.15. Зміна коефіцієнту тертя в період примусового видалення мастильного матеріалу при коченні з проковзуванням 20 % (1), 30 % (2), 40 % (3).

незважаючи на формування трансмісійною оливою при структурній пристосованості граничних шарів фізичної природи. Збереженню нормальної роботи трибоспряжень сприяють два фактори. По-перше, завдяки резерву мастильного матеріалу по впадинах шорсткості контактних поверхонь (експлуатаційна $R_a = 0,39\text{мкм}$, $R_z = 1,71$), товщина мастильного шару з 430-го циклу напрацювання починає збільшуватися до 3 мкм з наступним циклічним коливанням 0,2 – 3 мкм, що запобігає схоплюванню поверхонь тертя (рис. 3.16).

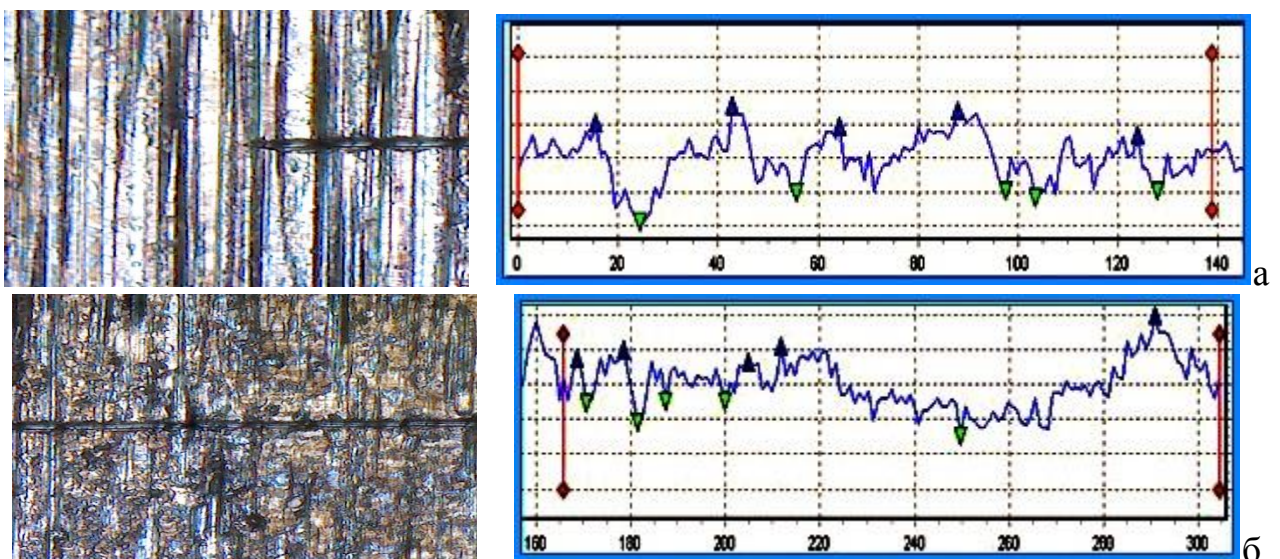


Рис. 3.16. Шорсткість контактних поверхонь: *а* – вихідна ($R_a = 0,57\text{ мкм}$, $R_z = 2,33$); *б* – експлуатаційна ($R_a = 0,39\text{ мкм}$, $R_z = 1,71$)

По-друге, сильно знеміцнені поверхневі шари металу завдяки пластифікуючому ефекту Ребіндера характеризуються низькими показниками опору дотичним напруженням зсуву. Мікротвердість поверхневих шарів зменшується, в середньому, на 1000 МПа, а глибина аморфізованого знеміцненого шару досягає 60 мкм. Таким чином, прояв зазначених процесів в контакті сприяє збереженню стабільності адгезійної складової коефіцієнта тертя на рівні показників, встановлених при достатньому надходженні мастильного матеріалу в зону контакту.

3.4.3. Аналіз антифрикційних властивостей трибоспряжень з позиції самоорганізації змащувальних граничних плівок.

Коефіцієнт тертя дорівнює сумі двох складових – адгезійної, обумовленої молекулярною взаємодією твердих тіл на фактичній площі дотику, і деформаційної, обумовленої деформацією поверхневих шарів твердих тіл при терті [292]. Тому аналіз кінетики зміни антифрикційних властивостей контакту повинен ґрунтуватися на розгляді питань, які стосуються як мастильної здатності використовуваних матеріалів, так і змін, що відбуваються в поверхневих шарах металу при терті. При наявності мастильного матеріалу в зоні контакту величина адгезійної складової коефіцієнта тертя буде визначатися дотичними напруженнями зсуву переважно в змащувальному шарі.

Розглянемо кінетику зміни антифрикційних властивостей трансмісійної оливи з позиції самоорганізації змащувальних граничних плівок при переході трибосистеми в екстремальні умови роботи, які полягають у відсутності резерву мастильного матеріалу. В період пуску, в умовах чистого кочення, при збільшенні швидкості дотичні напруження зсуву локалізуються в центральній частині товщини мастильного шару, так як відсутній градієнт швидкості зсуву ($V_{\text{ковз.}} = 0$). При напрацюванні 400 циклів за рахунок приросту товщини мастильного шару завдяки наявності вільного мастильного матеріалу на контактних поверхнях, дотичні напруження локалізуються переважно в цьому шарі. Так як мастильного матеріалу достатньо для повного розділення контактних поверхонь, зміни τ на ділянці I для поверхонь з подальшим проковзуванням 3 – 20% не зафіксовано, $\tau = 6 - 7$ МПа, як і в

умовах рясного мащення. Зазначені процеси сприяють домінуванню в контакті гідродинамічного режиму мащення, при якому коефіцієнт тертя визначається об'ємними властивостями рідкої смектичної або нематичної фази мастильного матеріалу [455]. Локалізація дотичних напружень зсуву в умовах чистого кочення в рідкій фазі внаслідок мінімального впливу поверхні твердого тіла забезпечує найкращі антифрикційні характеристики контакту з мінімальним коефіцієнтом тертя на рівні 0,006 – 0,008 (рис. 3.12).

На контактних поверхнях, які працюють за умов проковзування 30 і 40%, де максимальна швидкість ковзання досягає 0,85 і 1,5 м/с відповідно, встановлено інтенсивне розбризкування мастильного матеріалу. Це призводить до зменшення приросту товщини плівки при пуску в середньому в 2 рази, внаслідок чого реалізується переважно змішаний режим мащення. Однак напруга зсуву змащувальних шарів в період роботи на ділянці I збільшується незначно (в середньому в 1,2 рази), в порівнянні з умовами рясного мащення. Зі зменшенням товщини мастильної плівки в контакті зростає вплив твердої фази металу на компоненти мастильного матеріалу, що забезпечує зниження антифрикційних властивостей – коефіцієнт тертя збільшується до 0,01 – 0,013 (рис. 3.12).

В умовах проковзування швидкість ковзання досягає максимальних значень, що призводить до виникнення в контакті градієнта швидкості зсуву змащувальних шарів по всій товщині мастильної плівки. Внаслідок зменшення гідродинамічної складової товщини мастильного шару вектор дотичного напруження зсуву локалізується в основному в сформованому граничному шарі, що аналогічно результатам, наведеним у роботі [462].

Так як граничні шари характеризуються структуризацією і піддаються сильному впливу твердої фази металу, проаналізуємо вплив реологічних властивостей мастильного матеріалу на кінетику зміни адгезійної складової коефіцієнта тертя.

Аналіз змащувальної здатності досліджуваної трансмісійної оливи в умовах рясного мащення виявив формування граничних змащувальних шарів різної природи. На контактних поверхнях з мінімальним проковзуванням 3% формуються переважно

фізично адсорбовані граничні плівки з слабкими Ван-дер-Ваальсовими силами взаємодії, які характеризуються низькими напругами зсуву, аналогічними для об'ємної фази (рис. 3.13в).

Для контактних поверхонь з проковзуванням 3%, не встановлено зміни адгезійної складової коефіцієнта тертя в умовах обмеженого мащення, в порівнянні з рясним надходженням мастильного матеріалу в зону контакту. Перш за все, це пов'язано з низькою активацією поверхневих шарів металу при незначній швидкості ковзання ($V_{\text{ковз}} = 0,07$ м/с). Домінування швидкостей кочення створює передумови для мінімальних механічних і теплових впливів від градієнта швидкості [66], в результаті чого відбувається формування фізично адсорбованих граничних плівок. Відсутність сильних адгезійних зв'язків компонентів мастильного матеріалу з поверхнею металу обумовлює часту дезорієнтацію граничних шарів, що проявляється в циклічних коливаннях товщини мастильної плівки від 0,2 до 3 – 5 мкм тривалістю 50 циклів напрацювання. Для таких граничних шарів характерні реологічні властивості об'ємної рідкої фази оливи: напруга зсуву і ефективна в'язкість в контакті аналогічні параметрам, зафіксованим в умовах рясного мащення (рис.3.13).

Збільшення ступеня проковзування і, відповідно, градієнта швидкості зсуву, створює передумови для формування граничних змащувальних шарів хемосорбційної природи. При проковзуванні 10 – 40% активні компоненти мастильного матеріалу утворюють на контактних поверхнях хемосорбційні плівки і хімічно модифіковані шари, які характеризуються дещо більшими напруженнями зсуву, ніж об'ємна фаза, завдяки когезійним силам взаємодії.

Згідно [133], градієнт швидкості зсуву близько $10^5 \dots 10^7$ с⁻¹ призводить до деструкції компонентів мастильних матеріалів, що проявляється в зниженні їх в'язкості. Аналогічні результати отримані і в проведених дослідженнях: ефективна в'язкість в контакті знижується в 1,45 раз при збільшенні ступеня проковзування з 10% до 40%. Однак проведений аналіз реологічних характеристик структурованих граничних змащувальних шарів виявив іншу закономірність кінетики зміни ефективної в'язкості в умовах припинення подачі мастильного матеріалу. Ефективна в'язкість збільшується, причому ступінь її збільшення корелює з величиною

проковзування (рис. 3.13а). Ці шари характеризуються підвищенням напружень зсуву внаслідок зростання сил когезійної взаємодії при формуванні більш щільної напруженої структури. Згідно [12], поліморфізм органічних молекул мастильних матеріалів при їх структуризації на поверхні твердого тіла є джерелом формування граничних шарів по типу сітчастих (ретикулярних) гетерогенних структур. Під дією високих тисків у такому граничному шарі відбувається перебудова його молекулярної структури з утворенням більш щільних упаковок при зміні структури ланцюгових молекул внаслідок осьового стиснення ланцюгів за рахунок деформації тетраедричних кутів між атомами вуглецю.

Досліджувана мінеральна трансмісійна олива виготовлена на основі залишкової оливи, малов'язкого дистилляту і пакету поліфункціональних присадок. Таким чином, вона містить молекули різної стехіометричної будови. Під дією високих градієнтів швидкості зсуву, внаслідок механічної деструкції компонентів мастильного матеріалу, відбувається формування ретикулярних граничних шарів з багаторазовими перехресними зв'язками між активними центрами молекул. При цьому по товщині граничного шару утворюються єдині площини легкого ковзання, які орієнтовані в площині дії вектора дотичних напружень зсуву. Така утворена шарувата сітчаста структура служить своєрідним резервуаром для хаотичного розташування в ній вільних неактивних молекул. Наявність таких молекул характерно для фракцій насичених і неполярних сполук, присутніх в базовій основі при компаундуванні мінеральної трансмісійної оливи.

Таким чином, на активованих тертях контактних поверхнях утворюються впорядковані твердокристалічні ретикулярні структури, аналогічні каркасу дисперсної фази мастил, що містять різну кількість вільних молекул оливи, аналогічних дисперсійній складовій мастил. Причому, кількість інактивних вільних компонентів в таких структурах зменшується при зростанні ступеня впорядкування і щільності каркасу (рис.3.17). Відповідно, чим більше щільна упаковка твердокристалічної структури, тим вище її напруга зсуву, що і проявляється при максимальному проковзуванні (рис. 3.13).

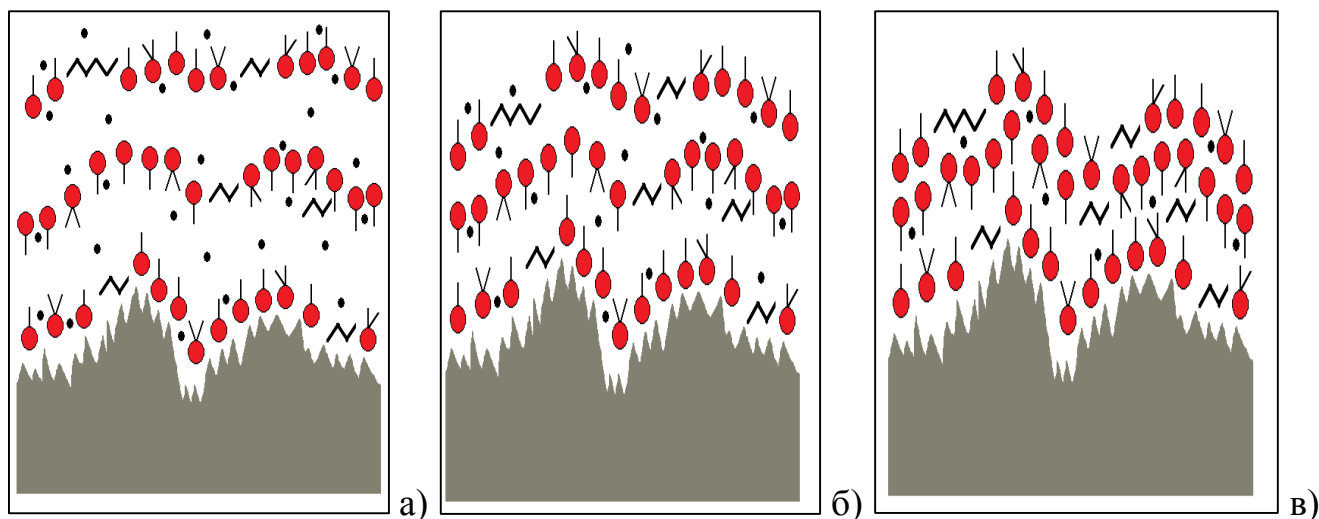


Рис.3.17. Структура граничної плівки для олив з поліфункціональними присадками: а – проковзування 10%; б – проковзування 20%; в – проковзування 40%.

Підтвердженням даного припущення служить кінетика зміни товщини граничних мастильних шарів після 400 циклу напрацювання, при примусовому видаленні вільного мастильного матеріалу з контактних поверхонь. Для контактних поверхонь з проковзуванням 10% товщина граничних мастильних шарів коливається від 0,5 до 3,2 мкм, реологічні характеристики хемосорбційних плівок залишаються незмінними. Стабільні показники градієнта швидкості зсуву і дотичного напруження свідчать про міцні адгезійні та когезійні зв'язки. Вектор дотичних напружень локалізується в граничному шарі мастильного матеріалу, міцнісні властивості якого досить ефективні, так як зберігається стабільна твердокристалічна структура граничних шарів. Дана структура граничних плівок забезпечує їх високі антифрикційні та протизношувальні властивості. До 500-го циклу напрацювання встановлена нормальна робота пар тертя, ознак схоплювання контактних поверхонь не спостерігалось.

Аналогічна закономірність встановлена і при ковзанні 20% до 450 циклу напрацювання. Потім відбувається різке збільшення товщини мастильного шару в 2,5 раз, напруг зсуву – в 1,5 раз, градієнта швидкості зсуву в 1,25 раз. Це пов'язано з руйнуванням когезійних і адгезійних зв'язків твердокристалічного граничного шару, що призводить до його розпорядкованості, оплавлення і переходу в смектичну фазу. Відбувається зниження ефективної в'язкості в контакті в 1,2 рази, різке збільшення

коефіцієнта тертя з 0,008 до 0,017 при наявності мастильного матеріалу в зоні тертя, в моменти порушення цілісності мастильного шару коефіцієнт тертя зростає до 0,032 і з'являються перші ознаки схоплювання контактних поверхонь при напрацюванні 490 циклів (рис. 3.15).

Більш інтенсивне руйнування граничних шарів і поява перших ознак схоплювання встановлені при 430 і 415 циклах напрацювання в умовах ковзання 30 і 40% відповідно при примусовому видаленні вільного мастильного матеріалу із зони тертя. Таким чином, міцнісні властивості граничних хемосорбційних шарів безпосередньо залежать від швидкості ковзання в контакті, збільшення якої створює високі градієнти швидкості зсуву, що призводять до механічної і теплової деструкції сформованих плівок мастильного матеріалу. Наприклад, в момент схоплювання контактних поверхонь при проковзуванні 40% градієнт швидкості зсуву зростає в 2 рази, напруга зсуву мастильних шарів – в 1,6 раз, а зменшення ефективної в'язкості в контакті встановлено з 180 до 112 Па·с. При цьому спостерігаються різкі коливання товщини мастильного шару, збільшення якої може досягати до 4 мкм, забезпечуючи низький коефіцієнт тертя на рівні 0,006, у порівнянні з 0,014 при мінімальній товщині мастильної плівки. Механізм цього процесу полягає в дезорієнтації граничних змащувальних шарів під дією зсувних напружень і приростом температури в контакті за рахунок збільшення швидкості ковзання, що призводить до плавлення твердокристалічного шару за рахунок механічного та температурного впливів. Мастильний матеріал знову набуває ньютонівських властивостей, стає рідким, слабшають когезійні і адгезійні сили взаємодії, збільшується об'ємна рідка фаза оливи в контакті, що призводить до короткочасного прояву гідродинамічного режиму мастильного дії, для якого характерні високі антифрикційні властивості мастильного матеріалу.

Отримані дані узгоджуються з основними положеннями моделей фазових переходів [436, 451] першого роду між твердими і рідкими станами. Згідно з постулатом цих моделей, різка зміна сили тертя відбувається в момент стрімкої зміни властивостей мастильного матеріалу при переході з твердокристалічної фази в рідку. Плавлення граничних шарів мастильного матеріалу може здійснюватися при

граничних значеннях зсувної деформації, при цьому мастило незалежно від температури буде знаходитися в рідкому стані [233, 402, 403]. У моменти порушення цілісності мастильного шару коефіцієнт тертя стрімко зростає до 0,038 і 0,047 при проковзуванні 30 і 40% відповідно (рис. 3.15).

Таким чином, різкі коливання коефіцієнта тертя при прояві перших ознак схоплювання контактних поверхонь обумовлені руйнуванням граничних змащувальних шарів. Ці процеси характеризуються проявом двох протилежних ефектів. Один з них обумовлює збільшення адгезійної складової коефіцієнта тертя внаслідок підвищення ступеня безпосереднього контакту з металом поверхонь. При другому відбувається зменшення коефіцієнта тертя і прояв в контакті короточасних гідродинамічних ефектів внаслідок локального плавлення граничних шарів.

Висновки до розділу 3.

1. Представлена методика припрацювання контактних поверхонь в нестационарних умовах роботи дає можливість більш достовірно та точно оцінити завершення етапу припрацювання за кінетикою зміни основних триботехнічних характеристик контакту при одночасній оцінці фізико-механічних властивостей поверхневих шарів матеріалу контактних поверхонь за кінетикою зміни питомої роботи тертя, антифрикційних характеристик контакту за кінетикою зміни моменту тертя та змащувальних і полімеризаційних властивостей мастильного матеріалу за кінетикою формування товщини мастильного шару.

2. Встановлено, що для оливи МС-20, яка характеризується найбільшою в'язкістю, підвищення контактного навантаження, незалежно від температури оливи, скорочує термін припрацювання контактних поверхонь, в середньому, в 1,2 рази. Основним критерієм ефективності антифрикційних властивостей є здатність оливи формувати хемосорбційні плівки з низьким опором зсуву на активованій поверхні металу. Із збільшенням температури до 70°C товщина полімерів тертя зменшується на 20%, проте напруга зсуву масляного шару залишається стабільною.

3. Олива І–40 характеризується прискоренням припрацювання при зростанні контактного навантаження лише при її об'ємній температурі 16⁰С. При збільшенні температури не встановлено адаптації адсорбційних шарів: товщина СОП зростає на 40%, але формування хемосорбційних плівок, стабільних до дії знакозмінних дотичних напруг, відбувається на 20% площі контакту.

4. Для оливи РАО–8 зростання тиску та температури призводить до дестабілізації триботехнічних характеристик контакту внаслідок руйнування хемосорбційних шарів в результаті їх інтенсивного стирання в режимі частих пусків-зупинок за рахунок збільшення в 4 рази градієнта швидкості зсуву, що призводить до дезорієнтації і десорбції молекул, зростання коефіцієнту тертя, при цьому ефективного припрацювання пар тертя не встановлено.

5. Максимальний момент тертя в пусковий період в умовах чистого кочення при підвищенні контактного навантаження з 100 до 140 МПа зростає в 1,46 разів, при подальшому збільшенні контактного навантаження до 170 МПа даний параметр зменшується в 1,72 рази, що обумовлено високою адаптаційною здатністю граничних адсорбційних шарів до динамічних умов навантаження.

6. Зростання проковзування до 20% призводить до появи високих градієнтів швидкості зсуву змащувальних шарів порядку $0,5 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$, що проявляється в зниженні антифрикційних властивостей трансмісійної оливи – момент тертя при σ_{max} 100, 140 та 170 МПа зростає в 1,2 : 1,3 : 1,9 разів відповідно.

7. За умов проковзування напруга зсуву мастильного матеріалу зростає аналогічно підвищенню моменту тертя – в 1,25 : 1,4 : 2,0 рази при σ_{max} 100, 140 та 170 МПа відповідно. Зростання напруг зсуву масляного шару при поступовому збільшенні контактного навантаження відбувається внаслідок утворення стійких когезійних зв'язків між структурними компонентами мастильного матеріалу.

8. Встановлено зниження енергонапруженості контакту при 170 МПа за рахунок ефективних демпфуючих властивостей граничних шарів мастильного матеріалу, який набуває в триботехнічному контакті властивостей неньютонівських рідин. Зменшення приросту та періодичності коливання питомої роботи тертя за умов проковзування при σ_{max} 170 МПа, в порівнянні з аналогічним параметром при 100 та

140 МПа, що свідчить про динамічну рівновагу та структурну пристосованість елементів трибоспряження і компонентів мастильного матеріалу до динамічних умов навантаження при роботі контактних поверхонь в режимі пуск – зупинка.

9. Стрімке зростання градієнту швидкості зсуву за наявності проковзування в контакті призводить до часткової дезорієнтації граничних адсорбованих шарів мастильного матеріалу, що проявляється в зниженні ефективної в'язкості в 25 : 16 : 12 разів при σ_{max} 100, 140 та 170 МПа відповідно. Встановлена чітка залежність ефективної в'язкості від градієнта швидкості зсуву – мастильний матеріал набуває неньютонівських властивостей.

10. Коливальний процес зміни питомої роботи тертя з великим амплітудним діапазоном (3000 – 10000 Дж\мм²) при 100 та 140 МПа свідчить про періодичний характер процесу утворення та руйнування вторинних структур. Мікротвердість контактних поверхонь знижується на 700 МПа, інтенсивність зношування становить $I=10^{-8}$. Формування вторинних структур обумовлює зміцнення поверхневих шарів металу, мікротвердість зростає на 550 МПа, в порівнянні з вихідною мікротвердістю сталі, а інтенсивність зношування зменшується до $I=10^{-9}$.

11. Встановлено зниження мастильної здатності мінеральної трансмісійної оливи при збільшенні проковзування контактних поверхонь від 3 до 40% при переході трибосистеми в екстремальні умови мащення, що обумовлено зменшенням товщини мастильного шару в 1,43 рази при переході трибосистеми в більш жорсткі режими роботи, при яких домінують напівсухий і граничний режими мащення.

12. В умовах чистого кочення високі антифрикційні властивості контакту обумовлені локалізацією дотичних напружень зсуву в рідкій фазі змащувальної плівки. В умовах кочення з проковзуванням вектор дотичних напружень локалізується в граничних структурованих хемосорбційних плівках, що знижує антифрикційні характеристики контакту.

13. Граничні шари фізичної природи, сформовані на контактних поверхнях з проковзуванням 3%, характеризуються ідентичністю реологічних властивостей з об'ємною рідкою фазою мастильного матеріалу. Такі структури чинять сильну

пластифікуючу дію на поверхневі шари металу, що проявляється в зниженні адгезійної складової коефіцієнту тертя.

14. Збільшення ступеня проковзування з 10 до 40% обумовлює створення високих градієнтів швидкості зсуву змащувальних шарів, підвищує активацію контактних поверхонь. Дані фактори створюють передумови для формування на поверхнях тертя хемосорбційних плівок, які представляють собою впорядковані твердокристалічні ретикулярні структури шаруватого типу.

15. Збільшення проковзування між контактними поверхнями призводить до прискорення періоду прояву перших ознак схоплювання, що проявляється в зростанні адгезійної складової коефіцієнта тертя при десорбції граничних шарів. Локально в екстремальних умовах проявляється коливальний процес зниження коефіцієнту тертя за рахунок короткочасних гідродинамічних ефектів внаслідок локального плавлення граничних шарів.

РОЗДІЛ 4

МЕХАНІЗМИ УТВОРЕННЯ ВТОРИННИХ СТРУКТУР ПРИ СТРУКТУРНІЙ ПРИСТОСОВАНOSTІ ТРИБОЕЛЕМЕНТІВ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

4.1. Структурно – енергетичні показники трибоконтакту в процесі утворення дисипативних структур.

Велика кількість фізико–хімічних процесів, що протікають на контактних поверхнях при терті, ускладнює вибір підходу щодо опису та аналізу процесу зношування елементів трибоспряжень. Зношування деталей і довговічність трибосистеми при сталому режимі тертя визначається безперервною моделлю зношування, яка базується на врахуванні кінетичних закономірностей зносу, що представляють собою тимчасові функції [291]. Процеси самоорганізації дисипативних структур можуть відбуватися за різними напрямками, визначити домінуючий при цьому представляє певні труднощі, особливо при несталих режимах роботи.

4.1.1. Напрямки структурної пристосованості елементів трибоспряжень при терті.

Відмінною особливістю експлуатації багатьох трибомеханічних систем є несталі режими роботи, що становлять в окремих випадках 60 – 90% часу їх експлуатації [120]. Головними фундаментальними завданнями при підвищенні довговічності трибоспряжень є встановлення діапазону навантажувально–швидкісних і температурних параметрів експлуатації пар тертя, вибір зносостійких матеріалів і ефективного мастильного матеріалу. При цьому, протизношувальні та антифрикційні властивості мастильного матеріалу необхідно розглядати в зв'язку з особливостями структури і властивостей тонкого, модифікованого тертям, поверхневого шару металу [245]. Встановлено, що для поверхонь, які піддаються фрикційному впливу, характерні особливості посилення адсорбційно–дифузійних

процесів і аномальні ефекти різкого підвищення хімічної активності матеріалів [202]. В ході змін, протікаючих на активованих тертях контактних поверхнях, відбувається формування тонких плівок вторинних структур [140], змащувальних адсорбційних шарів різної природи [12], які в результаті структурної пристосованості характеризуються більшою зносостійкістю, в порівнянні з вихідним матеріалом.

Згідно [226], для досягнення максимальної зносостійкості при структурній пристосованості елементів трибоспряжень необхідно використовувати засоби зменшення активації поверхневих шарів металу, зниження роботи тертя, регулювання пасивації і управління температурою. Розробка методів оцінки ефективності триботехнічних характеристик контакту в нестационарних умовах тертя є перспективним напрямком при визначенні діапазону працездатності матеріалів контактних поверхонь і мастильного матеріалу при їх експлуатації в динамічних умовах навантаження.

Метою роботи було визначення закономірності впливу кінетики формування граничних мастильних шарів на активованих тертях контактних поверхнях і збільшення питомої роботи тертя на зносостійкість сталі в режимі частих пусків–зупинок.

В якості зразків використовувались ролики зі сталі 40X (HRC = 38, Ra = 0,32 мкм), і сталі ШХ15 (HRC = 60, Ra = 0,32 мкм). Мастильний матеріал – трансмісійна мінеральна всесезонна олива ТАД–17і (API – GL–5).

Дослідження мастильних властивостей оливи проходило в режимі пуск–зупинка за наступною схемою: розгін в умовах чистого кочення контактних поверхонь (12,5с) – робота в умовах 20% проковзування (4 с) – гальмування в умовах чистого кочення контактних поверхонь (12,5с). Контактне навантаження по Герцу (σ_{\max}) склало 250 МПа, загальна кількість циклів напрацювання – 200, максимальна кількість обертів становила 1000 і 800 об/хв відповідно для випереджаючої і відстаючої поверхонь.

4.1.2. Оцінка режиму мастильної дії з урахуванням гідродинамічної та негідродинамічної складових товщини мастильного шару.

При дослідженні ефективності мастильної дії трансмісійної оливи ТАД-17і в початковий пусковий період циклу, в умовах чистого кочення встановлена висока несуча здатність оливи для всіх видів досліджуваних контактних поверхонь. Слід зазначити, що в початковий період пуску, який відповідає 0 – 2 с, страгування контактних поверхонь в 200 циклах напрацювання для сталі 40Х, відповідно до розрахункового критерію λ , відбувається в умовах напівсухого (5% циклів), граничного (20% циклів), еластогідродинамічного (30% циклів) і гідродинамічного (45% циклів) режимів мастильної дії, а для більш твердої сталі ШХ–15 кількість пусків, що відбуваються в умовах напівсухого і граничного режимів мастильної дії збільшується, в середньому, на 20%. Внаслідок активації поверхневих шарів металу в нестационарних умовах роботи контактних поверхонь відбувається поступове формування на них граничних адсорбційних шарів мастильного матеріалу, які проявляють високу адаптаційну здатність – товщина граничних шарів становить від 0,2 до 4 мкм. Аналіз мастильної здатності оливи при пусковому максимальному моменті тертя показав, що сформована товщина масляного шару в контакті має подвійну природу – граничну та гідродинамічну. Приріст гідродинамічної складової товщини мастильного шару при збільшенні сумарної швидкості кочення до 1,48 м/с, розрахований як різниця вимірюваної товщини мастильного шару при даній швидкості контактних поверхонь і товщини граничного шару, вимірюного на зупинці, становить 1 – 3 мкм, що при подальшому збільшенні швидкості кочення забезпечує реалізацію гідродинамічного режиму мастильної дії (рис. 4.1).

В даних умовах експерименту чисте кочення контактних поверхонь змінювалося на кочення з проковзуванням, максимальні значення якого становили 20% при швидкості кочення 4,8 м/с.

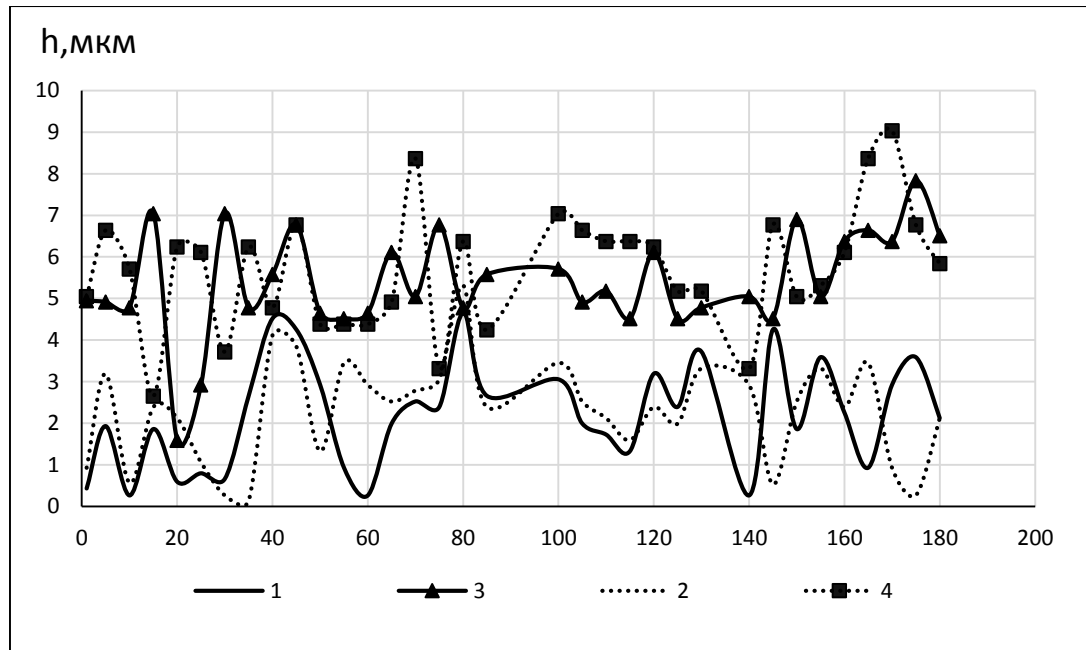


Рис.4.1. Зміна загальної товщини мастильного шару в контакті при сумарній швидкості кочення 1,48 м/с і товщини граничних адсорбційних шарів: 1 – товщина граничних шарів оливи на сталі ШХ–15; 2 – товщина граничних шарів оливи на сталі 40Х; 3 – загальна товщина плівки для сталі ШХ–15; 4 – загальна товщина плівки для сталі 40Х.

При такому режимі роботи досліджуваній мастильний матеріал проявляє ефективну змащувальну дію, реалізується гідродинамічний режим мащення, при цьому товщина мастильного шару становить 4 – 8 мкм, що відповідає аналогічним значенням даного параметра в умовах чистого кочення. Згідно з результатами, отриманими в роботі [85], контактно–гідродинамічний критерій $P_p/\mu V_{\Sigma k}$, що характеризує несучу здатність контакту, позитивно оцінює збільшення швидкості кочення на приріст товщини мастильного шару в контакті, проте збільшення швидкості ковзання при наявності проковзування обумовлює зниження ефективності мащення. Аналогічні результати отримані і в наших умовах експерименту – стабілізація товщини мастильного шару в контакті, відсутність кореляційного впливу на даний параметр швидкості кочення, є наслідком появи в контакті високих градієнтів швидкості зсуву масляного шару, які досягають значень $6,23 \cdot 10^4$ – $1,84 \cdot 10^5 \text{c}^{-1}$ при збільшенні величини проковзування.

4.1.3. Вплив проковзування на реологічні і антифрикційні властивості контакту.

Наявність проковзування в контакті істотно змінює реологічні властивості досліджуваної мінеральної трансмісійної оливи. Якщо в умовах чистого кочення ефективна в'язкість оливи ($\eta_{\text{еф}}$), незалежно від типу матеріалу контактних поверхонь, становила, в середньому, 2000 Па·с, то при високих градієнтах швидкості зсуву зниження цього показника встановлено у 10 разів при змащуванні сталі 40Х і в 20 разів при використанні роликів зі сталі ШХ–15 (рис. 4.2).

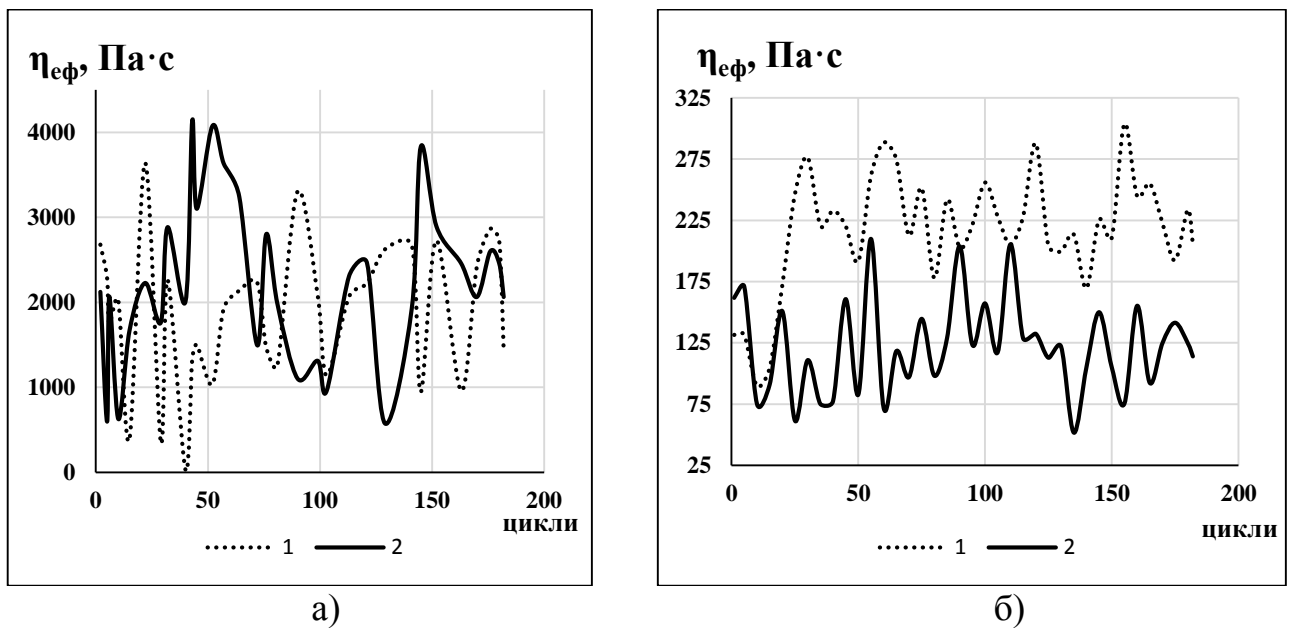
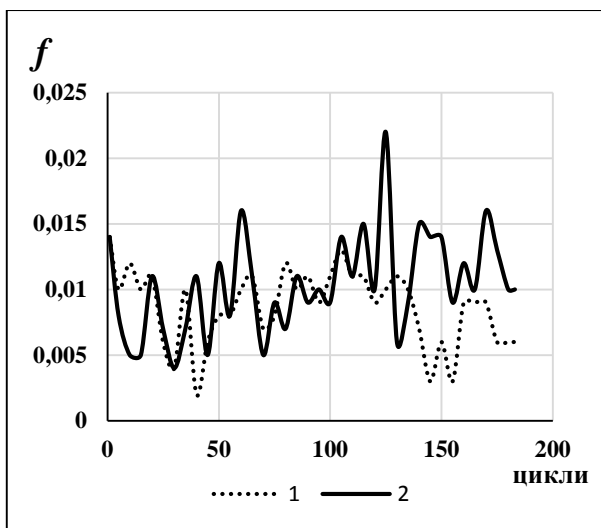


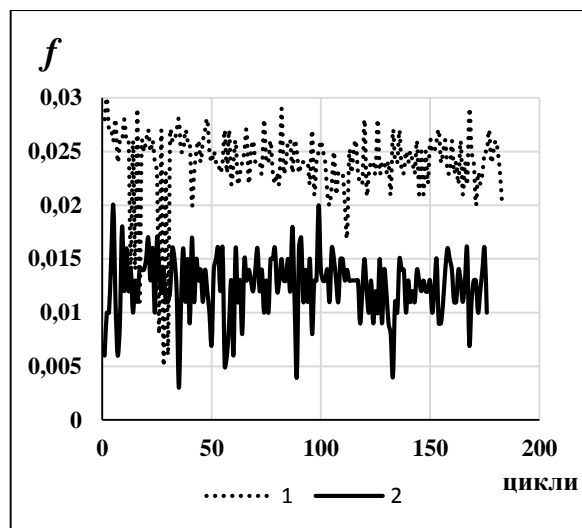
Рис. 4.2. Кінетика зміни ефективної в'язкості в контакті в умовах чистого кочення (а) і кочення з проковзуванням (б): 1 – при змащуванні сталі 40Х, 2 – при змащуванні сталі ШХ–15.

Залежність $\eta_{\text{еф}}$ від градієнта швидкості зсуву свідчить про надбання мастильним матеріалом неньютонівських властивостей в контакті, що також підтверджується і іншими авторами [133, 205, 207, 445].

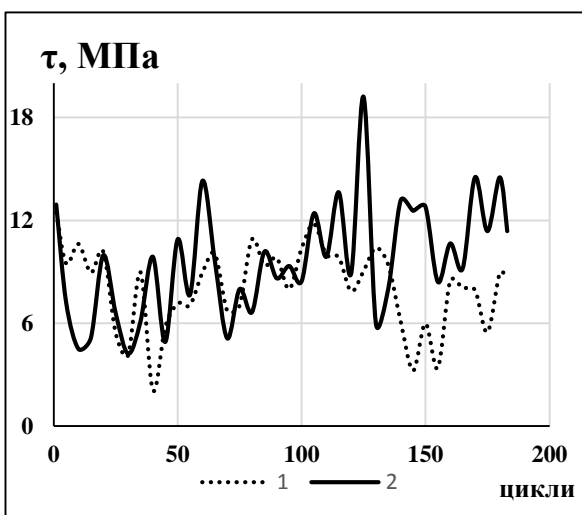
Умови чистого кочення сприяють локалізації напружень зсуву безпосередньо в змащувальному шарі, де сила тертя менше, при цьому високов'язка олива ТАД–17і проявляє високі антифрикційні властивості – коефіцієнт тертя не залежить від твердості досліджуваних поверхонь і становить, в середньому, 0,01 (рис.4.3).



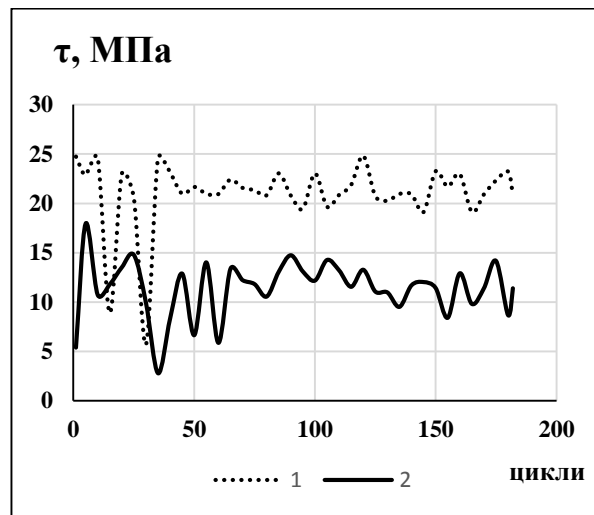
а)



б)



в)



г)

Рис. 4.3. Динаміка коефіцієнту тертя (а, б) і напружень зсуву мастильного шару (в, г) в нестаціонарних умовах роботи: 1 – при змащуванні сталі 40Х, 2 – при змащуванні сталі ШХ–15.

Однак, при високих градієнтах швидкості зсуву по товщині утвореного мастильного шару в умовах проковзування, напруга зсуву змащувальних шарів зростає в 2,4 рази при використанні більш м'якого матеріалу сталі 40Х, що призводить і до кореляційного підвищення коефіцієнта тертя, а при змащуванні поверхонь зі сталі ШХ–15 змін напруги зсуву змащувального шару і коефіцієнта тертя не встановлено (рис. 4.3).

4.1.4. Вплив структури сталі на кінетику зміни енергетичного параметра при терті.

Ми припускаємо, що різні зсувні напруження в змащувальному шарі при використанні сталей 40X і ШХ–15 обумовлені різною природою граничних змащувальних шарів, що утворюються з компонентів мастильного матеріалу і беруть участь у формуванні вторинних структур на активованих тертям контактних поверхнях. Це припущення ґрунтується на аналізі зміни енергетичного параметра – питомої роботи тертя ($A_{тр}$) в контакті. Згідно Костецького, питома робота тертя є комплексним фізичним критерієм, кінетика зміни якої всебічно характеризує процес тертя і зношування, а також поверхневу міцність матеріалів [226]. У початковий момент страгування контактних поверхонь для сталі 40X встановлені різкі піки приросту питомої роботи тертя в діапазоні 3 – 35 Дж/мм² в 95% циклів при напрацюванні, а для сталі ШХ–15 при аналогічних умовах експерименту приріст даного параметра становить 1 – 30 Дж/мм² в 20% циклів (рис. 4.4а).

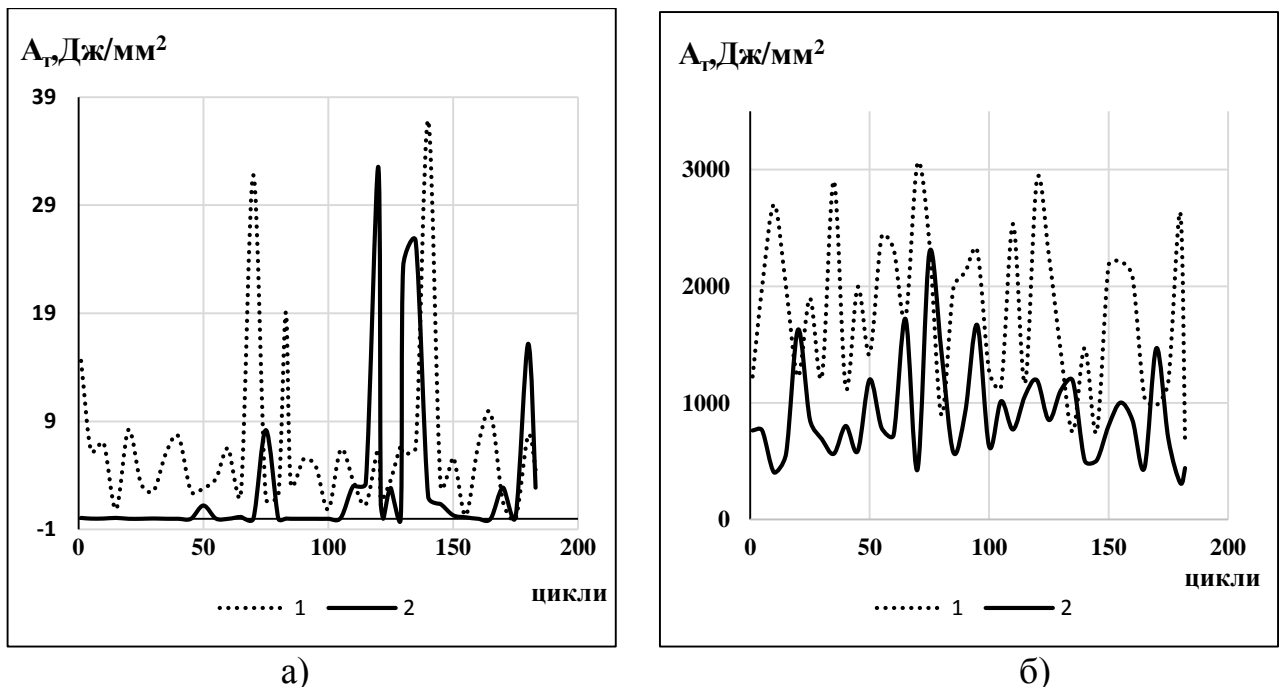


Рис. 4.4. Зміна питомої роботи тертя в контакті в період пуску при чистому коченні (а) та при 20% проковзуванні контактних поверхонь (б):

1 – для сталі 40X; 2 – для сталі ШХ–15.

Збільшення швидкості кочення до 4,8 м/с при наявності проковзування, де максимальна швидкість ковзання становить 0,65 м/с, призводить до різкого зростання енергонапруженості контакту: $A_{тр}$ знаходиться в діапазонах 1000 – 2800 Дж/мм² та 500 – 2000 Дж/мм² для сталей 40X і ШХ–15 відповідно (рис. 4.4б).

Такі істотні відмінності в кінетиці зміни енергетичного параметра для досліджуваних марок сталей обумовлені їх різними структурно–фазовими станами після загартування та відпуску. Для сталі 40X характерна структура сорбіту. Згідно [268], при терті такої сталі в приповерхневому шарі через низький потенційний бар'єр зсувної деформації формується текстурована структура. В наших умовах експерименту фізико–хімічна активність активованого тертям металу зростає (кінетика зміни питомої роботи тертя в початковий період напрацювання), що призводить до підвищеної адсорбційної здатності і формування на контактних поверхнях хемосорбційних граничних шарів, які характеризуються підвищеною напругою зсуву внаслідок впливу на них твердої фази активованого металу, що проявляється в режимі проковзування. Початкова стадія формування граничних шарів призводить до інтенсифікації зносу і адсорбційної пластифікації поверхневих шарів металу, що проявляється в їх знеміцненні – мікротвердість (ΔH_{100}) випереджаючої і відстаючої поверхонь зменшується на 260 і 490 МПа відповідно (рис. 4.5).

Однак, після напрацювання 100 циклів відбувається поступове зміцнення поверхневих шарів сталі 40X, що також збігається з результатами, отриманими в роботі [268]: основним видом зміцнення сорбітної структури в поверхневому шарі є наклеп.

Для сталі ШХ–15, що має після загартування і низькотемпературного відпуску структуру дрібногочастого мартенситу з рівномірно розподіленими надлишковими карбідами, характерна висока зносостійкість контактних поверхонь – знос відстаючої і випереджаючої поверхонь в 3,34 і 2,23 разів менше, в порівнянні з аналогічними показниками, встановленими для сталі 40X (рис. 4.5).

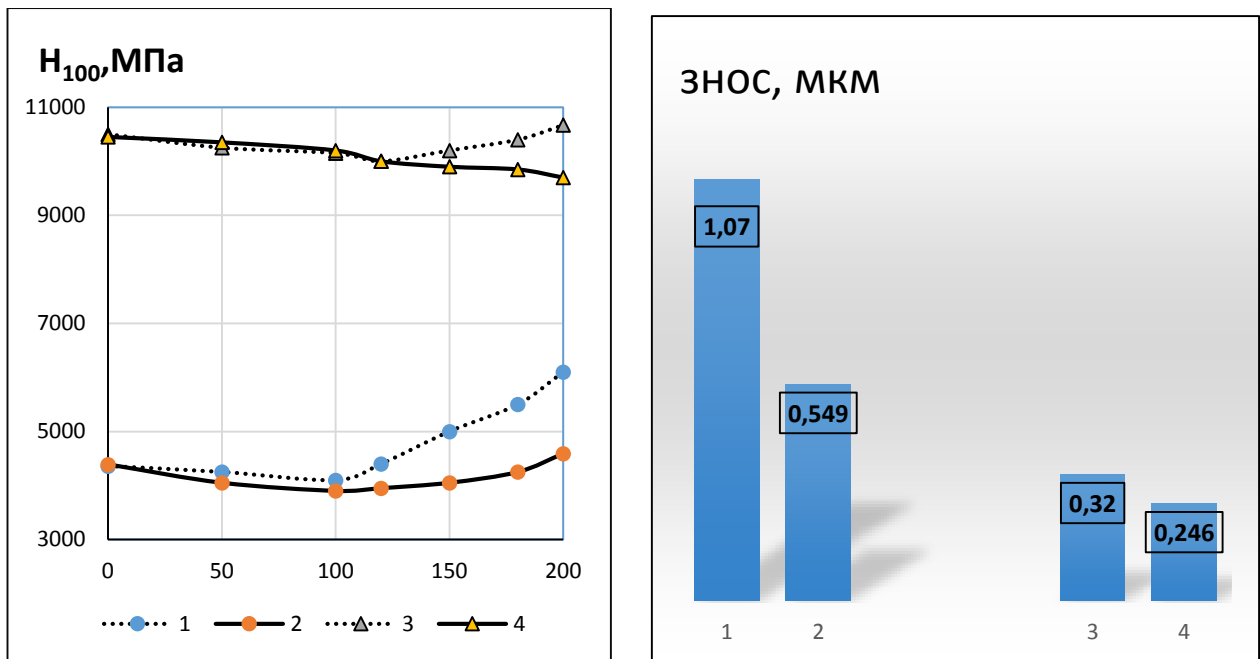


Рис. 4.5. Зміна мікротвердості поверхневих шарів металу і знос контактних поверхонь при напрацюванні 200 циклів: 1 – відстаюча поверхня, 40Х; 2 – випереджаюча поверхня, 40Х; 3 – відстаюча поверхня, ШХ–15; 4 – випереджаюча поверхня, ШХ–15.

Згідно [153] дрібнодисперсні карбіди сприятливо впливають на релаксаційну здатність металу. У наших умовах експерименту, при нестационарній роботі контактних поверхонь приріст питомої роботи тертя характеризується низькими показниками, зменшується вплив твердої фази на сформовані граничні шари мастильного матеріалу, що і проявляється у зниженні напруги зсуву змащувального шару в 2,3 рази при проковзуванні, в порівнянні з τ граничних шарів, утворених на сталі 40Х.

Слід зазначити, що ефект адсорбційного пластифікування і зниження міцності поверхневих шарів металу для сталі ШХ–15 проявляється при більш тривалих циклах напрацювання – для відстаючої поверхні знеміцнення поверхневих шарів металу склало $\Delta H_{100} = 800$ МПа без подальшого зміцнення, а для випереджаючої поверхні знеміцнення склало $\Delta H_{100} = 500$ МПа до 120 циклу, при подальшому напрацюванні контактні поверхні характеризуються поступовим зміцненням.

З наведеного аналізу змащувальних, антифрикційних і реологічних властивостей триботехнічного контакту випливає, що на структурну пристосованість контактних поверхонь в нестационарному режимі роботи істотно впливає активація поверхневих шарів металу на формування граничних змащувальних шарів оливою ТАД–17і. Причому, для матеріалу з меншою твердістю характерно формування граничних плівок з великими показниками ефективної в'язкості в контакті і напруг зсуву масляного шару внаслідок їх дезорієнтації і постійного оновлення на поверхні металу, яка стирається при зносі. Підвищення твердості сталі внаслідок менш інтенсивної її активації при терті сприяє формуванню стабільних граничних адсорбційних шарів, які характеризуються більш низькими напругами зсуву і кращими антифрикційними властивостями.

4.2. Оцінка вплив змінного градієнта швидкості зсуву на реологічні і протизношувальні властивості контакту.

Причиною нерівномірного зносу евольвентних зубчастих передач є мінливість умов тертя для всіх точок контактуючих поверхонь вздовж евольвентного профілю. Поверхневі шари в процесі експлуатації зубчастих коліс руйнуються в результаті циклічної дії напружень вигину і зношування від проковзування контактуючих поверхонь по лінії зачеплення до вершини (кореня) зуба [124]. В умовах тертя без мастильного матеріалу, в силу особливостей складного напруженого стану поверхневих шарів металу при одночасній дії нормальних і тангенціальних напружень, деформація поверхневих шарів йде переважно в напрямку дії тангенціальних сил, що призводить до текстурування поверхневих шарів, зміцнення і наклепу [57, 236]. При використанні в якості мастильного матеріалу для середньо– і високонавантажених зубчастих передач трансмісійних олив з активними компонентами протизношувальних і протизадирних присадок, істотно змінюються механо–хімічні властивості трибоконтракту. Адсорбована плівка змінює поверхневу енергію основного матеріалу. Первинний процес пластифікування матеріалу при адсорбції поверхнево–активних речовин закінчується стадією значного зміцнення

поверхневого шару металу [71, 132, 194]. Процес зміцнення поверхневого шару елементів трибоспряження в активному середовищі мастильного матеріалу обумовлює надбанням такими структурами екрануючої дії щодо поширення всередину металу пластичної деформації [448]. В роботі [182] встановлено взаємозв'язок між переходом пластичної деформації, що обумовлює інтенсифікацію зносу, до пружної, яка характеризується мінімальним зносом, і етапами формування захисних міцних граничних змащувальних шарів.

Досвід експлуатації зубчастих передач показує, що контактна витривалість поверхонь зубів залежить від товщини мастильних шарів, які, в свою чергу, впливають на сили тертя і напружений стан в контакті [100]. Особливі механічні та реологічні властивості граничних шарів свідчать про формування в результаті структурної пристосованості квазікристалічного твердого тіла, що володіє пружними і неньютонівськими властивостями [257, 463]. У процесі тертя, під дією нормальних і тангенціальних зусиль, важливо встановити закономірності зміни властивостей граничних шарів, що впливають на поверхню металу, в плані прогнозування зносостійкості контактних поверхонь.

4.2.1. Вплив ступеня проковзування контактних поверхонь на змащувальні і антифрикційні властивості оливи.

Метою досліджень було визначення впливу ступеня проковзування поверхонь на триботехнічні характеристики контакту в нестационарних умовах тертя.

В якості зразків використовувалися ролики зі сталі 45 (HRC 38, Ra 0,35мкм). Змащування контактних поверхонь здійснювалося зануренням нижнього ролика в ванночку з оливою. В якості мастильного матеріалу використовувалась мінеральна трансмісійна олива для механічних коробок передач і головних передач легкових і вантажних автомобілів Okko GL-4 80w/90. Об'ємна температура оливи – 20⁰С.

У початковий період запуску циклу, який відбувається в умовах чистого кочення, досліджувана олива характеризується ефективними змащувальними властивостями – сформована товщина мастильної плівки в перші 0 – 2с становить 3 – 6 мкм.

Загальна кількість циклів в кожному експерименті склала 500. Максимальна частота обертів для випереджаючої поверхні становила 1000 об/хв. У роботі імітувалося проковзування 3, 10, 20, 30 і 40%. Максимальне контактне напруження по Герцу – 250 МПа.

Згідно з розрахунковим критерієм режиму мастильного дії λ , в контакті реалізується гідродинамічний режим мащення (рис. 4.6), який забезпечує надійне розділення контактних поверхонь при страгуванні. Це підтверджується низькими показниками коефіцієнта тертя, які складають 0,005 – 0,01 (рис. 4.7).

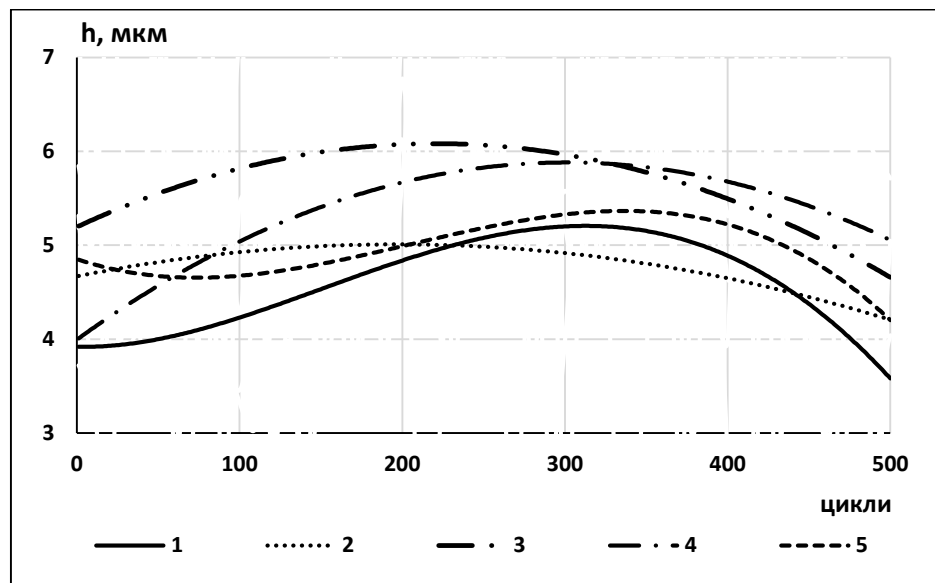


Рис. 4.6. Кінетика зміни товщини мастильного шару при напрацюванні в початковий період запуску для пар тертя з подальшим проковзуванням 3% (1), 10% (2), 20% (3), 30% (4), 40% (5).

В період припрацювання, тривалістю, в середньому 120 циклів, коефіцієнт тертя для контактних поверхонь, що працюють з різним ступенем проковзування, стабілізується на рівні 0,005 – 0,007. Однак, при подальшому напрацюванні спостерігається погіршення антифрикційних властивостей, проявляється підвищенням коефіцієнта тертя в 1,8 – 2 рази для поверхонь, які працюють на стаціонарній ділянці циклу з мінімальним проковзуванням 3% і максимальним проковзуванням 40%.

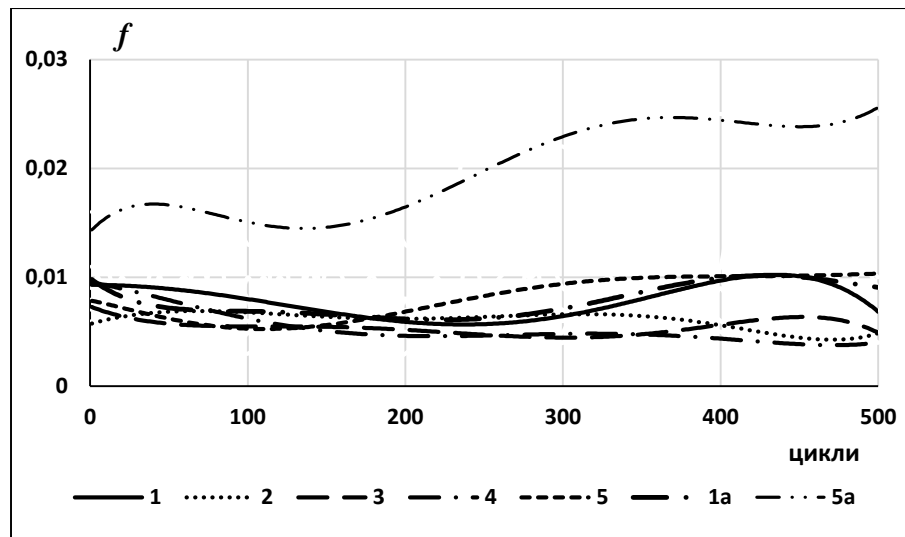


Рис. 4.7. Зміна коефіцієнта тертя (f) при пуску на ділянці I (для пар тертя з подальшим проковзуванням 3% (1), 10% (2), 20% (3), 30% (4), 40% (5)) і в період стаціонарної роботи на ділянці II (1а – проковзування 3%, 5а – проковзування 40%).

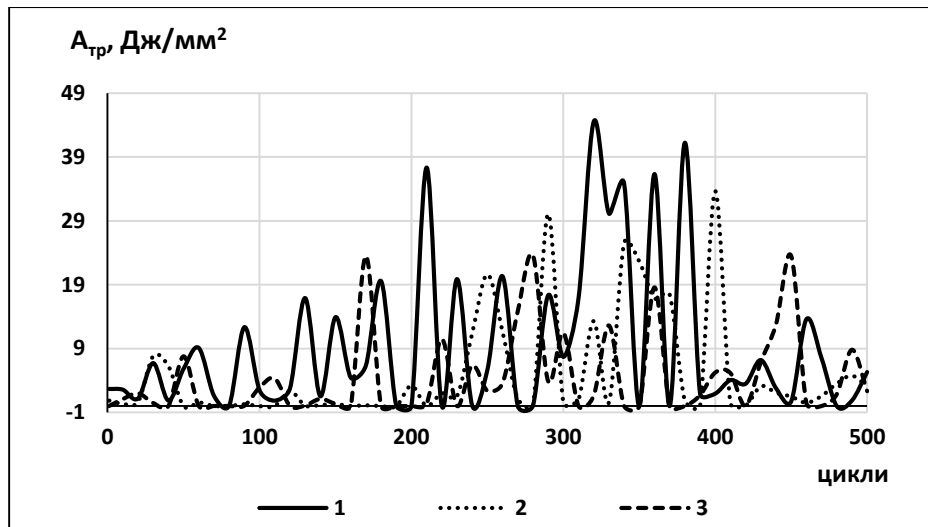
Зміна коефіцієнту тертя в контактї за наявності розділяючої змащувальної плівки характеризує етапи утворення дисипативних структур в процесі структурної пристосованості елементів трибоспряження. В процесі припрацювання відбувається структурна пристосовуваність контактуючих поверхонь і мастильного матеріалу, внаслідок чого реалізується динамічна рівновага процесів утворення і руйнування вторинних структур, граничних плівок мастильного матеріалу.

4.2.2. Механізми структурної пристосовуваності з позицій кінетики зміни енергетичних і реологічних властивостей контакту.

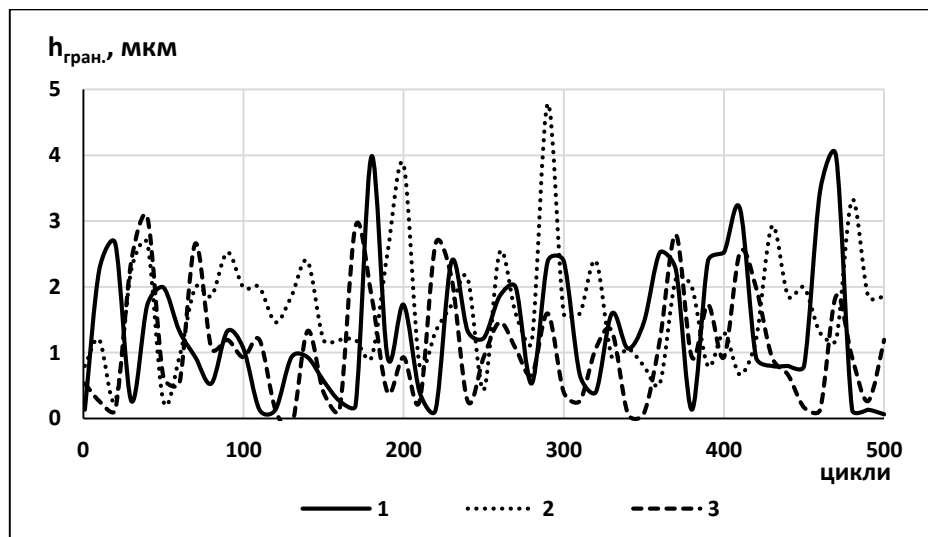
Структурна пристосованість пов'язана з утворенням стійкої дисипативної структури перенесення енергії і речовини зовнішнього середовища в систему тертя. Тому встановлення взаємозв'язку між зміною енергетичних і триботехнічних характеристик контакту є важливим етапом, на якому можливе прогнозування експлуатаційних властивостей досліджуваних матеріалів.

Аналіз зміни питомої роботи тертя в контактї в період запуску в умовах кочення виявив циклічність зростання цього показника, який залежить від кінетики утворення

і деструкції граничних мастильних шарів, утворених на активованих тертям контактних поверхнях (рис. 4.8).



а)



б)

Рис. 4.8. Кінетика зміни питомої роботи тертя (а) в початковий момент циклу і товщини граничних мастильних шарів (б) на зупинці для поверхонь при проковзуванні 3% (1), 20% (2), 40% (3).

Слід зазначити, що збільшення питомої роботи тертя, на 90% збігається з початком зростання товщини граничних змащувальних плівок. Наприклад, з представлених залежностей на рис. 4.8, характерний найменший приріст питомої роботи тертя в період запуску, який становить від 5 до 30 Дж/мм² в 20% циклів для пар тертя, що працюють при подальшому проковзуванні 20%. Саме для цих контактних поверхонь встановлена найбільша товщина граничних змащувальних

шарів, що складає від 0,5 до 3 мкм, кінетику формування якої в залежності від N циклів напрацювання, можна представити рівнянням поліноміальної регресії 4-го ступеня:

$$h_{\text{гран.}} = 1,55 + 0,0111 \cdot N - 3 \cdot 10^{-5} N^2 - 10 \cdot N^3 + 9 \cdot 10^{-11} N^4.$$

Для контактних поверхонь, що працюють на етапі стаціонарної роботи циклу з 40%-ним проковзуванням, в період запуску встановлено аналогічне збільшення питомої роботи тертя, однак зростання цього показника характерно для 70% циклів напрацювання. Підвищення енергетичних показників в даному випадку обумовлено частим стиранням граничних змащувальних плівок, що призводить до безпосереднього металевих контакту пар тертя на зупинці. Для даних контактних поверхонь встановлені найменші значення товщини сформованих граничних плівок, а кінетика їх формування при напрацюванні описується наступним рівнянням поліноміальної регресії:

$$h_{\text{гран.}} = 0,8061 + 0,0124 \cdot N - 0,0001 \cdot N^2 + 4 \cdot 10^{-7} \cdot N^3 - 4 \cdot 10^{-10} N^4.$$

Слід зазначити експериментально встановлене максимальне збільшення питомої роботи тертя в початковий період запуску контактних поверхонь, які працюють з подальшим 3%-ним проковзуванням. Показники $A_{\text{тр}}$ складають від 7 до 40 Дж/мм² в 85% циклів напрацювання. Безпосередній металевий контакт поверхонь внаслідок руйнування граничних шарів на стоянці виявлено в 20% циклів. Товщина сформованих граничних плівок коливається від 0,03 до 3 мкм, а динаміка їх утворення представлена наступним рівнянням:

$$h_{\text{гран.}} = 1,468 - 0,0053 \cdot N - 5 \cdot 10^{-6} \cdot N^2 + 2 \cdot 10^{-7} \cdot N^3 - 3 \cdot 10^{-10} \cdot N^4.$$

Ми вважаємо, що нестаціонарність процесів тертя і періодична зміна швидкісного параметра істотно впливають на прояв змащувальної ефективності досліджуваної трансмісійної оливи, оскільки в контактні відбувається постійна циклічна зміна режимів мащення. У період зупинки відбувається видавлювання мастильного матеріалу із зони контакту під дією прикладеного навантаження, і ефективність щодо розділення контактних поверхонь обумовлена механічними (реологічними) і поверхневими (адсорбційними) властивостями граничних змащувальних шарів. Збільшення швидкісного параметра забезпечує приріст

товщини мастильного шару і формування гідродинамічної складової мастильної плівки. Подальше зменшення швидкості кочення знову призводить до ослаблення впливу гідродинамічних ефектів і стоншування мастильного шару.

Найбільшою мірою схильні до руйнування граничні шари, сформовані на контактних поверхнях, що працюють в умовах мінімального і максимального проковзування. При цьому, основним фактором оцінки стійкості граничної плівки до динамічних умов навантаження є встановлення природи сформованого полімолекулярного граничного шару. На контактних поверхнях з проковзуванням до 3% формуються переважно граничні шари за рахунок фізичної адсорбції компонентів мастильних матеріалів, яка характеризується наявністю слабкої Ван–дер–Ваальсової сили взаємодії. Такі шари нестабільні, схильні до десорбції і дезорієнтації під дією дотичних зсувних напружень. Внаслідок цього відбувається зростання коефіцієнта тертя в 2 рази з 120–го циклу напруження і сильні коливання ефективної в'язкості в контакті (від 400 до 3500 Па·с) в період пуску (рис. 4.7, 4.9).

Різне збільшення η_{ef} свідчить про структурування компонентів мастильного матеріалу на поверхні металу при формуванні граничного мастильного шару. У той же час, при 3%-му проковзуванні на стаціонарній ділянці роботи збільшення градієнта швидкості зсуву до $(0,6 - 3,5) \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ обумовлює зниження ефективної в'язкості в контакті до 300 – 700 Па·с, незважаючи на 25%-ве підвищення товщини мастильного шару.

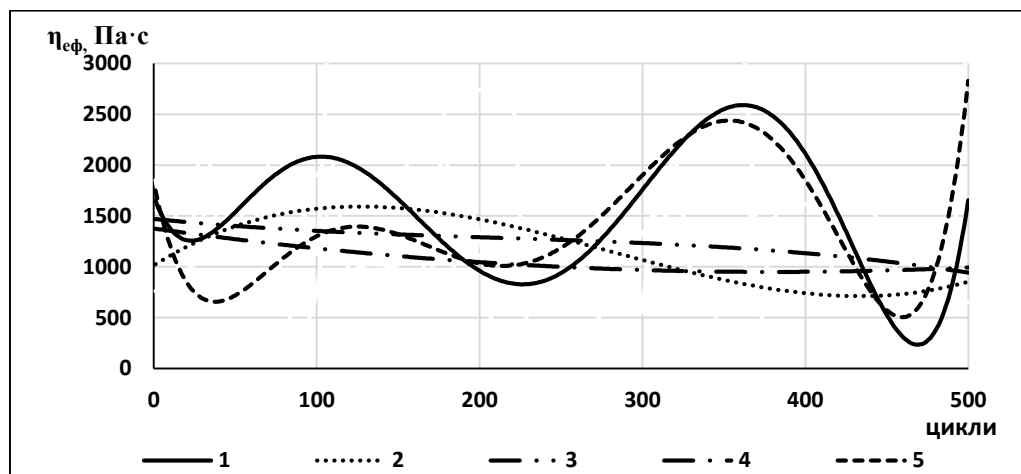


Рис. 4.9. Ефективна в'язкість трансмісійної оливи в контакті в пусковий період при роботі пар тертя з подальшим проковзуванням 3% (1), 10% (2), 20% (3), 30% (4), 40% (5).

Напруження зсуву масляної плівки зі збільшенням її товщини локалізуються в об'ємній фазі, де вплив силового поля активованої поверхні тертя значно послаблюється, отже, прогнозується зменшення τ . Однак, аналіз дотичних напружень зсуву змащувальних шарів в період пуску, при мінімальному збільшенні гідродинамічної складової товщини мастильного шару в контакт, і в період стаціонарної роботи, при повністю сформованому змащувальному шарі, показав, що зміни даного параметра не відбувається, розрахункові показники τ знаходяться в межах 5 – 8МПа (рис. 4.10).

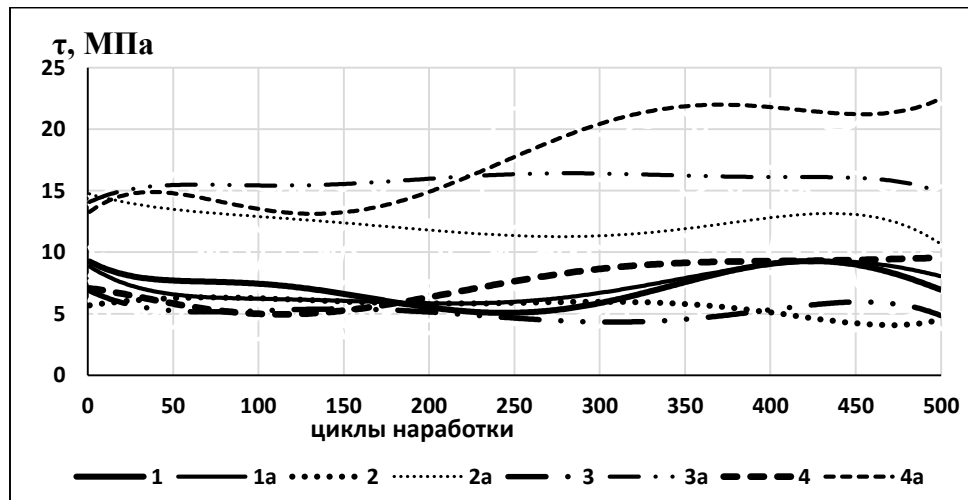


Рис. 4.10. Зміна напружень зсуву змащувальних шарів на ділянці I (1, 2, 3, 4) і на ділянці II циклу при роботі пар тертя з проковзуванням 3% (1а), 10% (2а), 20% (3а), 40% (4а).

Отже, опір полімолекулярних граничних шарів дотичним напруженням при зростанні градієнта швидкості зсуву мінімальний, оскільки товщина граничної плівки становить в різних циклах напрацювання від 0,5 до 50% загальної товщини несучого змащувального шару на стаціонарній ділянці роботи. Таким чином, встановлена ідентичність напружень зсуву граничних шарів і об'ємної фази оливи дозволяє стверджувати про збереження мастильним матеріалом властивостей ньютонівської рідини завдяки утворенню слабких адгезійних сил взаємодії фізичної природи між молекулами мастильного матеріалу і металевою поверхнею.

При збільшенні ступеня проковзування на стаціонарній ділянці роботи від 10 до 30% встановлено інший механізм формування і руйнування граничних

змащувальних шарів. На активованих тертях контактних поверхнях відбувається формування граничних шарів, які характеризуються наявністю міцних хімічних зв'язків між компонентами мастильного матеріалу і поверхневим шаром металу. Висока адаптаційна здатність хемосорбційних плівок до динамічних умов навантаження проявляється в стабілізації напружень зсуву змащувальних шарів в пусковий період, що підвищує антифрикційні властивості контакту – f становить 0,0045 – 0,006 (рис. 4.7). Товщина граничних плівок становить в середньому 2,3:1,6:1 мкм, відповідно для контактних поверхонь, що працюють при проковзуванні 10, 20 і 30%.

Про ідентичність природи сформованих хемосорбційних плівок на поверхнях з різним ступенем проковзування свідчить однакова кінетика зміни наступних реологічних характеристик. В період пуску, в умовах чистого кочення, для досліджуваних пар тертя напруження зсуву полімолекулярних граничних шарів становить 4 – 6 МПа, ефективна в'язкість в контакті залежить від ступеня стирання граничних шарів і коливається в межах 600 – 1500 Па·с (рис. 4.9).

На ділянці стаціонарної роботи в період проковзування встановлено різке падіння ефективної в'язкості в контакті до 100 – 250 Па·с внаслідок появи високих градієнтів швидкості зсуву порядку $(5 - 7) \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ для 10%-ного проковзування і $(1 - 1,3) \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$ для 20 і 30%-ного проковзування. Так як градієнт швидкості зсуву змащувальних шарів при проковзуванні локалізується в гідродинамічній і негідродинамічній складові товщини неоднорідної мастильної плівки, то підвищується опір хемосорбційних плівок їх стиранню, що проявляється в підвищенні напружень зсуву змащувальних шарів. Для 10, 20 і 30%-ного проковзування підвищення τ склало відповідно 2,1 : 3 : 3,1 рази (рис. 4.10). Невідповідність стрімкого падіння ефективної в'язкості в контакті і одночасного підвищення напружень зсуву змащувального шару свідчить про неньютонівські властивості сформованих хемосорбційних плівок, для яких характерна структуризація і, як наслідок, перехід до в'язкопластичного стану. Саме ці шари характеризуються високими протизношувальними і антифрикційними властивостями. Безумовно, в порівнянні з мінімальним 3%-ним проковзуванням,

коефіцієнт тертя при збільшенні ковзання до 10 – 30% підвищується в 2,5 – 3 рази. Однак це підвищення, на наш погляд, пов'язано з опором стиранню хемосорбційних граничних шарів з сильними когезійними і адгезійними зв'язками. Підтвердженням цьому служить кінетика зміни питомої роботи тертя: збільшення даного параметра на ділянці II при проковзуванні встановлено в 200 – 300 разів, в порівнянні з запуском в умовах чистого кочення на ділянці I. Отримані результати узгоджуються з дослідженнями [48], в яких експериментально встановлено підвищення питомої роботи молекулярної складової сили тертя для упорядкованих твердокристалічних шарів ПАР при їх структуризації на поверхні металу.

4.2.3. Вплив механо-хімічних процесів при терті кочення з різною величиною проковзування на зносостійкість контактних поверхонь.

На наш погляд, ефективність роботи трибоспряжень визначається, безумовно, мастильною здатністю оливи і антифрикційними характеристиками контакту, проте, вирішальним критерієм оцінки повинна бути зносостійкість пар тертя. Сумарний знос випереджаючої та відстаючої поверхонь знижується в 2 : 1,68 : 1,53 рази при проковзуванні 10, 20 і 30% відповідно, в порівнянні з зносом контактних поверхонь при мінімальному 3%-ному проковзуванні (рис. 4.11).

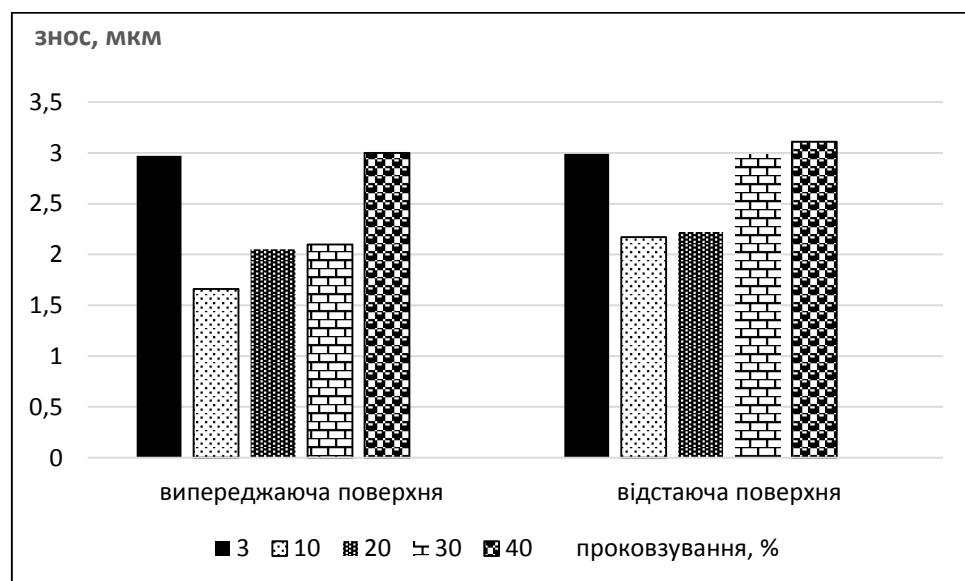


Рис. 4.11. Знос контактних поверхонь в нестационарних умовах роботи.

Одним з основних механізмів підвищення зносостійкості зі зростанням ступеня проковзування, на наш погляд, є зміна природи граничних шарів на активованих тертях контактних поверхнях. При мінімальному проковзуванні, як зазначалося вище, на поверхні металу формуються переважно адсорбційні шари фізичної природи. Згідно ефекту Ребіндера, адсорбція ПАР забезпечує пластифікування поверхневих шарів металу. Перш за все це проявляється в зниженні мікротвердості поверхневих шарів металу для випереджаючої і відстаючої поверхонь відповідно на 500 і 350 МПа при 500 циклах напрацювання. Поступове знеміцнення металу свідчить про відсутність надійного екранування поверхнево–активними компонентами мастильного середовища контактних поверхонь, яке виявлялося б у їх подальшому зміцненні. Тому відбувається поширення пластичної деформації вглиб металу. На ділянці проковзування встановлено саме мінімальне збільшення питомої роботи тертя, в середньому, в 13 – 15 разів, для цих контактних поверхонь, в порівнянні з іншими досліджуваними парами тертя (рис. 4.12). Це опосередковано підтверджує зниження опору поверхневих шарів металу дотичним напруженням внаслідок зменшення їх міцнісних характеристик при пластифікуванні, що призводить до інтенсифікації зносу.

Зі збільшенням ступеня проковзування до 10 – 30% при напрацюванні 150 – 250 циклів також встановлено знеміцнення поверхневих шарів металу до 200 – 250 МПа за рахунок зниження їх міцності при адсорбції активних сірко– і фосфоровмісних компонентів протизношувальної присадки досліджуваної трансмісійної оливи. Стійкі до динамічних умов навантаження граничні шари характеризуються високими екрануючими властивостями, запобігаючи поверхневому руйнуванню металу в результаті протікання механо–хімічних реакцій. Підтвердженням цьому є підвищення питомої роботи тертя в 330 – 400 разів на ділянці II при наявності проковзування (рис. 4.12) і поступове збільшення мікротвердості поверхневих шарів металу до вихідних значень (при проковзуванні 10 і 20%) або до перевищення вихідних показників на 200 МПа (при проковзуванні 30%). Таким чином, підвищення енергоємності контакту в цьому випадку сприяє утворенню зміцненого поверхневого шару металу, який характеризується підвищеною зносостійкістю.

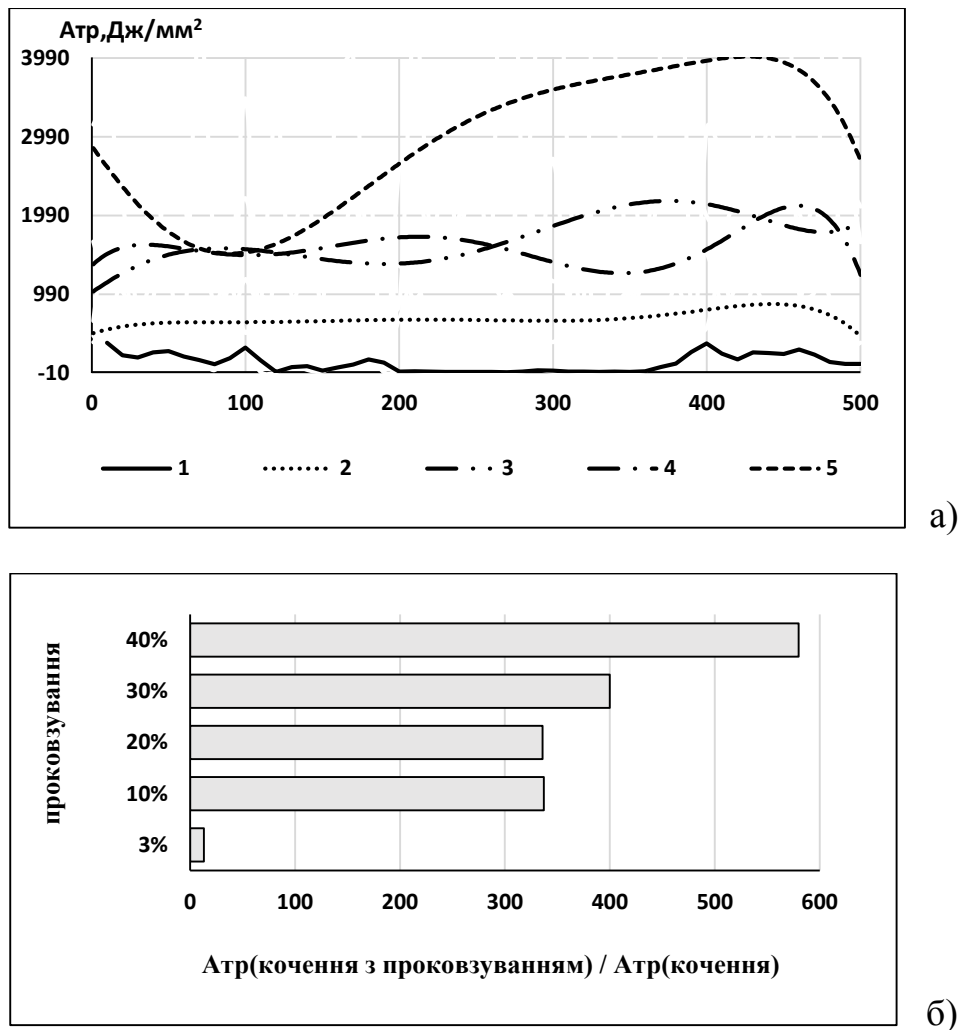


Рис. 4.12. Кінетика зміни питомої роботи тертя на ділянці II при проковзуванні 3% (1), 10% (2), 20% (3), 30% (4), 40% (5) (а) і приріст $A_{тр}$ в умовах проковзування відносно чистого кочення (б).

Особливої уваги заслуговує експериментально встановлене зниження зносостійкості контактних поверхонь при збільшенні ступеня проковзування на стаціонарній ділянці роботи до 40% (рис. 4.11). Одним з основних механізмів, які призводять до підвищеного зносу пар тертя, є стрімка зміна реологічних характеристик мастильного матеріалу. Підвищення швидкості ковзання при 40%-му проковзуванні до 1,14 м/с в даних умовах експерименту зумовлює появу високих градієнтів швидкості зсуву змащувальних шарів порядку $(1,8 - 3,0) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Наслідком впливу цього параметра на мастильний матеріал є різке зниження ефективної в'язкості в контакті, в середньому, в 20 разів. При цьому, товщина мастильного шару

знаходиться на рівні 5 – 6 мкм, як і при інших досліджуваних режимах проковзування. В таких умовах тертя на етапі припрацювання тривалістю 120 циклів антифрикційні властивості контакту характеризуються високою ефективністю: f дорівнює 0,015, як і для проковзування 10 – 30%. Це пов'язано з тим, що на контактних поверхнях формуються міцні граничні хемосорбційні плівки активними компонентами мастильного матеріалу. Підтвердженням цьому служить: відсутність металевих контактів на зупинці; пластифікування поверхневих шарів металу, що проявляється в зниженні їх мікротвердості на 200 – 250 МПа; напруження зсуву змащувальних шарів в період пуску аналогічні даному параметру для пар тертя з меншим ступенем проковзування.

Однак, в період з 200 по 300 цикл напрацювання встановлено поступове збільшення коефіцієнта тертя в 1,7 раз. Таке зниження антифрикційних властивостей контакту зберігається протягом усього подальшого періоду роботи (рис. 4.7). Перш за все, це пов'язано з неможливістю зберегти сформованими граничними шарами структурну стійкість до високих градієнтів швидкості зсуву, що проявляється у збільшенні на 44% напружень зсуву в змащувальному шарі внаслідок десорбції і дезорієнтації компонентів мастильного матеріалу в контакті. Підтвердженням цьому служить кінетика зміни наступних показників: в 20% циклів напрацювання встановлений металевий контакт пар тертя на зупинці (рис. 4.8, б); ефективна в'язкість в контакті в період пуску коливається від 900 до 3000 Па·с (рис. 4.9), що пов'язано зі зміною товщини структурованих граничних хемосорбційних шарів в діапазоні від 0 до 2,7 мкм.

Наслідком порушення екрануючих властивостей граничних шарів є підвищення питомої роботи тертя в контакті в 580 разів при зміні режиму кочення (ділянка I) на кочення з проковзуванням (ділянка II). З 200-го циклу напрацювання при 40%-му проковзуванні на ділянці II $A_{тр}$ збільшується в 2,67 разів. Ми вважаємо, що зростання даного параметра обумовлено збільшенням ступеня пластичної деформації: встановлено сильне зміцнення поверхневих шарів металу – їх мікротвердість підвищується після знеміцнення на 600 і 400 МПа відповідно для відстаючої і випереджаючої поверхонь. Безумовно, в процесі зміцнення значний

вплив створює і активне мастильне середовище, з компонентів якого формуються хемосорбційні плівки. Однак ступінь зміцнення поверхневих шарів металу при цьому режимі роботи збільшується в 2 – 3 рази, в порівнянні зі зміцненням при 30%-му проковзуванні, де на контактних поверхнях формуються міцні граничні шари змащувального матеріалу. Тому домінуючим чинником, що підвищує енергоємність контакту при досліджуваному максимальному проковзуванні, є пластична деформація металу, що різко знижує зносостійкість контактних поверхонь (рис. 4.11).

Таким чином, наведені результати досліджень щодо впливу ступеня проковзування на триботехнічні характеристики контакту дозволяють зробити висновок, що при мінімальному проковзуванні 3% в контакті домінують процеси, які призводять до пластифікування поверхневих шарів металу і зниження їх зносостійкості. Збільшення ступеня проковзування до 10 – 30% сприяє формуванню на поверхнях тертя стійких екрануючих хемосорбційних плівок, що забезпечують їх зміцнення і підвищення зносостійкості [185]. Подальше збільшення проковзування до 40% знижує зносостійкість пар тертя через часту зміну граничних шарів, які формуються внаслідок їх руйнування і посилення ступеня пластичної деформації контактуючих поверхонь.

Висновки до розділу 4.

1. Для сталі ШХ–15 подовжується час адаптації граничних змащувальних шарів до динамічних умов навантаження внаслідок зниження інтенсивності активації поверхневих шарів металу в початковий період припрацювання – встановлено незначне збільшення питомої роботи тертя в контакті, що обумовлює зниження швидкості утворення захисних екрануючих шарів активними компонентами мастильного матеріалу. Ці процеси призводять до збільшення на 20% циклів напрацювань, при яких в початковий період страгування реалізується напівсухий або граничний режим мастильної дії.

2. 20%–ве проковзування в контактi істотно підвищує градієнт швидкості зсуву змащувальних шарів, що призводить до зниження ефективної в'язкості в контактi в 10 разів при змащуванні сталі 40X і в 20 разів при змащуванні сталі ШХ–15.

3. При градієнтах швидкості зсуву по товщині мастильного шару вище $6,23 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ в умовах проковзування, напруга зсуву змащувальних шарів зростає в 2,4 рази при використанні більш м'якого матеріалу сталі 40X, що призводить і до кореляційного підвищення коефіцієнта тертя, а при змащуванні поверхонь зі сталі ШХ–15 змін напруги зсуву мастильного шару і коефіцієнта тертя не встановлено.

4. Встановлені показники приросту питомої роботи тертя в період пуску при чистому коченні для сталі 40X до 35 Дж/мм² в 95% циклів, а для сталі ШХ–15 – до 30 Дж/мм² в 20% циклів; при наявності проковзування енергоємність контакту різко зростає – питома робота тертя знаходиться в діапазонах 1000 – 2800 Дж/мм² і 500 – 2000 Дж/мм² для сталей 40X і ШХ–15 відповідно.

5. Структурні відмінності сталей 40X і ШХ–15 після загартування і відпуску істотно впливають на зносостійкість металу: для сталі ШХ–15 структура дрібногочастого мартенситу з рівномірно розподіленими надлишковими карбідами характеризується високою зносостійкістю контактних поверхонь – знос відстаючої і випереджаючої поверхонь в 3,34 і 2,23 разів менше, в порівнянні з аналогічними показниками, встановленими для сорбіту відпуску сталі 40X.

6. В період запуску циклічна зміна питомої роботи тертя обумовлена структурною пристосовуваністю граничних змащувальних шарів, найбільший ступінь руйнування яких встановлений при роботі на стаціонарному режимі з проковзуванням 3 і 40%, що призводить до металевого контакту пар тертя на зупинці.

7. При мінімальному проковзуванні для граничних шарів з слабкими фізичними Ван–дер–Ваальсовими силами взаємодії встановлені напруження зсуву, аналогічні об'ємній фазі оливи, що характерно для ньютонівських рідин; збільшення проковзування до 10 – 40% сприяє формуванню граничних екрануючих хемосорбційних плівок, що характеризуються властивостями неньютонівських рідин.

8. Кореляційне підвищення коефіцієнта тертя і питомої роботи тертя при проковзуванні 10 – 40% обумовлено збільшенням напружень зсуву граничних

змащувальних шарів внаслідок їх опору стиранню, десорбції і дезорієнтації в результаті зростання градієнтів швидкості зсуву.

9. Початковий вплив активних компонентів трансмісійної оливи на поверхневі шари металу проявляється в зниженні їх мікротвердості в результаті пластифікування. В діапазоні проковзування 10 – 30% формування стійких хемосорбційних плівок забезпечує зміцнення поверхневих шарів металу, що підвищує їх зносостійкість.

РОЗДІЛ 5

КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ В ДИНАМІЧНИХ УМОВАХ НАВАНТАЖЕННЯ

5.1. Вплив ступеня проковзування при коченні з ковзанням на зносостійкість контактних поверхонь в екстремальних умовах тертя.

Проблема підвищення надійності зубчастих передач є багатофункціональною. Вона може вирішуватися в різних напрямках. По–перше, за рахунок вибору і створення більш зносостійких антифрикційних матеріалів для заданих режимів навантаження і умов експлуатації зубчастих передач. По–друге, за рахунок застосування більш ефективних мастильних матеріалів з поліфункціональними присадками. По–третє, шляхом оптимізації параметрів тертя і режимів експлуатації зубчастих передач з подальшою розробкою регламентних технологічних умов. При цьому слід враховувати, що зносостійкість металу визначається не тільки структурою металу в початковому стані, але і структурою, яка формується в результаті протікання механо–хімічних процесів, що відбуваються при терті. Встановлення взаємозв'язку процесів накопичення енергії у вторинних структурах і зношування є важливою структурно–енергетичною характеристикою, яка багато в чому визначає довговічність контактних поверхонь. Це, в свою чергу, дозволить вирішити питання, пов'язані з прогнозуванням ресурсу роботи пар тертя з локальною формою контакту.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки комплексних методик триботехнічних випробувань, які б охоплювали різноманіття ефектів взаємодії компонентів мастильних матеріалів з активованою поверхнею металу. Зокрема, дослідження пар тертя кочення і, особливо, кочення з змінним проковзуванням, які становлять значну частку вузлів тертя машин і механізмів (підшипники кочення, зубчасті передачі) потребують подальшого поглибленого аналізу.

Метою роботи було дослідження впливу різного ступеня проковзування контактних поверхонь на кінетику зміни питомої роботи тертя, міцнісних властивостей поверхневих шарів металу і зносостійкість контактних поверхонь в

умовах припинення подачі мастильного матеріалу в зону контакту та переходу трибосистеми в екстремальні умови тертя.

Вивчення процесів взаємовпливу зовнішніх і внутрішніх факторів в процесі самоорганізації трибосистеми при терті дозволить визначити кінетику зміни триботехнічних властивостей контакту і виявити основні механізми, що визначають зносостійкість контактних поверхонь. Важливим етапом в цьому напрямку є вивчення процесів, що відбуваються в тонких поверхневих шарах металу. Саме поверхневі шари металу є складною нерівноважною системою, для якої характерні нелінійні процеси.

5.1.1. Оцінка впливу властивостей вторинних структур на знос елементів трибоспряжень.

Загальний лінійний знос випереджаючої і відстаючої поверхонь при роботі пар тертя в умовах достатнього постачання мастильного матеріалу, обмеженого змащування і примусового видалення мастильного матеріалу представлений на рис.5.1.

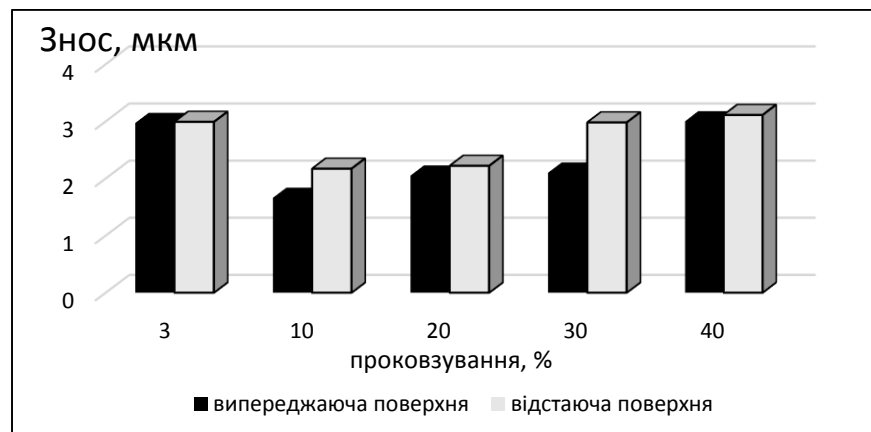


Рис. 5.1. Лінійний знос контактних поверхонь в умовах кочення з проковзуванням.

Якщо при збільшенні ступеня проковзування від 10 до 40% простежується чітка тенденція до зниження зносостійкості контактних поверхонь, то для мінімального проковзування встановлений досить високий знос. Пояснення отриманих результатів, на наш погляд, лежить в площині ідентифікації типів вторинних структур, які

утворюються на контактних поверхнях в результаті структурної пристосованості при терті. Ми вважаємо, що на поверхнях тертя з проковзуванням 3% утворюються вторинні структури I типу, які, згідно з Костецьким Б.І. [141], характеризуються властивостями зверхпластичності, мало насичені активними елементами і характеризуються низькими показниками питомої роботи тертя при формуванні.

Підтвердженням щодо наших припущень є наступні встановлені закономірності. По–перше, отримані результати визначення вагової частки елементів методом рентгенівського мікроаналізу на глибині 20 – 50 мкм під поверхнею тертя свідчать про те, що елементний склад приповерхневих шарів при терті ідентичний вихідному матеріалу, що характеризує його низьку активаційну здатність в результаті протікання механо – хімічних процесів (рис.5.2, табл.5.1).

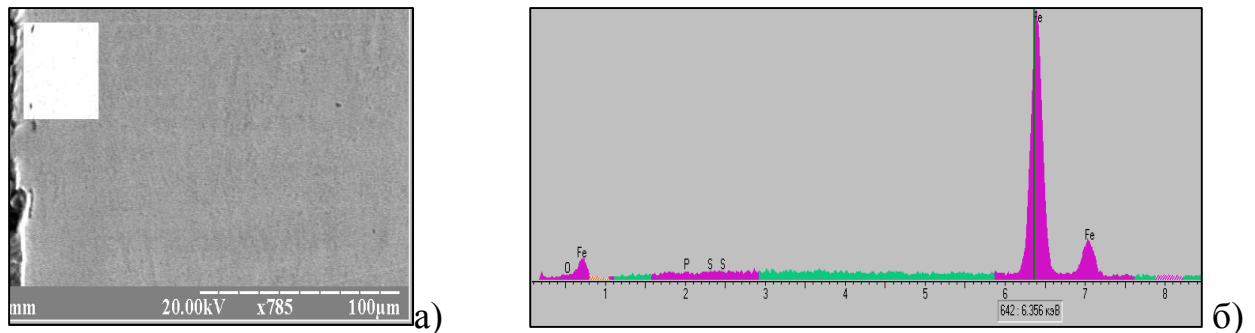


Рис.5.2. Зона визначення вагової частки елементів в металі (а) і інтенсивність характеристичних спектрів аналізованих елементів (б).

Таблиця 5.1

Концентрація вагової частки аналізованих елементів (С,%) в приповерхневих шарах металу

Елемент	Вихідний метал	Відстаюча поверхня з проковзуванням,%		
		3	20	40
O	0,65	0,58	0,75	1,02
P	0,03	0,03	0,05	0,03
S	0,05	0,05	0,12	0,15
Fe	99,27	99,34	99,08	98,8

По–друге, показники питомої роботи тертя для цих поверхонь характеризуються найменшими значеннями, в порівнянні з 10 – 40% проковзуванням, що свідчить про незначну енергоємність контакту як внаслідок домінування

швидкостей кочення, так і за рахунок реалізації переважно гідродинамічного режиму мащення (рис. 5.2). Якщо в період пуску в умовах чистого кочення (ділянка I) питома робота тертя становила 2 – 5 Дж/мм², то в період проковзування (ділянка II) даний параметр збільшується в 2 рази.

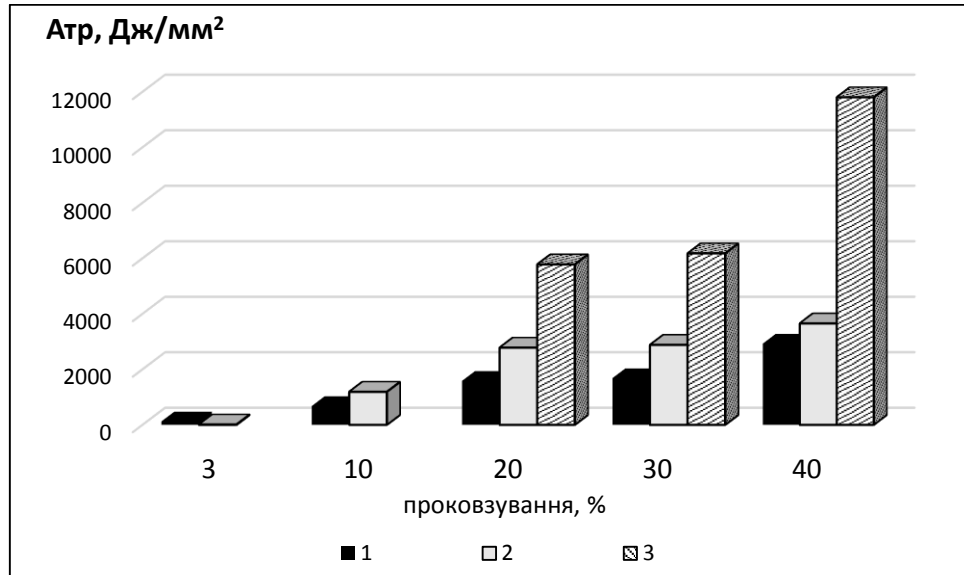


Рис.5.2. Вплив ступеня проковзування на кінетику зміни питомої роботи тертя в контактi: 1 – достатня подача мастильного матеріалу; 2 – припинення подачі мастильного матеріалу; 3 – момент схоплювання.

По-третє, про зверхпластичність утворених вторинних структур свідчить високий ступінь знеміцнення поверхневих шарів (мікротвердість випереджаючої і відстаючої поверхонь зменшується на 990 і 940 МПа відповідно) і аморфізація приповерхневих шарів металу на глибину 40 – 50 мкм (рис.5.3).

Характер зміни мікротвердості приповерхневих шарів свідчить про наявність позитивного градієнту їх механічних властивостей по глибині. Однак, аморфізований шар характеризується високим ступенем знеміцнення порядку 1100 – 1400 МПа, в порівнянні з вихідною поверхнею, що обумовлено проявом пластифікуючої дії активних компонентів мастильного матеріалу.

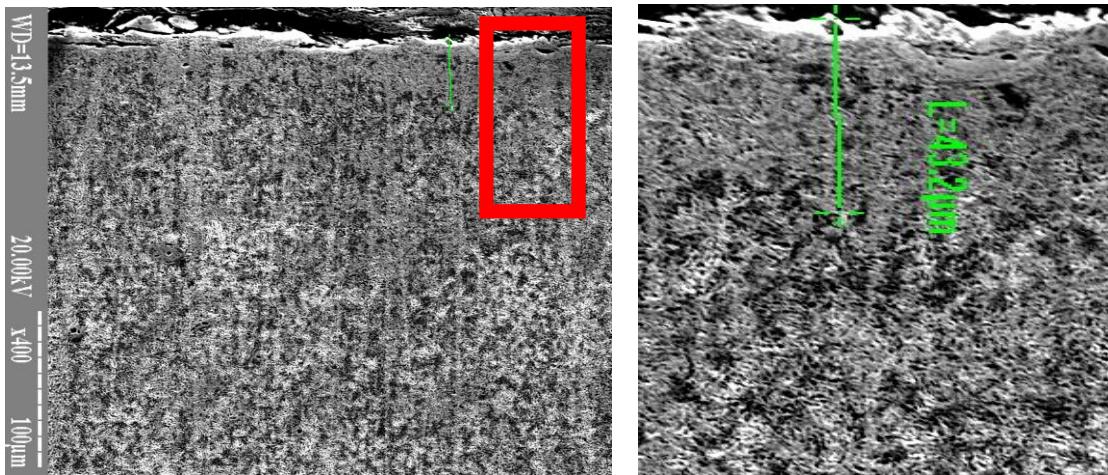


Рис.5.3. Мікроструктура приповерхневих шарів відстаючої поверхні сталі 45 при терті з проковзуванням 3% ($\times 400$).

В діапазоні проковзування 10 - 40% реалізуються інші механізми зносу елементів трибоспряжень. Зростання питомої роботи тертя при проковзуванні внаслідок збільшення швидкості ковзання обумовлює механо-термічну активацію контактних поверхонь (рис.5.2). Питома робота тертя за умов відсутності регулярної подачі мастильного матеріалу в зону контакту як в умовах чистого кочення при пуску (ділянка I), так і в умовах кочення з проковзуванням (ділянка II) збільшується, в середньому, в 1,75 разів, в порівнянні з достатнім надходженням оливи. Це створює передумови для утворення на поверхнях тертя більш стійких граничних шарів мастильного матеріалу – хемосорбційних плівок, а поверхневі шари металу формують вторинні структури II типу [141]. Наведемо фактичні результати, що підтверджують утворення цих структур. По-перше, приповерхневі шари металу на глибині до 50 мкм насичуються активними елементами – збільшується вагова частка кисню і сірки (табл.5.1). По-друге, поверхневі шари металу характеризуються підвищенням міцнісних властивостей, що проявляється в збільшенні їх мікротвердості при напрацюванні (рис.5.4).

Простежується чітка закономірність в ступені зміцнення випереджаючої і відстаючої поверхонь від проковзування: підвищується зміцнення контактних поверхонь, яке відбувається внаслідок збільшення деформаційної складової коефіцієнта

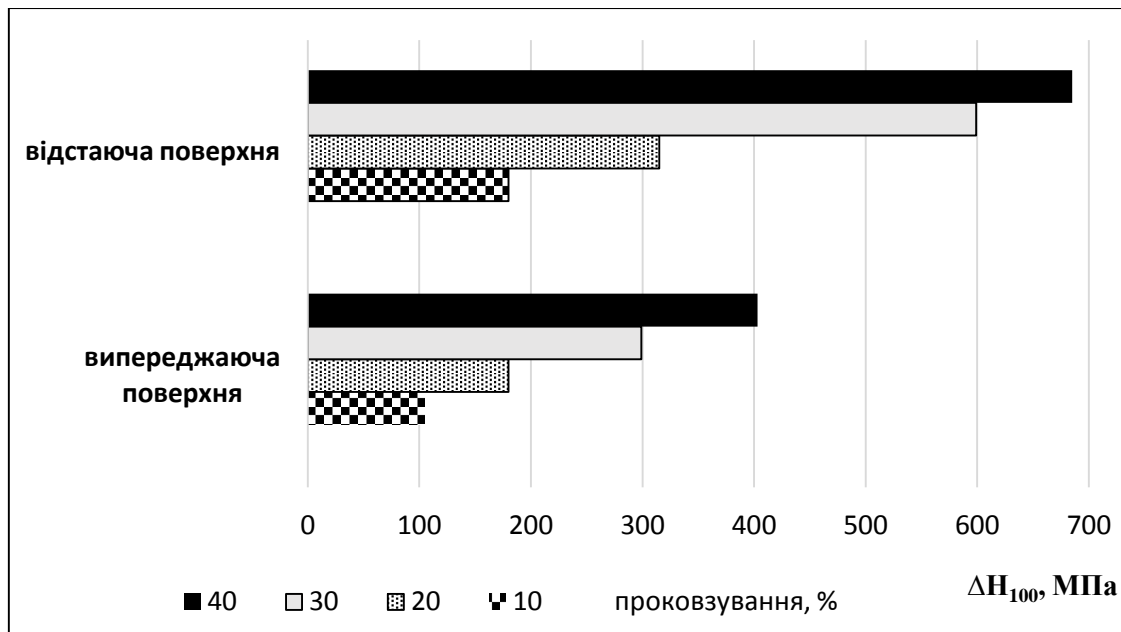


Рис.5.4. Ступінь зміцнення поверхневих шарів сталі 45 при роботі в умовах кочення з проковзуванням в екстремальних умовах тертя.

тертя при зростанні швидкості ковзання від 0,315 м/с до 1,14 м/с при 10% і 40 % проковзуванні відповідно. Складний напружений стан приповерхневих шарів металу при збільшенні механічного та теплового впливів в умовах одночасної дії нормальних і дотичних напружень призводить до їх інтенсивної деформації і зростанню питомої роботи тертя в контактi. Глибина поширення напружено – деформованого стану пар тертя знаходиться в прямій залежності від ступеня проковзування контактних поверхонь. Наприклад, глибина аморфізованого деформованого шару металу після травлення (4%-ним спиртовим розчином азотної кислоти) мікрошліфів відстаючої поверхні з проковзуванням 20% охоплює 30 – 37 мкм, а з проковзуванням 40% – 100....300 мкм (рис.5.5).

При цьому, для деформованого об'єму металу з меншим проковзуванням характерна однорідна сильно змінена дрібнодисперсна структура мартенситу, а при максимальному проковзуванні простежується нерівноважний структурно–фазовий стан деформованого шару з ділянками, які погано піддаються травленню. В роботі [29] також встановлена зміна фізико–механічних властивостей деформованих контактних поверхонь середньовуглецевих сталей зі збільшенням температури при терті внаслідок утворення вторинних структур, оксидних і окисних плівок.

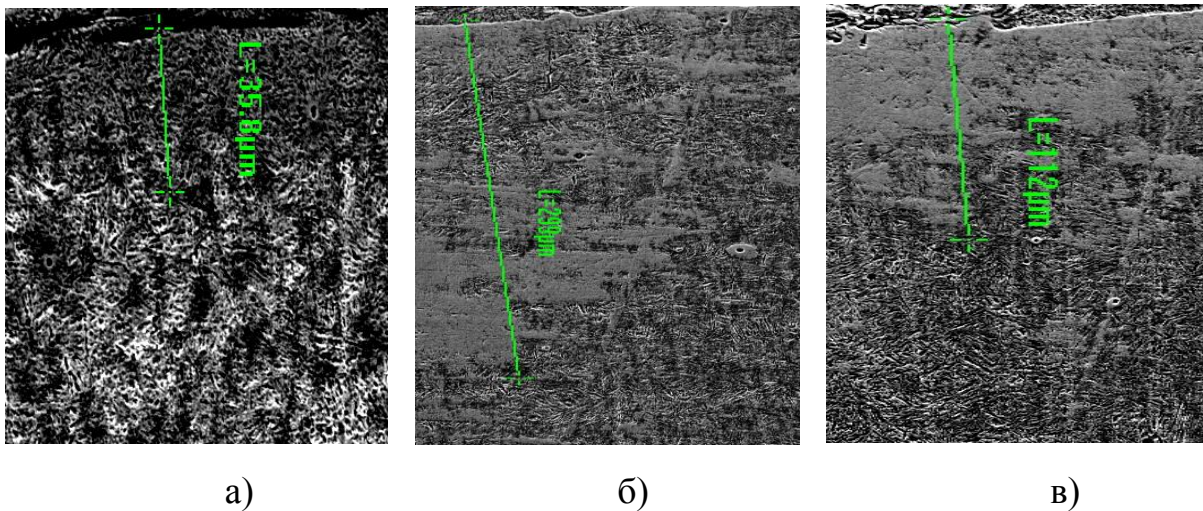


Рис.5.5. Мікроструктура приповерхневих шарів відстаючої поверхні сталі 45 ($\times 400$): а) – проковзування 20%; б, в) – проковзування 40%.

5.1.2. Вплив швидкості ковзання на характер розподілу мікротвердості поверхневих шарів металу по глибині.

В умовах тертя поверхні шари металу знаходяться в полі дії складного напруженого стану, який створюється при одночасному впливі нормальних і тангенціальних напружень. При цьому деформація поверхневих шарів йде переважно в напрямку дії тангенціальних сил, що призводить до текстурування поверхневих шарів, зміцнення і наклепу. Утворення зміцненого поверхневого шару в активному мастильному середовищі забезпечує екранування щодо поширення всередину металу пластичної деформації [439].

Згідно [425, 438] при наявності достатньої кількості мастильного матеріалу в контактні максимальні дотичні напруження, що залягають на глибині $h = 0,786 \cdot b$, де b – напівширина контакту, виходять на поверхню. Однак, на наш погляд, це справедливо для стаціонарних умов тертя, де реалізується еластогідродинамічний або гідродинамічний режим мащення, при яких забезпечується ефективне розділення пар тертя. У створених нами експериментальних умовах (режим пуск – зупинка) в контактні домінують нестационарні процеси, які призводять до постійної зміни режимів мащення. В умовах припинення подачі мастильного матеріалу в зону контакту проявляється, наприклад, весь спектр режимів мастильного дії: від напівсухого до гідродинамічного, незалежно від ступеня проковзування в контактні.

Саме в періоди порушення цілісності мастильного шару вектор дії максимальних дотичних напружень опускається на деяку глибину і локалізується в приповерхневих шарах металу. Це призводить до інтенсивної пластичної деформації верхніх об'ємів металу, реалізації механізмів внутрішнього тертя, домінування деформаційної складової коефіцієнта тертя, що в сукупності, підвищує знос контактних поверхонь. В роботі [182] експериментально встановлено, що 85% від загального зносу пар тертя доводиться на стадію домінування пластичної деформації при порушенні суцільності змащувального шару. Отримані нами результати максимального зношування контактних поверхонь з проковзуванням 40% також підтверджують значний вплив мастильного матеріалу на зносостійкість пар тертя. На даних контактних поверхнях встановлена найбільша ступінь деструкції граничних змащувальних плівок, яка в умовах граничного режиму мастильного дії становить 30% від усього періоду роботи (рис. 5.6).

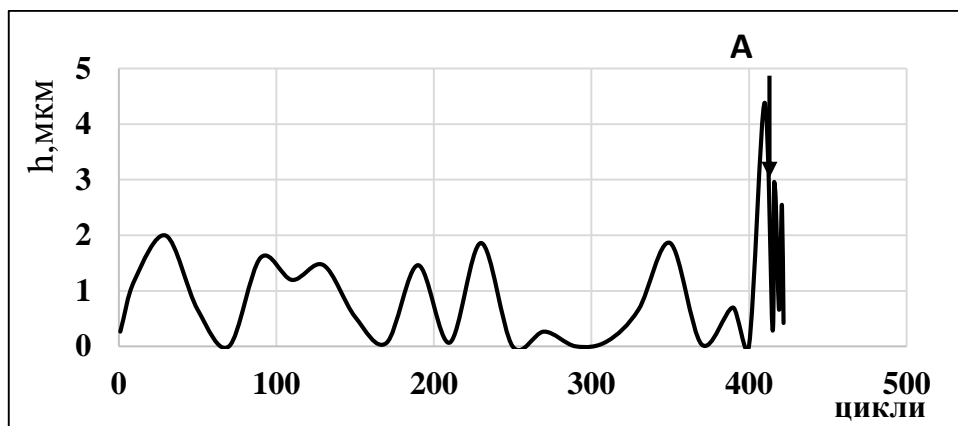


Рис. 5.6. Кінетика зміни товщини змащувального шару в режимі пуск – зупинка при коченні з проковзуванням 40%. В точці А – примусове видалення мастильного матеріалу.

Проведений нами аналіз зміни мікротвердості (H_{20}) приповерхневих шарів металу виявив неоднорідність міцністних властивостей текстурованого деформованого об'єму. Вихідна поверхня сталі 45 після загартування, високотемпературного відпуску і шліфування характеризується позитивним градієнтом механічних властивостей з максимальною зоною зміцненого шару на глибині 75 – 95 мкм, де H_{20} становить 5290 МПа (рис. 5.7а).

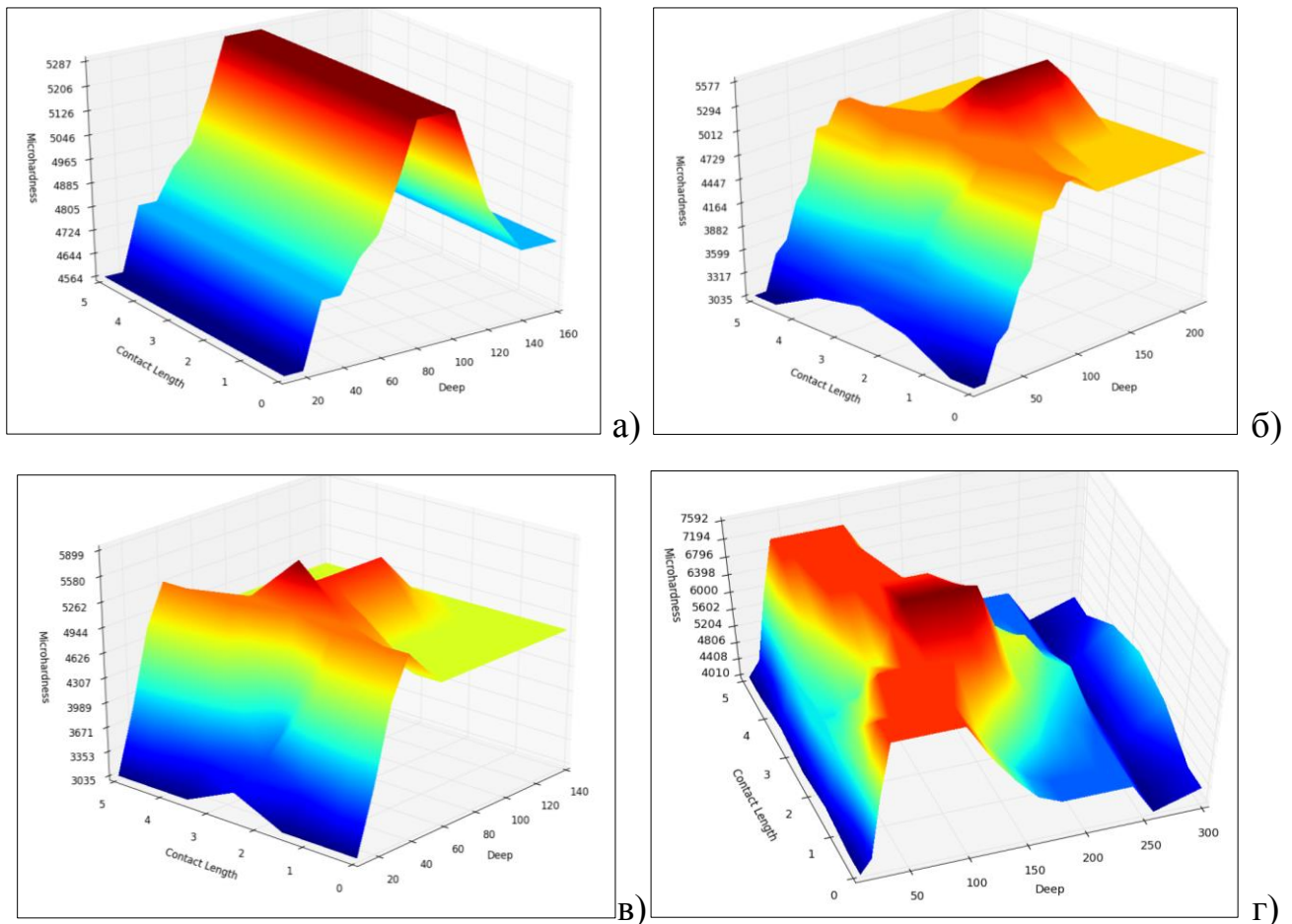


Рис. 5.7. Розподіл мікротвердості поверхневих шарів металу по глибині по лінії контакту пар тертя.

Для контактних поверхонь з мінімальним проковзуванням 3% до глибини 50 мкм встановлено знеміцнення приповерхневих шарів металу в межах 1700 – 1000 МПа, а в центральній частині по довжині контакту, що відповідає лінії контактування досліджуваних зразків, спостерігається розширення об'єму зміцненого металу до глибини 200 мкм (рис. 5.7б). Дані контактні поверхні характеризуються найменшою енергоємністю, формуванням лабільних надпластичних вторинних структур, пластифікуванням поверхневих шарів металу, що проявляється в значному знеміцненні приповерхневих шарів і зниженні зносостійкості металу.

Зі збільшенням проковзування до 20% зона знеміцнення охоплює приповерхневі шари до 20 – 25 мкм, на глибині 40 мкм починається зміцнення приповерхневих шарів (рис. 5.7в). Встановлена аналогічна епіюра розподілу мікротвердості по лінії контактування пар тертя - зона максимального зміцнення

поширюється на глибину до 120 мкм і максимальна мікротвердість становить $H_{20} = 5500$ МПа. Для даних контактних поверхонь збільшення зносостійкості здійснюється за рахунок формування стабільних граничних хемосорбційних плівок мастильного матеріалу, стійких високоміцних вторинних структур, які перешкоджають поширенню пластичної деформації вглиб металу.

Для контактних поверхонь з проковзуванням 40% встановлений мінімальний об'єм знеміцненого шару – мікротвердість приповерхневих шарів знижується на 400 – 500 МПа до 10 мкм по глибині (рис. 5.7г). Нижні шари характеризуються поступовим сильним зміцненням до 7600 МПа на глибині до 160 мкм. Зміцнення приповерхневих шарів також відбувається по епюрі з максимумом, яка відповідає центральній зоні лінії навантаження. Досягнення найбільшої поверхневої міцності цих шарів внаслідок максимальної енергоємності контакту при високій швидкості ковзання, що призводить до частого руйнування граничних хемосорбційних плівок і поширення деформації вглиб металу, обумовлює зниження їх пластичності. Висока мікротвердість приповерхневих шарів формує концентратор напружень [29], який знижує зносостійкість контактних поверхонь шляхом відшаровування крихких вторинних структур (рис. 5.8).

Так як деформація металу при одночасній дії нормальних і дотичних напружень призводить до текстурування і зміцнення приповерхневих шарів переважно в напрямку дії тангенціальних сил [333, 418], то епюри розподілу дотичних напружень в металі і мікротвердості по глибині повинні корелювати між собою. Однак, з отриманих нами результатів збіг розрахункових ($h = 41$ мкм) і експериментальних показників глибини залягання максимальних дотичних напружень отримано лише для контактних поверхонь з проковзуванням 20%: епюра зміни мікротвердості приповерхневих шарів характеризується максимумом їх зміцнення на глибині 40 – 50 мкм.

Для інших досліджуваних контактних поверхонь розрахункові та експериментальні значення мають розбіжність до 50%. Перш за все це пов'язано з тим, що теоретичні залежності не враховують наявність і природу мастильного матеріалу, швидкість ковзання і температурний фактор. Саме кінетика зміни

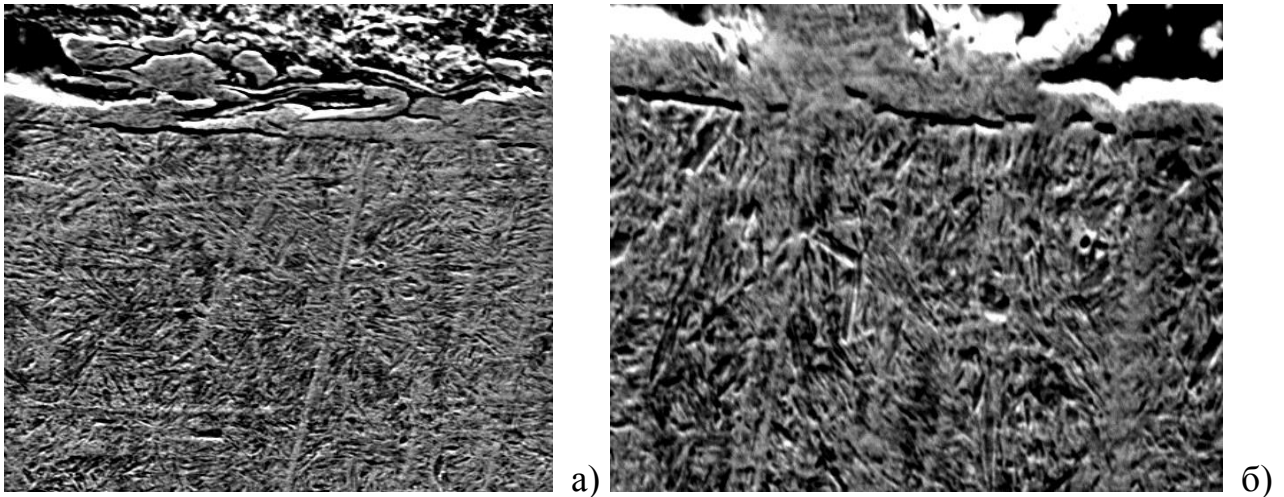


Рис. 5.8. Відшарування приповерхневих шарів сталі при терті: а) $\times 400$; б) $\times 800$.

швидкості ковзання, збільшення якої призводить до підвищення швидкості зсуву і напруг зсуву в змащувальному шарі, зростанню питомої роботи тертя, приросту температур в контакті, створює найбільший вплив на інтенсивність протікання деформаційних змін в металі.

Наведений вище аналіз епюр розподілу мікротвердості поверхневих шарів металу по лінії прикладання навантаження виявив загальну закономірність: максимальна зона зміцнення відповідає центральній області контакту, до периферії лінії контакту ступінь зміцнення знижується, в середньому, на 500 – 700 МПа і зменшується об'єм деформованого металу.

5.2. Методика прогнозування оптимальної структури поверхневих шарів в процесі експлуатації елементів трибоспряжень.

Встановлення оптимальних параметрів структури поверхневих шарів контактуючих пар, прогнозування їх експлуатаційних характеристик на основі розподілу механічних властивостей в елементах конструкцій є однією з найважливіших проблем сучасної трибології.

При цьому обмежена кількість експериментальних даних, які дозволяють встановлювати зв'язок між структурою поверхневих шарів і їх прогнозованою зносостійкістю в процесі експлуатації, складність фізико-хімічних процесів, що

супроводжують явище фрикційної взаємодії, істотно ускладнюють виділення основних факторів, які мають визначальне значення при прогнозуванні роботи контактних пар [201].

Дана обставина істотно обмежує управління технологічними режимами модифікації поверхонь, особливо в разі використання адитивних технологій, і як результат, призводить до обмеження інформації, необхідної для розробки рекомендацій по поверхневому зміцненню деталей вузлів тертя, яка заповнюється прийняттям рішень на основі інженерної інтуїції або практичного досвіду.

У зв'язку з цим виникає необхідність розробки комплексних методик триботехнічних випробувань, які б охоплювали різноманіття ефектів взаємодії компонентів мастильних матеріалів з активованою поверхнею металу. Зокрема, дослідження пар тертя кочення і, особливо, кочення зі змінним проковзуванням, які становлять значну частку вузлів тертя машин і механізмів (підшипники кочення, зубчасті передачі), є нечисленними і потребують подальшого поглибленого аналізу.

У зв'язку з цим актуальним є розробка математичних підходів щодо встановлення оптимальних параметрів поверхневих шарів контактних пар на основі наявності обмеженої інформації результатів натурних випробувань.

Набір емпіричної інформації. В якості вихідної інформації для прогнозування оптимальної структури поверхневих шарів використаємо розподіл вимірювання мікротвердості, отримане на зразках (сталь 45), які випробовували в нестационарних умовах тертя при коченні з проковзуванням від 3 до 40% (мастильний матеріал – трансмісійна олива Okko GL-4 80w / 90), а також величину сумарного зносу цих зразків (табл. 5.2).

Підхід до прогнозування. Для встановлення оптимальних параметрів структури поверхневих шарів згідно роботи [149], апіорі взяли, що експлуатаційні властивості матеріалу (знос) залежать як від характеристик мікротвердості поверхневих шарів, так і від розподілу їх по глибині матеріалу:

$$I = F(HV(x)), \quad (5.1)$$

де HV – мікротвердість, x – змінна, що описує відстань вглиб від поверхні деталі.

Результати вимірювання мікротвердості приповерхневих шарів металу

Зразок (величина проковзування)	Мікротвердість HV , МПа								Знос, мкм
	Відстань від поверхні, мкм								
	10	20	30	40	50	60	70	80	
Зразок 1 (3%)	3451	3451	3451	3708	3708	3853	4010	4179	5,96
Зразок 2 (10%)	3575	4564	5570	5570	5287	5023	5023	4783	3,83
Зразок 3 (20%)	3336	3451	3575	3853	5899	5570	5570	5570	4,27
Зразок 4 (30%)	4023	5023	5287	5287	5570	6255	6255	7095	5,08
Зразок 5 (40%)	4023	5287	5287	5287	5570	5570	6255	6255	6,11

В якості міри функції $F(HV(x))$ візьмемо інтегральний осереднений розподіл мікротвердості [149]:

$$F(HV(x)) = HV_{\phi} = \frac{1}{L} \int_L HV(x) dx, \quad (5.2)$$

де L – глибина, яка береться для дослідження зони градієнтної зміни мікротвердості по глибині (прийmemo $L \approx 80$ мкм).

У лінійному наближенні функція $HV(x)$ має вигляд:

$$HV(x) = HV_0 + k \cdot x, \quad (5.3)$$

де HV_0 – мікротвердість на поверхні, МПа, k – величина градієнта мікротвердості, МПа/мкм.

Ступінь зміцнення приповерхневих шарів металу на деяку глибину залежить від швидкості ковзання контактних поверхонь. З підвищенням швидкості ковзання від 0,062 до 1,15 м/с, що відповідає збільшенню ступеня проковзування з 3 до 40% відповідно, інтенсифікуються процеси тепловиділення в фрикційному контакті, зростає градієнт швидкості зсуву змащувальних шарів, в результаті чого створюються передумови для деструкції сформованих граничних плівок мастильного матеріалу. У зв'язку з цим, збільшується область поширення дотичних напружень зсуву вглиб металу і виникають локальні ділянки напружено-деформованого стану приповерхневих шарів. Незалежно від швидкості ковзання, в приповерхневих шарах

випереджаючої і відстає поверхонь реалізується правило позитивного градієнта механічних властивостей по глибині, що є важливим механізмом в плані підвищення зносостійкості пар тертя.

З урахуванням (5.3) співвідношення (5.2) набуде вигляду:

$$HV_{\text{эф}} = F(HV(x)) = \frac{1}{L} \left(HV_0 \cdot L + k \cdot \frac{L^2}{2} \right) = HV_0 + k \cdot \frac{L}{2}, \quad (5.4)$$

Таким чином, розглянутий параметр ефективної мікротвердості є усереднений показник розподілу мікротвердості в деякій локальній області, яка охоплює глибину поширення пружно–пластичних деформацій при терті. Даний параметр є міцності критерієм міцності, що характеризує просторову неоднорідність розподілу мікротвердості в результаті експлуатаційної модифікації контактних поверхонь при терті.

За вихідну величину мікротвердості на поверхні приймемо значення мікротвердості на глибині 10 мкм (табл. 5.3, стовпець 1), а градієнт визначимо як відношення різниці значень мікротвердості на глибині 80 мкм і 10 мкм, до показників різниці глибин (80 – 10) мкм. В результаті отримаємо залежність зносу від ефективної мікротвердості, поверхневої мікротвердості і градієнта (табл. 5.3).

Таблиця 5.3.

Залежність експлуатаційних характеристик матеріалу від узагальнених параметрів розподілу мікротвердості

Зразок (величина проковзування)	Поверхнева мікротвердість, МПа	Градієнт, МПа/мкм	$HV_{\text{эф}}$, МПа	Знос, мкм
Зразок 1 (3%)	3451	10,4	3857	5,96
Зразок 2 (10%)	3575	17,2	4263	3,83
Зразок 3 (20%)	3336	31,9	4612	4,27
Зразок 4 (30%)	4023	43,8	5775	5,08
Зразок 5 (40%)	4023	31,8	5295	6,11

Результати прогнозування. Знайдемо аналітичну залежність величини сумарного зносу випереджаючої та відстаючої поверхонь I від $HV_{\text{эф}}$ (рис. 5.9):

$$I = 7.074211011 \cdot 10^{(-13)} \cdot h^4 - 1.778035727 \cdot 10^{(-8)} \cdot h^3 + 0.1584466714 \cdot 10^{(-3)} \cdot h^2 - 0.6016932517 \cdot h + 833.2181630, \quad (5.5)$$

де h – величина ефективної («інтегральної») мікротвердості.

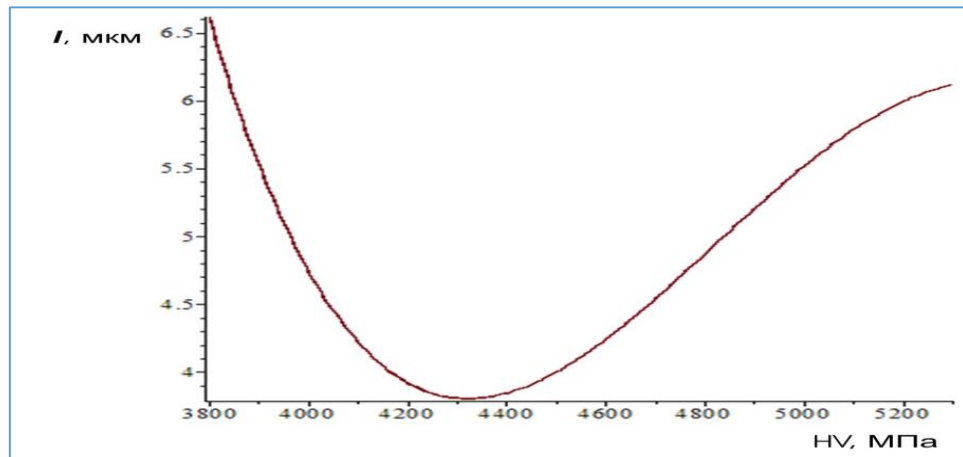


Рис. 5.9. Залежність лінійного зносу пар кочення від параметру ефективної («інтегральної») мікротвердості.

Як видно з рис. 5.9, дана залежність має мінімум величини зносу при значенні мікротвердості в інтервалі від 4200 МПа до 4400 МПа.

Вирішимо задачу по знаходженню величини $HV_{эф}^*$, яка забезпечує мінімальну величину зносу:

$$HV_{эф}^* : I \rightarrow \min. \quad (5.6)$$

Задача виду (5.6) еквівалентна наступній системі рівнянь:

$$HV_{эф}^* : \begin{cases} \frac{\partial I}{\partial HV} = 0 \\ \frac{\partial^2 I}{\partial HV^2} > 0 \end{cases}. \quad (5.7)$$

З даної системи знайдемо $HV_{эф}^* = 4323$ МПа. При цьому прогнозоване значення зносу буде на рівні 3,80 мкм.

Відзначимо, що досягти заданого значення ефективної мікротвердості, при якій максимально зменшується знос пари тертя, можна як за допомогою зміни величини поверхневої мікротвердості, так і за допомогою регулювання значення її градієнта.

Наприклад, при заданому значенні мікротвердості на рівні 3575 МПа, значення градієнта мікротвердості має бути рівним $k = \frac{2 \cdot (4323 - 3575)}{80} = 18.7 \frac{\text{МПа}}{\text{мкм}}$

При значенні градієнта на рівні 17,2 МПа/мкм, величина поверхневої мікротвердості повинна бути $HV_0 = \left(4323 - \frac{1}{2} \cdot 17.2 \cdot 80 \right) = 3635 \text{ МПа}$.

Параметр ефективної твердості H_{eff} використовується в ГОСТ 21354-87 [62] при розрахунках на запобігання глибинного контактного руйнування для цементованих і нітроцементованих зубчастих коліс:

$$H_{eff} = \frac{H_o}{\left(\frac{H_o}{H_k} - 1 \right) \left(\frac{h_{teff}}{h_t} \right) + 1}, \quad (5.8)$$

за умови, що розподіл твердості $H(z)$ по товщині зміцненого шару не гірше, ніж за залежністю:

$$H(z) = \frac{H_o}{\left(\frac{H_o}{H_k} - 1 \right) \left(\frac{z}{h_t} \right) + 1}. \quad (5.9)$$

В зазначеному ГОСТ градієнтний розподіл твердості враховується при розрахунку глибини залягання найбільших допустимих граничних глибинних дотичних напружень (h_H) в порівнянні глибиною зміцненого шару h_t :

– при $h_H > h_t$ небезпечна зона може розташовуватися тільки в серцевині

$$\sigma_{Нкр} = 3,6H_k; \quad (5.10)$$

– при $h_H \leq h_t$ небезпечна зона може розташовуватися або в зміцненому шарі

$$\sigma_{Нкр} = 3,6H_{eff}, \quad (5.11)$$

або на межі зміцненого шару

$$\sigma_{Нкр} = H_k \left[0,8 \left(\frac{h_t}{h_H} \right) + 2,8 \right]. \quad (5.12)$$

Слід врахувати, що параметр ефективної твердості H_{eff} може істотно змінитися в процесі експлуатації зубчастих передач, що і показано в наших експериментах при дослідженні пар тертя в умовах кочення з різним ступенем проковзування. Тому при зміцненні поверхневих шарів шестерен та коліс зубчастих передач та при їх

відновленні під час ремонтних робіт необхідно враховувати не лише вихідний стан градієнтного розподілу твердості зміцненого (або відновленого) поверхневого шару, але й можливу зміну градієнтного розподілу твердості під час експлуатації деталей, оскільки даний параметр суттєво впливає на зносостійкість контактних поверхонь. Саме зміна параметру градієнтного розподілу твердості під час експлуатації є результатом зміни твердості приповерхневих шарів металу внаслідок дії нормальних та дотичних напружень при терті та опосередковано відображує напружено-деформований стан, який проявляється на контактних поверхнях. Врахування змін градієнтного розподілу твердості під час експлуатації буде сприяти більш точному прогнозуванню кінетики зношування контактних поверхонь.

5.3. Оцінка температурного чинника як основного критерію при схоплюванні контактних поверхонь.

Тертя – це процес перетворення енергії. Згідно [437], при терті відбувається перетворення зовнішньої механічної енергії в енергію внутрішніх процесів. У даній роботі запропонована оцінка енергетичних процесів при терті на макрорівні за коефіцієнтом втрат на тертя. Даний параметр відображує дисипативний характер процесу тертя, враховуючи енергетичні втрати в трибосистемах. Коефіцієнт втрат на тертя залежить не тільки від властивостей контактуючих тіл, але і від навантаження, швидкості ковзання, умов навколишнього середовища та ін.

У роботах [350, 351, 420] на підставі першого закону термодинаміки змодельовано перетворення енергії фрикційного контакту в енергію деформації, енергію руйнування і теплову енергію. В умовах ковзання максимальний розподіл тепла, що виділяється за рахунок деформації, концентрується в поверхневому шарі і різко скорочується зі збільшенням відстані від контактної поверхні.

Застосування мастильних матеріалів створює передумови для ефективного відводу тепла з зони тертя. В роботі [346] запропонована модель прогнозування температури в лінійному контакті з урахуванням статичної реологічної залежності неньютонівської поведінки мастильного матеріалу.

В роботі [330] встановлено, що середня температура в змащувальній плівці є сумою таких складових, як підвищення температури спалаху, приріст температури за рахунок внутрішнього нагріву плівки і величиною температури оливи на вході в контакт [329]. Модель [401] розглядає розподіл температури в межах зони контакту двох шорстких поверхонь. Аналіз впливу шорсткості на підвищення локальної температури в зоні контакту наводиться в роботі [387]. Найвище збільшення температури складає приблизно 220°C на площі близько 3% від номінальної площі контакту. Середня температура в межах зони контакту знаходиться в діапазоні від 150 до 220°C .

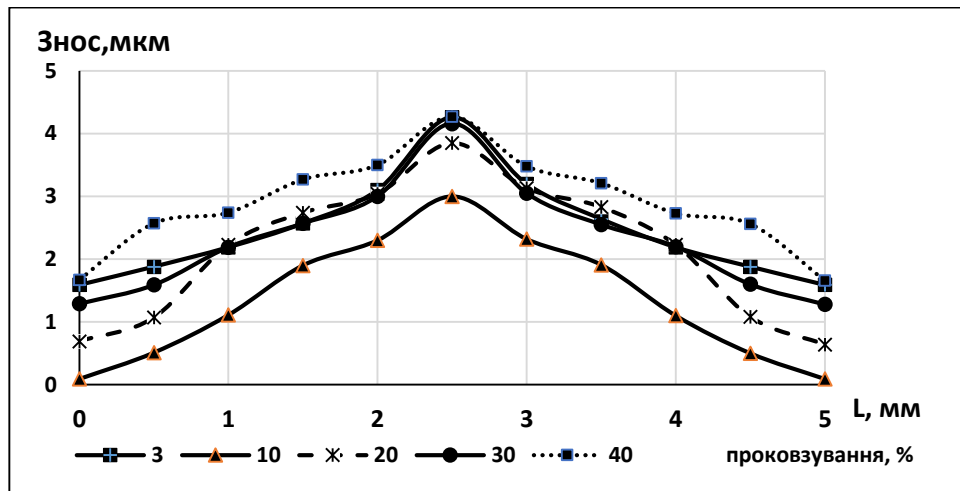
Розбіжність в розрахунках по підвищенню температури в контакті при терті в процесі деградації змащувального шару при захопленні контактних поверхонь, яка визначена за хімічною кінетичною моделлю та механічною моделлю, можуть становити до 100°C [417].

Отже, щодо питання оцінки температурного стану триботехнічного контакту – не існує єдиного підходу до вибору методики розрахунку температури в контакті. Існуючі методи оцінки впливу температурного чинника на стан мастильного шару базуються на основних принципах еластогідродинамічної теорії мащення. Однак, для пар тертя з локальним контактом, до яких відносяться зубчасті передачі, умови роботи відносяться переважно до нестационарних режимів (циклічна зміна запуск – зупинка). При цьому в процесі одного робочого циклу режим мастильної дії може змінюватися від напівсухого до гідродинамічного. В зв'язку з цим, використання тільки еластогідродинамічних критеріїв при оцінці температури в контакті представляється не зовсім коректним. Більш правильним методичним підходом щодо підвищення достовірності оцінки параметрів теплового стану триботехнічного контакту є оцінка аналізу локального приросту температури в граничних умовах мащення. Саме параметри граничного режиму мащення є домінуючими в плані прогнозування протизношувальних характеристик контакту.

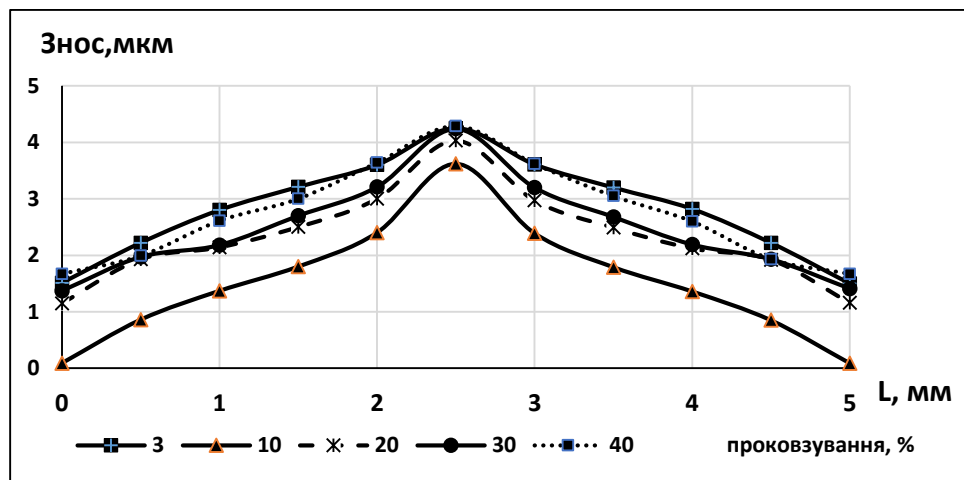
Проаналізуємо взаємозв'язок інтенсивності тепловиділення в фрикційному контакті і зносостійкістю пар тертя. Результати вимірювання зносу випереджаючої і

відстаючої поверхонь по їх лінії контактування свідчать про нерівномірність зношування пар тертя (рис. 5.10).

Чітко проявляється еюра розподілу зносу з максимумом в центральній зоні контакту і мінімумом на периферії. При цьому знос в центральній зоні перевищує, в середньому, в 2,8 раз знос контактних поверхонь на найбільш віддалених від центру ділянках. Ми вважаємо, що локальне підвищення зносу в центральній зоні контакту поверхонь є прямим наслідком одночасного впливу напружень і максимальних температур.



а)



б)

Рис. 5.10. Еюра зносу пар тертя по лінії контакту: а) випереджаюча поверхня; б) відстаюча поверхня.

Згідно [85], інтенсивність тепловиділення в зоні тертя залежить від потужності тертя і визначається співвідношенням:

$$Q_{\text{вид}} = f N_l V_{\text{ковз}} , \quad (5.13)$$

де f – коефіцієнт тертя, N_l – погонне навантаження, $V_{\text{ковз}}$ – швидкість ковзання.

Розглянемо зміну інтенсивності тепловиділення для досліджуваних поверхонь в умовах кочення з різним ступенем проковзування. При достатньому надходженні мастильного матеріалу в зону контакту, коли забезпечується ефективний тепловідвід, інтенсивність тепловиділення при збільшенні проковзування з 3 до 40% підвищується, в середньому, в 40 разів (рис. 5.11). Більш інтенсивне тепловиділення встановлено за умов кочення з проковзуванням, що перевищує 20%. Слід зазначити, що незалежно від ступеня проковзування контактних поверхонь, досліджувана трансмісійна олива характеризується високими змащувальними властивостями – сформована товщина мастильного шару становить, в середньому, 5 – 6 мкм. Згідно з розрахунковим критерієм λ , в контакті, незалежно від ступеня проковзування, реалізується гідродинамічний режим мастильного дії. Таким чином, поверхні розділені достатньою кількістю мастильного матеріалу, який є важливим регулятором теплового балансу в трибосистемах.

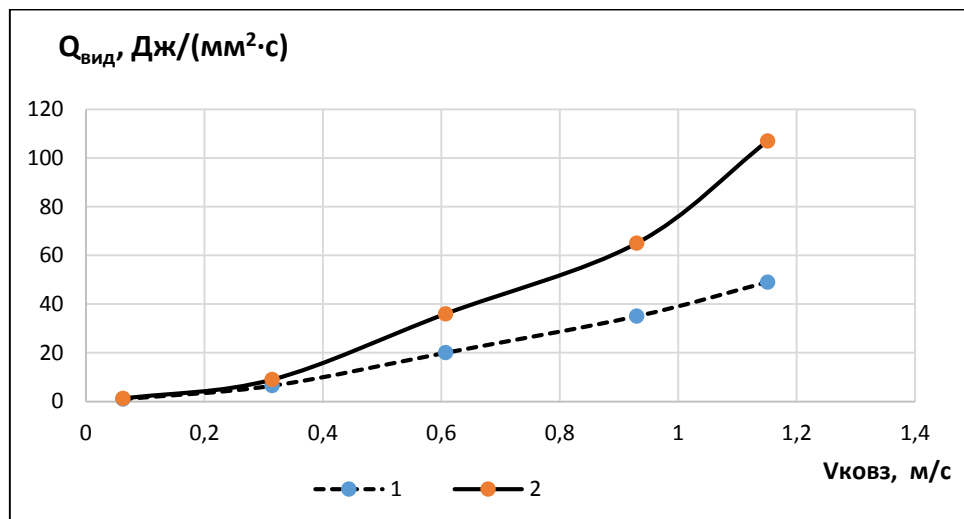


Рис. 5.11. Інтенсивність тепловиділення в фрикційному контакті: 1 – за умов достатнього надходження мастильного матеріалу; 2 – в екстремальних умовах тертя.

Однак, у формулі (5.13) враховуються тільки антифрикційні властивості оливи. Отримані експериментальні дані свідчать про підвищення коефіцієнта тертя, в середньому, в 2,2 рази при збільшенні ступеня проковзування з 3 до 40%. Даний параметр не в повній мірі відображає зміни, які протікають в змащувальному шарі при збільшенні швидкості ковзання. Саме підвищення $V_{\text{ск}}$ в 18 разів в досліджуваному

діапазоні проковзування є провідним фактором, що обумовлює зміну реологічних властивостей мастильного матеріалу [389].

Проаналізуємо рівняння балансу енергії для мастильного матеріалу [100] за умови реалізації гідро– або еластогідродбнамічного режиму мащення, яке враховує реологічні і фізичні характеристики оливи:

$$dQ_{\text{вид}} = dQ_{\text{відв}} + dQ_{\text{нагр}}, \quad (5.14)$$

де $dQ_{\text{вид}}$ – тепловиділення в змащувальному шарі елементарної товщини, $dQ_{\text{відв}}$ – тепловідвід в сусідні шари змащувального матеріалу, $dQ_{\text{нагр}}$ – кількість тепла, що витрачається на підігрів мастильного матеріалу в зоні тертя.

Прийmemo що

$$dQ_{\text{вид}}^* = \tau l \frac{\partial u}{\partial y} dy = \mu \frac{\partial u}{\partial y} l \frac{\partial u}{\partial y} dy = \mu l \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 dy, \quad (5.15)$$

$$dQ_{\text{відв}} = \lambda_0 l \frac{\partial^2 t^0}{\partial y^2} dy, \quad (5.16)$$

$$dQ_{\text{нагр}} = c_0 \rho_0 V_{\text{ковз}} l \frac{\partial t^0}{\partial x} dy, \quad (5.17)$$

де τ – дотичні напруження зсуву змащувального шару, $\frac{\partial u}{\partial y}$ – градієнт швидкості зсуву, μ – динамічна в'язкість, ρ_0 – густина мастильного матеріалу, c_0 і λ_0 – питома теплоємність і коефіцієнт теплопровідності мастильного матеріалу.

Тоді рівняння балансу енергії запишемо у вигляді:

$$\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = \lambda_0 \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + c_0 \rho_0 V_{\text{ковз}} \frac{\partial t^0}{\partial x}. \quad (5.18)$$

На підставі отриманих експериментальних даних про реологічні характеристики досліджуваної трансмісійної оливи встановлена динаміка тепловиділення в змащувальному шарі згідно з аналітичними залежностями за формулами (5.15 – 5.18). При низьких швидкостях ковзання (до 0,3 м/с), що відповідає проковзуванню до 10%, тепловиділення в змащувальному шарі характеризується незначним підвищенням, максимальні показники даного параметра складають 12 Дж/с (рис. 5.12). При цьому максимальне підвищення температури мастильного матеріалу склало 2 – 3⁰С. Стрімке збільшення тепловиділення встановлено при

перевищенні швидкості ковзання 0,6 м/с. Однак, максимальне збільшення температури незначне і досягає 10^0 С.

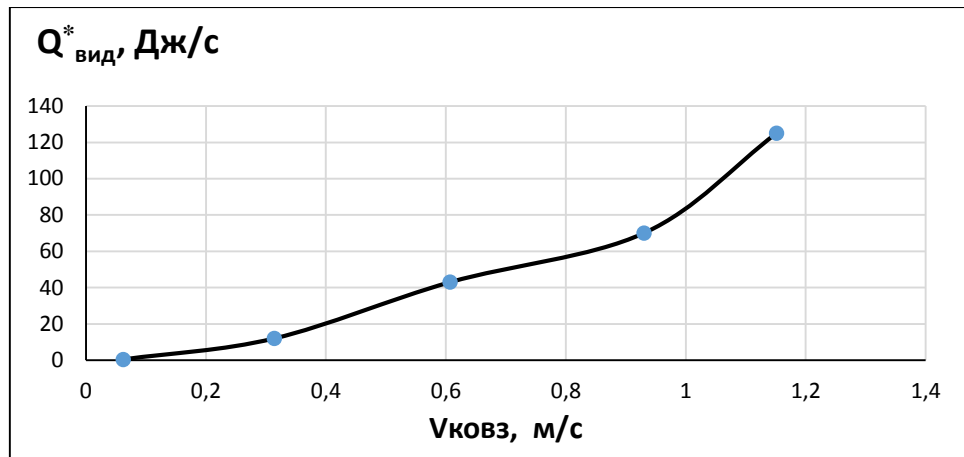


Рис. 5.12. Залежність тепловиділення в змащувальному шарі від величини проковзування в умовах кочення з ковзанням.

Таким чином, наведений аналіз тепловиділення в змащувальному шарі за формулою (5.18) в умовах кочення з проковзуванням показує, що при гідро– і еластогідродинамічному режимі мащення здійснюється інтенсивний тепловідвід, підвищення температури в контакті незначне. Отже, мастильний матеріал зменшує втрати потужності на тертя при наявності ефективного розділяючого мастильного шару ($h \gg R_a$), що істотно знижує інтенсивність тепловиділення в контакті (рис. 5.11).

В роботі [100] при розрахунку температури мастильного шару прийняті наступні допущення:

- тепловідводом в поверхні тертя можна знехтувати;
- температура поперек змащувального шару постійна;
- температура оливи змінюється тільки по довжині мастильного шару.

Якщо температура поперек мастильного шару постійна, то $\frac{\partial t^0}{\partial y} = 0$, $\frac{\partial^2 t^0}{\partial y^2} = 0$.

Отже, зміна температури буде тільки по довжині змащувального шару:

$$\frac{\partial t^0}{\partial x} = \frac{dt^0}{dx} \quad (5.19)$$

Згідно з прийнятими припущеннями, рівняння балансу енергії набуде вигляду:

$$\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = c_0 \rho_0 V_{\text{КОВЗ}} \frac{\partial t^0}{\partial x}. \quad (5.20)$$

Якщо прийняти $y = h$, де h – товщина змащувального шару, $u = V_{\text{КОВЗ}}$, то

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (2y - h) + \frac{V_{\text{КОВЗ}}}{h} = \frac{1}{2\mu} \left(6\mu V_{\Sigma \text{Коч}} \frac{h - h_0}{h^3} \right) (2y - h) + \frac{V_{\text{КОВЗ}}}{h} = \\ &= \frac{V_{\text{КОВЗ}}}{h} \left[3 \frac{(h - h_0)(2y - h)}{h^2} + \frac{V_{\text{КОВЗ}}}{V_{\Sigma \text{Коч}}} \right]. \end{aligned} \quad (5.21)$$

На підставі зазначених припущень, після інтегрування $\int_0^h \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 dy$ і перетворень, згідно [100] запропонована формула для визначення приросту температури в змащувальному шарі:

$$\Delta t^0 = \int_{x_1}^x \frac{2\mu V_{\text{КОВЗ}}}{c_0 \rho_0 h_0 h} \left[3 \left(\frac{h - h_0}{h} \right)^2 + \left(\frac{V_{\text{КОВЗ}}}{V_{\text{Коч}}} \right)^2 \right] dx. \quad (5.22)$$

В експерименті після 400 циклу напрацювання мастильний матеріал примусово видалявся з контактних поверхонь. В таких умовах гідродинамічна складова товщини мастильного шару відсутня. Тому основні змащувальні, антифрикційні та протизношувальні властивості трибоконтакту визначаються стійкістю граничних змащувальних шарів до механічних і температурних впливів. Спостерігалось різке коливання товщини мастильного шару, що призводило до більш жорстких умов тертя – проявляються напівсухий, граничний і змішаний режими мастильного дії (табл. 5.4).

Таблиця 5.4

Товщина мастильного шару в контактї в екстремальних умовах тертя

Проковзування, %	Товщина змащувального шару, мкм
до 3	0,23 – 4,7
10	0,23 – 4,6
20	0,19 – 4,5
30	0,13 – 4,3
40	0 – 3,2

В умовах, коли відсутня гідродинамічна складова товщини мастильного шару, дотичні напруження зсуву локалізуються в структурованих граничних плівках, які

характеризуються іншими реологічними властивостями, в порівнянні з об'ємною фазою. Це призводить до зростання коефіцієнта тертя, в середньому, в 2 рази для всіх досліджуваних контактних поверхонь, незалежно від ступеня проковзування. Відповідно, параметр $fN_lV_{\text{ковз}}$ в формулі (5.13), що характеризує потужність тертя, підвищується аналогічно зміні коефіцієнта тертя.

Збільшення потужності тертя обумовлює інтенсифікацію тепловиділення в контакті. Інтенсифікація тепловиділення відбувається при $V_{\text{ск}} > 0,6$ м/с, що відповідає проковзуванню відстаючої поверхні 20 – 40% (рис. 5.11). Це є провідним чинником, що призводить до десорбції граничних змащувальних шарів, зменшенню негідродинамічної складової товщини мастильної плівки і, як наслідок, до зростання небезпеки заїдання контактних поверхонь.

При $h \ll R_a$; $h \rightarrow 0$ в умовах напівсухого і граничного режимів мащення розрахувати тепловиділення в змащувальному шарі за формулами (5.15 – 5.18) важко. Приріст температури (5.22) в граничному шарі змащувального матеріалу при $h < 0,5$ мкм досягає 400 – 500 °С. На наш погляд, це досить завищені показники, оскільки значно перевищують температуру спалаху досліджуваного мастильного матеріалу. При реалізації в контакті напівсухого і граничного режимів мащення слід використовувати іншу методику розрахунку критичних температур і виходити з таких припущень.

При руйнуванні граничних змащувальних шарів виникає локальне збільшення температури на дискретних ділянках при фрикційній взаємодії. Досліджувана контактна модель ролик – ролик являє собою джерело теплоутворення у вигляді адитивної сукупності пов'язаних по площі контакту точкових джерел теплоутворення (рис. 5.13).

Згідно [85], для умов кочення з проковзуванням інтенсивність розігріву випереджаючої і відстаючої поверхонь залежить від сумарних швидкостей кочення і швидкості ковзання. В умовах, близьких до заїдання, відбувається швидкий приріст температури відстаючого ролика, в порівнянні з випереджаючим, причому швидкість збільшення температури залежить від швидкісного режиму, навантаження і дуже мало від радіуса кривизни.

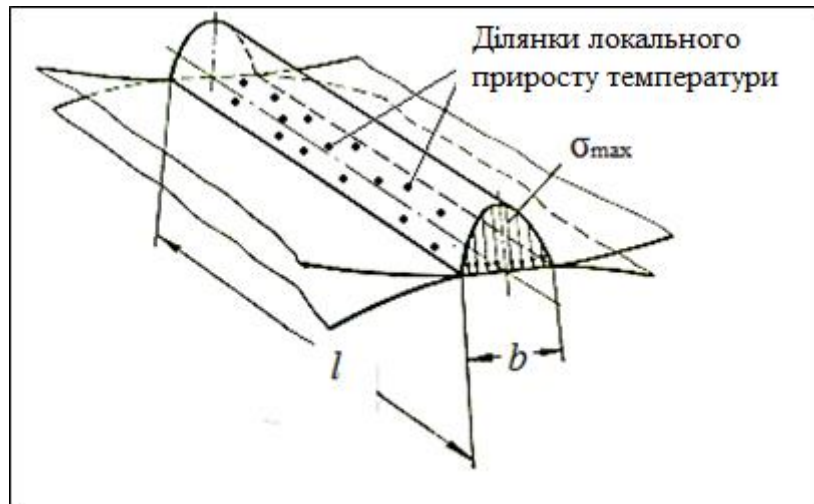


Рис. 5.13. Схема фрикційного контакту при роботі пар тертя в умовах кочення з проковзуванням.

Величина приросту температури залежить від відношення швидкості руху тіл і коефіцієнта теплопровідності, тобто від числа Pe . Введемо критерій Pe (число Пекле), який характеризує відношення теплоємності потоку осевого напрямку до теплового потоку в поперечному напрямку і визначається співвідношенням:

$$Pe = \frac{Vl}{a_t}, \quad (5.23)$$

де V – швидкість, l – довжина лінії контакту поверхонь, a_t – коефіцієнт теплопровідності, який визначається відношенням:

$$a_t = \frac{\lambda}{\rho c}, \quad (5.24)$$

де ρ – питома вага металу, c – питома теплоємність металу, λ – коефіцієнт теплопровідності металу.

Так як в досліджуваній контактній моделі швидкість кочення випереджаючої поверхні постійна і становить 2,75 м/с, то швидкість руху джерела тепла, згідно з критерієм Pe , буде визначатися швидкістю ковзання при наявності проковзування контактних поверхонь:

$$\Delta Pe = Pe_1 - Pe_2 = \frac{V_1 l}{a_t} - \frac{V_2 l}{a_t} = \frac{(V_1 - V_2) l}{a_t} = \frac{V_{\text{ковз}} l}{a_t}. \quad (5.25)$$

де V_1 , V_2 – швидкість кочення випереджаючої і відстаючої поверхонь відповідно, $V_{\text{ковз}}$ – швидкість ковзання.

При мінімальному досліджуваному 3%-ному проковзуванні відстаючої поверхні число ΔP_e становить 2,08. Збільшення ступеня проковзування обумовлює і кореляційне підвищення критерію Pe : ΔP_e при проковзуванні 40% становить 39,93.

Відповідно до гіпотези, висунутої Х.Блоком, для кожної пари трибоспряжень і типу мастильного матеріалу існує критична температура, при перевищенні якої відбувається схоплювання або заїдання контактних поверхонь внаслідок втратою мастильним матеріалом його захисних протизношувальних властивостей [335]. При цьому критерієм оцінки умов виникнення заїдання є критична температура в зоні контакту елементів трибоспряжень, яка виражається залежністю:

$$t_{\Sigma \text{кр}} = t_0 + \vartheta, \quad (5.26)$$

де t_0 – температура поверхонь до входу в зону контакту, ϑ – температура спалаху, яка представляє миттєве підвищення температури, при якій відбувається заїдання.

Умова відсутності заїдання виконується при

$$t_0 + \vartheta \leq t_{\Sigma \text{кр}} = \text{const}, \quad (5.27)$$

де t_0 визначається експериментально, ϑ – розрахунковим шляхом.

За умов рівності початкових температур контактних поверхонь циліндричної форми миттєве збільшення температури ϑ визначається за формулою:

$$\vartheta = 0,83 \frac{f N_l V_{\text{КОВЗ}}}{(\sqrt{\lambda_1 \rho_1 c_1 V_{\text{К1}}} + \sqrt{\lambda_2 \rho_2 c_2 V_{\text{К2}}}) \sqrt{b}}, \quad (5.28)$$

де f – коефіцієнт тертя, N_l – погонне навантаження, $V_{\text{КОВЗ}}$ – швидкість ковзання, $\lambda_{1,2}$ – коефіцієнт теплопровідності, $\rho_{1,2}$ – питома вага, $c_{1,2}$ – питома теплоємність випереджаючої (1) і відстаючої (2) поверхонь відповідно; b – напівширина площадки контакту по Герцу.

Відповідно до розрахунків, найбільший вплив на миттєве підвищення температури в зоні контакту в умовах нестационарної роботи трибоелементів створює параметр $f N_l V_{\text{КОВЗ}}$, який характеризує потужність тертя і тепловиділення в контакті. При проковзуванні контактних поверхонь до 10% як в умовах достатньої подачі мастильного матеріалу в зону тертя, так і в екстремальних умовах мащення локальне підвищення температури незначно (рис.5.14). Параметр $t_0 + \vartheta \ll t_{\Sigma \text{кр}}$, в зв'язку з цим схоплювання контактних поверхонь не встановлено.

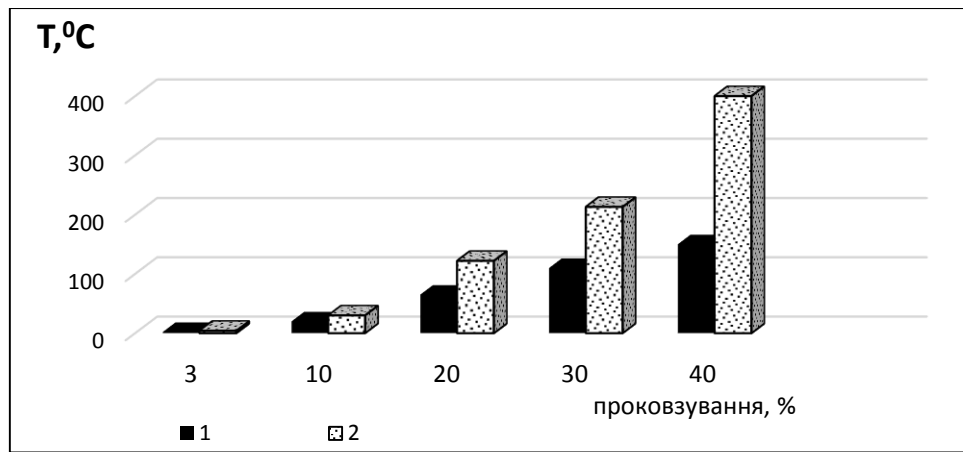


Рис. 5.14. Локальне підвищення температури в фрикційному контакті: 1 – достатня кількість мастильного матеріалу, 2 – екстремальні умови тертя.

При подальшому збільшенні ступеня проковзування, як було проаналізовано вище, відбувається підвищення потужності тертя. Локальний приріст температури збільшується, в середньому, в 3 і 7 рази при проковзуванні 20 і 40% відповідно в еластогідродинамічному режимі мащення. Однак, достатнє надходження мастильного матеріалу в зону тертя створює передумови для ефективного відводу тепла. В екстремальних умовах локальне збільшення температури перевищує в 4 (проковзування 20%) і 13 разів (проковзування 40%) аналогічний параметр при 10% проковзуванні. Перші ознаки захоплення контактних поверхонь спостерігаються при локальному збільшенні температури до 125°C на 490-ому циклі (проковзування 20%) і при локальному збільшенні температури до 410°C на 415 циклі (проковзування 40%). На підставі отриманих експериментальних даних можна оцінити температурну стійкість граничних шарів. Вона відповідає мінімальній температурі $t_{\Sigma_{кр}}$, при якій з'являються перші ознаки захоплення контактних поверхонь. Для досліджуваного мастильного матеріалу даний параметр становить 145°C.

У роботах [89, 117, 208, 443] відзначається висока температурна стійкість граничних змащувальних шарів, яка досягає, залежно від типу присадки і базової основи, 90 – 400°C. Однак, в умовах проковзування спостерігається зниження критичної температури руйнування граничних шарів за рахунок одночасного впливу температури і градієнта швидкості зсуву. Наявність пластичних деформацій

контактних поверхонь також призводить до зниження критичної температури руйнування граничних шарів [180].

В роботі [411] запропонована синергетична модель, в якій плавлення мастильного шару відбувається за рахунок механізмів термодинамічного і зсувного впливів. Стосовно до досліджуваних процесів мастильного дії в нестационарних умовах тертя, основні положення даної теорії можливо змоделювати в такий спосіб. В умовах кочення з проковзуванням критична температура $t_{\Sigma_{кр}}$, при якій відбувається заїдання, залежить, перш за все, від швидкості ковзання. Саме з підвищенням швидкості ковзання зростає градієнт швидкості зсуву змащувальних шарів, встановлюється критичне значення пружних напружень, при якому відбувається руйнування граничних шарів шляхом їх плавлення. Таким чином, градієнт швидкості зсуву мастильних шарів є провідним фактором при механічній деструкції змащувальних шарів. Одночасно, підвищення швидкості ковзання обумовлює зростання температури в контакті і, як наслідок, термічну деструкцію граничних шарів. Синергізм впливу зазначених процесів проявляється в різких коливаннях товщини мастильного шару і коефіцієнта тертя, зростанні питомої роботи тертя, зниження ефективної в'язкості мастильного матеріалу. Дані зміни триботехнічних характеристик контакту свідчать про порушення структурної пристосованості трибосистеми, перехід її в нерівноважний стан, що веде до прояву перших ознак захоплення контактних поверхонь і скорочення періоду нормальної роботи трибоелементів.

Підвищення енергетичного балансу трибосистеми при механічному впливі внаслідок збільшення швидкості ковзання при проковзуванні, локалізація дотичних напруг в тонких приповерхневих шарах створюють градієнт температур як по глибині, так і по довжині контакту внаслідок зниження інтенсивності процесів теплообміну з навколишнім середовищем, результатом чого є зміна їх механічних властивостей. Однак, якщо температурний градієнт на поверхні металу створює напруги, які при накладенні дотичних напруг приводять до розрихлення матеріалу і підвищеного зносу в центральній частині по лінії контакту, то по глибині в цій же зоні відбувається найбільш інтенсивне зміцнення матеріалу. Поява в контакті зони

локального підвищеного зносу призводить до зміни напружено-деформованого стану поверхонь і виникненню центру концентратора напруг.

Моделювання контакту з використанням методу скінченних елементів (програма Nastran) дозволяє розрахувати поля температур і напружень в досліджуваних зразках [312]. Для моделювання процесів відведення тепла з зони фрикційного контакту в навколишнє середовище використовувалися наступні граничні умови: температура навколишнього середовища приймалася рівною 20°C , початкова температура зразків вважалася рівною температурі навколишнього середовища. Розрахунки, виконані за даною методикою, показали, що максимальні значення температур і еквівалентних температурних напружень характерні для центральної зони по лінії контакту поверхонь (рис. 5.15).

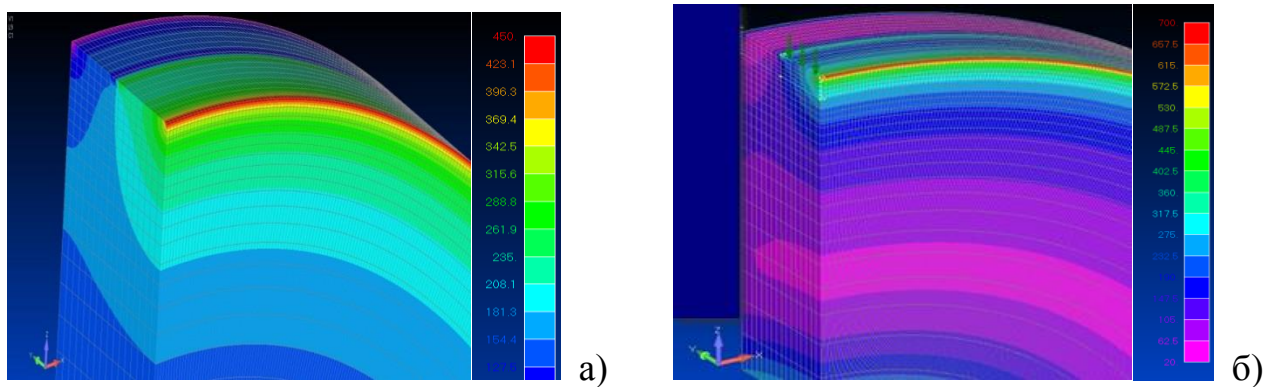


Рис. 5.15. Зміна температури (а) і еквівалентних температурних напружень (б) по лінії фрикційного контакту (перетин по центру доріжки тертя досліджуваного зразка).

Наприклад, підвищення температури з 120°C до 400°C призводить до збільшення еквівалентних температурних напружень з 220 до 600 МПа відповідно при проковзуванні 20 і 40%.

Саме по центральній ділянці лінії контакту проявляються перші ознаки схоплювання контактних поверхонь при 20 – 40%–ному проковзуванні в умовах примусового видалення мастильного матеріалу із зони контакту (рис. 5.16).

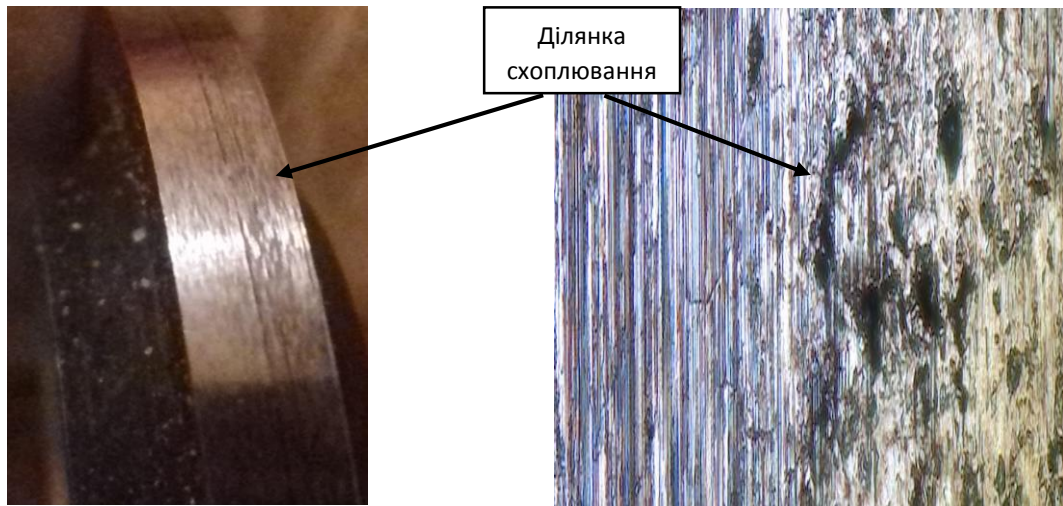


Рис. 5.16. Ділянка схоплювання контактних поверхонь, яка розташовується в центральній зоні по лінії фрикційного контакту.

В роботі [372] встановлено прояв зон максимального місцевого зносу по лінії зачеплення зубчастих передач, або самих «слабких» зон, які залежать від температури в контакті: пітинг проявляється в зонах переважного домінування швидкостей кочення над швидкостями ковзання, а заїдання - в зонах максимальних швидкостей ковзання.

Результати наших досліджень в нестационарних умовах тертя дозволяють доповнити уявлення про структурно-енергетичний стан зон максимального місцевого зносу. При мінімальному проковзуванні (до 3%), яке проявляється в найближче розташованих ділянках до полюсної зони зачеплення зубчастих передач, домінують процеси втомного руйнування пластичних вторинних структур, які характеризуються низькими показниками питомої роботи тертя, мінімальним приростом температури, стійкістю до схоплювання в умовах недостатнього надходження мастильного матеріалу в зону контакту. Зі збільшенням проковзування до 20 - 40%, яке відповідає заплосним зонам зачеплення зубчастих передач, процеси руйнування міцних вторинних структур характеризуються високими показниками питомої роботи тертя, підвищенням температури в контакті, зміцненням поверхневих і приповерхневих шарів металу, схильністю до схоплювання в екстремальних режимах тертя.

5.4. Вплив структурно-фазових перетворень в поверхневих шарах металу при терті на зносостійкість контактних поверхонь.

Рентгенівська зйомка проводилася на дифрактометрі ДРОН-3 в мідному $\text{Cu} - \text{K}\alpha$ випромінюванні з графітовим монохроматором. Зйомка велася в автоматичному режимі з кроковим переміщенням 0,1 градуса і часом експозиції в кожній точці 4 сек. Надалі проводилася комп'ютерна обробка отриманих цифрових даних.

Зразки для досліджень отримували після проведення випробувань, впродовж яких змінювали величину складової проковзування контактних поверхонь в процесі випробувань. На рис. 5.17 наведені дифрактограми поверхні вихідного зразка та зразків сталі 45, які випробовувались в нестационарних умовах тертя при коченні з проковзуванням від 3 до 40% (мастильний матеріал – трансмісійна олива Okko GL-4 80w).

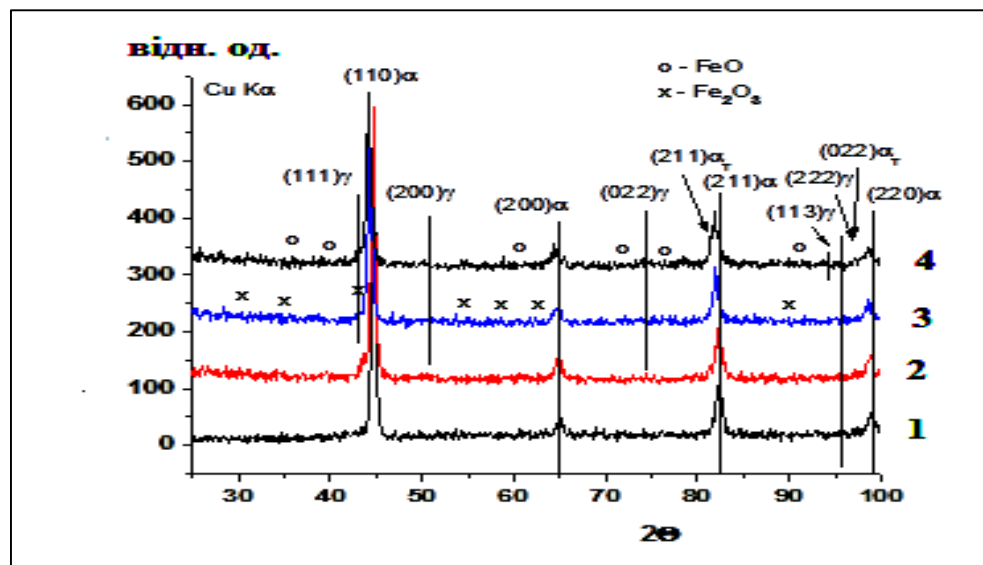


Рис.5.17. Дифрактограми вихідної поверхні сталі 45 (1) та відстаючої поверхні за умов проковзування 3% (2), 20% (3), 40% (4).

Аналіз дифрактограм, наведених на рис.5.17, свідчить про появу ряду дифракційних ефектів, що проявляються в різній ступені в залежності від величини проковзування під час тертя. Серед цих ефектів варто відзначити наступні:

1) зміщення дифракційних максимумів у бік менших кутів дифракції. Такі зміни на дифрактограмах матеріалу, в якому не змінюються хімічний і фазовий склад,

зазвичай пов'язують з формуванням у досліджуваному шарі макронапружень стиснення, які викликані деяким зростанням міжплощинних відстаней у кристалічній ґратці;

2) розширення дифракційних максимумів, яке у загальному випадку може бути пов'язане як із зменшенням розмірів областей когерентного розсіювання, так і зі зростанням мікронапружень (показовою у цьому випадку є лінія $(200)\alpha$);

3) зміна асиметрії дифракційних максимумів, особливо $(211)\alpha$, яка переважно пов'язується з формуванням тетрагональної оцк ґратки (ОЦТ) за рахунок розчинення у ній атомів вуглецю. В залежності від кількості розчиненого у ґратці вуглецю дифракційних максимум $(211)\alpha$ у тій чи іншій мірі розщеплюється на так званий мартенситний дублет $(211)\alpha$ - $(112)\alpha_T$, що характеризується величиною міждублетної відстані (тим більшої, чим більша концентрація вуглецю у тетрагональній кристалічній ґратці (ОЦТ));

4) зміна співвідношення інтенсивності дифракційних максимумів від різних площин (наприклад $I_{(200)\alpha}/I_{(110)\alpha}$), яка може бути пов'язана з деякою переорієнтацією зерен (зміною кристалографічної текстури) у поверхневому шарі, який зазнає інтенсивної деформації в процесі тертя з проковзуванням контактних поверхонь;

5) поява дифракційних максимумів, що відповідають ГЦК аустенітній фазі $((111)\gamma)$;

б) поява дифракційних максимумів, що відповідають оксидам FeO і Fe₂O₃.

Розглянемо залежності перерахованих дифракційних ефектів і структурно-фазових перетворень у поверхневих шарах контактуючих зразків сталі 45, які обумовлюють ці ефекти, від величини складової проковзування контактних поверхонь під час тертя.

Проведені на рис. 5.17 вертикальні лінії відзначають положення дифракційних максимумів фериту сталі 45 у вихідному стані. З аналізу дифрактограм зразків після тертя видно, що з ростом величини проковзування під час тертя спостерігається все більше зміщення дифракційних максимумів у бік менших кутів дифракції. Для оцінки величини залишкових напружень ($\sigma_1 + \sigma_2$) у поверхневому шарі використовували

вираз, що пов'язує напруження із зміною міжплощинної відстані $\Delta d/d$ та пружними характеристиками (модуль пружності Юнга E і коефіцієнт Пуассона ν) матеріалу:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = -E(d - d_0)/\nu d_0, \quad (5.29)$$

де d_0 і d – міжплощинні відстані у вихідному і деформованому станах.

Оцінки залишкових напружень ($\sigma_1 + \sigma_2$) в поверхневих шарах зразків після випробувань проведені при припущенні, що напруження σ_3 незначні, по зміні міжплощинних відстаней вказують на формування макронапружень стиснення. З рис.5.18 видно, що з ростом величини проковзування контактних поверхонь величина цих напружень зростає.

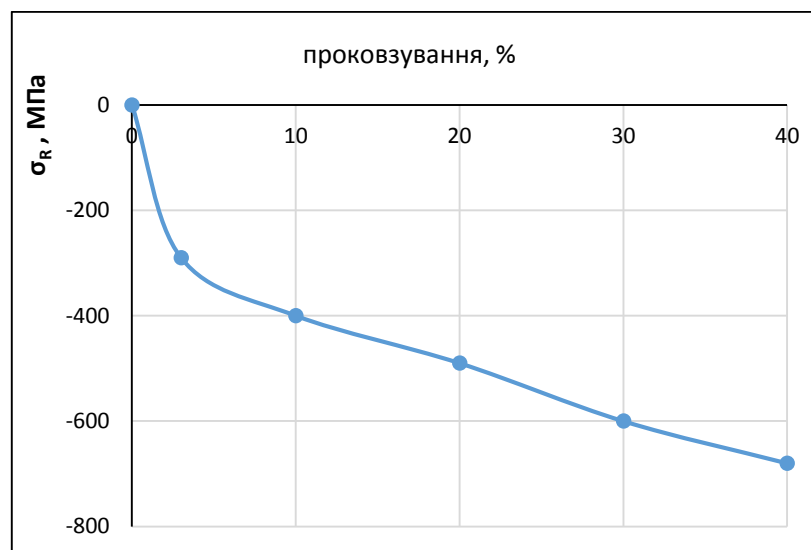


Рис.5.18. Залежність залишкових макронапружень в поверхневому шарі зразків сталі 45 від величини проковзування контактних поверхонь.

Аналіз співвідношення інтенсивностей рефлексів (110) і (200) фериту I_{200}/I_{110} вказує на незначну зміну переважної орієнтації зерен в поверхневому шарі зразків після випробувань з різним відсотком проковзування. Так, в порівнянні з випробуваннями без проковзування, після яких $I_{200}/I_{110} = 0,073$, відношення інтенсивностей після випробувань з проковзуванням I_{200}/I_{110} змінюється в межах 0,081-0,092, вказуючи на появу більшої кількості зерен з орієнтацією площин 200 паралельно поверхні внаслідок деформаційних процесів.

У кутових положеннях, які відповідають максимумам оксидів заліза FeO і Fe₂O₃, з'являються рефлекси дуже незначної інтенсивності. Тобто можна говорити

про наявність незначної кількості оксидів, що корелює з даними енергодисперсійного рентгенівського аналізу, які показують майже подвійне зростання вмісту кисню в поверхневому шарі з ростом величини проковзування контактуючих поверхонь до 20 – 40%. Тобто в процесі тертя, на активуючих контактних поверхнях, інтенсифікуються хімічні процеси окислювання з утворенням тонких оксидних шарів, які перешкоджають розвитку процесів схоплювання і / або катастрофічного зношування [158].

Також, слід звернути увагу на появу після випробувань рефлексів, які відповідають аустенитній γ -фазі. Хоча кутове положення рефлексу $(111)\gamma$ близько до кутового положення максимуму $(400)\text{Fe}_2\text{O}_3$, згідно з даними роботи [158] при терті можливо утворення залишкового аустеніту. Це пов'язано з багаторазовим локальним нагріванням мікровершин виступів шорстких поверхонь до критичних температур (A_c) і їх швидким охолодженням. Даний процес відбувається при термо – механічній деструкції граничних змащувальних шарів, яка частіше проявляється при зростанні ступеня проковзування. У нашому випадку утворення залишкового аустеніту підтверджується наявністю як і інших рефлексів аустеніту, так і оцінкою співвідношення інтенсивностей рефлексів $(111)\gamma$ і $(110)\alpha$. Даний аналіз дозволяє зробити висновок, що об'ємна частка аустеніту не перевищує $\sim 8\%$ і майже не змінюється при зміні величини проковзування.

Ще одним дифракційним ефектом, є ефект, який дозволяє оцінити наявність перерозподілу вуглецю між фазами (мартенсит – ферит). Перш за все, це асиметрія дифракційного максимуму $(211)\alpha$ фази. За рахунок утворення мартенситу з підвищеним вмістом вуглецю в кристалічній ОЦК гратці відбувається розщеплення максимуму (211) на так званий мартенситний дублет. Це пов'язано з зміною кристалічної гратки ОЦК фериту в тетрагональну об'ємноцентровану гратку, що проявляється у виникненні двох відображень від площин $(211)\alpha$ і $(112)\alpha_T$ (третє відображення $(121)\alpha_T$ збігається з відображенням $(211)\alpha$). Як вже говорилося раніше, величина междублетної відстані, виміряна між кутовими положеннями центрів мас двох суб-максимумів $(211)\alpha$ і $(112)\alpha_T$, залежить від вмісту вуглецю в мартенситі, що дозволяє вирішувати зворотну задачу. Виходячи з аналізу междублетних відстаней,

zareєстрованих для різних величин проковзування при терті, можна оцінити зміну концентрації вуглецю в мартенситі деформації, що утворюється при терті контактних поверхонь.

У нашому випадку видно, що з ростом величини проковзування міждублетна відстань δ_M (рис. 5.19а) і концентрація вуглецю в мартенситі (рис. 5.19б) дещо збільшуються, що призводить до зміцнення поверхневого шару.

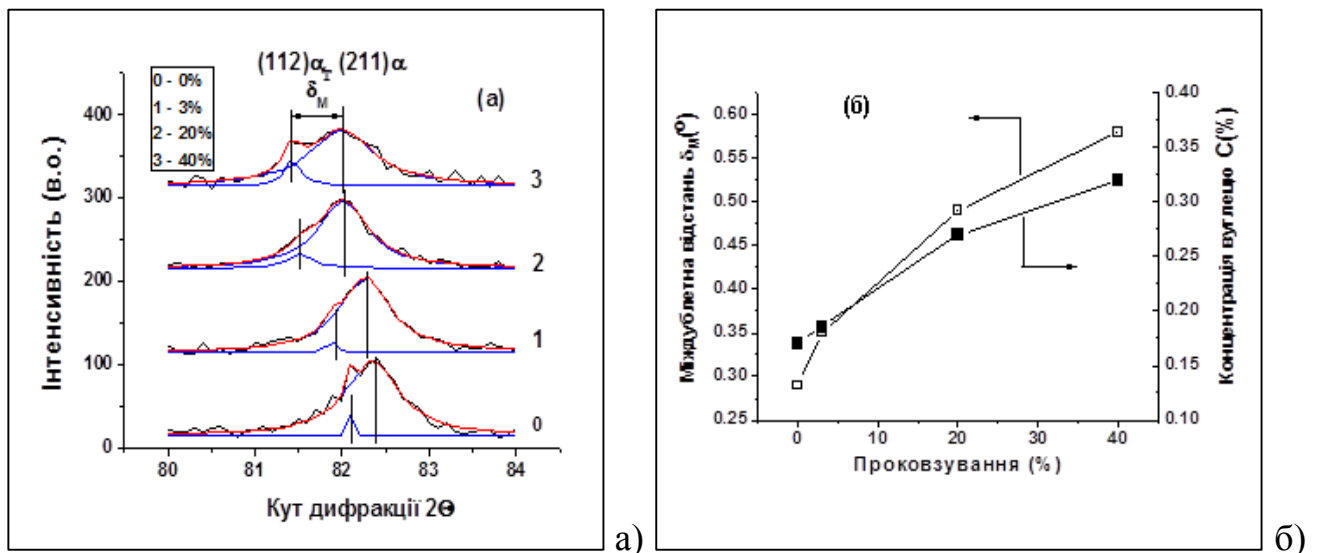


Рис. 5.19. Фрагменти рентгенограм (а), міждублетна відстань і концентрація вуглецю в мартенситі (б) в поверхневих шарах зразків сталі 45 після випробувань з різною величиною проковзування контактних поверхонь.

Розглянемо ще один важливий дифракційний ефект – розширення дифракційних максимумів. Для прикладу на рис. 5.20 наведено фрагменти рентгенограм поверхонь зразків сталі 45 в двох кутових інтервалах відображень, на яких видно поступове розширення максимумів $(200)\alpha$ і $(220)\alpha$ з ростом величини проковзування контактних поверхонь, в порівнянні з вихідним станом. Відзначимо, що ми розглядаємо фізичне розширення, що виявляється за рахунок структурних змін, на противагу інструментальному розширенню (пов'язаного з дозволяючою здатністю дифрактометра).

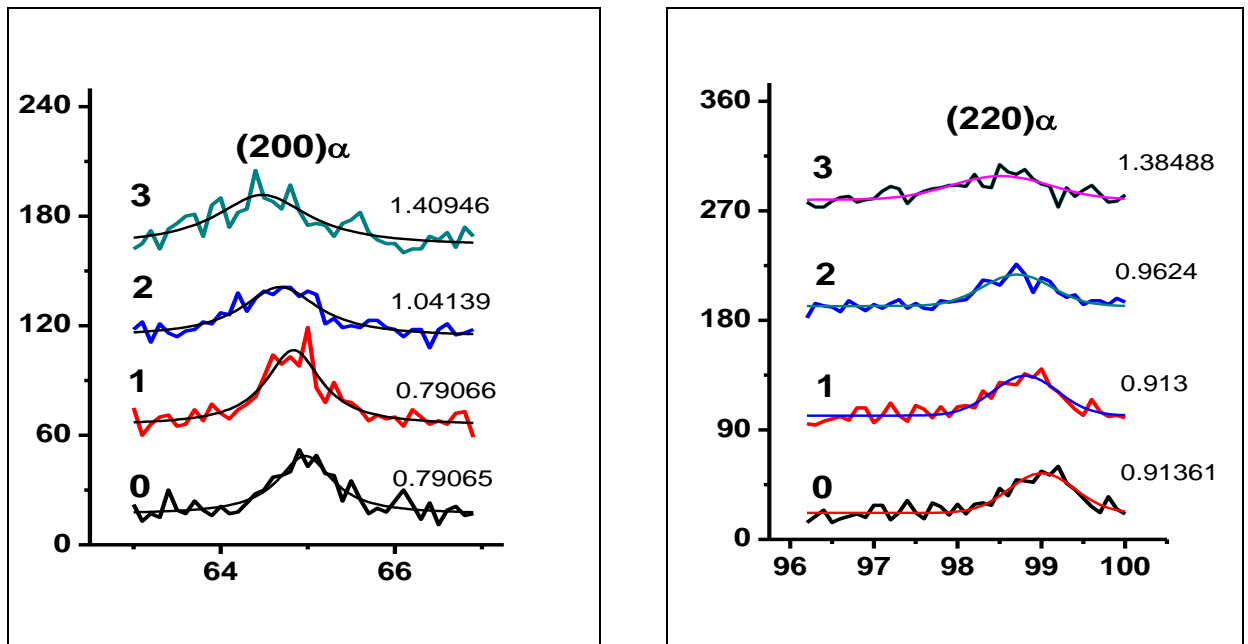


Рис. 5.20. Фрагменти рентгенограм поверхневих шарів зразків сталі 45 в початковому стані (0) і після випробувань з різною величиною проковзування контактних поверхонь (3% (1), 20% (2), 40% (3)) із зазначенням розширення максимумів.

Оцінимо вклади в фізичне розширення B розмірів областей когерентного розсіювання $\beta_{OKP} = 1/D$ і мікроспотворень кристалічної ґратки $\langle \varepsilon \rangle = \langle \Delta d \rangle / d$. Для цього скористаємося методом Вільямсона–Хола [373, 459], визначивши розширення всіх зареєстрованих максимумів і побудувавши залежність розширення від тангенса кута відображення Θ (рис. 5.21). Продовжимо розглядати співвідношення Шеррера з урахуванням довжини хвилі рентгенівського випромінювання (Cu K α : $\lambda = 0,154178$ нм):

$$B \cos \theta = (0.9\lambda/D) + \varepsilon \sin \theta.$$

Очевидно, що нахил залежності $B = f(\operatorname{tg} \Theta)$ відповідає мікроспотворенням кристалічної ґратки $\langle \varepsilon \rangle$, а відрізок, який відсікається на осі ординат, є зворотна величина розміру ОКР ($\beta_{OKP} = 1/D$).

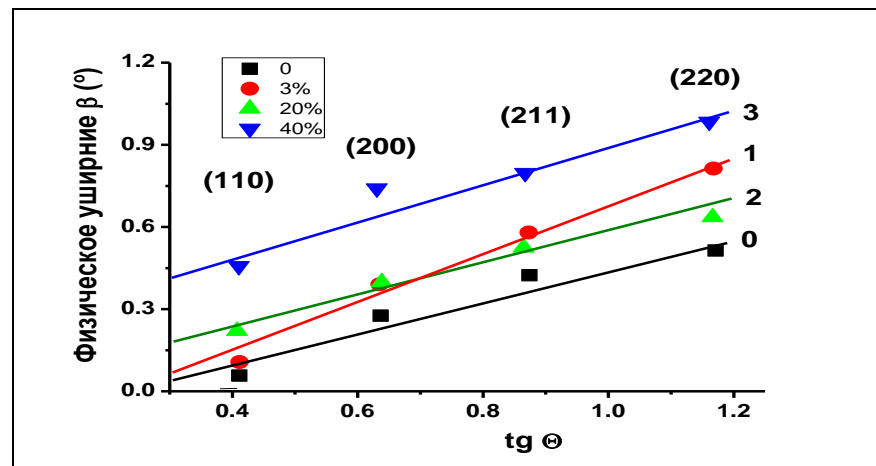


Рис. 5.21. Залежності фізичного розширення від тангенса кута відбиття для відображень зразків сталі 45 в початковому стані (0) і після випробувань з різною величиною проковзування контактних поверхонь (3% (1), 20% (2), 40% (3)).

Аналіз отриманих залежностей фізичного розширення від тангенса кута відбиття для відображень зразків сталі 45 після випробувань проведено в порівнянні з вихідним станом сталі 45 (загартовування + відпуск). Основний внесок в розширення вихідного зразка вносять мікроспотворення решітки, викликані, очевидно, попередньою термообробкою. Найменша величина проковзування контактних поверхонь (3%) під час випробувань веде до ще більшого зростання мікроспотворень при майже повній відсутності змін розмірів зерен в поверхневому шарі. Подальше зростання величини проковзування контактних поверхонь (до 20 і 40%) дещо знижує мікроспотворення, але призводить до поступового зменшення розмірів ОКР (відрізок відсікається на осі ординат – збільшується). Аналіз даного параметру дає можливість оцінити розміри ОКР величини, які складають ~ 50 і ~ 20 нм в разі величини проковзування контактних поверхонь 20 і 40% відповідно. Це істотно менше, ніж розмір ОКР в початковому стані ($\sim 0,5 - 0,8$ мкм).

Висновки до розділу 5

1. Встановлено зниження зносостійкості контактних поверхонь з 3% проковзуванням, яке відбувається внаслідок їх низької активації, формування граничних адсорбційних шарів фізичної природи, в результаті чого утворюються

вторинні структури I типу і проявляється сильне пластифікування поверхневих і приповерхневих шарів металу (зниження мікротвердості сталі 45 досягає, в середньому, 1000МПа).

2. Збільшення проковзування до 10 – 40% інтенсифікує процеси, що характеризують утворення аморфізованого деформованого шару металу по глибині, збільшення мікротвердості вторинних структур II типу, насичення активними елементами поверхневих шарів металу, підвищення енергоємності металу при терті.

3. При підвищенні швидкості ковзання від 0,315 м / с до 1,14 м / с при коченні з проковзуванням встановлено збільшення глибини поширення напружено - деформованого стану контактних поверхонь внаслідок переходу трибосистеми в граничний режим мащення, що знижує зносостійкість пар тертя: глибина деформованих шарів збільшується з 40 ... 50 мкм до 100 ... 300мкм, сумарний лінійний знос складає 4,27 і 6,11 мкм при підвищенні величини проковзування з 20 до 40% відповідно.

4. Встановлено формування епюри розподілу мікротвердості для вторинних структур II типу по лінії прикладання навантаження, для якої характерна максимальна зона зміцнення в центрі контакту і поступове зниження ступеня зміцнення до периферії лінії контакту. При цьому встановлена кореляція між ступенем зміцнення поверхневих шарів металу і об'ємом деформованого металу по глибині.

5. Представлено практичне застосування методики прогнозування оптимальної структури поверхневих шарів, що утворюється в процесі експлуатації елементів трибоспряжень. Методика заснована на визначенні усередненого значення мікротвердості приповерхневих шарів матеріалу в деякій розглянутої локальної області деформованого при терті об'єму контактних поверхонь глибиною до 80мкм. Показана можливість прогнозування зносу контактних поверхонь в умовах кочення з різним ступенем проковзування від величини ефективної («інтегральної») мікротвердості, яка враховує мікротвердість поверхневих шарів металу в процесі структурної пристосованості при терті і градієнтний розподіл мікротвердості по глибині деформованого шару. Встановлений кореляційний взаємозв'язок між зносом елементів трибоспряжень і значеннями мікротвердості як поверхневих шарів

трибосистем, так і градієнтним її розподілом, що дозволяє розробляти практичні рекомендації по режимам технологічної та експлуатаційної модифікації елементів вузлів тертя.

6. Встановлено вплив величини проковзування контактних поверхонь на кінетику зміни інтенсивності тепловиділення в контакті. Більш інтенсивне тепловиділення характерно для умов кочення з проковзуванням, що перевищує 20%. В умовах припинення подачі мастильного матеріалу в зону тертя спостерігається збільшення інтенсивності тепловиділення, в середньому, в 2 рази для пар тертя, що працюють з проковзуванням 20 - 40%. Це обумовлено деструкцією граничних плівок мастильного матеріалу, внаслідок чого знижується тепловідвід.

7. Проаналізовано динаміку тепловиділення в змащувальному шарі з урахуванням реологічних характеристик мастильного матеріалу в контакті. Показана доцільність вибору різних методик розрахунку підвищення температури в фрикційному контакті в умовах домінування гідродинамічного, еластогідродинамічного і граничного режимів мащення.

8. Встановлені механізми, що зумовлюють вплив температурних і механічних факторів на напружено-деформований стан поверхонь при терті. Проаналізовано вплив даних факторів на появу в контакті центру концентратора напружень і зони локального підвищеного зносу.

9. Зростання ступеня проковзування призводить до наступних структурно-фазових змін в поверхневих шарах металу при терті: формування у досліджуваному шарі макронапружень стиснення, які викликані зростанням міжплощинних відстаней у кристалічній ґратці; зменшення розмірів областей когерентного розсіювання і зростанням мікронапружень; формування тетрагональної оцк ґратки (ОЦТ) за рахунок розчинення у ній атомів вуглецю; переорієнтації зерен (зміною кристалографічної текстури) у поверхневому шарі, який зазнає інтенсивної деформації в процесі тертя з проковзуванням контактних поверхонь; появи дифракційних максимумів, що відповідають ГЦК аустенітній фазі; появи дифракційних максимумів, що відповідають оксидам FeO і Fe₂O₃.

РОЗДІЛ 6

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНОШУВАННЯ ПАР ТЕРТЯ В НЕСТАЛИХ
УМОВАХ РОБОТИ**6.1. Термо-кінетична модель оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно-енергетичних параметрів фрикційного контакту.**

Для побудови розрахункової оцінки довговічності по критерію зносу, в якості базової моделі скористаємося найбільш відомою і широко визнаною кінетичною моделлю руйнування матеріалів, яка побудована на основі розробленої термофлуктуаційної концепції міцності твердих тіл С.Н. Журкова [101, 102].

Отримане в рамках даної моделі рівняння довговічності (6.1) широко використовується в сучасній теорії міцності твердих тіл:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (6.1)$$

де τ – довговічність матеріалу під навантаженням σ ; τ_0 – постійна часу, що дорівнює періоду атомних коливань в тілі $10^{-13} \dots 10^{-12}$ с; k – постійна Больцмана; T – абсолютна температура, К; U_0 – енергія активації руйнування, кДж/моль; γ – структурно-чутливий коефіцієнт.

Аналіз наведених в розділі 1 досліджень, які проводяться в цьому напрямку, показав, що сучасні уявлення щодо природи втомного зношування ґрунтуються на моделі, що характеризує різну кінетику утворення, розвиток та швидкість накопичення змін в поверхневому об'ємі матеріалу при терті. Згідно з уявленнями існуючої моделі, при втомному зношуванні тонкий поверхневий дебрис-шар накопичує трибопошкодження різного характеру та руйнується в режимі малоциклової втоми, нижчерозташовані приповерхневі шари металу, що зазнають пружно-пластичних деформацій, схильні до розвитку контактної втоми, що протікає в багатоцикловому режимі.

В зв'язку з вищезазначеним, пропонується в представленій розрахунковій моделі враховувати наявність двох областей накопичення пошкоджень при терті, для

яких характерні різні механізми домінуючого виду руйнування контактних поверхонь.

Таким чином, в загальному вигляді вираз для довговічності зношуваного шару можна представити:

$$\tau = \tau_d + \tau_\sigma, \quad (6.2)$$

де τ_d – довговічність дебрис–шару; τ_σ – довговічність області багаточислової контактної втоми.

Якщо врахувати в моделі, що період первинного накопичення мікропошкоджень втомного характеру підповерхневого шару до його диспергування і руйнування у вигляді частинок зносу, в загальному випадку, більше ніж період руйнування дебрис–шару в n разів, тоді вираз (6.2) набуде вигляду:

$$\tau = \sum_{i=1}^n \tau_d + \tau_\sigma. \quad (6.3)$$

Вираз (6.3) враховує ступінчастий характер експериментальних залежностей втомного зношування, а саме, наявність періодів незначної зміни і стрибкоподібного збільшення зносу. Періоди незначного збільшення зносу можна інтерпретувати, як послідовний знос n дебрис-шарів, в період накопичення втомних мікропошкоджень. При досягненні критичної кількості мікропошкоджень відбудеться руйнування підповерхневого шару, який може мати розміри істотно більше розмірів дебрис–шару, що в свою чергу, призведе до збільшення (стрибка) зносу на експериментальній залежності.

З урахуванням виразу (6.1) і запропонованими авторами [110, 270] уточненнями щодо врахування впливу зовнішнього середовища в подоланні енергетичного бар'єру, отримаємо:

$$\tau = \tau_0 \left[\left(\sum_{i=1}^n \left[\exp \left(\frac{U_{0d} - \gamma_d \sigma_d \pm \Delta G_d}{kT_d} \right) \right] \right) + \exp \left(\frac{U_{0\sigma} - \gamma_\sigma \sigma_\sigma \pm \Delta G_\sigma}{kT_\sigma} \right) \right], \quad (6.4)$$

де τ_0 – постійна часу, що дорівнює періоду атомних коливань в тілі $10^{-13} \dots 10^{-12}$ с; k – постійна Больцмана; T – абсолютна температура, К; U_0 – енергія активації руйнування, Дж/моль; γ – структурно-чутливий коефіцієнт; σ – навантаження; ΔG – коефіцієнт що враховує вплив зовнішнього середовища ($\Delta G < 0$ – зовнішнє середовище розміцнює зношувальний шар, $\Delta G > 0$ – зміцнює, а $\Delta G = 0$ – проявляє

нейтральну дію). Індокси d, σ при змінних у виразі (6.4) означають, що змінна відноситься до дебрис–шару (d) або області контактної втоми (σ) відповідно.

Величина енергії активації в істотній мірі залежить від природи діючого механізму руйнування. Тому кожен матеріал має стільки значень енергій активації руйнування, скільки існує механізмів цього процесу. Енергія активації U_0 і коефіцієнт γ залежать від діючого механізму пошкодження, що необхідно враховувати при їх оцінці.

Зміни в матеріалі поверхневого шару, які відбуваються безпосередньо в процесі тертя внаслідок механічної та фізико–хімічної взаємодії контактуючих поверхонь (деформація, текстурування матеріалу, зміни елементного складу, фазові перетворення, хімічна модифікація, зміна різних фізичних характеристик) призводять до суттєвих відмінностей щодо показників енергії активації руйнування матеріалу в поверхневому шарі та в об'ємі. В зв'язку з вищезазначеним, параметри, які в виразі (6.4) відносяться до дебрис–шару та області контактної втоми, будуть різними. Тому оцінку цих параметрів необхідно проводити з урахуванням особливостей накопичення трибопошкоджень в кожній області.

6.1.1. Оцінка активаційних параметрів області багатоциклової втоми.

Для аналізу представимо вираз, що визначає довговічність області багатоциклової втоми у вигляді

$$\tau_{\sigma} = \tau_0 \exp\left(\frac{U_{0\sigma} - \gamma_{\sigma}\sigma_{\sigma} \pm \Delta G_{\sigma}}{kT_{\sigma}}\right). \quad (6.5)$$

Найдем з (6.5) вираз для σ_{σ} :

$$\sigma_{\sigma} = \frac{U_{0\sigma} - kT_{\sigma} \ln\left(\frac{\tau_{\sigma}}{\tau_0}\right) \pm \Delta G_{\sigma}}{\gamma_{\sigma}}. \quad (6.6)$$

Замінив постійну Больцмана на газову постійну R , одержимо:

$$\sigma_{\sigma} = \frac{U_{0\sigma} - RT_{\sigma} \ln\left(\frac{\tau_{\sigma}}{\tau_0}\right) \pm \Delta G_{\sigma}}{\gamma_{\sigma}}, \quad (6.7)$$

де σ_{σ} – напруги, що обумовлюють руйнування зразка після напрацювання протягом часу τ_{σ} ; τ_0 – постійна часу, що дорівнює періоду атомних коливань в тілі $10^{-13} \dots 10^{-12}$

c ; R – газова постійна, Дж/(К моль); T_σ – абсолютна температура, К; $U_{0\sigma}$ – енергія активації руйнування, кДж/моль; γ_σ – структурно-чутливий коефіцієнт.

З огляду на циклічність процесу навантаження, представимо час напрацювання τ_σ через кількість циклів N і фактичний час навантаження за цикл $t_{ц}$:

$$\sigma_\sigma = \frac{U_{0\sigma} - RT_\sigma \ln\left(\frac{N \cdot t_{ц}}{\tau_0}\right) \pm \Delta G_\sigma}{\gamma_\sigma}. \quad (6.8)$$

Аналіз напружено-деформованого стану методом скінченних елементів (МСЕ) з використанням програмного забезпечення ANSYS показав, що максимальні контактні навантаження, отримані МСЕ, перевищують, в середньому, на 11% аналогічні значення, розраховані по залежностях Герца, що вносить певні похибки в результати розрахунків.

Для аналізу втомного руйнування в умовах складного напружено-деформованого стану ефективно використовується об'єднання гіпотези питомої енергії формозміни та модифікованих співвідношень Сміта [137]. В цьому випадку умова руйнування [137] може бути представлена у вигляді:

$$\sqrt{\frac{3E}{1+\nu}} (\sqrt{u_{d_{max}}} - 2\sqrt{u_{d_m}}) - \sigma_{yp} \geq 0, \quad (6.9)$$

$$\sqrt{\frac{3E}{1+\nu}} (\sqrt{u_{d_{max}}} - \sqrt{u_{d_m}}) - \sigma_N \geq 0, \quad (6.10)$$

$$\sqrt{\frac{3E}{1+\nu}} (\sqrt{u_{d_{max}}} - \sqrt{u_{d_m}}(1-r)) - \sigma_N \geq 0, \quad (6.11)$$

$$\sqrt{\frac{3E}{1+\nu}} \sqrt{u_{d_{max}}} - \sigma_{yp} \geq 0, \quad (6.12)$$

де

$$u_{d_{max}} = \frac{1+\nu}{3E} \left[\frac{(\sigma_{1_{max}} - \sigma_{2_{max}})^2}{2} + \frac{(\sigma_{2_{max}} - \sigma_{3_{max}})^2}{2} + \frac{(\sigma_{3_{max}} - \sigma_{1_{max}})^2}{2} \right],$$

$$u_{d_m} = \frac{1+\nu}{3E} \left[\frac{(\sigma_{1_m} - \sigma_{2_m})^2}{2} + \frac{(\sigma_{2_m} - \sigma_{3_m})^2}{2} + \frac{(\sigma_{3_m} - \sigma_{1_m})^2}{2} \right],$$

$$u_{d_{min}} = \frac{1+\nu}{3E} \left[\frac{(\sigma_{1_{min}} - \sigma_{2_{min}})^2}{2} + \frac{(\sigma_{2_{min}} - \sigma_{3_{min}})^2}{2} + \frac{(\sigma_{3_{min}} - \sigma_{1_{min}})^2}{2} \right],$$

$\sigma_{1m}, \sigma_{2m}, \sigma_{3m}$ – середні значення головних напружень; $r = \sigma_N / \sigma_u$; σ_u – межа міцності; σ_N – втомна міцність при N циклах; σ_{yp} – межа текучості матеріалу; E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуасона.

Умови руйнування (6.9) – (6.12) з урахуванням виразу (6.8) набудуть виду:

$$\sqrt{\frac{3E}{1+\nu}} (\sqrt{u_{dmax}} - 2\sqrt{u_{dm}}) - \sigma_{yp} \geq 0, \quad (6.13)$$

$$\sqrt{\frac{3E}{1+\nu}} (\sqrt{u_{dmax}} - \sqrt{u_{dm}}) - \frac{U_{0\sigma} - RT_{\sigma} \ln\left(\frac{N \cdot t_{II}}{\tau_0}\right) \pm \Delta G_{\sigma}}{\gamma_{\sigma}} \geq 0, \quad (6.14)$$

$$\sqrt{\frac{3E}{1+\nu}} (\sqrt{u_{dmax}} - \sqrt{u_{dm}}(1-r)) - \frac{U_{0\sigma} - RT_{\sigma} \ln\left(\frac{N \cdot t_{II}}{\tau_0}\right) \pm \Delta G_{\sigma}}{\gamma_{\sigma}} \geq 0, \quad (6.15)$$

$$\sqrt{\frac{3E}{1+\nu}} \sqrt{u_{dmax}} - \sigma_{yp} \geq 0. \quad (6.16)$$

Вирази (6.13) – (6.16) зв'язують напружено-деформований стан, характеристики втомної міцності матеріалу з характеристиками фізичної моделі руйнування матеріалу, яка заснована на термофлуктуаційній теорії міцності твердих тіл.

Таким чином, для визначення довговічності в виразі (6.5) в якості діючого навантаження, яке визначає перебіг процесів втомного руйнування σ_{σ} доцільно прийняти еквівалентні напруження по Мізесу, які використовуються для визначення потенційної енергії зміни форми:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2}{2} + \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2} + \frac{(\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}. \quad (6.17)$$

Згідно з даними [2, 220]:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_{max}^2 + 3\tau_{max}^2} \quad (6.18)$$

В якості прикладу наведемо отримані результати енергії активації руйнування сталі 45 (HRC 38) при терті в несталих умовах в середовищі трансмісійної оливи ТАД17-і (SAE 80w90 API GL-5) в режимі кочення з різним ступенем проковзування (від 3 до 40%) (табл. 6.1). Загальна тривалість роботи елементів трибоспряження включала період припрацювання, роботи пар тертя в різних режимах мащення до прояву перших ознак схоплювання контактних поверхонь (за методикою оцінки величини енергії активації руйнування, наведеною в розділі 2 (2.2.3))

**Експериментально-розрахункові показники при визначенні енергії
активації руйнування сталі 45 в несталіх умовах тертя**

Параметри	Ступінь проковзування в контактi в умовах кочення з проковзуванням, %				
	3	10	20	30	40
τ_{p170}, c	$\sigma_{max} = 170\text{МПа}, (\sigma_{екв} = 192\text{МПа})$				
	27000	23000	20000	18000	15600
T_{170}, K	293,5	313	384	461	635
$U_{170}, \text{кДж/моль}$	97	103	127,01	150,96	209
τ_{p250}, c	$\sigma_{max} = 250\text{МПа}, (\sigma_{екв} = 279,38\text{МПа})$				
	21000	18000	14700	12900	11500
T_{250}, K	299	323	415	506	703
$U_{250}, \text{кДж/моль}$	99,15	106,69	136,39	165,75	229,6
τ_{p300}, c	$\sigma_{max} = 300\text{МПа}, (\sigma_{екв} = 338,1\text{МПа})$				
	18000	15000	12450	9000	7000
T_{300}, K	315	343	438	541	755
$U_{300}, \text{кДж/моль}$	104,05	112,78	143,34	175,59	243,47

Згідно з отриманими експериментальними залежностями $\tau_p(\sigma) \sim f(\sigma)$ шляхом екстраполяції визначають граничне значення контактного тиску $\sigma_{гран}$ (рис. 6.1), а енергію активації руйнування $U_{0\sigma}$ визначають шляхом екстраполяції величини $U(\sigma)$ по залежностям $U(\sigma) \sim f(\sigma)$ до встановленого граничного значення контактного тиску $\sigma_{гран}$ (рис. 6.2).

Таким чином, $\sigma_{\sigma_{гран}}$ можна інтерпретувати як межу втомної міцності при N циклах навантаження.

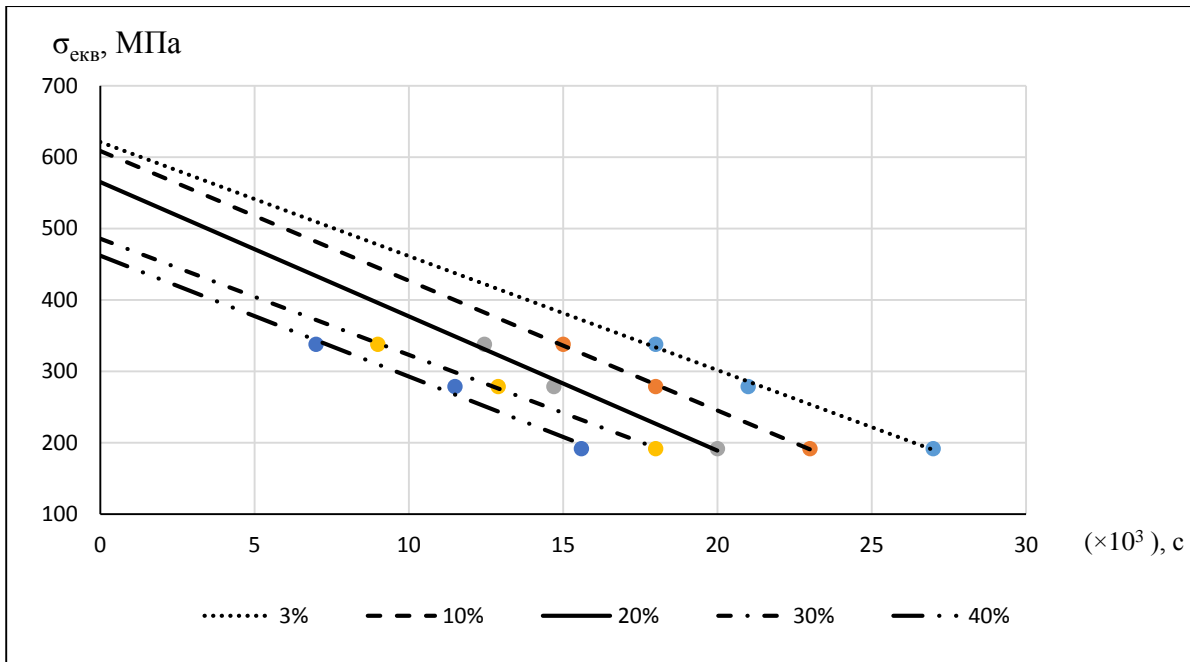


Рис. 6.1. Визначення граничного значення контактної тиску по отриманим експериментальним значенням часу напрацювання елементів трибоспрязень до прояву ознак схоплювання контактних поверхонь.

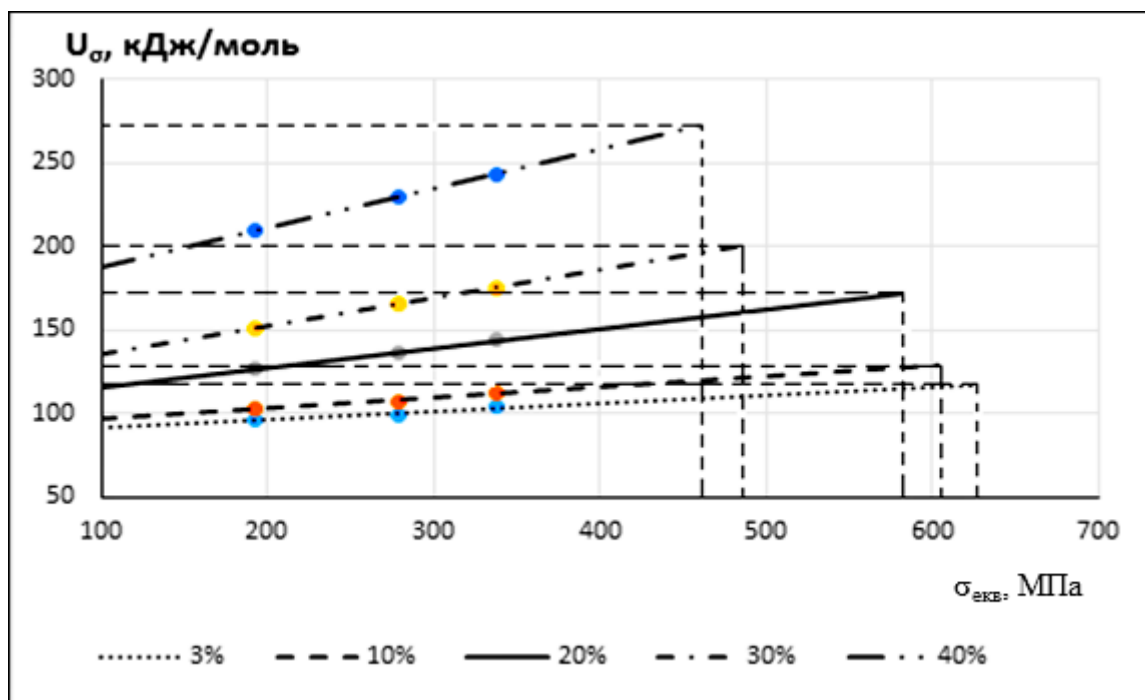


Рис. 6.2. Залежність енергії активації руйнування від контактної тиску при різному ступені проковзування контактних поверхонь в умовах кочення з проковзуванням.

Структурно-чутливий коефіцієнт γ_σ знаходимо із співвідношення:

$$\gamma_\sigma = \frac{U_{0\sigma}}{\sigma_{\text{гран}}} \quad (6.19)$$

Отримані значення $U_{0\sigma}$, $\sigma_{\text{гран}}$ і γ_σ для сталі 45 в умовах кочення з різним ступенем проковзування, представлені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2.

Вплив ступеня проковзування при коченні з проковзуванням на енергію активації руйнування, граничне значення контактного тиску і структурно-чутливий коефіцієнт

Параметри	Ступінь проковзування в контактї в умовах кочення з проковзуванням, %				
	3	10	20	30	40
$U_{0\sigma}$, кДж/моль	117	130	166	202	273
$\sigma_{\text{гран}}$, МПа	623	603	580	487	463
γ_σ , кДж·мм ² /моль·Н	0,188	0,216	0,295	0,415	0,59

Визначивши діючі характеристики напружено-деформованого стану підповерхневого шару конкретної деталі (наприклад, методом кінцевих або граничних елементів), і маючи активаційні характеристики втомного механізму руйнування $U_{0\sigma}$, γ_σ , ΔG_σ , які дозволяють врахувати вплив фізичних аспектів на протікання процесу накопичення втомних пошкоджень, можливо спрогнозувати швидкість накопичення і розвиток втомних пошкоджень в умовах трибоконтактної взаємодії.

Представлена кінетична модель відображає збільшення внутрішньої енергії матеріалу в процесі нестационарного циклічного навантаження. Роботу по руйнуванню поверхневого шару здійснюють внутрішні сили, що сформувалися в результаті обміну енергією дисипативної системи з навколишнім середовищем [110]. При цьому в процесі тертя відбувається зміна внутрішньої енергії приповерхневих

шарів металу на деяку глибину матеріалу внаслідок впливу теплових, механо-хімічних, дифузійних та інших факторів.

Збільшення ступеня проковзування при коченні з проковзуванням підвищує рівень накопичення енергії активації провідного механізму руйнування. Перш за все, це пов'язано зі збільшенням ступеня пластичної деформації, підвищенням температури і градієнта швидкості зсуву в контакті внаслідок підвищення швидкості ковзання з 0,062 до 1,15 м / с при проковзуванні з 3 до 40% відповідно. В роботах Д.Дорна [396] вказується, що деформація в металі протікає за рахунок різних механізмів, що діють на мікрорівні, причому кожен з них характеризується власною енергією активації руйнування. Дані про розподіл мікротвердості приповерхневих шарів металу по глибині також свідчать про різну зону поширення деформаційних змін при терті (рис. 6.3)

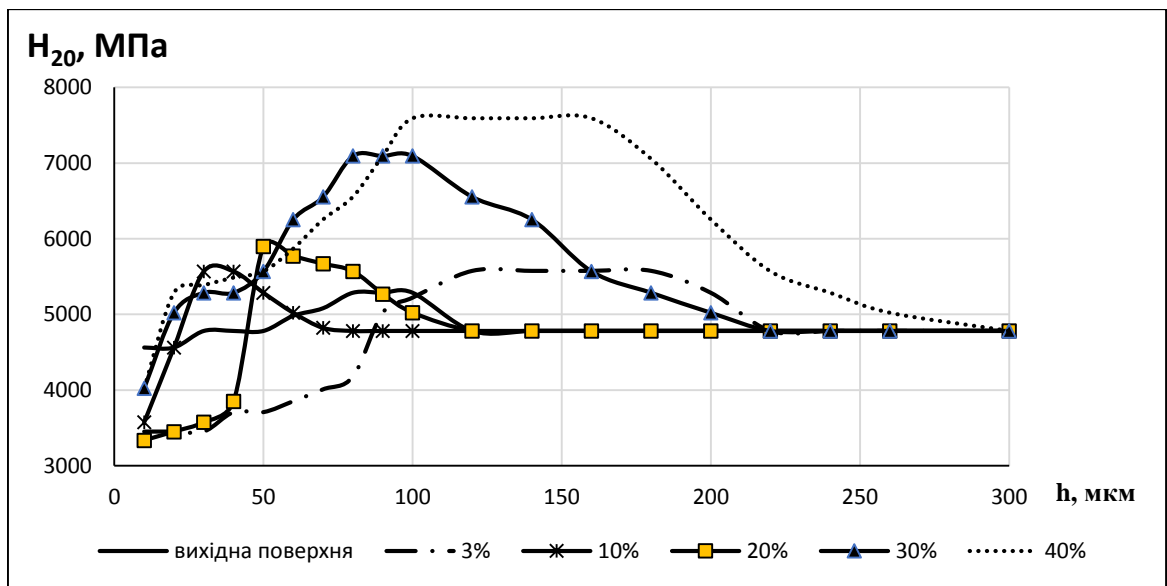


Рис. 6.3. Розподіл мікротвердості по глибині вихідної поверхні сталі 45 і після тертя при коченні з проковзуванням від 3 до 40% ($\sigma_{\max} = 250\text{МПа}$).

Рівень енергії активації при терті залежить як від ступеня зміцнення приповерхневих шарів, так і від типу вторинних структур і плівок мастильного матеріалу, утворених в результаті структурної пристосованості. Наприклад, найменший рівень енергії активації руйнування при $\sigma_{\max} = 250\text{МПа}$ встановлений для пар тертя, що працюють при коченні з проковзуванням 3%. Це обумовлено рядом ефектів: формуванням на контактних поверхнях граничних змащувальних шарів

фізичної природи, сильною аморфізацією металу і зменшенням на глибину до 70 мкм, формуванням при терті вторинних структур першого типу [185, 327]. При роботі елементів трибоспряжень з проковзуванням 40% відбувається формування хемосорбційних граничних шарів змащувального матеріалу, сильне зміцнення приповерхневих шарів металу на глибину до 260 мкм, структурно–фазові зміни різного характеру, утворення вторинних структур другого типу. Дані фактори сприяють значному підвищенню енергії активації руйнування.

Поступове збільшення внутрішньої енергії трибосистеми можливо в результаті акумуляції енергії руйнування при циклічно повторювальних деформаційних процесах, структурно–фазових перетвореннях, диспергування матеріалу і т.д. При досягненні деякого критичного значення внутрішньої енергії при багатоциклічній втомленості можливе руйнування матеріалу. Слід зазначити, що рівень критичного значення внутрішньої енергії залежить від матеріалу контактних поверхонь і для кожного конструкційного параметру має визначатися експериментальним шляхом (рис. 6.4).

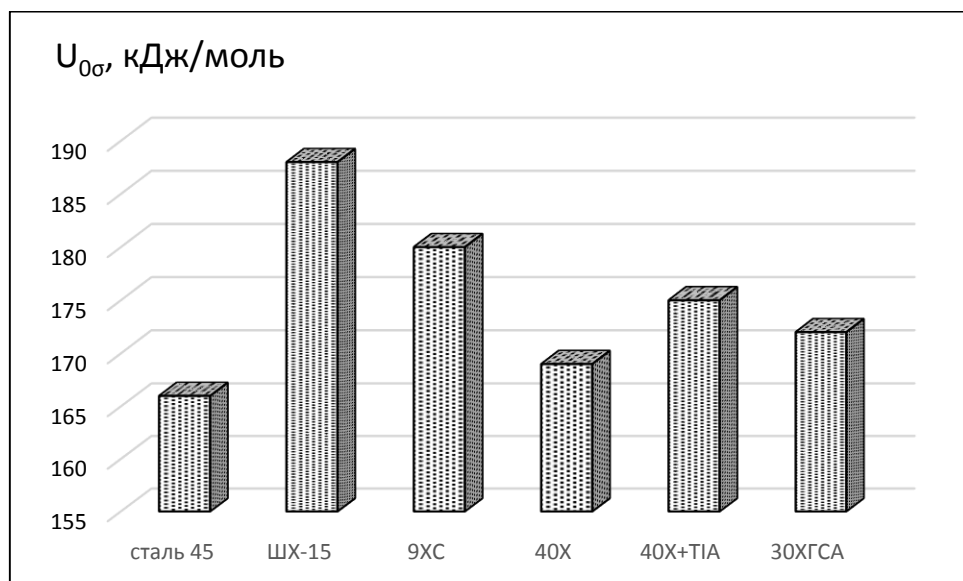


Рис. 6.4. Енергія активації руйнування різних марок сталей, що працюють в умовах кочення з проковзуванням 20%.

Представимо умову руйнування для поверхонь, що працюють в умовах кочення з проковзуванням, у вигляді:

$$U_{\sigma} = U_{0\sigma} \quad (6.20)$$

де U_{σ} – енергія активації руйнування при контактному тиску σ і певній швидкості ковзання; $U_{0\sigma}$ – енергія активації руйнування при граничному значенні контактного тиску $\sigma_{\text{гран}}$ для певної швидкості ковзання.

Таким чином, в процесі напрацювання контактних поверхонь в умовах кочення з проковзуванням відбувається поступове накопичення енергії пошкоджуваності в матеріалі. Процеси формування стійких дисипативних структур в результаті структурної пристосованості конструкційних матеріалів при терті забезпечують нормальну роботу трибоспряжень в певному проміжку часу. Тривалість цього етапу залежить, перш за все, від здатності сформованих вторинних структур до накопичення енергії. Чим більше пластична деформація в поверхневих шарах металу, тим більше швидкість накопичення енергії активації руйнування. При досягненні критичного значення енергії активації руйнування відбувається руйнування матеріалу.

Визначивши енергію активації руйнування при граничному значенні контактного тиску $\sigma_{\text{гран}}$ для певної швидкості ковзання можливо прогнозувати довговічність елементів трибоспряження за кінетикою накопичення енергії активації при терті (рис. 6.5, 6.6).

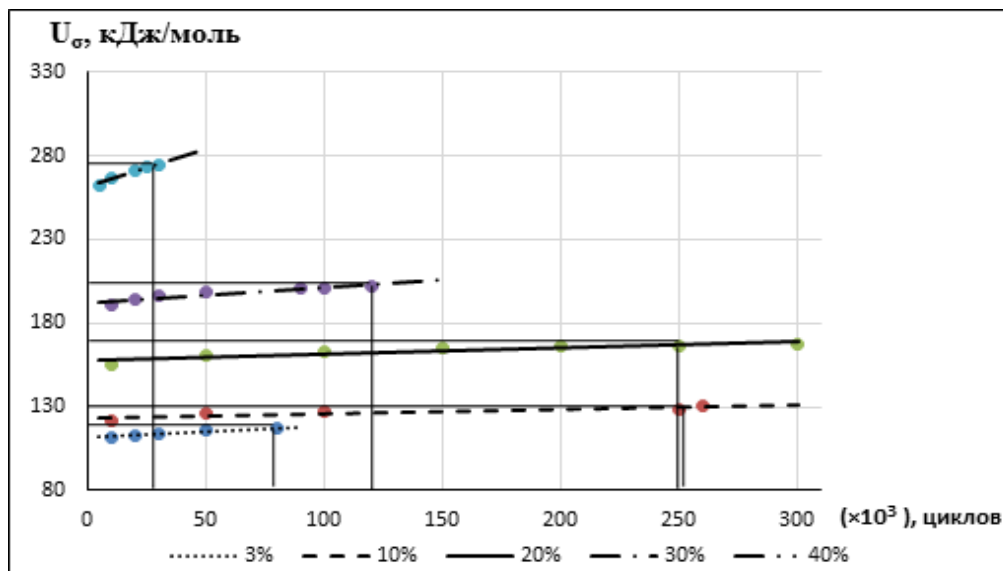


Рис. 6.5. Кінетика збільшення енергії активації для сталі 45 в середовищі трансмісійної оливи при $\sigma_{\text{max}} = 300 \text{ МПа}$ в умовах кочення з проковзуванням від 3 до 40%.

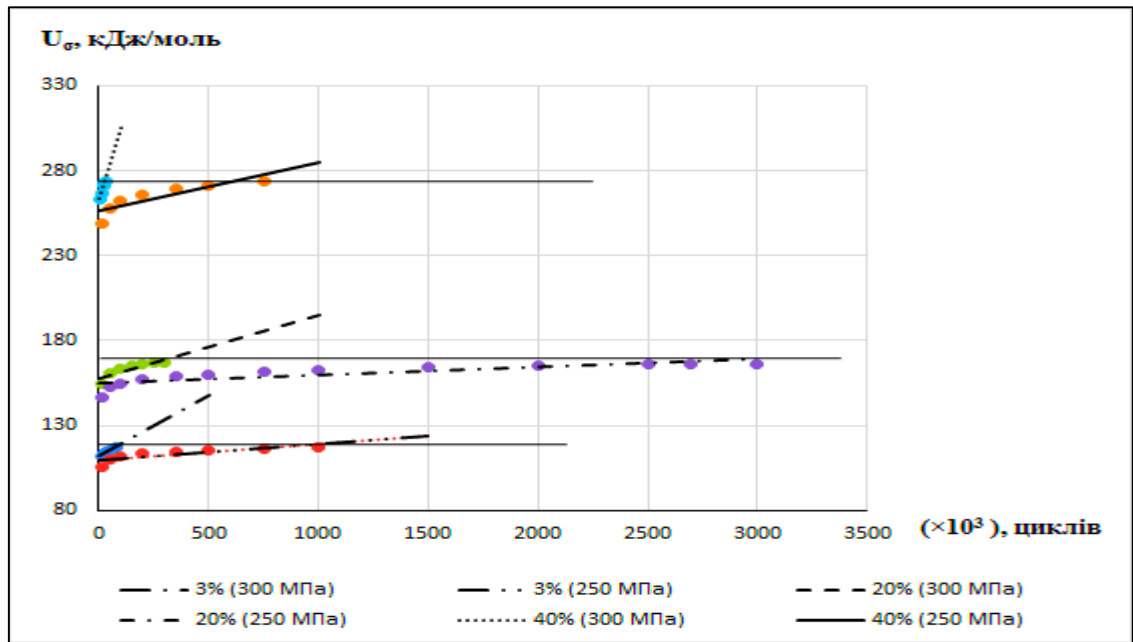


Рис. 6.6. Вплив навантаження на кінетику збільшення енергії активації для сталі 45 в середовищі трансмісійної оливи в умовах кочення з проковзуванням 3, 20 и 40%.

Розрахункові дані про прогнозування кінетики збільшення енергії активації для контактних поверхонь в досліджуваних режимах тертя корелюють з отриманими експериментальними даними швидкості зношування пар тертя. Наприклад, при $\sigma_{\max} = 300$ МПа швидкість зношування відстаючої поверхні при коченні з проковзуванням 3, 20 і 40% становить 0,36, 0,252 і 0,45 мкм / год відповідно. При цьому максимальна кількість циклів, що відповідає граничному рівню накопичення енергії активації руйнування, становить 76000, 240000 і 28000 циклів для контактних поверхонь з проковзуванням 3, 20 і 40% відповідно.

Таким чином, з урахуванням наведеного аналізу напружено–деформованого стану контактних поверхонь, кінетики накопичення енергії активації руйнування в умовах кочення з проковзуванням, рівняння (6.5) набуде вигляду:

$$\tau_{\sigma} = \tau_0 \exp\left(\frac{U_{0\sigma} - \gamma_{\sigma} \sigma_{\text{екв}} \pm \Delta G_{\sigma}}{RT_{\sigma}}\right). \quad (6.21)$$

Проведемо аналіз коефіцієнта γ_{σ} залежності (6.8). Представимо вираз (6.8) в вигляді:

$$\sigma_{\text{екв}} \gamma_{\sigma} = U_{0\sigma} - RT_{\sigma} \ln\left(\frac{N \cdot t_{\text{ц}}}{\tau_0}\right) \pm \Delta G_{\sigma}. \quad (6.22)$$

Аналіз виразу (6.22) показує, що член $\sigma_{\text{екв}} \gamma_{\sigma}$ відображає ту частину роботи, яку в втомному руйнуванні тіла виконує зовнішня сила (еквівалентні напруги $\sigma_{\text{екв}}$). Таким чином, чим менше γ_{σ} , тим робота руйнування від зовнішнього впливу менше, і відповідно, більше довговічність тіла.

Згідно з даними, наведеними в таблиці 6.2, структурно-чутливий коефіцієнт γ_{σ} підвищується зі збільшенням ступеня проковзування. Однак, якщо для діапазону проковзування 10 – 40% підвищення γ_{σ} металу корелює з експериментально встановленим збільшенням питомої роботи тертя в контакті, об'ємом деформованого приповерхневого шару металу, зносом контактних поверхонь, то для пар тертя, що працюють в умовах з проковзуванням 3%, встановлені дещо інші закономірності. Найменше значення γ_{σ} корелює лише з мінімальними показниками питомої роботи тертя в контакті і найменшою енергією активації руйнування металу. Як зазначалося вище, об'єм деформованого металу і швидкість зношування перевищує аналогічні показники, встановлені для контактних поверхонь з проковзуванням 10 і 20%. Встановлена невідповідність між роботою руйнування і зносостійкістю контактних поверхонь пояснюється тим, що в процесі тертя лише для умов кочення з проковзуванням 3% характерне знеміцнення поверхневих шарів металу, формування вторинних структур I типу, які, згідно з Костецьким Б.І. [144], характеризуються властивостями зверхпластичності, утворенням мастильним матеріалом на поверхнях тертя граничних змащувальних шарів фізичної природи.

Згідно роботи [249], фізичний зміст коефіцієнта γ_{σ} автори представляють як добуток активаційного об'єму V_a , в якому розвиваються елементарні акти руйнування, на коефіцієнт перенапруження $q = \sigma_{\text{лок}}/\sigma$, де $\sigma_{\text{лок}}$ – локальне справжнє напруження в місці руйнування, а σ – середнє напруження. Відповідно, коефіцієнт γ_{σ} залежить від величини перенапружень, які виникають в тілі, якщо припустити що активаційний об'єм залишиться незмінним.

Однак, в разі кочення з проковзуванням збільшення швидкості ковзання обумовлює зростання градієнта швидкості зсуву і температури в контакті. Ці фактори призводять до збільшення активаційного об'єму металу при терті.

Наявність градієнта температури в поверхневих шарах металу як за глибиною, так і по довжині контакту внаслідок зниження інтенсивності процесів теплообміну з навколишнім середовищем обумовлює зміну механічних властивостей металу на різну глибину, в залежності від ступеня проковзування контактних поверхонь (рис. 5.15, 6.3). Таким чином, поява в центральній частині контакту зони локального підвищення еквівалентних температурних напружень призводить до зміни напружено–деформованого стану поверхонь і виникненню центру концентратора напружень.

Отже, основним джерелом виникнення локальних перенапружень в поверхневих шарах металу при терті є структурна неоднорідність, що виникає внаслідок механічного та теплового впливів, яка відіграє роль первинних концентраторів напружень, і є місцем виникнення зародкових субмікроскопічних тріщин з подальшим їх розвитком і перетворенням в мікро- і макротріщини, які і визначають довговічність елементів трибоспряжень.

Таким чином, будь–який вплив в зоні фрикційного контакту, що призводить до зменшення структурної неоднорідності і / або перешкоджатиме формуванню і / або розвитку процесу утворення тріщин, є таким чинником, який сприяє підвищенню зносостійкості пар тертя. У досліджуваних умовах кочення з проковзуванням, до факторів, що підвищують зносостійкість контактних поверхонь, відносяться:

- здатність мастильного матеріалу формувати граничні хемосорбційні шари, стійкі до високих градієнтів швидкості зсуву,
- утворення вторинних структур II типу в результаті структурної пристосованості при терті,
- зміцнення поверхневих шарів металу при терті і локалізація пластичної деформації в тонких приповерхневих шарах,
- структурно–фазові перетворення в поверхневих шарах металу (розмір зерен – 40 – 60 нм, утворення аустеніту тертя до 8 – 10%, насичення приповерхневих шарів вуглецем, киснем, сіркою, та ін.).

Оцінити кінетику зміни даних факторів можливо за допомогою представленої моделі втомного зношування шляхом використання алгоритму визначення енергії

активації руйнування, енергії активації руйнування при граничному значенні контактної тиску, структурно–чутливого коефіцієнту γ_σ для певного контактної тиску і швидкості ковзання.

6.1.2. Оцінка активаційних параметрів дебрис-шару.

Проаналізуємо вираз, який характеризує довговічність дебрис–шару, для цього виділимо його з виразу (6.4) і замінимо постійну Больцмана на газову постійну R :

$$\tau_d = \tau_0 \exp\left(\frac{U_{0d} - \gamma_d \sigma_d \pm \Delta G_d}{RT_d}\right). \quad (6.23)$$

На підставі отриманих експериментальних даних зміни τ_{pd} і T_d в залежності від контактної тиску визначаємо значення енергії активації провідного механізму руйнування за формулою:

$$U_d = RT_d \ln \frac{\tau_p}{\tau_0}, \quad (6.24)$$

де U_d – енергія активації руйнування, кДж/моль; τ_p – напрацювання пар тертя протягом часу, с; τ_0 – постійна часу, що дорівнює періоду атомних коливань в тілі $10^{13} \dots 10^{12}$ с; R – газова постійна, Дж/(К моль); T_d – абсолютна температура мастильного матеріалу в контакті, К.

Енергію активації руйнування U_{0d} визначають шляхом екстраполяції величини $U(\sigma)$ по залежностям $U(\sigma) \sim f(\sigma)$ (рис. 6.7), приймаючи граничне значення контактної тиску $\sigma_{\text{гран}}$, встановлене при розрахунку довговічності області багатоциклової втоми з рис.6.1.

Представимо вираз (6.23) у вигляді:

$$\gamma_d \sigma_d = U_{0d} - RT_d \ln\left(\frac{N \cdot t_{\text{п}}}{\tau_0}\right) \pm \Delta G_d. \quad (6.25)$$

Член $\sigma_d \gamma_d$ відображує ту частину роботи, яку в руйнуванні дебрис–шару виконує зовнішній вплив. Логічно прийняти, що в якості роботи зовнішніх сил виступає питома робота сил тертя $A_{\text{тр}}$.

Тоді можна записати:

$$\gamma_d \sigma_d = \frac{A_{\text{тр}}}{V_d}, \quad (6.26)$$

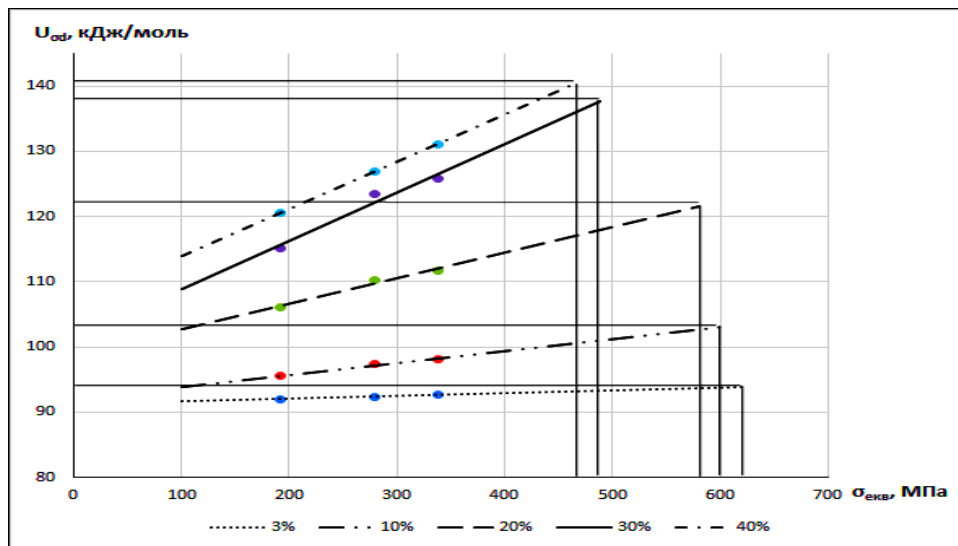


Рис. 6.7. Визначення критичної енергії активації руйнування дебрис-шару по експериментально встановленим значенням енергії активації руйнування в залежності від навантаження.

де V_d – об'єм зношеного шару, моль.

З урахуванням того, що:

– розрахунок питомої роботи тертя проводиться шляхом інтегрування площі, обмеженої кривою зміни моменту тертя:

$$A_{\text{тр}} = \left[\int_0^{t_i} M_i(t) \cdot 2\pi n_i(t) dt - \frac{1}{2} \sum_0^{i=n_{ti}} J_{\Pi_i} \cdot \omega_i^2 \right] / S, \quad (6.27)$$

где n , ω – частота обертів і кутова швидкість обертання; t – час тривалості циклу; J_{Π} – полярний момент інерції деталей триботехнічної установки, які обертаються;

$$- A_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} L_S = f \cdot F_N \cdot L_S;$$

$$- V_d = (A_H \cdot h_d) / M;$$

– при терті більша частина енергії деформації розсіюється у вигляді тепла, тому приймемо, що у вигляді збереженої енергії, згідно [295, 296] запасеться до 25 – 30%;

перетворимо (6.26) до виду:

$$\gamma_d \sigma_d = 10^{-3} \frac{f \cdot F_N \cdot L_S \cdot M}{A_H \cdot h_d}, \quad (6.28)$$

де f – коефіцієнт тертя; F_N – нормальна сила, Н; L_S – шлях тертя ковзання, м; M – молярний об'єм, м³/моль; A_H – номінальна площа поверхні контакту, м²; h_d – товщина зношеного шару, м.

Якщо врахувати, що відношення F_N/A_H представляє собою контактний тиск σ_N , з урахуванням (6.17 – 6.18) можна записати:

$$\gamma_d \sigma_d = 10^{-3} \frac{f \cdot \sigma_{\text{екв}} \cdot L_S \cdot M}{h_d}. \quad (6.28)$$

Для розрахунків прийmemo, що $M = 7,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{моль}$ [110], $L_S = (V_1 - V_2) \cdot N \cdot t_{\text{ц}}$, м/с.

Результати розрахунків параметра $\gamma_d \sigma_d$ для сталі 45 (HRC 38) при терті в несталіх умовах в середовищі трансмісійної оливи ТАД17-і (SAE 80w90 API GL-5) і мінеральної оливи І-40 представлені на рис. 6.8.

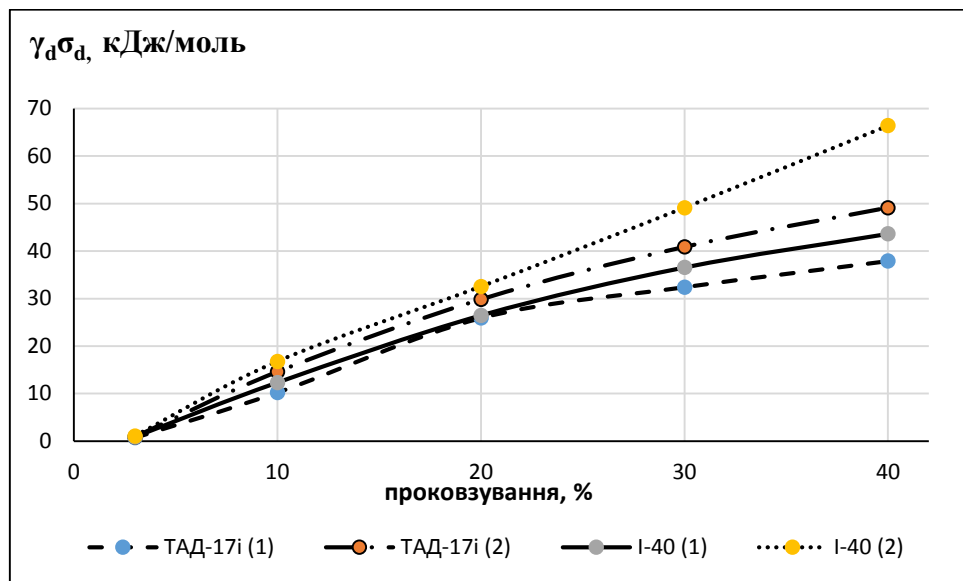


Рис. 6.8. Вплив ступеня проковзування при коченні з проковзуванням на кінетику зміни параметра $\gamma_d \sigma_d$ дебрис-шару: 1 – $\sigma_{\text{екв}} = 279,38 \text{ МПа}$; 2 – $\sigma_{\text{екв}} = 338,1 \text{ МПа}$.

Аналіз кінетики зміни параметра $\gamma_d \sigma_d$ показує, що найбільший вплив на збільшення роботи, яку в руйнуванні дебрис-шару виконують зовнішні чинники, припадає на швидкість ковзання. Підвищення даного параметра з 0,062 до 1,15 м/с при зростанні ступеня проковзування з 3 до 40% відповідно обумовлює збільшення роботи руйнування для контактних поверхонь при змащуванні оливами ТАД17-і та І-40, в середньому, в 53 і 62 рази відповідно. Підвищення еквівалентних напружень з 279 до 338 МПа, в середньому, в 1,25 разів збільшує роботу руйнування сформованого дебрис-шару як при змащуванні сталі 45 мастильним матеріалом з

поліфункціональними присадками ТАД–17і, так і при використанні базової оливи без присадок І–40. Найменші значення роботи руйнування дебрис–шару характерні для мінімального проковзування 3%. Однак, знос контактних поверхонь, що працюють в цих кінематичних умовах, аналогічний максимальному зносу пар тертя, що працюють в умовах максимального ковзання 40%. Перш за все, це пов'язано з сильним знеміцненням поверхневих шарів металу при напрацюванні (зниження мікротвердості досягає 700 – 900 МПа, в порівнянні з вихідною поверхнею) внаслідок формування вторинних структур першого типу в результаті структурної пристосованості при терті. Тільки в умовах мінімального проковзування відбувається формування активними компонентами мастильного матеріалу граничних шарів фізичної природи, які характеризуються низькими протизношувальними властивостями. При збільшенні ступеня проковзування до 10 – 40% відбувається формування в контакті міцніших граничних шарів (мінеральна олива І–40 формує СОП, трансмісійна олива ТАД–17і – хемосорбційні плівки або хімічномодифіковані шари), вторинних структур другого типу і простежується підвищення мікротвердості поверхневих шарів металу при напрацюванні. Дані процеси є провідними чинниками, які обумовлюють підвищення роботи руйнування дебрис–шару.

При оцінці довговічності дебрис-шару важливу роль відіграє коефіцієнт ΔG_d , що враховує вплив зовнішнього середовища.

Найчастіше на процес зношування істотний вплив відводиться мастильному матеріалу, тому логічно розглянути його в якості головного чинника, що формує коефіцієнт ΔG_d .

Дослідження багатьох авторів показали, що довговічність мастильних матеріалів оцінюється за величиною енергії активації деструкції – чим вище енергія, тим важче активується процес деструкції молекул, і, отже, довговічніше мастильний матеріал [2, 110, 295]. Для оцінки енергії активації деструкції мастильних речовин використовується принцип Ле Шательє–Брауна, який визначає умови стабільності термодинамічної системи, згідно з якими, в системі, що знаходиться в стані рівноваги, всяка зміна параметра, що виводить систему з рівноваги, супроводжується такими змінами, які прагнуть компенсувати зміну цього параметра. Отже, якщо на поверхні

проявляються умови, які призводять до руйнування граничного шару мастильного матеріалу, то, прагнучи зберегти рівноважний баланс, матеріал поверхневого шару повинен збільшити внутрішню енергію на ту ж величину, яка вивільнюється при деструкції молекул мастильного матеріалу. Іншими словами, визначивши різницю отриманих значень енергії активації до і після нанесення на неї мастильного матеріалу можна оцінити енергію активації руйнування шару мастильного матеріалу.

Оцінка різниці значень енергій активації руйнування поверхневого шару в сухому і змащеному станах в функціонуючих вузлах тертя дозволяє оцінити вплив мастильного матеріалу на міцність поверхневого шару, при цьому параметр ΔG_d є інтегральним, тобто таким, що враховує комплексний вплив всіх механізмів, що призводять до даного ефекту, а за абсолютними значеннями ΔG_d можна порівнювати ступінь впливу різних мастильних матеріалів на поверхню.

Для твердих мастильних покриттів автори [135] на підставі експериментальних даних вказували, що довговічність такого покриття підпорядковується залежності, подібній до залежності довговічності (6.1), тоді можна записати:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma_{cm}\sigma}{kT}\right), \quad (6.29)$$

де τ – довговічність твердого мастильного матеріалу під навантаженням σ ; τ_0 – постійна часу, що дорівнює періоду атомних коливань в тілі $10^{-13} \dots 10^{-12}$ с; k – постійна Больцмана; T – абсолютна температура на поверхні контакту, К; U_0 – енергія активації руйнування твердого мастильного матеріалу, кДж/моль; γ_{cm} – параметр структурної неоднорідності твердого мастильного покриття.

З урахуванням принципу Ле Шательє–Брауна, після перетворень можна записати:

$$\Delta G_d \sim U_0 = kT \ln\left(\frac{N \cdot t_n}{\tau_0}\right) + \gamma_{cm}\sigma_N. \quad (6.30)$$

Аналіз показує, що коефіцієнт ΔG_d фактично можна трактувати, як несучу здатність мастильного шару, іншими словами чим вище енергія активації деструкції, тим довговічніше мастильний матеріал.

Автори [135] на основі великої кількості експериментальних даних, в якості комплексу, що характеризує несучу здатність мастильного шару для зубчастих передач використовують залежність:

$$\frac{\mu v_{\Sigma}}{N} \quad (6.31)$$

де μ – динамічна в'язкість мастильного матеріалу, Па·с; $v_{\Sigma k}$ – сумарна швидкість кочення, м/с; N – питома нормальне навантаження, Н/м.

З урахуванням, що в'язкість мастильного матеріалу є функцією температури і навантаження в зоні контакту і з врахуванням залежностей Баруса і Рейнольдса [100]:

$$\mu = \mu_0 e^{\beta p - \alpha \Delta t}, \quad (6.31)$$

де p – тиск; β – п'єзокоефіцієнт в'язкості мастильного матеріалу; α – коефіцієнт залежності в'язкості мастильного матеріалу від температури у формулі Рейнольдса.

Враховуючи вищезазначене, можна записати:

$$\Delta G_d = K_{cm} \frac{\mu_0 e^{\beta p - \alpha \Delta t} v_{\Sigma}}{N}, \quad (6.33)$$

де K_{cm} – коефіцієнт пропорційності.

З урахуванням (6.31 – 6.33), проведеного факторного аналізу одержаних експериментальних параметрів з використанням програми FACTO, призначеної для введення вхідних даних і п'яти підпрограм (CORRE, EIGEN, TRACE, LOAD и VARMX), що дозволяють встановити взаємозв'язок між триботехнічними параметрами, які найбільше впливають на фізико–механічні та триботехнічні характеристики контакту. З використанням факторного аналізу проаналізована внутрішня структура кореляційної матриці на підставі кінетики зміни реологічних характеристик мастильного матеріалу, гідро– і негідродинамічної складової товщини мастильного шару, мікротвердості поверхневих шарів металу і визначені з урахуванням коефіцієнтів множинної кореляції комбінація факторів, які найбільше впливають на зміну параметра ΔG_d .

Запропонована наступна залежність для розрахунку даного параметра:

$$\Delta G_d = \Delta H_{\mu}^{0,2} \frac{\eta_{ef} V_{ковз}}{N}, \quad (6.34)$$

де ΔH_μ - зміна мікротвердості поверхневих шарів металу при напрацюванні, МПа; $\eta_{\text{еф}}$ - ефективна в'язкість в контактi, Па·с; $V_{\text{ковз}}$ - швидкість ковзання контактних поверхонь, м/с; N - погонне навантаження, Н/мм.

За кінетикою зміни параметра ΔG_d можливо припустити про ведучі механізми структурної пристосованості мастильного матеріалу і матеріалу контактних поверхонь в умовах кочення з проковзуванням. Від'ємні показники параметра ($-\Delta G_d$) свідчать про розміщення поверхневих шарів металу активними компонентами мастильного матеріалу. На контактних поверхнях домінують ефекти пластифікування поверхневих шарів, змащувальними матеріалами формуються на активованих тертях контактних поверхнях переважно граничні шари фізичної природи. Від'ємні показники параметра ($-\Delta G_d$) характерні тільки для умов роботи пар тертя з мінімальним проковзуванням до 3% (рис. 6.9). В таких умовах швидкість ковзання незначна, градієнт швидкості зсуву мастильних шарів найменший, в порівнянні з аналогічними показниками при збільшенні проковзування в контактi, і досягає $3,01 \cdot 10^2 - 1,43 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, в результаті чого в контактi не відбувається інтенсивного тепловиділення.

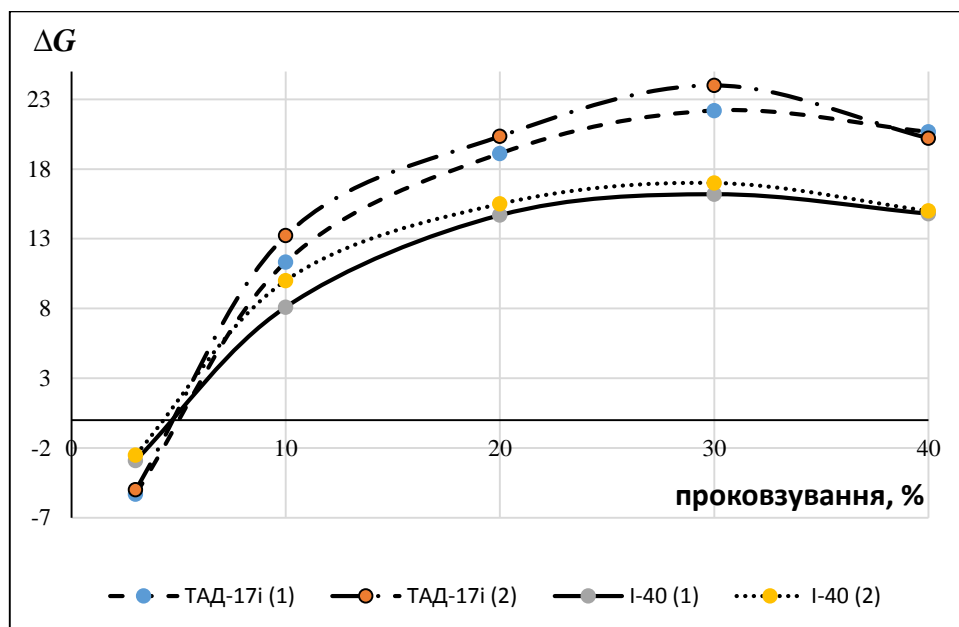


Рис. 6.9. Вплив навантаження, проковзування в контактi і типу мастильного матеріалу на параметр ΔG : 1 – $\sigma_{\text{екв}} = 279,38$ МПа; 2 – $\sigma_{\text{екв}} = 338,1$ МПа.

Позитивні показники параметру ($+\Delta G_d$) характеризують не тільки процеси зміцнення поверхневих шарів металу при терті, а й свідчать також про здатність

мастильного матеріалу формувати в контактi граничні хемосорбційні і хімічнoмодифіковані плівки (для оливо з поліфункціональними присадками) або плівки СОП (для базових оливо). Позитивні показники ΔG_d встановлені для умов тертя кочення з проковзуванням 10 – 40% (рис. 6.9). Можливо, існують граничні значення зміни параметра ΔG_d , які залежать від типу мастильного матеріалу і матеріалу контактних поверхонь. Це свідчить про максимальне зміцнення поверхневих шарів металу і стійкість сформованих граничних змащувальних шарів до високих градієнтів швидкості зсуву. Наприклад, при $\sigma_{\text{екв}} = 338,1$ МПа, мастильний матеріал – ТАД17-і при проковзуванні 40% градієнт швидкості зсуву зростає в 4 рази, в порівнянні з проковзуванням 10%, і досягає значень $(1,2 - 4,23) \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$. Внаслідок цього відбувається збільшення тепловиділення в фрикційному контактi, в середньому, в 6,3раза, локальне підвищення температури за умови еластогідродинамічного або змішаного режиму змащувальної дії становить 120°C . Інтенсифікуються процеси механічної та теплової деструкції граничних змащувальних шарів, що призводить до стрімкого падіння ефективної в'язкості в контактi. Якщо зі збільшенням проковзування від 10 до 40% зниження ефективної в'язкості при підвищенні температури в контактi характеризується лінійною залежністю, то кінетика зміни мікротвердості поверхневих шарів металу носить нелінійний характер. Більш інтенсивне збільшення мікротвердості поверхневих шарів металу встановлено в діапазоні проковзування від 10 до 30%, подальше підвищення проковзування до 40% незначно збільшує даний параметр. Оскільки показники ефективної в'язкості мастильного матеріалу і мікротвердості поверхневих шарів металу впливають на параметр ΔG_d , кінетику їх зміни потрібно аналізувати для конкретного мастильного матеріалу і елементів трибоспряження.

З урахуванням (6.28 та 6.34) вираз (6.23) набуде виду:

$$\tau_d = \tau_0 \exp \left(\frac{U_{0d} - \left[10^{-3} \frac{f \cdot \sigma_{\text{екв}} \cdot ((V_1 - V_2) \cdot N \cdot t_{\text{ц}}) \cdot M}{h_d} \right] \pm \Delta H_{\mu}^{0,2} \frac{\eta_{\text{еф}} V_{\text{КОВЗ}}}{N}}{RT_d} \right). \quad (6.35)$$

Результати розрахунків, виконані за формулою (6.35), представлені в таблиці 6.3. В розрахунках прийнято: $\tau_0 = 10^{-12}$, с; $R = 0,008314$, кДж/моль·К; $M = 7,16 \cdot 10^{-6}$, м³/моль.

**Влиw ступеня проковзування контактних поверхонь на довговічність
дебрис-шару.**

Час до руйнування дебрис-шару	Ступінь проковзування в контактi в умовах кочення з проковзуванням, %				
	3	10	20	30	40
τ_d, c ($\sigma_{екв} = 192 \text{ МПа}$)	$4,77 \cdot 10^4$	$2,57 \cdot 10^6$	$1,29 \cdot 10^6$	$3,71 \cdot 10^5$	$4,21 \cdot 10^4$
τ_d, c ($\sigma_{екв} = 279,38 \text{ МПа}$)	$3,58 \cdot 10^3$	$2,37 \cdot 10^5$	$1,13 \cdot 10^5$	$4,89 \cdot 10^4$	$5,01 \cdot 10^3$
τ_d, c ($\sigma_{екв} = 338,1 \text{ МПа}$)	$3,15 \cdot 10^3$	$5,61 \cdot 10^4$	$1,11 \cdot 10^4$	$1,28 \cdot 10^3$	43,89

Аналіз залежності (6.35) показує, що провідними факторами, які впливають на довговічність дебрис-шару, є контактний тиск, швидкість ковзання і температура. Збільшення навантаження і ступеня проковзування між елементами зубчастої пари (швидкості ковзання) призводить до збільшення роботи сил тертя, тобто роботи, що витрачається на руйнування шару. Збільшення швидкості ковзання є провідним фактором, що обумовлює підвищення температури в зоні контакту, що призводить до інтенсифікації деструктивних процесів в дебрис-шарі і значно знижує його довговічність τ_d .

На підставі отриманих експериментальних даних залежності зносу контактних поверхонь від антифрикційних, реологічних, енергетичних характеристик контакту запропонована формула для розрахунку інтенсивності зношування елементів трибоспрямижень, що працюють в умовах кочення з проковзуванням в несталіх умовах роботи:

$$J_h = 0,1 \frac{\sigma_{екв} \cdot f \cdot V_{ковз}}{\eta_{эф} \cdot \tau_d \cdot A_{тр}^{0,8}}, \quad (6.36)$$

де J_h – лінійна інтенсивність зношування; $\sigma_{екв}$ – еквівалентне контактне напруження, МПа; f – коефіцієнт тертя; $V_{ковз}$ – швидкість ковзання, м/с; $\eta_{эф}$ – ефективна в'язкість

в контактi, Па·с; τ_d – довговiчнiсть дебрис–шару, с; $A_{тр}$ – питома робота тертя в контактi, Дж/мм².

Розрахунковi значення iнтенсивностi зношування для сталi 45 (HRC 38) при тертi в середовищi трансмiсiйної оливи ТАД17–i (SAE 80w90 API GL–5) за формулою (6.36), представлени в табл. 6.4, рис. 6.10.

Таблиця 6.4.

Вплив еквiвалентних напружень в контактi i швидкостi ковзання на iнтенсивнiсть зношування сталi 45

Еквiвалентнi напруження ($\sigma_{екв}$), МПа	Ступiнь проковзування в контактi в умовах кочення з проковзуванням, %				
	3	10	20	30	40
	Швидкiсть ковзання, м/с				
	0,062	0,314	0,607	0,858	1,15
279,38	$1,52 \cdot 10^{-10}$	$1,14 \cdot 10^{-11}$	$4,36 \cdot 10^{-11}$	$1,6 \cdot 10^{-10}$	$2,59 \cdot 10^{-9}$
338,1	$1,9 \cdot 10^{-10}$	$1,47 \cdot 10^{-10}$	$4,6 \cdot 10^{-10}$	$6,01 \cdot 10^{-9}$	$2,9 \cdot 10^{-8}$

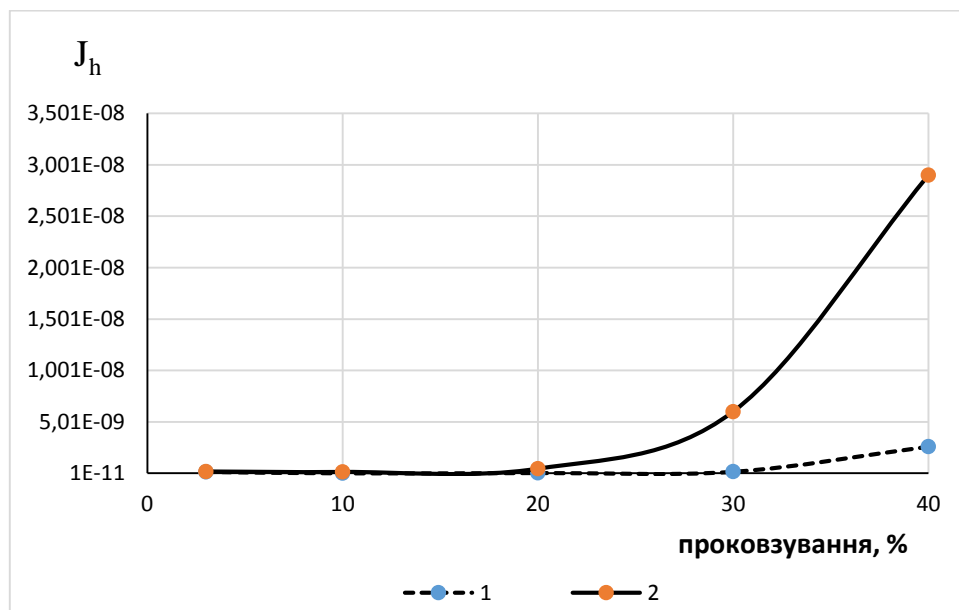


Рис. 6.10. Кінетика зміни iнтенсивностi зношування сталi 45 в умовах тертя кочення з змiнним проковзуванням: 1 – $\sigma_{екв} = 279,38$ МПа; 2 – $\sigma_{екв} = 338,1$ МПа.

Розбіжність між експериментальними даними по інтенсивності зношування контактних поверхонь і розрахунковими значеннями, отриманими за формулою (6.36), не перевищує 5%.

Таким чином, запропонована термо–кінетична модель оцінки довговічності контактних поверхонь на основі структурно-енергетичних параметрів фрикційного контакту, що враховує наявність двох областей накопичення пошкоджень, а саме областей багатоциклової контактної втоми і дебрис–шару. Удосконалені існуючі та розроблені нові параметри дозволять більш точно прогнозувати довговічності контактних поверхонь, які працюють за умов кочення з проковзуванням в несталих режимах тертя.

6.2. Апробація методики оцінки триботехнічних властивостей контакту верхнє компресійне кільце - гільза циліндра двигуна внутрішнього згорання.

Знос гільзи циліндра є однією з причин передчасної відмови двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ). Відомо, що інтенсивність зношування трибоспряжень залежить від теплових процесів, напруженого стану в зоні контакту та тривалості роботи. Окрім цього, на інтенсивність зношування гільз циліндра впливає якість палива та мастильного матеріалу, фізико–механічні властивості матеріалу та режим технічної експлуатації. В процесі експлуатації двигунів робочі поверхні циліндрів зношуються нерівномірно, в результаті чого відбувається зміна геометричної форми як по довжині, так і по діаметру циліндра. Збільшення внутрішнього діаметра і зміна форми робочої поверхні циліндрів приводять до значного збільшення робочих зазорів, що супроводжується зниженням потужності двигуна, збільшенням витрат палива і мастильного матеріалу.

Прогнозування інтенсивності зношування деталей ДВЗ в залежності від конструктивних та робочих параметрів з використанням розрахунково–аналітичних методів має велике практичне значення [224].

По прогнозуванню фактичного ресурсу деталей циліндро-поршневої групи ДВЗ за величиною їх зносу на стадії проектування розроблено ряд математичних моделей [171].

Зокрема, в роботі [32] розглянуто особливості моделювання зношування верхнього поршневого компресійного кільця ДВЗ з урахуванням його переміщень та вібрацій в поршневій канавці двигуна та запропонована методика оцінки ресурсу поршневого кільця. В роботі [106] отримано залежності середньої і відносної середньої відстані між плямами контакту від комплексної характеристики шорсткості поверхонь при різних видах деформацій і умовах тертя деталей ДВЗ. З використанням метода складання умовних лінійних рівнянь на основі спрощеного алгоритма Гауса, приведення їх до нормальних рівнянь та рішенням останніх, одержана формула розрахунку зносу втулок циліндрів різних типів двигунів внутрішнього згоряння, за якою можливе прогнозування величини зносу з достатньою для практичних цілей достовірністю [321].

Подальша розробка нових та удосконалення існуючих методів визначення зносу деталей ДВЗ та їх практичне використання є актуальним питанням.

В роботі поставлено задачу розробки методики оцінки інтенсивності зношування гільзи циліндру з урахуванням конструкційних параметрів та режимів технічної експлуатації двигуна, основних параметрів робочого процесу ДВЗ.

В якості об'єктів досліджень були обрані моделі двигунів внутрішнього згоряння ряду марок автомобілів при першому капітальному ремонті (табл. 6.5). При визначенні технічного стану перед ремонтом знос гільз визначався індикатором-нутроміром у двох взаємно-перпендикулярних площинах і в чотирьох поясах-перетинах:

- на відстані $5 \div 10$ мм від верхньої площини циліндра - незношена частина циліндра;
- на відстані $10 \div 15$ мм від верхньої площини циліндра - найбільш зношена частина циліндра, ВМТ;
- посередині циліндра;
- на відстані $10 \div 15$ мм від нижньої площини циліндра, НМТ.

**Результати мікрометричного вимірювання зносу гільзи циліндру в
верхній та нижній мертвих точках (ВМТ та НМТ) для різних моделей двигунів
залежно від пробігу автомобілів**

Марка автомобіля	Рік випуску	Об'єм робочого тіла в циліндрі, см ³	Пробіг автомобіля, тис.км	Знос втулки циліндра, мм		Модель двигуна
				ВМТ	НМТ	
Audi-80	1998	2597	500	0,04 – 0,05	0,009 – 0,01	ABC V6
BMW 325e	1996	2693	400	0,10 – 0,12	0,03 – 0,05	M 50
Honda Civic	1986	1488	350	0,07 – 0,09	0,02 – 0,03	EW
Mersedes Benz 230	1995	2499	500	0,10 – 0,11	0,01 – 0,03	M102-16V
Mitsubishi Eclipse, L200	1991	1997	320	0,05 – 0,07	0,01 – 0,02	G63B
Opel Record	1999	1796	450	0,07 – 0,08	0,04 – 0,05	18S
Subaru Leone	1985	1298	300	0,12 – 0,13	0,06 – 0,07	EA65
Volkswagen Passat	1992	1896	600	0,12 – 0,14	0,009 – 0,01	1Y Diesel

В роботі поставлено задачу розробки методики оцінки інтенсивності зношування гільзи циліндру та кінетики формування товщини мастильного шару в контакті з урахуванням конструкційних параметрів та режимів технічної експлуатації двигуна, основних параметрів робочого процесу ДВЗ (розділ 2.5). Стендові випробування проводились на дизельному двигуні 1,9 TDI. В гільзах циліндра були зроблені отвори для датчиків вимірювання товщини змащувального шару.

На основі встановлених експериментальних залежностей кінетики зміни триботехнічних показників створена анімаційна модель, яка візуально зображує зміну товщини мастильного шару, напруг зсуву, температури оливи, інтенсивність зношування гільзи циліндру на кожному робочому етапі ДВЗ (рис. 6.11).

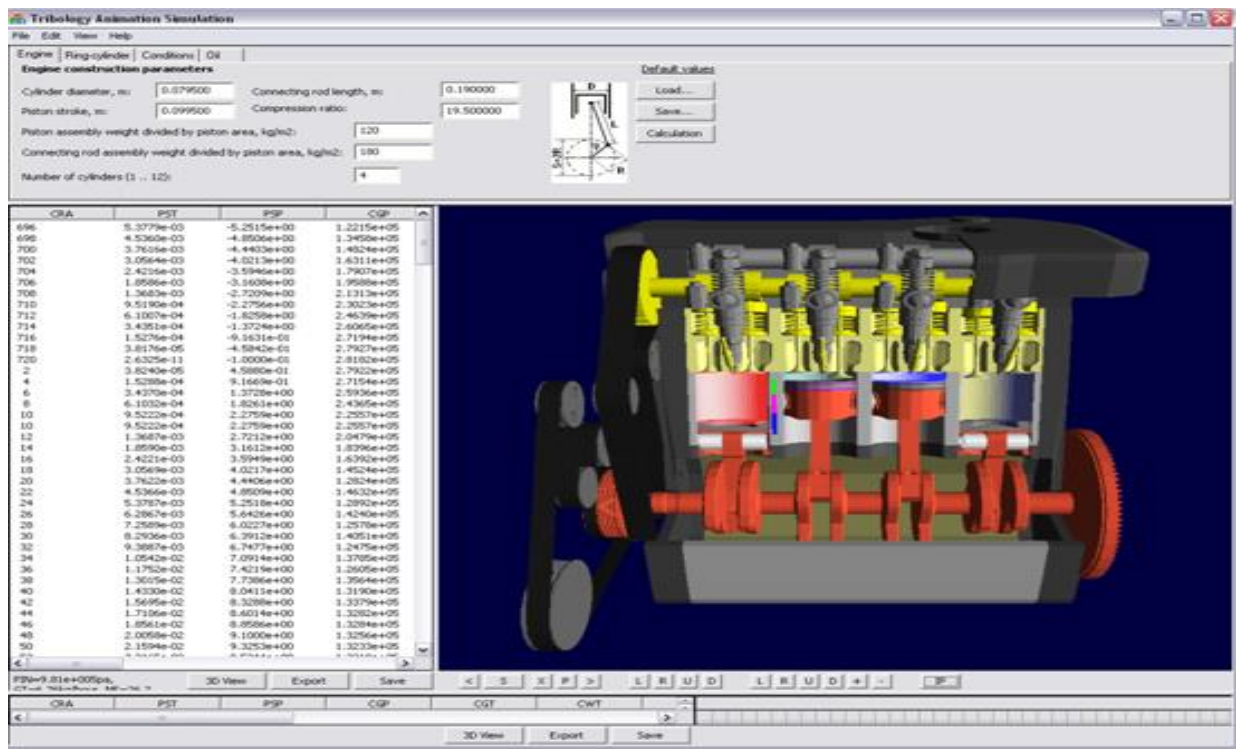


Рис. 6.11. Трибологічна модель оцінки триботехнічних характеристик контакту залежно від робочого процесу ДВЗ.

За одержаними значеннями інтенсивності зношування I_i представленої моделі можливо прогнозувати кінетику зміни даного чинника від кута повороту кривошипа для чотирьох тактів ДВЗ (рис. 6.12).

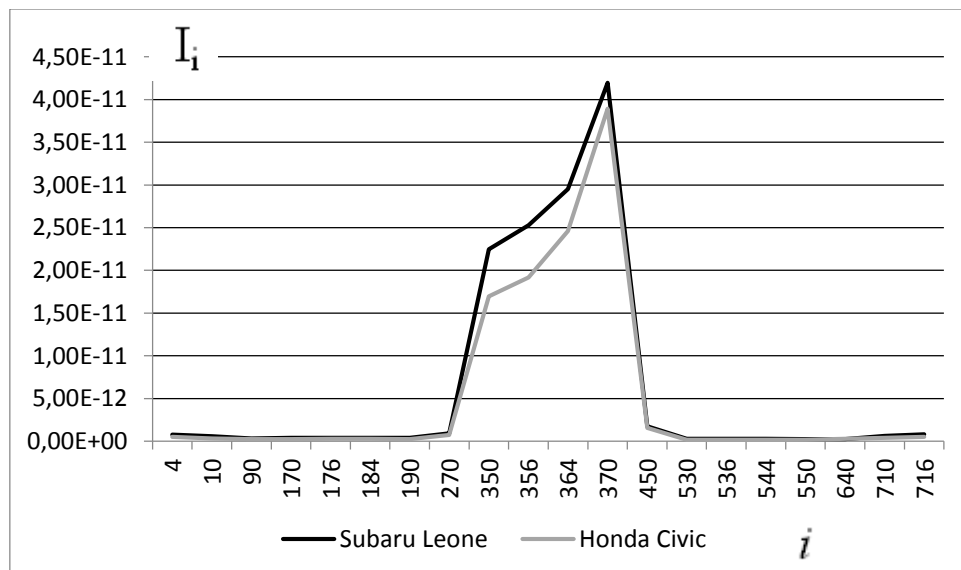


Рис. 6. 12. Розрахункові значення інтенсивності зношування гільзи циліндра залежно від кута повороту кривошипа в робочому процесі ДВЗ для різних марок автомобілів

Аналіз епюр зносу втулок циліндрів по утворюючій показує наявність яскраво вираженого максимуму у верхній частині, в зоні ВМТ. Згідно одержаній математичній залежності динаміки зміни інтенсивності зношування гільзи, максимальні показники даного параметру характерні при таких робочих процесах двигуна, як стиск паливно-повітряної суміші та її згоряння, що відповідає куту повороту кривошипу 244° – 474° . Саме в цьому робочому діапазоні встановлено стрімке зниження товщини мастильного шару та перехід трибосистеми в екстремальні умови роботи.

Наприклад, згідно приведеному алгоритму розрахунку товщини мастильного шару (розділ 2.5), змащувальні властивості оливи Аріан-екстра SAE15w40 API CF-4/SG при частоті обертів колінчастого вала 3000 хв.^{-1} , тиску у впускному трубопроводі 157000 Па , коефіцієнту надлишку повітря $1,60$, куті випередження впорскування $12,0$ град. будуть мати закономірність, приведену на рис. 6.13.

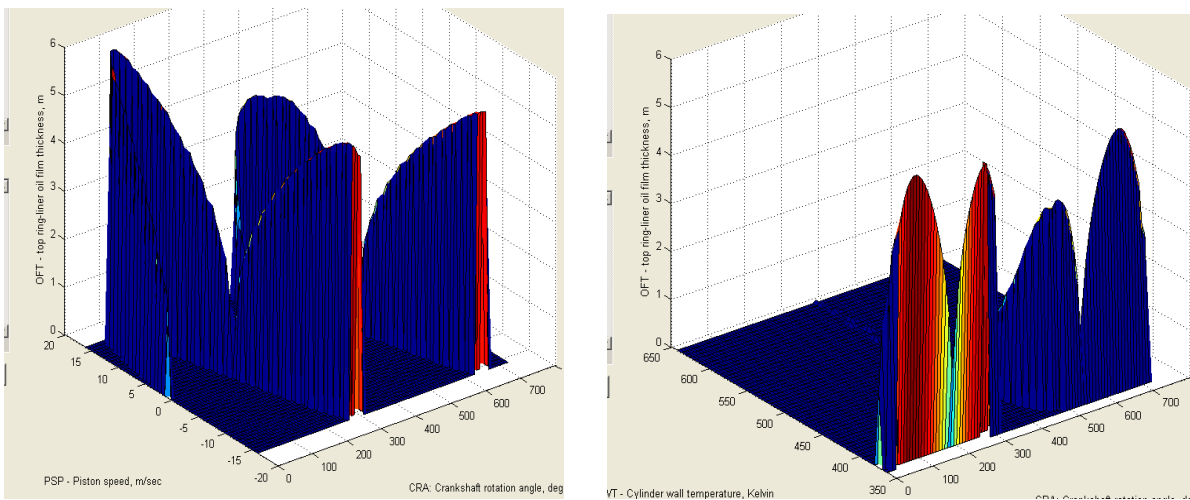


Рис. 6.13. Зміна товщини мастильного шару в трибоспряженні верхнє компресійне кільце – гільза циліндра залежно від кута повороту кривошипа, лінійної швидкості поршня та температури стінки циліндра.

Втулка циліндра є однією з найбільш напружених і відповідальних деталей двигуна, яка лімітує термін його служби до капітального ремонту. У зв'язку з цим прогнозування зносу гільзи циліндра в середніх умовах експлуатації автомобіля є першочерговим завданням. За допомогою представленої математичної моделі

можливо теоретично спрогнозувати знос гільз циліндрів в залежності від пробігу автомобіля, що достовірно збігається з реальними показниками зносу гільз циліндрів при пробігу двигуна до його капітального ремонту (рис. 6.14).

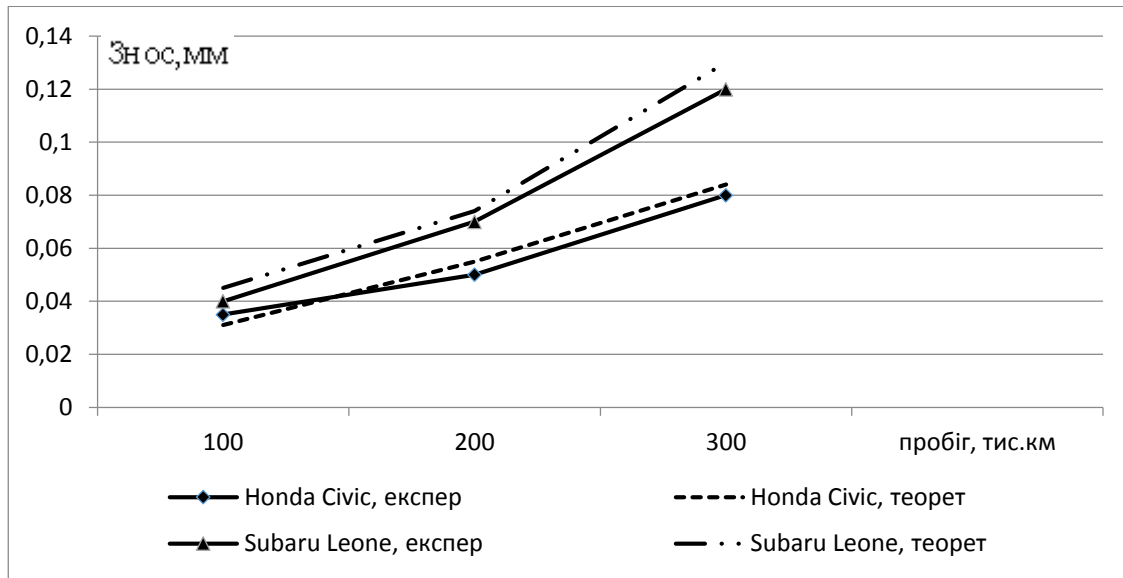


Рис. 6.14. Теоретичні та експериментальні залежності зміни зносу гільз циліндрів ДВЗ залежно від пробігу автомобілів.

Таким чином, створена методика розрахунку основних трибологічних характеристик пар ковзання двигуна внутрішнього згоряння дозволяє спрогнозувати ефективність мащення та ступінь зношування контактних поверхонь залежно від робочого процесу.

6.3. Моделювання оцінки величини максимальних дотичних напружень та глибини їх залягання залежно від триботехнічних характеристик контакту.

Метою даного напрямку було визначення напружено-деформованого евольвентного зачеплення. На основі моделювання, експериментальних досліджень триботехнічних параметрів контакту визначити чинники, які впливають на глибину залягання максимальних дотичних напружень і на їх величину.

Побудова геометричної моделі зубчастої пари здійснювалася в системі Autodesk Inventor, що забезпечує високу точність побудови. Точність побудови

профілю зуба для зубчастого зачеплення в Inventor відповідає 5 ступеню точності зубчастих передач. Для проведення аналізу, побудована геометрична модель зубчастого зачеплення була експортована в ANSYS Workbench (рис. 6.15 а). В ANSYS побудована скінченно-елементна модель зубчастої передачі (рис. 6.15 б-г).

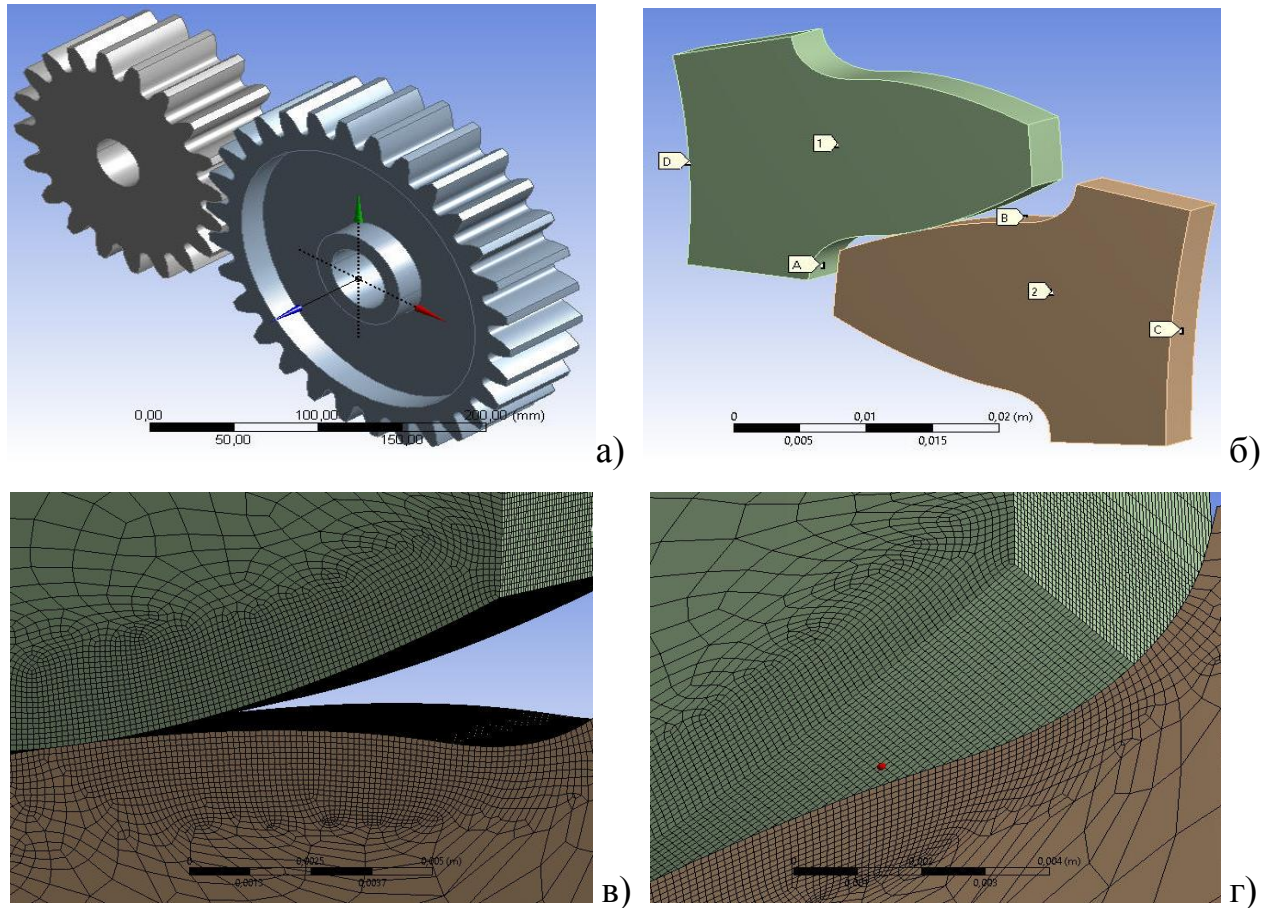


Рис.6.15. Моделювання евольвентного зачеплення методом скінченних елементів.

Для аналізу обрана зубчаста пара з параметрами, наведеними в табл.6.6.

Таблиця 6.6

Параметр	Шестерня	Колесо
Кількість зуб'їв	20	30
Ширина зубчастого вінця, мм	64	60
Кут зачеплення, градуси	20	
Модуль зачеплення, мм	8	
Міжосьова відстань, мм	200	
Крутний момент, Нм	200	
Модуль Юнга, МПа	$2,15 \cdot 10^5$	
Коефіцієнт Пуасона	0,3	

З метою зменшення об'єму обчислювальної роботи для аналізу напружено-деформованого стану вирізано сегмент, який складається з двох зуб'їв: шестерні 1 і колеса 2 (рис.1. б). Ширина зубчастого вінця шестерні зменшена до 6 мм і для колеса до 5 мм, відповідно зменшено навантаження на зубчасту пару.

Для забезпечення достатньої точності обчислень, в зоні контактної взаємодії щільність розбивки тіл кінцевими елементами істотно збільшена, а розміри кінцевих елементів (0,1 мм) задані порівняльно з розмірами ділянки контакту (рис.1 в, г). В якості елементів для побудови сітки використані об'ємні просторові 20-вузлові елементи SOLID186.

В якості моделі контактної взаємодії шестерні і колеса вибрана взаємодія двох поверхонь А і В (рис.1, б), для опису яких використані просторові 8 вузлові контактні елементи CONTA174 і TARGE170.

Граничні умови:

- для колеса задано повне фіксування всіх ступенів свободи по поверхні С;
- для шестерні – обмеження всіх ступенів свободи крім обертання навколо осі z по поверхні D (рис.1, б).

В результаті отримана скінченно-елементна модель, що складається з 294240 елементів і 1228075 вузлів.

Результати розрахункового аналізу напружено-деформованого стану наведені в додатку В (рис. В.1 – В.15).

Порівняльний аналіз отриманих результатів з розрахунковими результатами контактної взаємодії Герца для двох співвісних циліндрів (проаналізовано в розділі 1) показав ряд відмінностей в результатах чисельного та аналітичного рішень, які пояснюються відмінностями в розрахункових моделях.

Як показують результати розрахунку, залежності Герца дають занижені значення контактної тиску в порівнянні з результатами чисельного аналізу. Максимальні контактні навантаження, отримані МСЕ становлять 175,46 МПа (коефіцієнт тертя 0,05) (рис. В.7, а), а за розрахованим залежностям Герца - 156 МПа, похибка в розбіжності становить близько 11%. Максимальні дотичні напруження, отримані МСЕ - 66 МПа (рис. В.12, а) при глибині залягання від поверхні 0,12 мм і

відповідно по Герцу – 47 МПа на глибині 0,14 мм, похибка становить за максимальними дотичним напруженням близько 28 % і по глибині 14%. Таким чином, можна стверджувати, що використання класичних формул по Беляєву (1.23) і (1.25) вносить певні похибки в результати розрахунків.

Слід зазначити, що на відміну від розрахунку за формулою Герца, який дає однакові значення тисків по всій довжині контактної лінії, МСЕ враховує крайові ефекти (рис. В.4, а, рис. В.5.), що виникають на межі області контакту. Збільшення значень компонент напружено-деформованого стану обумовлено різною шириною зубчастих вінців шестерні і колеса, в разі рівної ширини значення компонент НДС у торців зуб'ів зменшуються.

Ефективний аналіз поведінки механічної системи з наявністю тертя можливий при використанні коректної моделі системи, що адекватна моделі тертя. Адекватну модель тертя можна отримати в результаті експериментальних досліджень, що проводиться на реальних пристроях або фізичних моделях.

Для фізичних моделей важливо забезпечити механічну подібність, що дозволяє переносити результати експериментальних досліджень на реальне трибоспряження деталей. Подібність буде забезпечена за умов рівності критеріальних параметрів або комплексів подібності. Методи теорії подібності дозволяють визначити ці числа. Методи теорії подібності, в тому числі і аналіз розмірностей, можна використати в трибоспряженнях деталей. Їх перевагою є те, що вони використовуються у тих випадках, коли невідома математична модель досліджуваного явища. Зрозуміло, що метод розмірностей не дозволяє проводити оцінку впливу усіх факторів на процес тертя, є наближеним і вимагає експериментального підтвердження.

При дослідженні величини і глибини залягання максимального дотичного напруження в матеріалах трибоспряження деталей важливе врахування наступних факторів: σ_{\max} – максимальне контактне навантаження, МПа; h_m – товщина мастильного шару, мкм; $V_{\text{ковз}}$ – швидкість ковзання, м/с; V_1 – швидкість кочення випереджаючої поверхні, м/с; V_2 – швидкість кочення відстаючої поверхні, м/с; $V_{\Sigma\text{коч}} = V_1 + V_2$ – сумарна швидкість кочення, м/с; $A_{\text{мп}}^{\text{num}}$ – питома робота сил тертя,

Дж/мм²; $\theta = \frac{\Delta T}{T}$ – максимальний відносний приріст температури в зоні контакту; b – напівширина площадки контакту.

Враховуючи ці змінні, максимальне дотичне напруження можна представити у вигляді наступної функції:

$$\tau_{\max} = f_1(\sigma_{\max}, h_m, V_{\text{ковз}}, V_{\Sigma\text{коч}}, A_{\text{мп}}^{\text{num}}, \theta, b). \quad (6.37)$$

Глибину залягання h максимальних дотичних напружень можна представити у вигляді наступної функції:

$$h = f_2(V_{\text{ковз}}, V_{\Sigma\text{коч}}, h_m, b, H, E, \nu, k_{\text{ум}}), \quad (6.38)$$

де E – модуль пружності матеріалу деталі, МПа; H – мікротвердість поверхневого шару, МПа; ν – коефіцієнт Пуассона; $k_{\text{ум}}$ – коефіцієнт, що характеризує умови тертя спряження деталей.

В свою чергу деякі з факторів, наприклад, питома робота сил тертя, коефіцієнт тертя залежать від ряду незалежних змінних. Тому метод розмірностей можна використовувати каскадним чином. Зрозуміло, що кожний раз його застосування слід узгодити з результатами експериментальних досліджень і вводити відповідні корегуючі коефіцієнти.

Представимо величини змінних функції (6.37) в одиницях вимірювання: τ_{\max} [kg m⁻¹ s⁻²]; $A_{\text{мп}}^{\text{num}}$ [kg s⁻²]; h [m]; h_m [m]; σ_{\max} [kg m⁻¹ s⁻²]; $V_{\text{ковз}}$ [m s⁻¹]; $V_{\Sigma\text{коч}}$ [m s⁻¹]; b [m].

Використаємо матричний метод аналізу розмірностей, згідно якого представимо змінні в зазначеній системі вимірювання (табл.6.7).

Таблиця 6.7

Змінні функції (6.37), що враховані при аналізі методу розмірностей

	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇
	τ_{\max}	σ_{\max}	$A_{\text{мп}}^{\text{num}}$	$V_{\Sigma\text{коч}}$	b	h_m	$V_{\text{ковз}}$	θ
L	-1	-1	0	1	1	1	1	0
M	1	1	1	0	0	0	0	0
T	-2	-2	-2	-1	0	0	-1	0

Отже маємо: L – довжина; M – маса; T – час; $P_1 \dots P_7$ – нові змінні, що приписуються факторам зазначеним у функції (6.37).

Згідно даних табл.6.7, усі умови можливості використання матричного методу виконані:

$$m_j = 3; \quad n+1=8; \quad m_j < n-1, \quad (6.39)$$

де m_j – число основних одиниць, n – число досліджуваних факторів $r=3=m_j$.

Матриця, представлена в табл. 6.7, не є особливою, тому вона містить ненульовий визначник:

$$W = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ -2 & -2 & -1 \end{vmatrix} = 1 \neq 0. \quad (6.40)$$

Згідно методу аналізу розмірностей отримаємо систему розмірних рівнянь:

$$\begin{cases} -P_1 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 = -1; \\ P_1 + P_2 = 1; \\ -2P_1 - 2P_2 - P_3 - P_6 = -2. \end{cases} \quad (6.41)$$

Система (5) розв'язується по відношенню до зв'язаних невідомих:

$$\begin{cases} P_1 = 1 - P_3 + P_4 + P_5; \\ P_2 = P_3 - P_4 - P_5; \\ P_6 = -2P_3. \end{cases} \quad (6.42)$$

При розгляді змінних, крім їх степеня, тобто величини $P_1 \dots P_6$ з системи рівнянь (6.42) необхідно врахувати фізичну сутність процесів і провести корегування у відповідності до результатів експериментальних досліджень, а також можна ввести ряд корегуючих коефіцієнтів. В розрахунках використовувався факторний метод, за допомогою якого визначались найбільш значимі параметри, які враховувались при виведенні залежностей.

Згідно розглянутому методу, одержані залежності максимальних дотичних напружень в контакті та глибини їх залягання з урахуванням триботехнічних параметрів контакту. Залежність максимальних дотичних напружень набуде вигляду:

$$\tau_{max} = \sigma_{max} \frac{V_{\text{КОВЗ}}^{0,1}}{V_{\Sigma \text{ Коч}}} (A_{\text{ГР}} T)^{0,07}, \quad (6.43)$$

де $V_{\Sigma \text{коч}}$ – сумарна швидкість кочення випереджаючої та відстаючої поверхонь, T – температура в фрикційному контакті.

В таблиці 6.8 представлені розрахункові значення максимальних дотичних напружень для сталі 45 при домінуванні різних режимів мащення в триботехнічному контакті.

Таблиця 6.8

Вплив навантаження та кочення з проковзуванням на максимальні дотичні напруження в контакті

Максимальні дотичні напруження, τ_{max} , МПа	Величина проковзування в контакті в умовах кочення з ковзанням, %		
	3	20	40
	$\sigma_{max} = 200 \text{ МПа}$		
за формулою (1.23)	60,0		
за формулою (6.43)	41,4* ... 43**	86,3* ... 99,0**	129,2* ... 139,1**
	$\sigma_{max} = 250 \text{ МПа}$		
за формулою (1.23)	75,0		
за формулою (6.43)	52,1* ... 58,3**	110,2* ... 126,3**	143,1* ... 169,0**
	$\sigma_{max} = 300 \text{ МПа}$		
за формулою (1.23)	90,0		
за формулою (6.43)	63,2* ... 70,48**	135,6* ... 155,2**	174,4* ... 209,8**

* - для гідро- та еластогідродинамічного режимів мащення;

** - для граничного та напівсухого режимів мащення.

Розрахунки максимальних дотичних напружень, проведені за запропонованою формулою, свідчать про значний вплив проковзування на зростання даного параметра. При мінімальному проковзуванні антифрикційні властивості контакту, незалежно від режиму мащення, досить ефективні та характеризуються низькими значеннями коефіцієнту тертя (0,007). Домінування швидкостей кочення в контакті є провідним чинником щодо локалізації дотичних напруг зсуву по товщині змащувального шару. Це, в свою чергу, призводить до зниження максимальних

дотичних напружень в матеріалі контактних поверхонь, в середньому, в 1,33 рази, в порівнянні з розрахунками за формулою (1.23).

Зростання проковзування до 20% обумовлює підвищення максимальних дотичних напружень в 1,45 та 1,7 раз за умов реалізації гідро- / еластогідродинамічного або граничного / напівсухого режимів мащення відповідно, в порівнянні з розрахунками за формулою (1.23). Підвищення швидкості ковзання в 10 разів, в порівнянні з мінімальним проковзуванням, призводить до локалізації вектора дотичних напружень від сил тертя не тільки по товщині змащувального шару, але й до зміни напружено-деформованого стану приповерхневих шарів металу, інтенсифікуючи пружно-пластичні деформації в приповерхневих шарах металу.

Наступне зростання швидкості ковзання до 1,13 м/с при проковзуванні 40%, що в 18 разів перевищує швидкість ковзання при проковзуванні 3%, призводить до ще більшого зростання максимальних дотичних напружень. При гідро- / еластогідродинамічному або граничному / напівсухому режимах мащення підвищення даного параметра становить в 1,9 та 2,27 разів відповідно.

Таким чином, зростання швидкості ковзання обумовлює зміну напружено-деформованого стану контактних поверхонь за рахунок появи дотичних напружень зсуву при терті, вектор дії яких локалізується не тільки по товщині змащувального шару, але й опускається в приповерхневі шари металу.

Аналіз співвідношення інтенсивностей рефлексів (110) і (200) фериту I_{200}/I_{110} вказує на незначну зміну переважної орієнтації зерен в поверхневому шарі зразків після випробувань з різним відсотком проковзування. Так, в порівнянні з випробуваннями з мінімальним проковзуванням 3%, після яких $I_{200}/I_{110} = 0,073$, відношення інтенсивностей I_{200}/I_{110} після випробувань з проковзуванням 20 і 40% змінюється в межах 0,081 та 0,092 відповідно, вказуючи на появу більшої кількості зерен з орієнтацією площин 200 паралельно поверхні внаслідок деформаційних процесів (рис. 6.16).

Аналогічно використаємо матричний метод аналізу розмірностей для отримання формули залежності глибини залягання максимальних дотичних напружень.

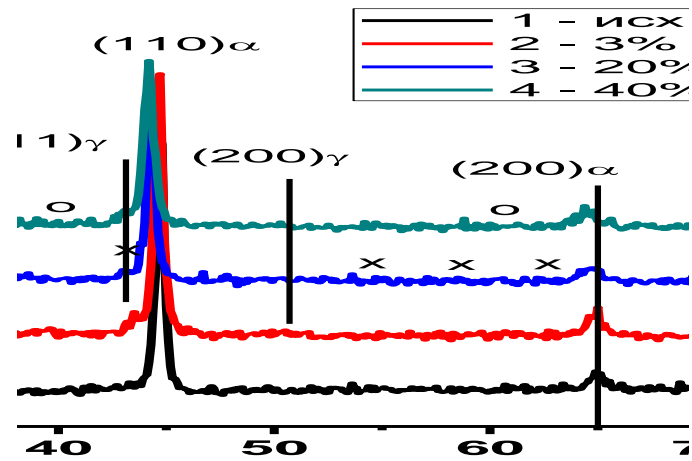


Рис. 6.16. Фрагмент дифрактограми зразків сталі 45 при терті в умовах кочення з проковзуванням.

При цьому складемо таблицю 6.8, в якій враховані розмірності змінних і отримаємо аналогічну систему розмірних рівнянь.

Таблиця 6.8.

Змінні функції (6.38), що враховані при аналізі методу розмірностей

	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
	h	$V_{\Sigma\text{коч}}$	$V_{\text{ковз}}$	b	h_m	E	H	ν	$k_{\text{ум}}$
L	1	1	1	1	1	-1	-1	0	0
M	0	0	0	0	0	1	1	0	0
T	0	-1	-1	0	0	-2	-2	0	0

$$\begin{cases} P_1 + P_2 + P_3 - P_5 - P_6 = 1; \\ P_5 + P_6 = 0; \\ -P_1 - P_2 - 2P_5 - 2P_6 = 0. \end{cases} \quad (6.44)$$

Врахувавши попереднє, отримаємо формулу глибини залягання максимальних дотичних напружень, як функції (6.38) з урахуванням даних факторного аналізу:

$$h = \left[(0,786 + \frac{V_{\text{ковз}}^{0,1}}{V_{\Sigma\text{коч}}}) b \right] / h_m^{0,2}. \quad (6.45)$$

Розрахунки за даною формулою для сталі 45 наведені в таблиці 6.9.

**Вплив навантаження та кочення з проковзуванням на глибину залягання
максимальних дотичних напружень в контактї.**

Глибина h , мм	Величина проковзування в контактї в умовах кочення з ковзанням, %		
	3	20	40
	$\sigma_{max} = 200\text{МПа}$		
за формулою 1.25	0,033		
за формулою 6.45	0,026...0,031*	0,028...0,033*	0,029...0,034*
	0,049...0,098**	0,053...0,104**	0,055...0,107**
	$\sigma_{max} = 250\text{МПа}$		
за формулою 1.25	0,041		
за формулою 6.45	0,033...0,038*	0,035...0,041*	0,036...0,043*
	0,061...0,121**	0,065...0,128**	0,068...0,133**
	$\sigma_{max} = 300\text{МПа}$		
за формулою 1.25	0,052		
за формулою 6.45	0,039...0,046*	0,041...0,049*	0,043...0,051*
	0,073...0,144**	0,076...0,153**	0,081...0,159**

* - для гідро- та еластогідродинамічного режимів мащення;

** - для граничного та напівсухого режимів мащення.

Згідно результатам, представленим в таблиці 6.9, розрахункові значення глибини залягання максимальних дотичних напружень за запропонованою формулою корелюють з розрахунковими показниками за формулою (1.25) лише за реалізації еластогідродинамічного режиму мащення в контактї (рис. 6.17).

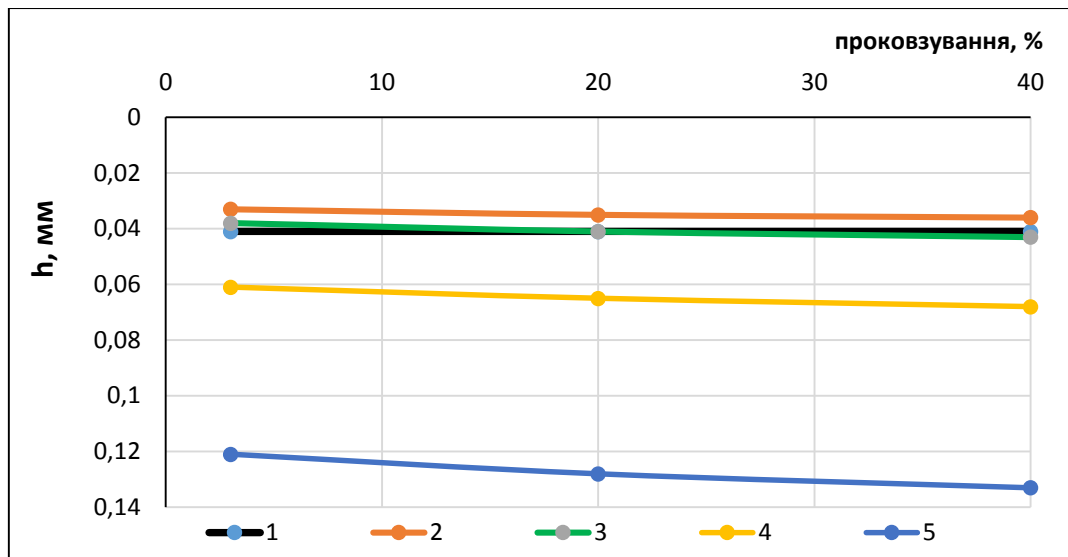


Рис. 6.17. Глибина залягання максимальних дотичних напружень в приповерхневих шарах металу в умовах кочення з проковзуванням: 1 – за формулою (1.25), 2,3,4,5 – за формулою (6.45); 2 – гідродинамічний, 3 – еластогідродинамічний, 4 – граничний, 5 – напівсухий режими мащення.

При гідродинамічному режимі мащення максимальні дотичні напруження від сил тертя піднімаються в вищерозташовані приповерхневі шари металу завдяки демпфуючим властивостям змащувальної плівки. По мірі переходу трибосистеми в екстремальні режими, за умов домінування в контакті граничного або напівсухого режимів мащення, глибина залягання максимальних дотичних напружень збільшується в 1,85 та 3,65 разів відповідно, в порівнянні з гідродинамічним режимом мащення. Зростання величини проковзування з 3 до 40% призводить до збільшення розрахункового параметру h , в середньому, в 1,1 рази.

Таким чином, зниження товщини мастильної плівки в контакті є домінуючим чинником щодо локалізації вектора дотичних напружень зсуву при терті на значно більшу глибину в приповерхневих шарах металу.

Висновки до розділу 6

1. Запропоновані методи оцінки параметрів, що входять в модель, яка описує довговічність області багаточислової втоми. Отримані вирази зв'язують напружено-

деформований стан, характеристики втомної міцності матеріалу з характеристиками фізичної моделі руйнування матеріалу, заснованої на термофлуктуаційній теорії міцності твердих тіл. Встановлено вплив ступеня зміцнення приповерхневих шарів, типу вторинних структур і граничних плівок мастильного матеріалу, утворених в результаті структурної пристосованості, на енергію активації провідного механізму руйнування при терті.

2. Збільшення ступеня проковзування при коченні з проковзуванням підвищує рівень накопичення енергії активації провідного механізму руйнування. Перш за все, це пов'язано зі збільшенням ступеня пластичної деформації, підвищенням температури і градієнта швидкості зсуву в контакті внаслідок підвищення швидкості ковзання з 0,062 до 1,15 м / с при проковзуванні з 3 до 40% відповідно.

3. Проведено аналіз параметрів, що входять у вираз, який визначає довговічність дебрис-шару, дані оцінки параметрів і запропоновані методи їх визначення стосовно контактних поверхонь, що працюють в умовах кочення з змінним ковзанням. Показано, що провідними факторами, що впливають на довговічність дебрис-шару, є швидкість ковзання, температура і контактний тиск. Для коефіцієнта, що враховує вплив зовнішнього середовища, запропоновані залежності оцінки зміни енергії активації поверхневого шару з урахуванням таких характеристик, як мікротвердість поверхневих шарів металу і ефективна в'язкість мастильного матеріалу в контакті. Припущена оцінка провідних механізмів структурної пристосованості мастильного матеріалу і матеріалу контактних поверхонь в умовах кочення з ковзанням по кінетиці зміни параметра ΔG_d .

4. Запропоновано формулу для розрахунку інтенсивності зношування елементів трибоспряжень, що працюють в умовах кочення з проковзуванням, що враховує кінетику зміни антифрикційних, реологічних, енергетичних характеристик контакту.

5. Запропонована математична модель оцінки інтенсивності зношування гільзи циліндра ДВЗ залежно від параметрів конструкції двигуна, матеріалів кільце – циліндр, умов роботи ДВЗ, властивостей мастильного матеріалу, за якою можливо визначити появу нерівномірного зносу гільзи циліндра по висоті та спрогнозувати

ресурс експлуатації автомобіля за максимально допустимим зносом гільз циліндрів залежно від обраної моделі двигуна.

6. Враховані основні вхідні параметри для розрахунку товщини мастильного шару в контакті ковзання, які включають параметри конструкції двигуна, параметри матеріалів кільце – циліндр, умови роботи ДВЗ, фізико–хімічні властивості змащувальної рідини. Запропоновано проводити розрахунок товщини мастильного шару між першим компресійним кільцем та гільзою циліндра в ДВЗ з урахуванням кінетики зміни безрозмірних параметрів швидкості, матеріалу та навантаження, параметру мікрогеометрії контактних поверхонь та приведеного радіусу кривизни контактних поверхонь.

7. Запропонована емпірична залежність величини максимальних дотичних напружень в контакті з урахуванням триботехнічних параметрів контакту. Зростання проковзування до 20% та 40% обумовлює підвищення максимальних дотичних напружень в 1,7 та 2,27 в умовах граничного / напівсухого режимів мащення відповідно, в порівнянні з розрахунковими класичними залежностями за Беляєвим та Герцем.

8. Запропонована емпірична залежність глибини залягання максимальних дотичних напружень. По мірі переходу трибосистеми в екстремальні режими, за умов домінування в контакті граничного або напівсухого режимів мащення, глибина залягання максимальних дотичних напружень збільшується в 1,85 та 3,65 разів відповідно, в порівнянні з гідродинамічним режимом мащення.

РОЗДІЛ 7

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КОНТАКТНИХ ПОВЕРХОНЬ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ТА МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ

В плані актуальності проблем ресурсо– та енергозбереження в промисловості економічно перспективними є розробки комплексу технологічних заходів, спрямованих на відновлення і зміцнення зношених деталей.

Підвищення довговічності і міжремонтного ресурсу деталей машин і механізмів може бути отримано шляхом застосування нових матеріалів, покриттів і обробок, що підвищують триботехнічні характеристики контактних поверхонь і сприяють підвищенню їх зносостійкості. Перспективним напрямком підвищення ефективності використання деталей різного призначення при економії матеріальних і паливно-енергетичних ресурсів є організація відновлення зношених деталей машин.

У сучасних умовах питома вага відновлених деталей складає близько 7 – 10%, хоча створення виробництв по відновленню деталей вимагає в 2 – 2,5 разів менше капітальних вкладень в порівнянні з підприємствами по виготовленню запасних частин [103].

Типовими пошкодженнями шестерен і зубчастих коліс є зношування, заїдання, залишкова деформація, контактна втома, виникнення і розвиток тріщин, руйнування зуба [40]. При наявності пошкоджень, відколів, тріщин – деталі калібруються. Ремонт слідів зносу виконується слюсарно–механічною обробкою, якщо їх величини не перевищують гранично допустимих [63]. Потім деталі можуть піддаватись гальванопокриттям, напилюванню, наплавленню, наварці, після чого – додатково слюсарно механічній обробці і контролю якості виконання ремонту і відновлення деталей.

Більш великі пошкодження на неробочих поверхнях шестерен, а в деяких випадках і на робочих поверхнях, усуваються плазмовим наплавленням, наварюванням або напиленням з наступною слюсарно–механічною обробкою для дотримання геометричної форми і розмірів (зачистка, шліфування, зміцнення і т.д.).

У літературних джерелах є результати досліджень, які показують перспективи підвищення питомої потужності авіаційних зубчастих передач шляхом нанесення покриттів [356]. Відновлення зносу на чавунних зубчастих колесах можливо шляхом нарощування карбідних покриттів методом термодифузійного насичення з порошкового середовища [39].

Поява нових технологій для наплавлення, термомеханічної і хімічної обробок, покриття і зниження шорсткості контактуючих поверхонь дозволяє знаходити різні варіанти їх поєднання як при ремонті, так і при проектуванні нових зубчастих передач для підвищення їх довговічності в умовах експлуатації. Зокрема, електродугове наплавлення порошковим дротом займає міцні позиції в реновації деталей машин і механізмів в різних галузях промисловості [276, 281, 454]. Вибір порошкового дроту проводиться з урахуванням умов експлуатації відновлюваної деталі, виду захисту, конструктивних особливостей деталі, наявного обладнання.

У той же час, перевірка якості технологій, якими зміцнюють або відновлюють, повинна експериментально здійснюватися в лабораторних умовах на зразках, навантажених відповідно до основних експлуатаційних впливів; при цьому також необхідно приділяти увагу і вибору мастильного матеріалу.

7.1. Аналіз триботехнічних характеристик самофлюсуючих покриттів в умовах кочення з ковзанням при нестационарному навантаженні.

Останнім часом багато дослідників намагаються отримати тонкі поверхні газотермічним напиленням покриттів з матеріалів, які характеризуються високою твердістю і зносостійкістю [230]. Порошки, зокрема самофлюсуючі, набули найбільшого поширення в практиці відновлювально–зміцнюючих технологій. Особлива перевага матеріалів цього класу полягає в тому, що якісне оплавлення покриття відбувається без застосування додаткових флюсів або захисних середовищ. При цьому вартість відновлення зазвичай не перевищує 30 –50% вартості нових деталей [240].

Самофлюсуючі сплави – це широко поширені матеріали, які мають цільове триботехнічне призначення в техніці, спрямоване на створення зносостійких покриттів. Зазвичай, сплави леговані бором і кремнієм, які утворюють легкоплавкі флюси при взаємодії матеріалу покриття з поверхнею деталі, яка напилюється. Необхідною умовою досягнення необхідної твердості і зносостійкості покриття є наявність в структурі сплаву фаз високої твердості бориду хрому CrB і комплексних карбоборидів Fe, Ni, Cr [284, 379]. Незважаючи на підвищений попит до таких покриттів, багато питань, пов'язаних з вивченням їх формування, впливу структурно-фазових змін вихідних матеріалів на фізико-механічні властивості покриттів, в тому числі і опір втомі системи «покриття-основа», залишаються невирішеними [317]. Проведені дослідження самофлюсуючих сплавів Ni–Cr–B–Si з високим вмістом Cr і B показали, що для них характерно формування різних типів мікроструктур, що залежать від швидкостей охолодження і температури [380].

Самофлюсуючі сплави на основі нікелю, леговані бором і кремнієм, відрізняються високими технологічними (низька температура плавлення; оплавлення в окислювальній або нейтральній атмосфері в щільне, безпористе покриття; оброблюваність різанням) і експлуатаційними (зносостійкість покриттів в 3...5 разів перевищує загартовані інструментальні сталі) властивостями [49]. Згідно [348], самофлюсуючі порошки Ni–Cr–B–Si є одними з найбільш широко використовуваних для наплавлення на контактні поверхні в якості зносостійких і корозійностійких покриттів.

Самофлюсуючі порошки застосовуються для зміцнення, захисту і відновлення деталей плунжерів насосів, валів газотурбінних двигунів, транспортних засобів (клапани ДВЗ, деталі зчеплення вагонів, вали, хрестовини і т.п.), деталей дорожніх машин і механізмів і т.д. [230, 309]. Відповідно до [67], застосування самофлюсуючих порошків на нікелевій основі дозволяє отримати сплав з високою жароміцністю, теплостійкістю і зносостійкістю в парах тертя з чавуном в умовах ковзання.

Широке використання самофлюсуючих покриттів стримується в зв'язку з нестачею науково-обґрунтованих рекомендацій щодо їх застосування для різних елементів пар тертя, які працюють не тільки в умовах ковзання, але й кочення, і,

особливо, кочення з проковзуванням в мастильному середовищі [7]. Особливої актуальності це питання набуває у зв'язку з відсутністю будь-яких обґрунтованих рекомендацій щодо застосування цих покриттів для деталей пар тертя машин і механізмів, які працюють переважно в нестаціонарних умовах.

Метою досліджень було визначення закономірностей кінетики зміни фізико-механічних, протизношувальних і антифрикційних властивостей самофлюсуючих покриттів на нікелевої основі в середовищі трансмісійної оливи при коченні з проковзуванням в умовах нестаціонарного навантаження.

Контактне навантаження по Герцу (σ_{\max}) в процесі випробувань поступово збільшувалось і становило: з 1 по 150 цикл – 150 МПа; 151 – 300 цикл – 200 МПа; 301 – 650 цикл – 250 МПа. Максимальна кількість обертів склала 1000 і 800 об/хв відповідно для випереджаючої і відстаючої поверхонь [216]. Кінцевий період роботи трибоспрямижень визначався при перших ознаках схоплювання контактних поверхонь.

В якості мастильного матеріалу використовувалась трансмісійна олива ТС-гіп (SAE 140 API GL-5), виготовлена за ТУ 38.1011332-90 на ЗТМ «Аріан» (Україна), яка призначена для змащування прямозубих, спіральних-конічних і черв'ячних передач. Об'ємна температура оливи становила 100 °С.

В якості зразків використовувалися ролики із загартованої сталі 45 (HRC 38), на робочу поверхню яких наносився методом газополуменевого напилення самофлюсуючий гранульований порошок ПГ-АН9 (ПР-НХ8Д6СРП), розроблений Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України згідно ТУ 374-83 [301]. Гранулометричний склад основної фракції порошку відповідав розміру часток 50 – 125 мкм. Товщина напилюваного шару за один прохід складає 0,1 ... 0,25 мм. Загальна товщина покриттів для кожної пари досліджуваних зразків після шліфування становить 0,3; 0,7 і 1,2 мм.

Гранична працездатність досліджуваного покриття ПГ-АН9, що визначається при прояві перших ознак схоплювання контактних поверхонь в нестаціонарних умовах тертя, склала 120, 320 і 650 циклів напрацювання відповідно при товщині напиленого шару 0,3; 0,7 і 1,2 мм.

7.1.1 Вплив товщини покриття самофлюсуючого порошку на триботехнічні властивості контакті.

Розглянемо кінетику зміни основних триботехнічних показників контакту. В умовах чистого кочення в початковий період запуску тривалістю до 2 с для всіх досліджуваних контактних поверхонь, відповідно до розрахункового критерію λ , в контакті переважає гідродинамічний режим мастильної дії. Збільшення контактного тиску з 150 до 200 МПа обумовлює короткочасне зниження несучої здатності мастильного матеріалу для пар тертя з товщиною покриття 0,7 мм. Аналогічні зміни мастильної здатності встановлені при подальшому збільшенні σ_{\max} до 250 МПа для покриття з товщиною напиленого шару 1,2 мм.

Збільшення проковзування в контакті до 20%, яке призводить до появи високих градієнтів швидкості зсуву в змащувальному шарі порядку $(0,2-1,5) \cdot 10^5 \text{с}^{-1}$ не впливає на характер змащувальної дії для покриття товщиною 0,3 і 0,7 мм.

Для покриття товщиною 1,2 мм встановлено зниження товщини мастильного шару на 10%, проте в контакті домінує гідродинамічний режим мащення. У періоди підвищення контактного тиску до 200 і 250 МПа короткочасно реалізується змішаний режим мащення (рис. 7.1).

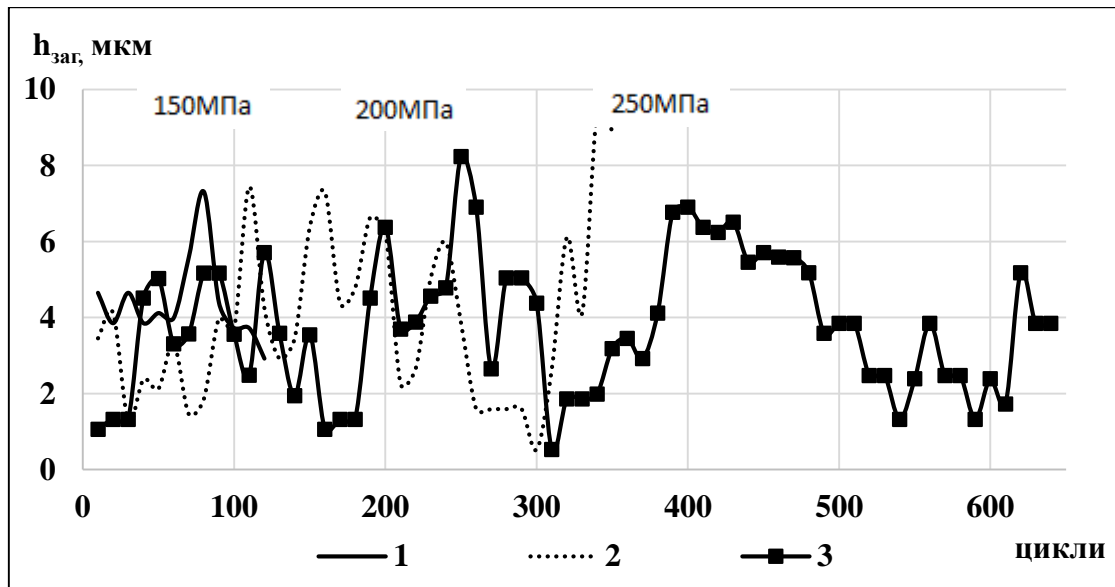


Рис. 7.1. Кінетика зміни товщини мастильного шару в умовах кочення з проковзуванням для покриття товщиною: 1 – 0,3мм; 2 – 0,7мм; 3 – 1,2мм.

При визначенні товщини граничних змащувальних шарів встановлена висока адсорбційна активність компонентів мастильного матеріалу – товщина граничних плівок, утворених на поверхнях з різною товщиною напиленого шару порошку, становить від 0,2 до 6 мкм (рис. 7.2).

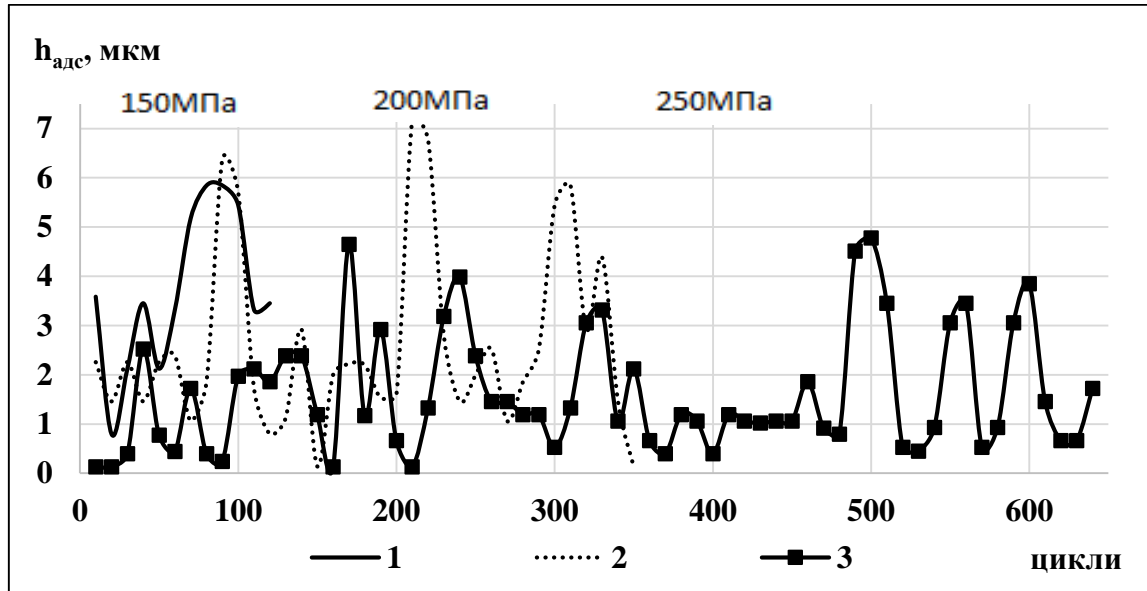


Рис. 7.2. Кінетика утворення граничних адсорбційних шарів для покриття товщиною: 1 – 0,3мм; 2 – 0,7мм; 3 – 1,2мм.

Аналіз кінетики зміни моменту тертя в триботехнічному контакті дозволив встановити ряд антифрикційних властивостей напиленого шару. По-перше, в пусковий період в умовах чистого кочення для пар тертя з товщиною покриття 1,2 мм характерні найменші показники моменту тертя, які в 1,5 – 2 рази нижче аналогічних показників, встановлених для контактних поверхонь з напиленими шарами 0,3 і 0,7 мм (рис. 7.3). При цьому підвищення контактного тиску з 150 до 250 МПа не приводить до приросту моменту тертя, що свідчить про поліпшення антифрикційних властивостей покриття – коефіцієнт тертя з підвищенням навантаження монотонно знижується з 0,024 до 0,009.

По-друге, наявність проковзування в контакті призводить до зростання моменту тертя для всіх досліджуваних контактних поверхонь, в середньому, в 1,5 раз, а для пар тертя з максимальною товщиною покриття встановлено короточасне різке підвищення моменту тертя в 2 рази при збільшенні σ_{max} до 250 МПа, що обумовлено зниженням несучої здатності мастильного матеріалу, зазначеним вище.

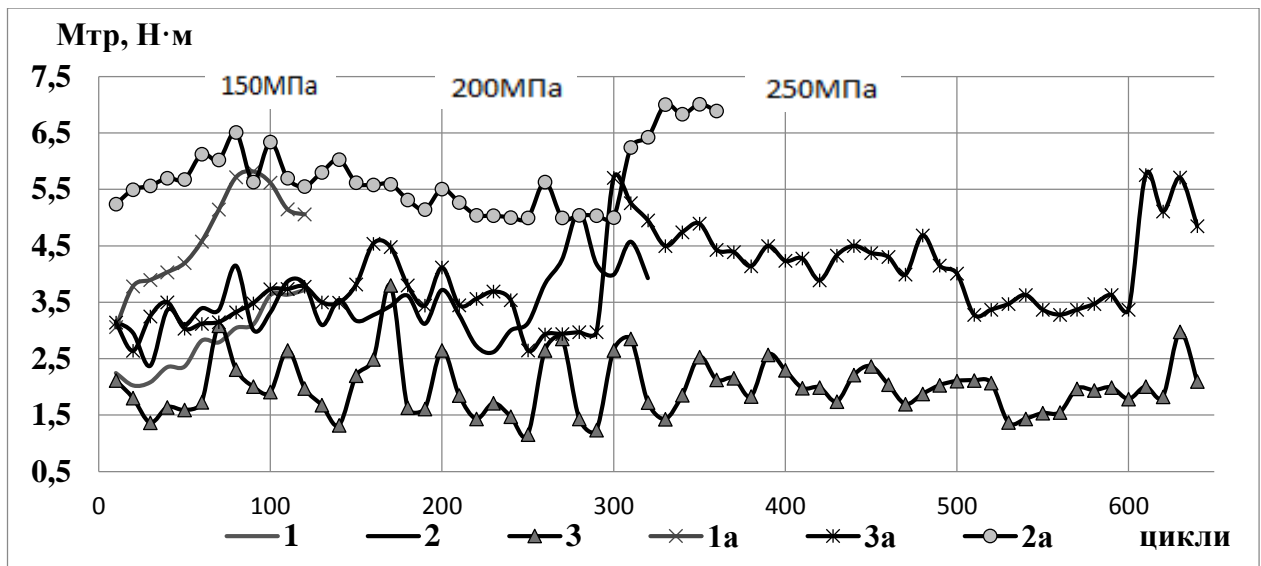


Рис. 7.3. Зміна моменту тертя при підвищенні навантаження для контактних поверхонь в умовах чистого кочення (1, 2, 3) і кочення з проковзуванням (1а, 2а, 3а): 1, 1а – покриття 0,3 мм; 2, 2а – покриття 0,7 мм; 3, 3а – покриття 1,2 мм.

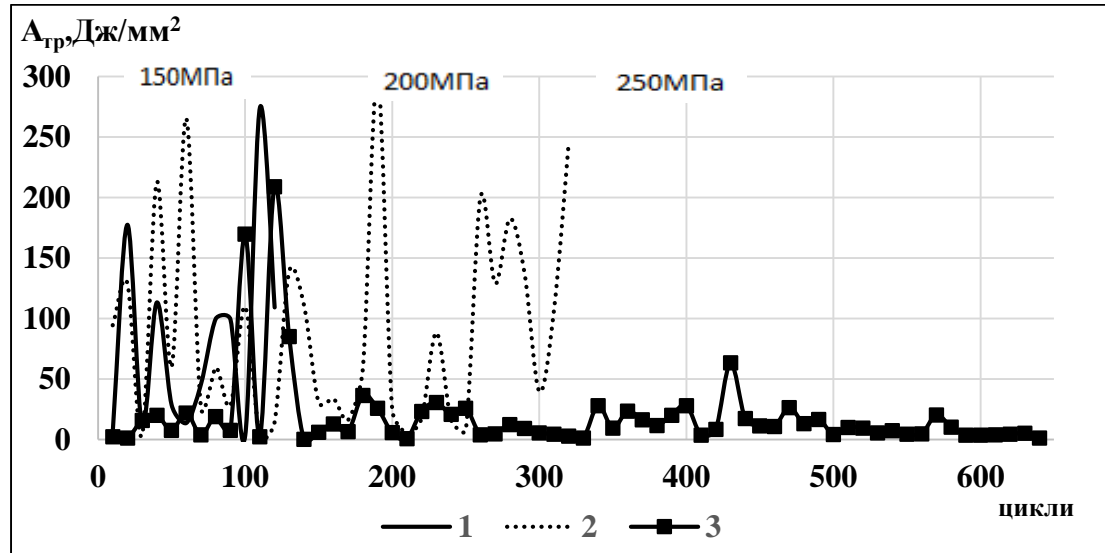
При дослідженні мікротвердості контактних поверхонь встановлено, що вихідна мікротвердість напиленого шару корелює з його товщиною: збільшення товщини покриття порошку ПГ–АН9 до 0,7 і 1,2 мм призводить до підвищення мікротвердості поверхневих шарів в 1,77 і 2,58 разів відповідно, по порівняно з покриттям 0,3 мм (табл. 7.1). Це обумовлено тривалістю температурного впливу при пошаровому нанесенні покриття з подальшим оплавленням напилених шарів.

Таблиця 7.1

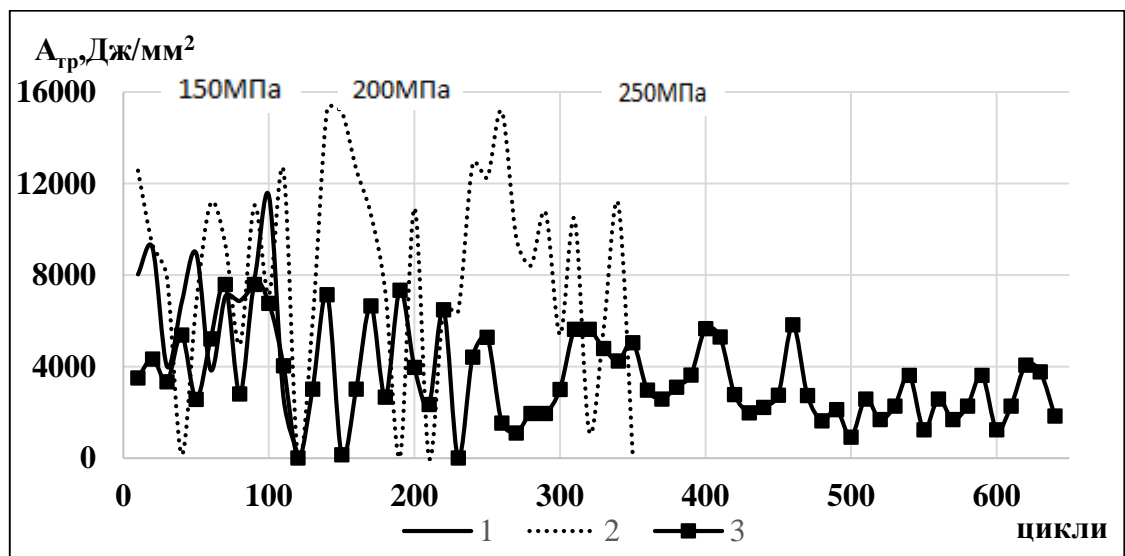
Зміна мікротвердості поверхневих шарів (H_{100}) напилених покриттів при напрацюванні

Товщина покриття ПГ–АН9, мм	Випереджаюча поверхня			Відстаюча поверхня		
	Вихідна H_{100} , МПа	Після наробітки, H_{100} , МПа	ΔH_{100} , МПа	Вихідна H_{100} , МПа	Після наробітки, H_{100} , МПа	ΔH_{100} , МПа
0,3	2377	2318	-59	2370	2171	-199
0,7	4204	3076	-1128	4200	2600	-1600
1,2	6124	5684	-440	6100	5069	-1031

Аналіз кінетики зміни питомої роботи тертя ($A_{тр}$) в контактї показав, що найбільші значення даного параметра характерні для покриття товщиною 0,3 мм – в умовах чистого кочення $A_{тр}$ становить 50.....250 Дж/мм², в умовах кочення з проковзуванням – 3000.....10000 Дж/мм² (рис. 7.4).



а)



б)

Рис. 7.4. Зміна питомої роботи тертя для контактних поверхонь в умовах чистого кочення (а) і кочення з проковзуванням (б): 1 – покриття 0,3 мм; 2 – покриття 0,7 мм; 3 – покриття 1,2 мм.

Стабілізація енергетичного параметра при ступінчастому підвищенні навантаження встановлена лише для покриття з максимальною товщиною напиленого шару. Приріст питомої роботи тертя при розгоні контактних поверхонь при пуску в умовах чистого кочення становить від 5 до 200 Дж/мм² в 15% циклів, а в

умовах проковзування при σ_{\max} 150 і 200 МПа коливання $A_{\text{тр}}$ складають 0 – 700 Дж/мм², що в 2 – 3 рази менше аналогічних значень, встановлених при дослідженні контактних поверхонь з меншою товщиною напиленого порошку.

На рис. 7.5 наведені показники лінійного зносу випереджаючої і відстаючої поверхонь досліджуваних покриттів.

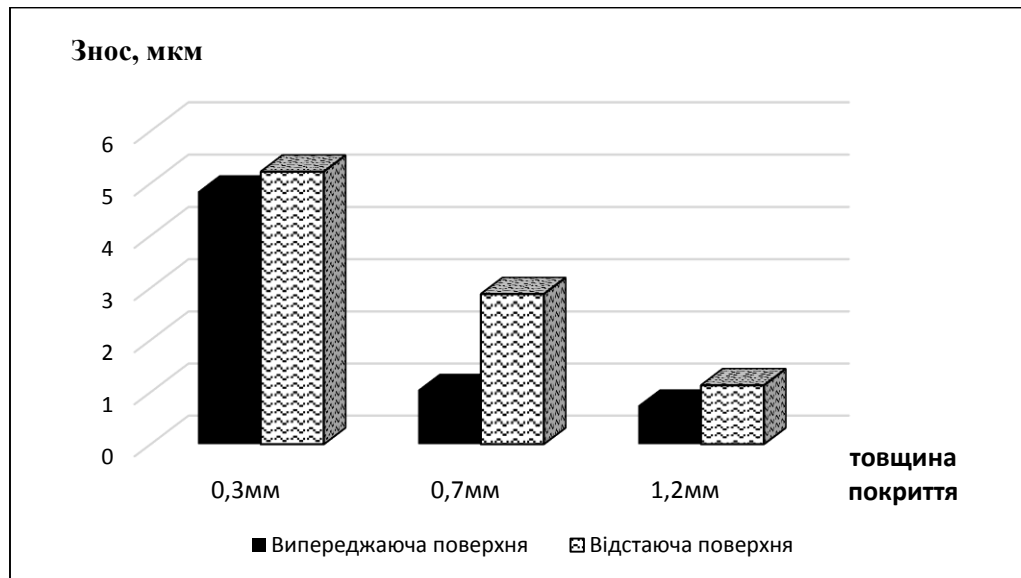


Рис. 7.5. Лінійний знос контактних поверхонь з різною товщиною напиленого шару.

Встановлений чіткий кореляційний зв'язок між товщиною покриття і його зносостійкістю. Наприклад, при збільшенні товщини напиленого шару порошку ПГ–АН9 до 0,7 мм в 2,7 разів підвищується час роботи пар тертя до схоплювання. При цьому знос контактних поверхонь знижується в 4,65 і 1,81 разів відповідно для випереджаючої і відстаючої поверхонь, в порівнянні з аналогічними показниками для покриття товщиною 0,3 мм.

7.1.2. Механізми структурної пристосованості з позиції активації поверхневих шарів металу.

В роботі встановлена кореляція між тривалістю нормальної роботи досліджуваних елементів трибоспрямижень і контактного тиску. Для товщини покриття 0,3 мм встановлено мінімальний час роботи до прояву перших ознак схоплювання контактних поверхонь при мінімальному встановленому навантаженні ($\sigma_{\max} = 150$

МПа), що відповідає загальному шляху тертя 4320м. Збільшення товщини напиленого шару до 1,2 мм підвищує тривалість нормальної роботи елементів трибоспряжень в 5,42 рази (23415 м) і характеризується нормальною працездатністю при збільшенні контактного тиску до $\sigma_{\max} = 250$ МПа. Перші ознаки схоплювання контактних поверхонь включають часткове руйнування граничних змащувальних шарів в контакті, внаслідок чого стрімко зростає коефіцієнт тертя.

Вирішальний вплив на антифрикційні властивості контакту надає мастильна дія і, зокрема, кінетика формування граничних змащувальних шарів на контактних поверхнях тертя. Досліджувана олива ТС-гіп виготовлена на основі базових мінеральних фракцій (високов'язкого ароматизованого продукту (SAE-50) і дистилатної оливи селективного очищення (ISO VG 68)) з додаванням протизадирних і депресорних присадок. Наявність ароматичних вуглеводнів в базовій основі оливи і активної сірки ($\geq 1,5\%$) в якості присадки сприяє підвищенню адсорбційної активності даних компонентів на поверхні металу [133]. При цьому слід зазначити, що в 20 – 30% циклів встановлені різкі скачки приросту товщини граничних змащувальних шарів, які в 2,0 – 2,5 разів перевищують аналогічні показники товщини плівки в інших циклах напрацювання. Ми припускаємо, що це обумовлено пористістю напиленого шару. Тліючий електричний розряд в змащувальному матеріалі, за яким реєструється падіння напруги в контакті, враховує наявність мастильного матеріалу, що знаходиться в порах напиленого шару порошку.

Згідно ефекту Ребіндера, адсорбція на металі поверхнево-активних речовин забезпечує пластифікування його поверхневих шарів [248]. Однак цей ефект з різною інтенсивністю проявляється на досліджуваних контактних поверхнях з різною товщиною напиленого шару, що підтверджується кінетикою зміни його мікротвердості при напрацюванні. Згідно [229], основна структурна фаза покриттів, що утворюються – γ -твердий пересичений розчин на основі нікелю, зміцнюючими фазами якого є борид і силіциди нікелю, бориди хрому і нікелю, карбіди хрому змінного складу. Однак ступінь розчинення в нікелі зміцнюючих кластерів прямо пропорційна тривалості і періодичності впливу температури оплавлення покриття,

що проявляється в зниженні його пористості і підвищення мікротвердості при збільшенні товщини покриття (табл. 7.1).

В процесі тертя встановлена загальна закономірність для випереджаючої і відстаючої поверхонь – відбувається знеміцнення поверхневих шарів металу при напрацюванні, що проявляється в зниженні їх мікротвердості, проте механізми цього процесу для пар тертя з різною товщиною напиленого шару різні.

Найменше зниження мікротвердості поверхневих шарів металу встановлено для мінімальної товщини напиленого шару – ΔH_{100} становить 59 і 199 МПа для випереджаючої і відстаючої поверхонь відповідно. Для цих контактних поверхонь встановлена найбільша інтенсивність зношування, що пов'язано з періодичним видаленням верхніх деформованих шарів металу в умовах динамічного навантаження. При такій інтенсивній активації поверхневих напилених шарів значно підвищується їх адсорбційна активність до компонентів мастильного матеріалу. Однак внаслідок низького вмісту зміцнюючих фаз в γ -твердому пересиченому розчині на основі нікелю, деформаційні процеси поширюються в нижні шари напиленого металу, обумовлюючи постійне їх диспергування і підвищений знос.

Основний вплив на пластифікування поверхневих шарів металу створюють сформовані на активованих тертям поверхнях граничні адсорбційні шари мастильного матеріалу, що характеризуються ефективними протизношувальними властивостями.

Для покриттів товщиною 0,7 мм показники питомої роботи тертя в контакті аналогічні показникам, які встановлені для пар тертя з меншою товщиною покриття. Підвищення контактного тиску до 200 МПа не впливає на збільшення питомої роботи тертя в умовах чистого кочення, а в умовах кочення з проковзуванням в 5% циклів питома робота тертя підвищується до 14000 Дж/мм² (рис. 7.4). Однак підвищення навантаження не призводить до інтенсифікації зносу, оскільки на 80% площі контакту сформовані граничні плівки, що характеризуються міцними хемосорбційними зв'язками з металевою поверхнею і високими антифрикційними властивостями (стабілізація коефіцієнта тертя до 0,033 при σ_{\max} 200 і 250 МПа). З підвищенням σ_{\max} до 250 МПа зростають як нормальні, так і дотичні напруження, що призводить до

інтенсифікації диспергування нижчерозташованих шарів металу, оскільки встановлена мікротвердість поверхневих шарів металу при напрацюванні лише на 10 – 20% вище, в порівнянні з аналогічним параметром при мінімальній товщині напилення.

Процеси структурної пристосованості і мастильного дії найбільш ефективно протікають на поверхнях з максимальною товщиною напиленого шару. Завдяки підвищенню в 2,58 раз вихідної мікротвердості поверхневих шарів напилення товщиною 1,2 мм характеризується високою стійкістю до деформацій. Це підтверджується мінімальним приростом питомої роботи тертя при пуску в циклічних умовах випробовування контактних поверхонь як в режимі чистого кочення, так і кочення з проковзуванням. Слід зазначити, що при 250 МПа відбувається стабілізація параметра питомої роботи тертя. Наприклад, в умовах кочення з проковзуванням значення цього параметра знаходяться, в середньому, в межах 1500 – 2500 Дж/мм² (рис. 7.4). Низька активаційна здатність напиленого шару при 150 МПа збільшує період формування міцних граничних плівок мастильного матеріалу на контактних поверхнях – у 20% циклів відбувається зрив змащувального шару на зупинці (рис. 7.3). Однак при подальшому напрацюванні елементів трибоспряжень в умовах підвищення σ_{\max} до 250 МПа сформовані граничні шари характеризуються високими антифрикційними і протизношувальними властивостями. Знос випереджаючої і відстаючої поверхонь знижується в 6,54 і 4,62 рази відповідно, в порівнянні з аналогічними параметрами для напиленого шару завтовшки 0,3 мм (рис. 7.5). Також слід зазначити меншу ступінь пластифікування поверхневих шарів покриття при формуванні на них граничних змащувальних шарів – знеміцнення випереджаючої поверхні знижується в 2,56 раз, а відстаючої в 1,55 разів, у порівнянні з впливом граничних шарів змащувального матеріалу на напилений шар товщиною 0,7 мм. Ми припускаємо, що це пов'язано з рівномірністю розчинення в нікелі зміцнюючих фаз при оплавленні покриття, що значно підвищує його зносостійкість.

7.2. Триботехнічні характеристики чавуну з покриттям зі сталі в мастильному середовищі при несталих режимах тертя

Метою роботи було визначення мастильної дії, протизношувальних і антифрикційних властивостей трансмісійної оливи в умовах ступеневого підвищення навантаження на зразках з модифікованого чавуну СЧ30 з покриттям сталі 30ХГСА в умовах циклічно повторюваних режимів пуск – гальмування – пауза.

Припрацювання контактних поверхонь проводили протягом 200 циклів (σ_{max} 150 МПа, температура мастильного матеріалу склала 20⁰С) до стабілізації моменту тертя, товщини мастильного шару і питомої роботи тертя в контактi.

Триботехнічні випробування покриттів проводилися в умовах ступеневого підвищення навантаження: σ_{max} становило 150, 200, 250 і 300 МПа відповідно при кожних 400 циклах напрацювання. Мастильний матеріал – трансмісійна олива ТС–гіп (SAE 140 API GL–5), об'ємна температура оливи становила 100⁰С.

В якості зразків використовувалися ролики з модифікованого чавуну СЧ30 (лиття ВАТ Металургійного комбінату «Азовсталь») твердістю НВ 217 (табл. 7.2). Утворення графіту в структурі чавуну мають пластинчасту прямолінійну форму (ПГф1) довжиною 60 – 250 мкм (ПГд90...180), спостерігається рівномірний розподіл графіту по площі шліфа (ПГр1), кількість включень графіту становить 10% (ПГ10). Металева основа – перліт (П(Ф0)). Фосфідна евтектика потрійна дрібнозерниста (ФЕ 3) і голчаста (ФЕ 4). Розподіл включень фосфідної евтектики рівномірний (ФЕр1). Площа найбільших включень фосфідної евтектики становить 4000 мкм² (ФЕп 6000), найменших – не перевищує 2000 мкм² (ФЕп 2000). На жодному з досліджуваних зразків структурно-вільного цементиту не спостерігалось.

Таблиця 7.2

Хімічний склад модифікованого чавуну СЧ30, %

C	Si	P	S	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Mg
3,07	1,33	0,039	0,086	0,904	0,158	1,06	0,704	0,335	0,016

Попередня обробка зразків дробом зі сталі діаметром від 0,4 до 1,0 мм здійснювалася за допомогою дробильноструменевого пістолета в спеціальній камері КПАН-1300 дробильноструменевого апарату УСАО-1300 [190]. Потім на робочу поверхню зразків методом електродугового напилення наносився в якості проміжного шару ніхром Х20Н80 (НВ 145) товщиною до 0,15 мм і основний шар порошкового дроту марки ПП–Нп-30ХГСА в поєднанні з флюсом АН26П. Товщина напилюваного шару за один прохід складає 0,1...0,25 мм. Товщина напилюваного шару покриття сталі 30ХГСА для кожної пари досліджуваних зразків після шліфування становить 0,5 і 1,0 мм.

7.2.1. Оцінка роботоздатності покриттів з позицій змащувальних, реологічних і антифрикційних властивостей контакту.

Роботоздатність досліджуваного покриття сталі 30ХГСА на модифікованому чавуні СЧ-30 в умовах ступеневого підвищення контактного тиску залежить від товщини напиленого шару: перші ознаки схоплювання контактних поверхонь з товщиною покриття 0,5 мм встановлені при збільшенні σ_{\max} з 150 до 250 МПа, покриття товщиною 1,0 мм характеризується нормальною роботоздатністю при підвищенні контактного тиску до 300 МПа, схоплювання контактних поверхонь не зафіксовано.

В умовах експерименту за один цикл пуск – зупинка відтворювався реальний режим роботи зубчастих прямозубих передач, де чисте кочення реалізується тільки в полюсі зачеплення, а в перехідних зонах (входу і виходу зуба із зачеплення) відбувається проковзування. В таких умовах досліджувана трансмісійна олива характеризується високою мастильною здатністю, незалежно від навантаження. У початковий період пуску, що проходить в умовах чистого кочення тривалістю до 2с при максимальній сумарній швидкості кочення до 1,3 м/с, в контакті реалізується гідродинамічний режим мащення: розрахунковий параметр λ становить 5 – 7 при змащуванні покриття товщиною 0,5 мм і 7 – 9 для покриття товщиною 1,0 мм. У моменти переходу роботи пар тертя на черговий етап навантаження, відповідно до прийнятої схеми експерименту, внаслідок стрімкого підвищення контактного тиску,

спостерігається різке короткочасне зниження несучої здатності оливи, що проявляється в реалізації змішаного (при σ_{\max} 200 МПа) або граничного (при σ_{\max} 250 і 300 МПа) режимів мащення в контакті.

В умовах кочення з проковзуванням, при збільшенні сумарної швидкості кочення до 4,8 м/с, не відбувається приросту товщини мастильного шару внаслідок появи в контакті високих градієнтів швидкості зсуву, що досягають $(0,8 - 4,5) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$, однак режим мастильного дії в 95% циклів відповідає гідродинамічному.

Напилення покриття 30ХГСА характеризується високими антифрикційними властивостями в умовах кочення при наявності мастильного матеріалу. Для покриття товщиною 0,5 мм при σ_{\max} 150 і 200 МПа коефіцієнт тертя при пуску в умовах чистого кочення становить 0,05 – 0,058 (рис. 7.6). Стрімке зростання коефіцієнта тертя в 2,2 рази зафіксовано лише в періоди підвищення навантаження, однак, при подальшому напрацюванні тривалістю 20 – 50 циклів встановлена стабілізація даного параметра. При подальшому підвищенні контактного тиску до 250 МПа стабілізації коефіцієнта тертя не спостерігається, f монотонно зростає з 0,06 до 0,078, з'являються перші ознаки схоплювання контактних поверхонь.

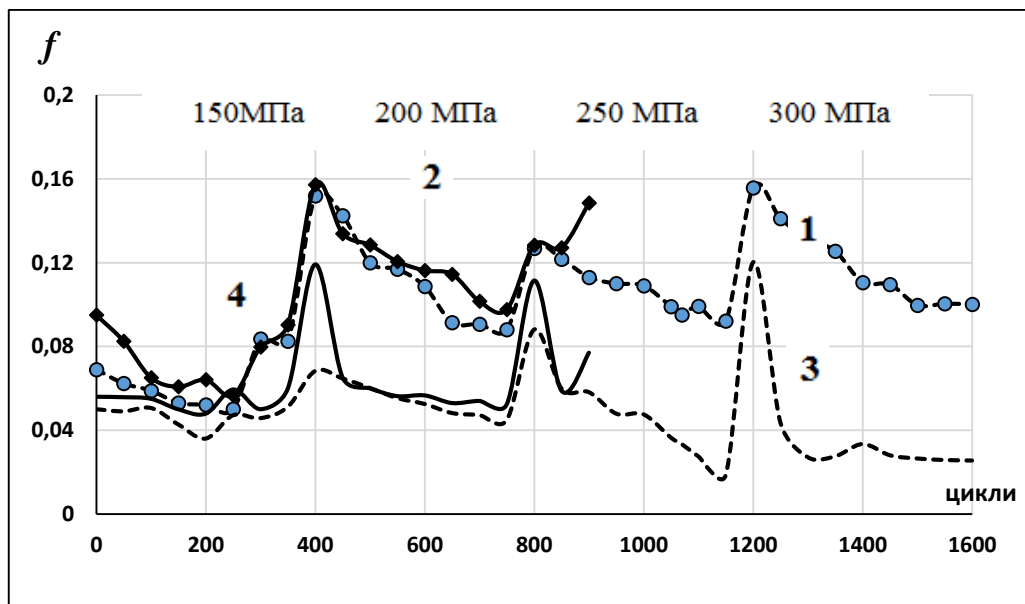


Рис. 7.6. Зміна коефіцієнта тертя при підвищенні навантаження в умовах кочення з проковзуванням (1,2) і кочення (3,4): 1,3 – покриття 1,0 мм; 2,4 – покриття 0,5 мм.

В аналогічних умовах чистого кочення в період пуску для покриття товщиною 1,0 мм коефіцієнт тертя, в середньому, на 20% нижче, в порівнянні з аналогічним параметром, встановленим для покриттів з товщиною 0,5 мм. В початкові періоди підвищення навантаження f короткочасно збільшується в 1,17:1,93:2,86 разів відповідно при σ_{\max} 200, 250 і 300 МПа. Однак при подальшому напрацювання спостерігається тенденція до поступового зниження коефіцієнта тертя: сталі значення f при σ_{\max} 300 МПа складають, в середньому, 0,03, що в 1,5 разів нижче показників, встановлених при мінімальному досліджуваному контактному тиску в 150 МПа.

В умовах кочення з проковзуванням відбувається зниження антифрикційних властивостей, незалежно від товщини напиленого шару покриття. Якщо в умовах чистого кочення для покриття товщиною 0,5 мм підвищення контактної тиску з 150 до 200 МПа не впливає на сталі показники коефіцієнта тертя, то наявність 20% проковзування обумовлює підвищення f в 1,3 і 2 рази при σ_{\max} 150 і 200 МПа відповідно. Подальше зростання σ_{\max} до 250 МПа призводить до збільшення коефіцієнта тертя в 3,33 рази, в порівнянні з чистим коченням, і проявляються перші ознаки схоплювання контактних поверхонь.

Для покриття товщиною 1,0 мм наявність проковзування, в порівнянні з чистим коченням, призводить до монотонного зростання сталих значень f в 1,3:2,0:3,33:4 рази умовах ступеневого підвищення σ_{\max} з 150 до 300 МПа відповідно.

Розрахунок напружень зсуву мастильного шару (τ) свідчить про залежність даного параметра від контактної тиску і швидкості кочення. На рис. 7.7 наведені значення максимальних дотичних напружень зсуву мастильного шару в початковий момент ступеневого підвищення навантаження. В умовах чистого кочення ($V_{\Sigma k} = 1,3$ м / с) при змащуванні контактних поверхонь з товщиною покриття 1,0 мм τ зростає в 6 разів, а в умовах кочення з проковзуванням ($V_{\Sigma k} = 4,8$ м/с; $= 0,6$ м/с) в 4 рази зі збільшенням σ_{\max} з 150 до 300 МПа.

Підвищення напруги зсуву змащувальних шарів в початковий момент ступеневого навантаження обумовлено, перш за все, стрімким зниженням, в середньому, в 2 рази, негідродинамічної складової товщини мастильного шару,

дезорієнтацією компонентів мастильного матеріалу, внаслідок чого знижується їх екрануюча здатність і посилюється вплив силового поля металевої поверхні (рис. 7.8).

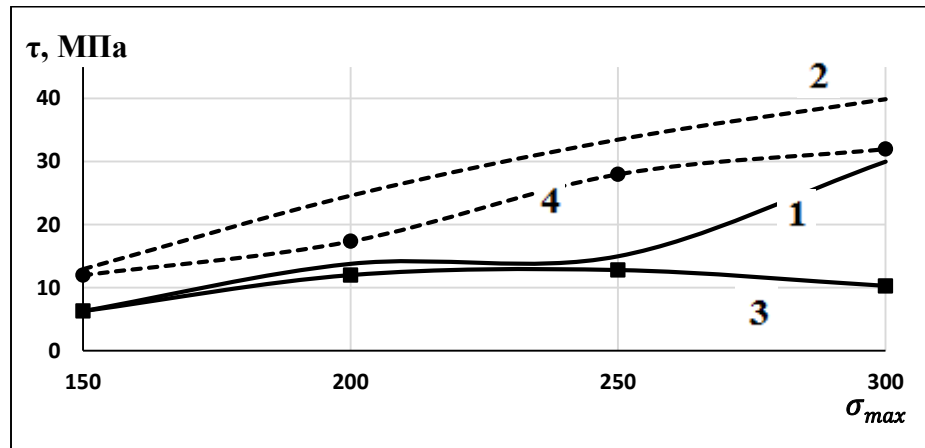


Рис. 7.7. Напряга зсуву змащувального шару на покритті 30ХГСА (1,0 мм) в початковий момент підвищення навантаження (1,2) і його сталі значення (3,4): 1,3 — кочення; 2,4 — кочення з проковзуванням.

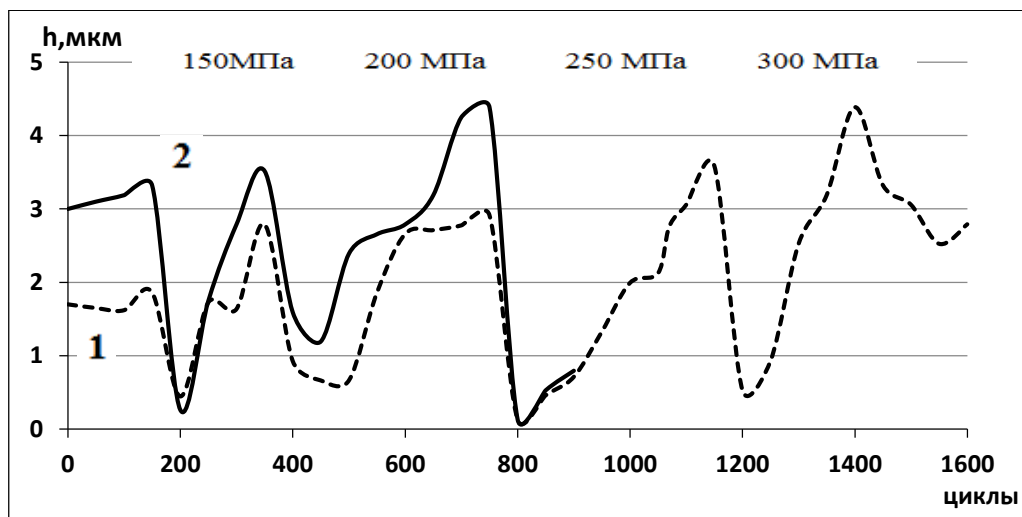


Рис. 7.8. Динаміка формування граничних змащувальних шарів, утворених на покриттях сталі 30ХГСА завтовшки 1,0 мм (1) і 0,5 мм (2), при підвищенні навантаження.

Таким чином, створений зовнішній механічний вплив, не тільки призводить до зниження несучої здатності мастильного матеріалу, що проявляється в реалізації граничного або змішаного режимів мащення в контакті, але й збільшує інтенсивність руйнування граничних екрануючих шарів, сформованих на поверхнях металу. Слід зазначити, що в нестационарних умовах роботи пар тертя, внаслідок інтенсивної

активації поверхневих шарів металу, мастильний шар, що розділяє контактні поверхні, має яскраво виражені дві складові – гідродинамічну і негідродинамічну. В умовах чистого кочення дотичні напруження зсуву локалізуються в центральній частині загальної товщини змащувального шару, тобто в гідродинамічній складовій, де вплив силового поля твердої фази на молекули мастильного матеріалу мінімальний, що проявляється і в більш низьких показниках τ . Якщо при σ_{\max} 150 МПа напруга зсуву змащувальних шарів в умовах чистого кочення нижче в 2 рази, в порівнянні з проковзуванням, то з підвищенням σ_{\max} до 300 МПа цей показник зменшується в 1,3 рази, що свідчить про зменшення вільного об'єму між молекулами мастильного матеріалу внаслідок їх більш щільної упаковки при підвищенні контактного тиску.

Зростання дотичних напружень зсуву мастильного шару при проковзуванні обумовлено їх локалізацією по всій товщині неоднорідного змащувального шару.

Істотні зміни τ встановлені при поступовій адаптації граничних змащувальних шарів до постійно змінюваних умов навантаження. Внаслідок приросту негідродинамічної складової товщини мастильного шару послаблюється вплив силового поля твердої фази металу і відбувається монотонне зниження τ . Наприклад, для покриття товщиною 1,0 мм, незалежно від контактного тиску, сталі значення напруг зсуву мастильного шару, в порівнянні з початковими показниками при перших циклах на кожному ступені навантажування, менше в 1,2 рази як в умовах чистого кочення, так і в умовах кочення з проковзуванням (рис. 7.7). Також для чистого кочення встановлено, що в процесі адаптації змащувального шару на кожному новому ступені прикладеного навантаження в діапазоні σ_{\max} 200 – 300 МПа сталі значення напруг зсуву мастильного шару стабілізуються на рівні 10 – 12 МПа. Це свідчить про локалізацію дотичних напружень зсуву при відсутності проковзування в гідродинамічній складовій товщини мастильного шару, яка характеризується структурною однорідністю рідкої фази оливи. Згідно розрахункової формули Баруса [235], збільшення в'язкості досліджуваної трансмісійної оливи в діапазоні застосовуваних навантажень незначне і становить 2 – 3%, відповідно мастильний матеріал буде характеризуватися стабільним дотичним напруженням зсуву, що і

відбувається в контактi при адаптації змащувального шару до динамічних навантажень.

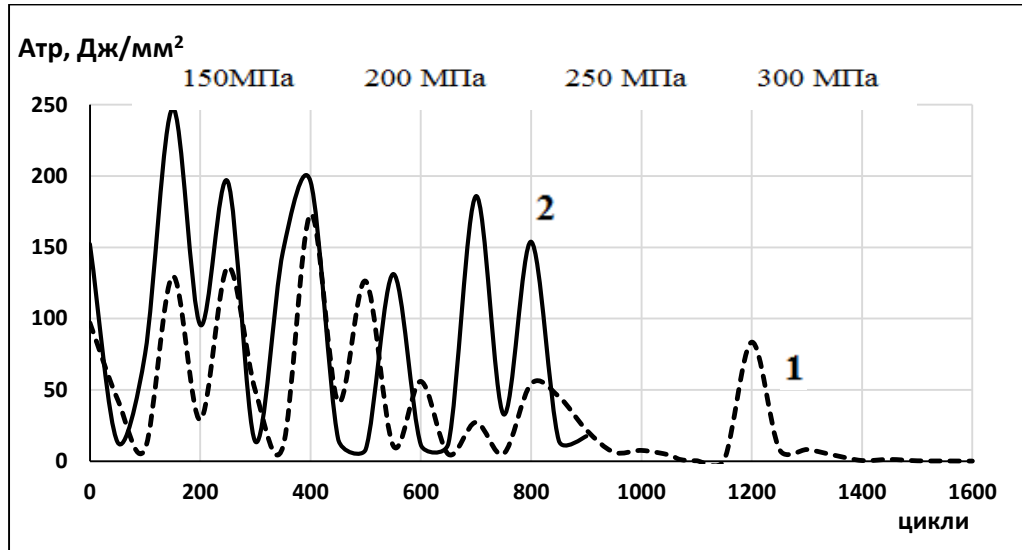
При змащуванні напиленого покриття товщиною 0,5 мм зберігається аналогічна тенденція зменшення τ в умовах чистого кочення в процесі напрацювання при 150 і 200 МПа, однак при подальшому навантаженні до 250 МПа τ монотонно зростає, антифрикційні властивості мастильного шару знижуються, що призводить до прояву початкових ознак схоплювання контактних поверхонь.

7.2.2. Вплив кінетики зміни питомої роботи тертя на протизношувальні властивості покриття при структурній пристосованості в умовах динамічного навантаження.

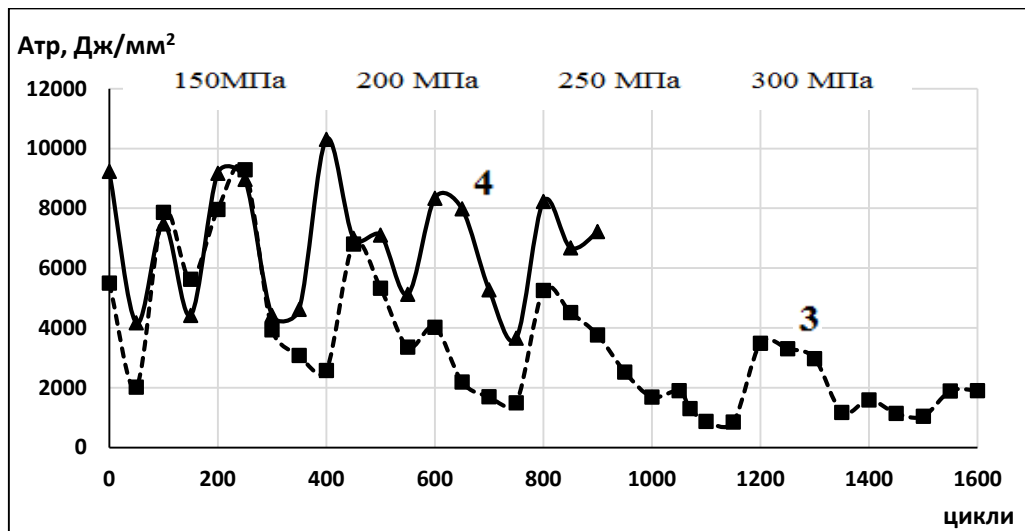
Підвищення σ_{\max} при ступінчастому навантаженні порушує режим нормального тертя: збільшується інтенсивність механічного руйнування граничних шарів і сповільнюються процеси їх відновлення, внаслідок чого зростає робота сил тертя. Слід зазначити, що максимальні значення питомої роботи тертя, незалежно від товщини досліджуваного покриття, встановлені при найменшому контактному тиску σ_{\max} 150 МПа (рис. 7.9).

Ми вважаємо, що підвищення питомої роботи тертя обумовлено наступними процесами, що відбуваються в контактi. Так як припрацювання пар тертя відбувалось при об'ємній температурі мастильного матеріалу 20⁰С, то на активованих тертях контактних поверхнях сформувався переважно граничний шар мастильного матеріалу, що характеризується слабкими адсорбційними Ван-дер-Ваальсовими силами взаємодії з поверхнею металу. Підвищення об'ємної температури оливи до 100⁰С забезпечує зростання кінетичної енергії адсорбованих молекул, внаслідок чого відбувається термічна десорбція молекул граничних шарів в об'ємну фазу мастильного матеріалу [18]. В умовах підвищених температур відбувається зміна природи граничних шарів: при напрацюванні 200 і більше циклів формуються хемосорбційні і хімічно модифіковані шари завдяки наявності в оливі протизадирних присадок, що містять в якості активного компонента сірку ($\geq 1,5\%$). При цьому істотної зміни коефіцієнта тертя не встановлено, що свідчить про динамічну

рівновагу процесів руйнування і утворення граничних шарів. Однак, саме для цього періоду напрацювання, незалежно від товщини покриття, характерні найбільші показники питомої роботи тертя як в умови чистого кочення (приріст $A_{тр}$ становить 100 – 200 Дж/мм²), так і в умовах ковзання ($A_{тр}$ збільшується до 3500 – 10000 Дж/мм²) (рис. 7.9).



а)



б)

Рис.7.9. Зміна питомої роботи тертя в контакті в умовах підвищення навантаження при коченні (а) і коченні з проковзуванням (б): 1,3 – покриття 1,0 мм; 2,4 – покриття 0,5мм.

В процесі адаптації до динамічних умов навантаження сформованих граничних шарів хемосорбційної природи на покритті товщиною 1,0 мм встановлено поступове зниження питомої роботи тертя в контакті: при 300 МПа $A_{тр}$ становить 5 Дж/мм² лише

в 10% циклів напрацювання в умовах чистого кочення, а в умовах проковзування даний параметр стабілізується на рівні 1500 – 2000 Дж/мм². При змащуванні покриттів товщиною 0,5 мм приріст питомої роботи тертя знижується лише в умовах чистого кочення, при проковзуванні стабілізації даного параметра не встановлено. Це пов'язано з більш інтенсивними процесами зношування, що відбуваються при руйнуванні і регенерації сформованих вторинних структур при терті. Інтенсивність зношування покриття товщиною 0,5 мм, в середньому, в 2 рази перевищує аналогічний показник, встановлений для покриття більшої товщини, як для випереджаючої, так і для відстаючої поверхонь (рис. 7.10).

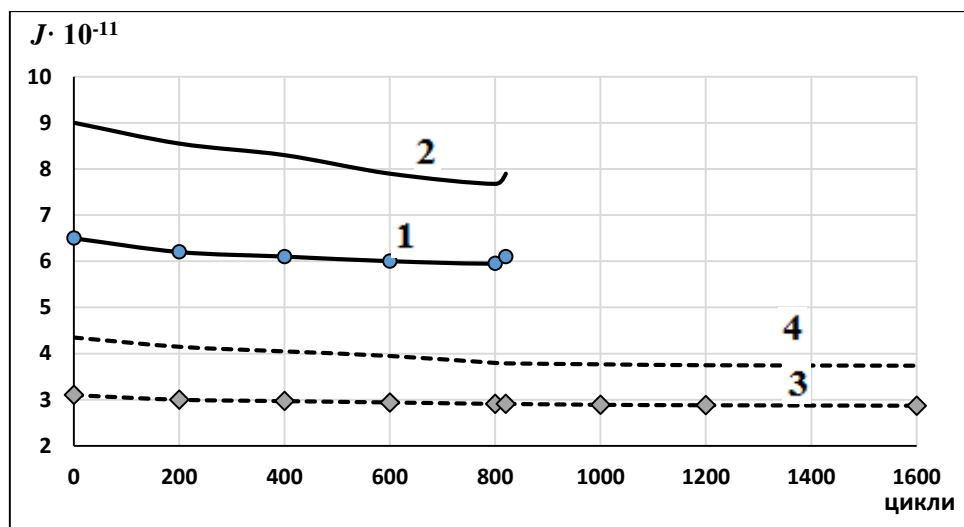


Рис. 7.10. Зміна інтенсивності зношування покриття сталі 30ХГСА для випереджаючої (1,3) і відстаючої (2,4) поверхонь: 1, 2 – покриття 0,5мм, 3, 4 – покриття 1,0 мм.

Слід зазначити, що більшою зносостійкістю характеризується покриття товщиною 1,0 мм. Це обумовлено низкою факторів: внаслідок більш тривалого температурного впливу при електродуговому напиленні мікротвердість напиленого покриття сталі 30ХГСА зростає, в середньому, на 750 МПа, а його пористість знижується вдвічі і становить 5%, в порівнянні з аналогічними параметрами для досліджуваного покриття меншої товщини. Загальною закономірністю для покриттів різної товщини є наявність знеміцнених поверхневих шарів металу, покритих граничними мастильними шарами різної природи (табл. 7.3).

Мікротвердість поверхневих шарів напиленого покриття сталі 30ХГСА

Товщина покриття	Випереджаюча поверхня			Відстаюча поверхня		
	Вихідна H_{100} , МПа	Після напрацювання, H_{100} , МПа	ΔH_{100} , МПа	Вихідна H_{100} , МПа	Після напрацювання, H_{100} , МПа	ΔH_{100} , МПа
0,5 мм	4101	4023	-78	4108	3424	-684
1,0 мм	4865	3666	-1199	4895	3598	-1297

Отже, для обраних умов експерименту домінуючим процесом в контакті є не деформаційне зміцнення покриття в умовах динамічного навантаження, а його знеміцнення внаслідок впливу як температурного чинника, так і хемосорбційних шарів мастильного матеріалу, що забезпечують пластифікування поверхневих шарів металу.

Наведений аналіз змащувальних, антифрикційних і протизношувальних властивостей сформованих в процесі тертя захисних структур показує, що вони характеризуються досить високою несучою здатністю і проявляють великий опір зношуванню, що свідчить про ефективну структурну пристосованість досліджуваних покриттів і трансмісійної оливи в несталих умовах тертя.

7.3. Апробація методики оцінки температурної і механічної стійкості граничних плівок мастильного матеріалу на контактних поверхнях, зміцнених за методом термоциклічного іонного азотування.

При оцінці температурної і механічної стійкості граничних плівок використовувалися базові оливи різної в'язкості і мастильні матеріали з різними поліфункціональними присадками. У таблиці 7.4 представлені результати термомеханічної стійкості граничних шарів, сформованих на контактних поверхнях сталі 40Х (загартування + відпуск (400⁰С)). У таблиці 7.5 – термомеханічна стійкість граничних шарів, сформованих на сталі 40Х (термоциклічне іонне азотування (ТІА)).

Таблиця 7.4

Кінетика руйнування граничних змащувальних шарів залежно від швидкості ковзання пар тертя (сталь 40X (загартування, відпуск))

Змащувальний матеріал	В'язкість кінематична при 100 ⁰ С, мм ² /с	Температура спалаху у відкритому тиглі, ⁰ С	Густина, кг/м ³	Швидкість ковзання при коченні з проковзуванням, м/с									
				0,062		0,314		0,607		0,93		1,151	
				N	ϑ	N	ϑ	N	ϑ	N	ϑ	N	ϑ
Т-1500У	8*	135**	885	170	15	80	90	2	110	-	-	-	-
І-20	3,85	210	869	>200	10	110	95	20	115	1	160	-	-
І-40	8,9	235	883	>200	8	>150	28	51	111	8	190	1	270
РАО-8	8,3	260	832	>200	5	>150	33	80	126	22	230	8	410
МС-20	23,9	275	903	>200	5	>150	30	70	118	20	211	7	385
І-40 +1% Англамол-82				>200	5	>150	25	67	110	15	203	5	313
І-40 +2% Англамол-82				>200	5	>150	29	76	119	15	214	8	386
І-40 +3% Англамол-82				>200	5	>150	32	81	121	19	218	10	389
ТСп-14Гіп (SAE90 API GL-4)	14,9	218	900	>200	5	>150	32	81	124	20	225	10	393
ТАД-17і (SAE 80w90 API GL-5)	19,2	218	890	>200	5	>150	33	86	128	29	220	11	427
М10Г ₂ к (SAE 30 API CC)	11,2	228	903	>200	5	>150	29	70	109	17	215	5	321
Аріан-екстра (SAE 15w40 API CF-4/SG)	14,7	220	890	>200	5	>150	30	79	116	19	219	9	389

N – кількість циклів наробітки до перших проявів схоплювання; ϑ – локальне підвищення температури, ⁰С.

* – в'язкість кінематична при 50⁰С, мм²/с,

** – температура спалаху у закритому тиглі, ⁰С

Кінетика руйнування граничних змащувальних шарів залежно від швидкості ковзання пар тертя (матеріал – сталь 40Х (ТІА))

Змащувальний матеріал	В'язкість кінематична при 100 ⁰ С, мм ² /с	Температура спалаху у відкритому тиглі, ⁰ С	Густина, кг/м ³	Швидкість ковзання при коченні з проковзуванням, м/с									
				0,062		0,314		0,607		0,93		1,151	
				N	ϑ	N	ϑ	N	ϑ	N	ϑ	N	ϑ
Т-1500У	8*	135**	885	180	10	100	70	4	75	1	120	-	-
І-20	3,85	210	869	>200	8	140	85	30	90	3	140	1	185
І-40	8,9	235	883	>200	5	>150	20	55	100	10	160	3	250
РАО-8	8,3	260	832	>200	4	>150	28	85	120	28	210	13	400
МС-20	23,9	275	903	>200	4	>150	26	75	115	22	190	10	370
І-40 +1% Англамол-82				>200	4	>150	22	70	105	18	180	8	300
І-40 +2% Англамол-82				>200	4	>150	26	80	115	23	190	12	370
І-40 +3% Англамол-82				>200	4	>150	28	84	117	25	195	13	375
ТСп-14Гіп (SAE90 API GL-4)	14,9	218	900	>200	4	>150	28	84	118	25	200	13	380
ТАД-17і (SAE 80w90 API GL-5)	19,2	218	890	>200	4	>150	30	90	122	30	213	15	410
М10Г ₂ к (SAE 30 API CC)	11,2	228	903	>200	4	>150	25	75	105	18	187	8	310
Аріан-екстра (SAE 15w40 API CF-4/SG)	14,7	220	890	>200	4	>150	25	83	110	22	193	13	375

N – кількість циклів наробітки до перших проявів схоплювання; ϑ – локальне підвищення температури, ⁰С.

* – в'язкість кінематична при 50⁰С, мм²/с,

** – температура спалаху у закритому тиглі, ⁰С

На підставі цієї методики встановлено критичні температури плавлення граничних змащувальних шарів при певній швидкості ковзання контактних поверхонь.

Аналіз температурно–механічної стійкості граничних шарів показує, що критична температура деструкції мастильних плівок залежить від в'язкості базової основи, наявності присадок в змащувальному матеріалі і типу матеріалу контактних поверхонь. Порівняння результатів, представлених в таблицях 7.4 і 7.5, свідчить про більш інтенсивне підвищення локальної температури в триботехнічному контакті і скорочення періоду роботи трибоелементів до прояву перших ознак схоплювання контактних поверхонь при використанні сталі 40Х, в порівнянні із зразками, для підвищення зносостійкості яких використовувалася технологія ТІА.

Розглянемо кінетику утворення і деструкції граничних змащувальних шарів, сформованих мастильними матеріалами різного експлуатаційного призначення на азотованих поверхнях (табл.7.5).

Досліджувана трансформаторна олива Т–1500у, яка характеризується найменшою в'язкістю, формує на контактних поверхнях граничні плівки, які виявляють ефективний захист контактних поверхонь від схоплювання при градієнтах швидкості зсуву до $6,2 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$. У нестационарному режимі роботи перші ознаки схоплювання контактних поверхонь виявлялися на 90–й хвилині роботи елементів трибоспряджень (рис.7.11). При цьому максимальне збільшення температури склало 10^0 C (рис.7.12).

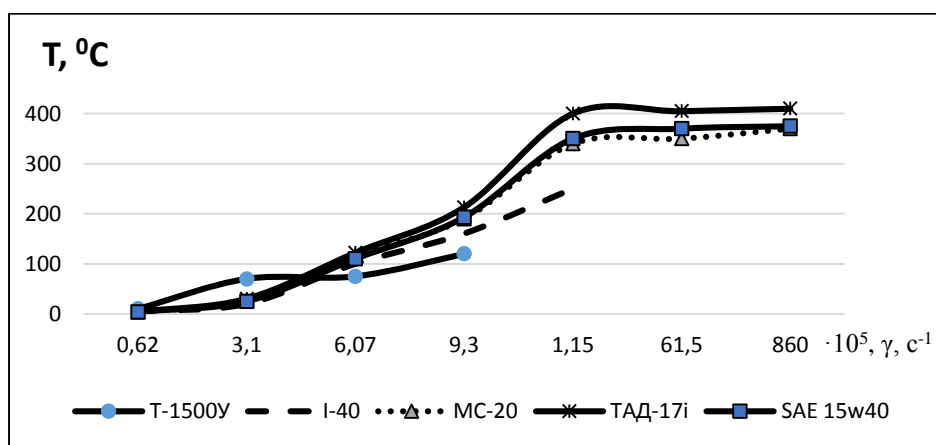


Рис. 7.11. Локальний приріст температури (T) в контактi в період деструкції граничних змащувальних шарів при зростанні градієнту швидкості зсуву (γ).

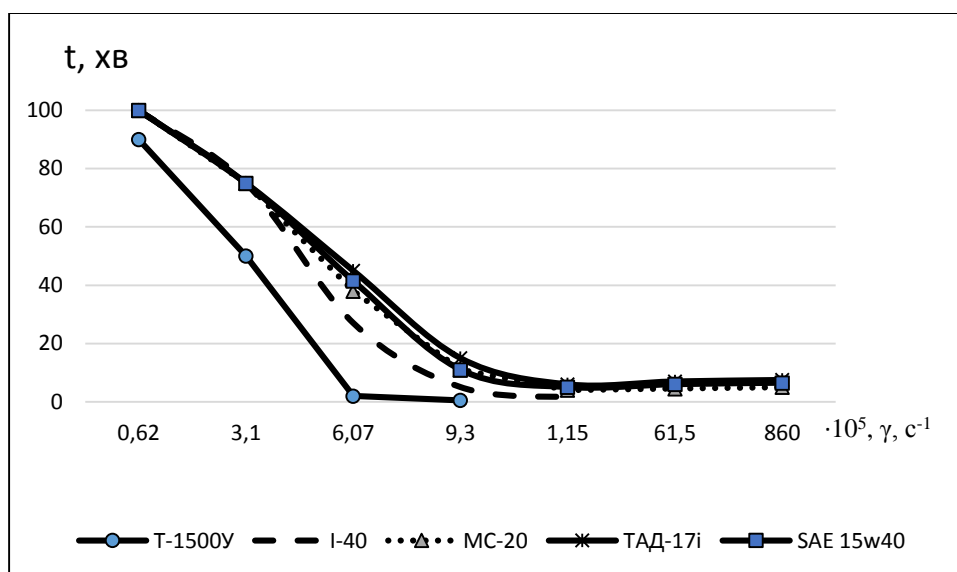


Рис. 7.12. Час роботи пар тертя (T) до прояву перших ознак схоплювання при зміні градієнту швидкості зсуву (γ).

Збільшення градієнта швидкості зсуву до $3,14 \cdot 10^5 \text{с}^{-1}$ скорочує вдвічі період напрацювання до прояву перших ознак схоплювання елементів трибоспряжень, а приріст локальної температури при схоплюванні склав 70°C . При $\gamma > 6,07 \cdot 10^5 \text{с}^{-1}$ дані граничні шари мастильного матеріалу повністю втрачають свої захисні властивості – відбувається різкий приріст температури і схоплювання контактних поверхонь.

Найбільш в'язка досліджувана олива MC-20, яка не містить присадок, формує граничні змащувальні шари, які характеризуються механічною стійкістю до градієнтів швидкості зсуву до $6,07 \cdot 10^5 \text{с}^{-1}$. Перші ознаки схоплювання проявляються лише на 38-й хвилині роботи, локальний приріст температури при цьому склав 115°C . Захисні властивості граничних плівок даного мастильного матеріалу зі збільшенням γ до $8,6 \cdot 10^7 \text{с}^{-1}$ різко погіршуються: на 5-й хвилині роботи встановлені перші ознаки схоплювання, при цьому локальне збільшення температури складає 370°C .

Введення в базову основу протизношувальної присадки Англамол-82 (активні елементи: $S - 10,5\%$, $Cl - 2,8\%$, $P - 0,3\%$) підвищує температурну і механічну стійкість сформованих граничних шарів в нестационарних умовах тертя. Наприклад, якщо перші ознаки схоплювання контактних поверхонь при використанні оливи I-40 без присадок

виявлялися при градієнті швидкості зсуву граничних плівок $6,07 \cdot 10^5 \text{c}^{-1}$ на 27 хвилині роботи пар тертя після припинення подачі мастильного матеріалу, то додавання 1 і 3% присадки збільшує тривалість періоду до схоплення в 1,3 і 1,55 разів відповідно (рис. 7.13). Наявність присадки в базовій основі підвищує і температурну стійкість до деструкції граничних шарів: локальне збільшення максимальних температур при схоплюванні більше на 5 і 17°C при наявності 1 і 3% присадки відповідно (рис. 7.14).

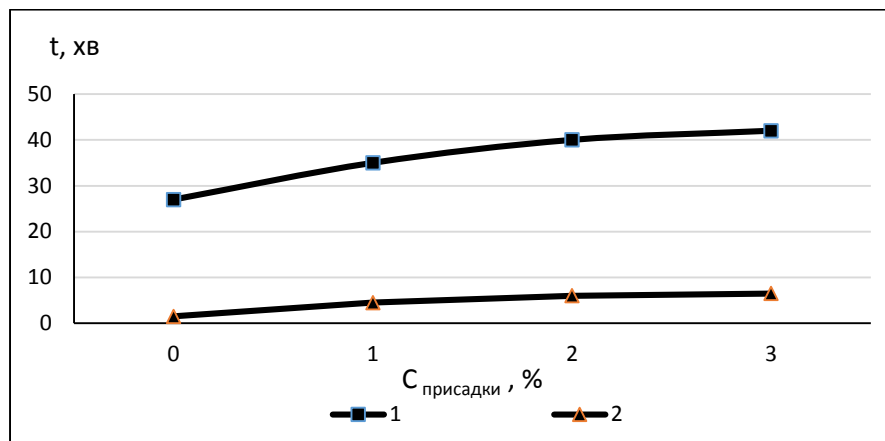


Рис. 7.13. Час роботи пар тертя (T) до прояву перших ознак схоплювання контактних поверхонь в залежності від концентрації присадки (C): 1 – $6,0 \cdot 10^5 \text{c}^{-1}$, 2 – $6,0 \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$.

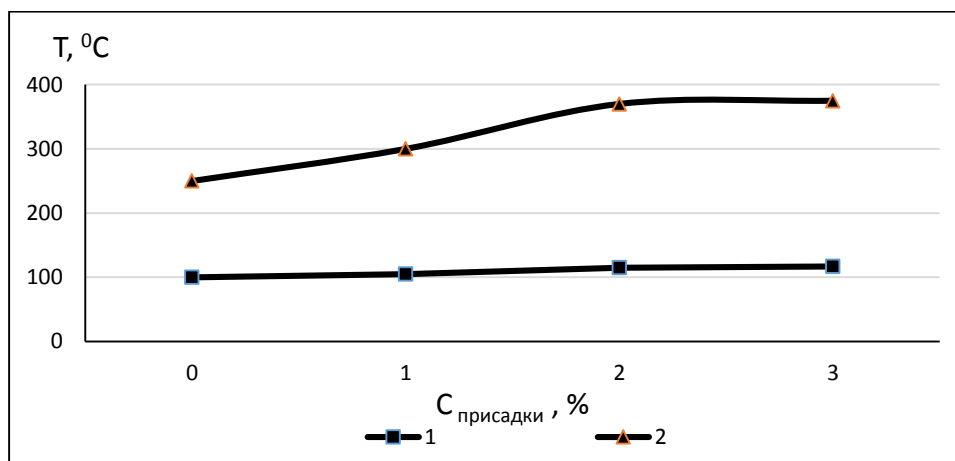


Рис. 7.14. Локальний приріст температури (T) в контакті при перших ознаках схоплювання контактних поверхонь в залежності від концентрації присадки (C): 1 – $6,0 \cdot 10^5 \text{c}^{-1}$, 2 – $6,0 \cdot 10^6 \text{c}^{-1}$.

Із збільшенням швидкості ковзання при коченні з проковзуванням відбувається підвищення локальних температур в контактї, що обумовлює скорочення періоду роботи контактних поверхонь до прояву перших ознак схоплювання. Так, при проковзуванні 40% схоплювання пар тертя в умовах припинення подачі мастильного матеріалу настає через 1,5 хв. при використанні базової оливи І-40 без присадок. При цьому γ становить $6,0 \cdot 10^6 \text{с}^{-1}$, а локальне збільшення температури – 250°C . Додавання присадки Англамол-82 в концентрації 3% збільшує час роботи елементів трибоспрямижень до настання схоплювання в 4,3 рази, а температура початку деструкції граничних шарів підвищується на 125°C (рис. 7.13, 7.14).

Таким чином, введення протизношувальної присадки забезпечує формування в контактї стійкіших до механо–термічної деструкції граничних шарів, які характеризуються ефективними властивостями в плані запобігання схоплювання контактних поверхонь в критичних умовах тертя.

Ефективність протизношувальних присадок підтверджується результатами, отриманими при дослідженні механо–термічної стійкості граничних шарів, сформованих активними компонентами трансмісійних та моторних олів різного експлуатаційного призначення. Локальне збільшення температури в контактї при прояві перших ознак схоплювання, який відповідає температурі деструкції граничних змащувальних шарів, сформованих даними олівами, характеризується високими показниками у всьому досліджуваному діапазоні проковзування.

Температура руйнування граничних плівок для трансмісійних олів перевищує даний показник для моторних олів (табл. 7.5, рис. 7.11). Перш за все, це забезпечується наявністю в даних олівах протизношувальних присадок з активними елементами сірки, хлору і фосфору, які формують хімічно–модифіковані шари, що характеризуються найвищою температурною стійкістю.

Моторні оливи містять інший функціональний клас присадок (миючі, диспергуючі, протизношувальні та ін.), які спрямовані на зниження лако– і нагароутворення, зменшення переважно корозійного зносу і ін.

Наявність протизношувальних присадок не тільки підвищує термо-механічні властивості граничних змащувальних шарів, а й знижує знос контактних поверхонь. Розглянемо це на прикладі базової оливи МС–20 і трансмісійної оливи ТСП–14гіп. Згідно з даними, наведеними в таблиці 7.5, ці мастильні матеріали характеризуються близькими показниками щодо температурної деструкції граничних плівок в широкому діапазоні градієнтів швидкості зсуву граничних шарів.

Однак, знос азотованих контактних поверхонь сталі 40Х на 5 км шляху тертя істотно залежить від типу мастильного матеріалу. При проковзуванні 20% знос випереджаючої і відстаючої поверхонь, в середньому, в 1,5 разів нижче при використанні трансмісійної оливи ТСП–14гіп, в порівнянні з мінеральною оливою МС–20 (рис. 7.15). Збільшення проковзування до 40% обумовлює підвищення зносу, однак при використанні ТСП–14гіп знос контактних поверхонь нижче в 1,7 раз, в порівнянні з аналогічними показниками при змащуванні пар тертя оливою МС–20.

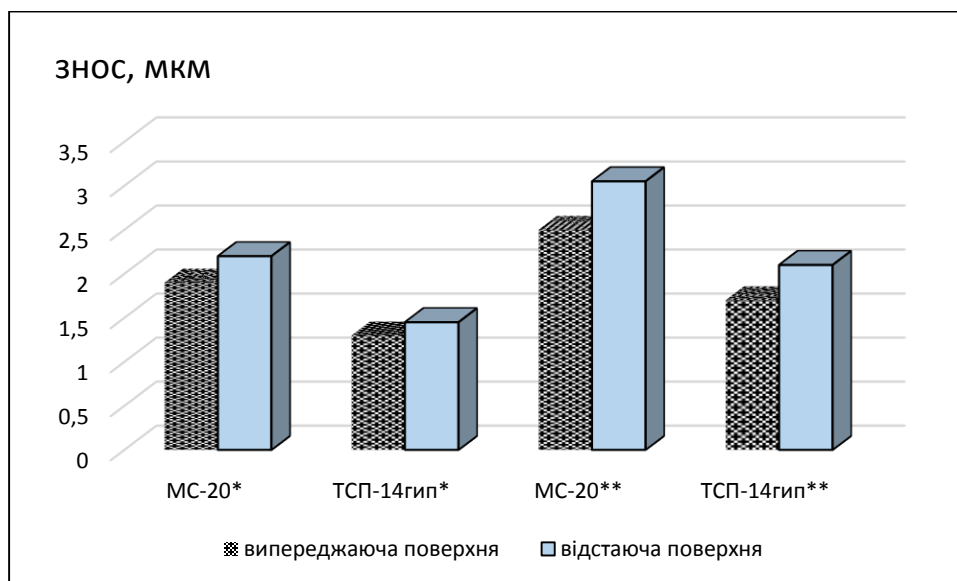


Рис. 7.15. Знос контактних поверхонь 40Х (ТІА) в умовах кочення с проковзуванням 20% (*) і 40% (**).

Ми вважаємо, що зносостійкість контактних поверхонь насамперед залежить від природи сформованих граничних плівок на активованих тертях контактних поверхнях. Мінеральна олива селективного очищення МС–20 формує на контактних поверхнях

самогенеруючі органічні плівки (СОП) або полімери тертя. СОП є продуктом полімеризації полярно-інертних вуглеводнів різних класів (парафінових, нафтових, ароматичних) в результаті активації механо-хімічних процесів в зоні тертя [246, 381]. Механізм утворення СОП можна представити в такий спосіб. Збільшення градієнта швидкості зсуву змащувальних шарів до $6,0 \cdot 10^5 \text{с}^{-1}$ (при проковзуванні 20%) і $6,0 \cdot 10^6 \text{с}^{-1}$ (при проковзуванні 40%) створює передумови для утворення активних радикалів внаслідок розриву вуглецевих зв'язків молекул мастильного матеріалу при механічній деструкції. При цьому на активованих тертях контактних поверхнях інтенсифікуються процеси взаємодії з утвореними активними компонентами оливи, наслідком чого є формування змащувальної плівки в результаті полімеризації активних радикалів. Згідно з даними [13], енергія розриву вуглець - вуглецевого зв'язку в молекулах різних класів вуглеводнів становить 250 - 500 кДж / моль. Аналіз кінетики зміни питомої роботи тертя в контакті ($A_{\text{тр}}$) при змащуванні мінеральною оливою МС-20 показав, що при проковзуванні 20 і 40% $A_{\text{тр}}$ становить 2 кДж/мм² і 4,3 кДж/мм². Встановлені показники питомої роботи тертя свідчать про високу енергоємність трибоспряжень в умовах кочення з проковзуванням, що і є провідним фактором для активації трибополімеризаційних процесів в змащувальному матеріалі.

Трансмійна олива ТСП-14гіп, на відміну від МС-20, формує інший тип граничних шарів. Перш за все, це хемосорбційні плівки і хімічно-модифіковані шари, що утворюються на активованих тертях контактних поверхнях шляхом взаємодії активних компонентів протизношувальної присадки з поверхнею металу. Такі граничні шари характеризуються ефективними протизношувальними і антизадирними властивостями, що і було встановлено в експериментах при коченні з різним ступенем проковзування. Слід зазначити, що дані граничні плівки характеризуються не тільки низьким опором зсуву при збільшенні градієнта швидкості зсуву змащувальних шарів, а й зменшують поширення пружно-пластичної деформації вглиб металу. Аналіз мікроструктури приповерхневих азотованих шарів сталі 40Х після тертя в умовах кочення з проковзуванням 40% виявив, що товщина аморфного шару металу внаслідок

протікання деформаційних процесів становить 80 мкм, що в 1,4 рази менше, ніж при використанні в якості мастильного матеріалу мінеральної оливи МС 20 (рис. 7.16).

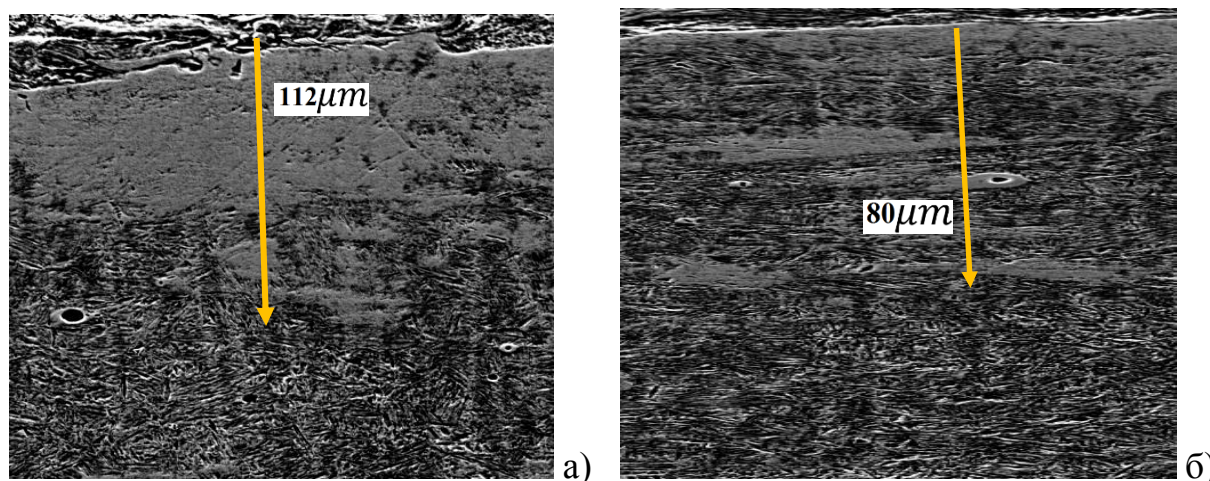


Рис. 7.16. Мікроструктура азотованих приповерхневих шарів відстаючої поверхні сталі 40X ($\times 400$): а) змащування МС–20; б) змащування ТСп–14гіп.

Для деформованого об'єму металу простежується нерівноважний структурно-фазовий стан деформованого шару з локальними ділянками, які погано піддаються травленню. Площа таких зон при використанні в якості мастильного матеріалу трансмісійної оливи ТСп–14гіп на 40% менше, в порівнянні з МС–20. Перш за все, це пов'язано з високою термо-механічною стійкістю граничних плівок хемосорбційної природи, які зменшують ступінь локалізації дотичних напруг вглиб металу і виводять їх на поверхню.

Розглянемо швидкість зношування контактних поверхонь в екстремальних режимах, що призводять до захоплення пар тертя, для досліджуваних зразків сталі 40X (загартування + відпуск) і сталі 40X (ТІА) при змащуванні трансмісійною оливою для гіпоїдних передач ТСп–14гіп. Для даного аналізу була використана феноменологічна імовірнісна модель послідовного зносу субшарів трибологічного шару (розділ 2).

На підставі отриманих результатів зносу випереджаючої і відстаючої поверхонь (рис. 7.17), з огляду на час роботи елементів трибоспряжень до прояву перших ознак захоплення, швидкість зношування контактних поверхонь представлена на рис. 7.18.

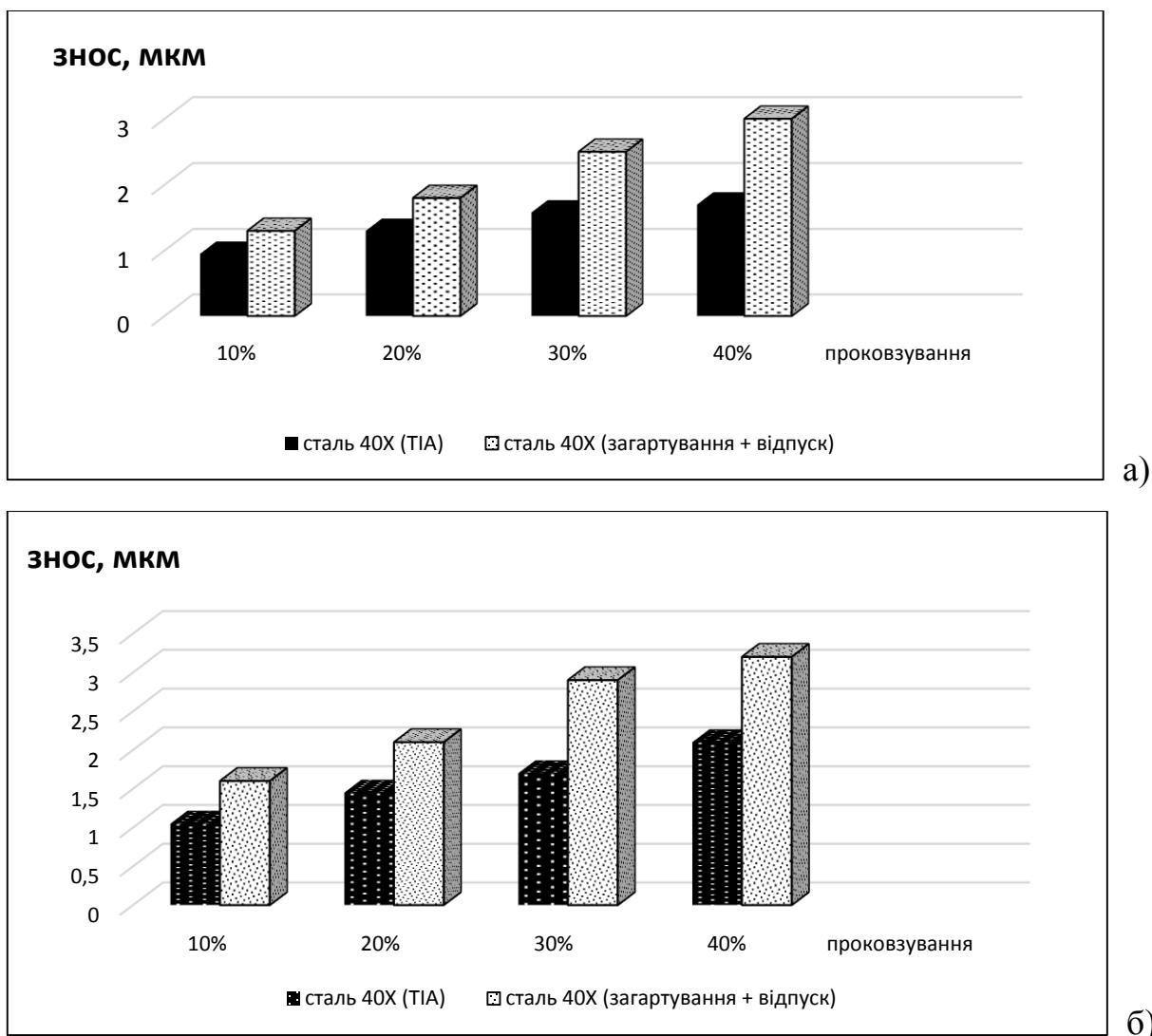


Рис. 7.17. Лінійний знос пар тертя в умовах кочення з різною величиною проковзування: а) – випереджаюча поверхня, б) – відстаюча поверхня.

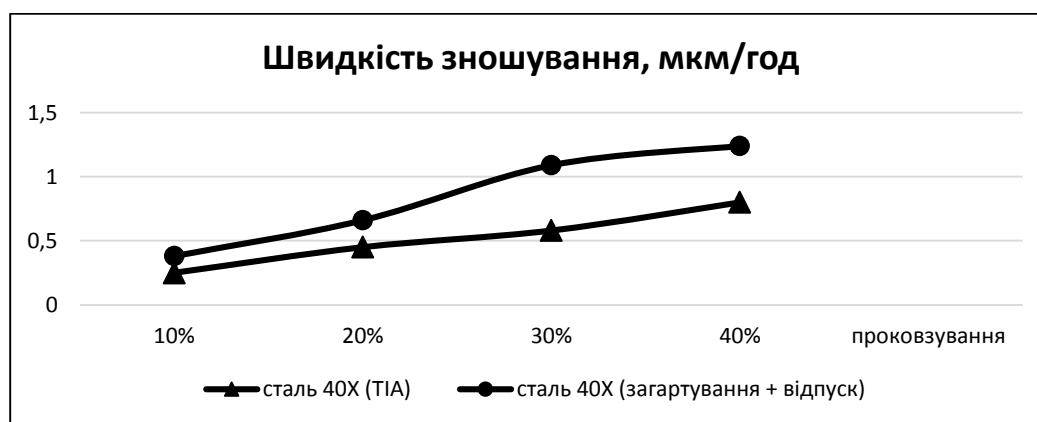


Рис. 7.18. Кінетика залежності швидкості зношування відстаючої поверхні від ступеня проковзування в фрикційному контакті в умовах кочення з ковзанням.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що застосування технології ТІА забезпечує зниження швидкості зношування контактних поверхонь в критичних режимах тертя, що призводять до схоплювання елементів трибоспряжень, в середньому в 1,58 раз. У гідродинамічному і еластогідродинамічному режимах змащувальної дії застосування даної технології зміцнення поверхневих шарів забезпечує зниження зносу пар тертя в 2,3 рази.

Таким чином, представлена феноменологічна імовірнісна модель послідовного зносу субшарів трибологічного шару дозволяє прогнозувати величину зносу контактних поверхонь в залежності від часу роботи пар тертя. Отримані експериментальні результати при впровадженні автоматизованих методів і засобів контролю триботехнічних параметрів і випробування контактних поверхонь в реальному масштабі часу в режимах, максимально наближених до експлуатаційних, дозволяють екстраполювати закономірності триботехнічних процесів на реальні вузли тертя, що є складовою частиною завдання забезпечення мінімізації зносу і підвищення ресурсу пар тертя.

Висновки до розділу 7

1. Збільшення товщини напиленого покриття самофлюсуючого порошку ПГ–АН9 з 0,3 до 1,2 мм підвищує тривалість нормальної роботи трибоспряжень, яка встановлюється до періоду прояву перших ознак схоплювання контактних поверхонь, в 5,42 рази в умовах динамічного навантаження.

2. Встановлена висока змащувальна здатність трансмісійної оливи ТС–гіп покриття порошку ПГ–АН9: незалежно від навантаження, в контакті переважно реалізується гідродинамічний режим мащення. При збільшенні контактного тиску з 150 до 250 МПа і при переході від чистого кочення до кочення з проковзуванням відбувається короткочасне зниження несучої здатності масляного шару для пар тертя з

товщиною покриття 0,7 і 1,2 мм, що проявляється в реалізації змішаного режиму мащення.

3. Найкращими антифрикційними властивостями характеризується покриття ПГ–АН9 товщиною 1,2 мм, для якого момент тертя в контактї в 1,5 – 2 рази нижче аналогічних показників, встановлених для поверхонь з меншою товщиною покриття.

4. Найвища зносостійкість покриття ПГ–АН9 товщиною 1,2 мм забезпечується за рахунок підвищення в 2,58 раз вихідної мікротвердості поверхневих напилених шарів; зниження в 2 – 3 рази приросту питомої роботи тертя як в умовах чистого кочення, так і в умовах кочення з проковзуванням; зменшення ступеня пластифікування поверхневих шарів покриття при формуванні на них граничних змащувальних шарів, що проявляється в меншому знеміцненні випереджаючої і відстаючої поверхонь.

5. В умовах чистого кочення для покриття сталі 30ХГСА на модифікованому чавуні СЧ30 товщиною 1,0 мм коефіцієнт тертя на 20% нижче, в порівнянні з аналогічним параметром, встановленим для покриття товщиною 0,5 мм. Наявність проковзування, в порівнянні з чистим коченням, призводить до монотонного зростання коефіцієнту тертя в 1,3:2,0:3,33:4 рази в умовах ступеневого підвищення σ_{\max} з 150 до 300 МПа відповідно. Зниження антифрикційних властивостей в контактї за умов кочення з проковзуванням обумовлено підвищенням напруги зсуву змащувальних шарів внаслідок зниження, в середньому, в 2 рази, негідродинамічної складової товщини мастильного шару та дезорієнтацією компонентів мастильного матеріалу.

6. В умовах підвищення об'ємної температури оливи до 100⁰С відбувається формування хемосорбційних і хімічно модифікованих шарів на активованих тертях контактних поверхнях (для покриття сталі 30ХГСА). Найбільш чутливим показником щодо зміни природи граничних адсорбційних шарів є питома робота тертя в контактї – показники питомої роботи тертя як в умови чистого кочення ($A_{\text{тр}}$ становить 100 – 200 Дж/мм²), так і за умов проковзування ($A_{\text{тр}}$ збільшується до 3500 – 10000 Дж/мм²) є найвищими, в порівнянні з іншими періодами напрацювання, для яких фіксуються стабільні показники негідродинамічної складової товщини мастильного шару.

7. Підвищення зносостійкості покриття сталі 30ХГСА товщиною 1,0 мм, в середньому, в 2 рази, обумовлено збільшенням вихідної мікротвердості покриття на 750 МПа, зниженням його пористості, формуванням в контактні граничних шарів хемосорбційної природи, які призводять до поступового зниження питомої роботи тертя в контактні.

8. Вперше апробовано методику оцінки температурно–механічної стійкості граничних плівок мастильних матеріалів в умовах, що призводять до пружно–пластичної деформації контактних поверхонь, і швидкостях ковзання, що обумовлюють появу високих градієнтів швидкості зсуву мастильних шарів. При руйнуванні граничних змащувальних шарів виникає локальне збільшення температури на дискретних ділянках при фрикційній взаємодії, досліджувана контактна модель ролик – ролик розглядається як джерело теплоутворення у вигляді адитивної сукупності пов'язаних по лінії контакту точкових джерел теплоутворення. Критерієм оцінки умов виникнення заїдання є критична температура в зоні контакту елементів трибоспряжень, розрахована по Блоку.

9. Встановлено підвищення термомеханічної стійкості граничних шарів, сформованих на контактних поверхнях сталі 40Х (термоциклічне іонне азотування), в середньому, в 1,7 рази, в порівнянні з граничними шарами, утвореними на сталі 40Х (загартування + відпуск) .

10. Встановлено залежність зносу азотованих контактних поверхонь сталі 40Х від типу мастильного матеріалу. При проковзуванні 20% і 40% знос випереджаючої і відстаючої поверхонь відповідно в 1,5 і 1,7 разів нижче при використанні трансмісійної оливи ТСП–14Гіп, в порівнянні з мінеральною оливою МС–20.

11. Формування мастильними матеріалами хемосорбційних або хімічно–модифікованих шарів сприяє зменшенню поширення пружно–пластичної деформації вглиб зміцнених азотованих шарів металу – при терті в умовах кочення з проковзуванням 40% – товщина аморфного шару металу внаслідок протікання деформаційних процесів становить 80 мкм, що в 1,4 рази менше, ніж при використанні в якості мастильного матеріалу мінеральної оливи МС–20.

12. Запропоновано феноменологічну імовірнісну модель послідовного зносу субшарів трибологічного шару для опису процесів накопичення трибопошкоджень, що відносяться до класу кумулятивних ушкоджень, яка дозволяє прогнозувати величину зносу контактних поверхонь в залежності від часу роботи пар тертя. Застосування технології ТІА забезпечує зниження швидкості зношування контактних поверхонь в критичних режимах тертя, в середньому в 1,58 раз, в гідро– та еластогідродинамічних режимах мащення – в 2,3 рази.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Розроблено програмно–апаратний комплекс для оцінки триботехнічних характеристик в лінійному контакті, який в реальному часі фіксує вихідні сигнали, обробляє їх (програмне забезпечення ProfiLab), аналізує та представляє їх в графічному і табличному зображенні - кінетику зміни товщини мастильного шару, моменту тертя, температури мастильного матеріалу, частоту обертання дослідних зразків. Кінематична незалежність приводів дозволила встановити довільний вибір діапазону проковзування (від 3 до 40%) відстаючої поверхні в умовах кочення з проковзуванням, що є реальним відтворенням режиму роботи зубчастих передач, де чисте кочення реалізується лише в полюсі зачеплення.

2. Визначені закономірності структурної пристосованості для сталі ШХ–15 і сталі 40Х, які полягають у зниженні питомої роботи тертя в 2 рази, зменшенні напруги зсуву мастильного шару і коефіцієнта тертя в 2,3 рази, збільшенні періоду напрацювання до прояву першого акту розміщення поверхневих шарів металу, що забезпечує підвищення зносостійкості контактних поверхонь сталі ШХ–15 в 3 рази в умовах кочення з проковзуванням 20%.

3. Активація поверхневих шарів металу в нестационарних умовах тертя при коченні з проковзуванням 10 – 40% і термомеханічна деструкція компонентів трансмісійних та моторних олив обумовлюють формування ретикулярних граничних шарів шаруватої сітчастої структури товщиною 0,02 – 3,8 мкм, що характеризуються неньютонівськими властивостями, підвищенням адгезійної складової коефіцієнта тертя з 0,006 до 0,047, підвищенням ефективної в'язкості негідродинамічної складової товщини мастильного шару в 1,4 - 2,3 рази.

4. В екстремальних умовах тертя збільшення проковзування з 10 до 40% призводить до зростання градієнта швидкості зсуву змащувальних шарів в 3,2 – 4,8 разів, в сформованих граничних шарах локально проявляються фазові переходи першого роду між твердим і рідким станом внаслідок їх плавлення при граничних значеннях зсувної

деформації. У період, що передує схоплюванню контактних поверхонь, спостерігається прояв двох протилежних ефектів: збільшення адгезійної складової коефіцієнта тертя в 2,1 – 2,6 рази внаслідок підвищення ступеня металевго контакту поверхонь або зменшення коефіцієнта тертя в 1,5 – 2,3 рази при прояві короткочасних гідродинамічних ефектів в результаті осередкового плавлення граничних шарів.

5. Підвищення швидкості ковзання з 0,6 до 1,15 м/с при коченні пар тертя в екстремальних умовах є ведучим фактором, що обумовлює підвищення інтенсивності тепловиділення в контакті в 2 рази, локальне збільшення температури в 3 – 7 разів, зростання питомої роботи тертя в 1,7 – 3 рази, деструкцію граничних шарів, руйнування метастабільних вторинних структур. У періоди, що безпосередньо передують схоплюванню контактних поверхонь, встановлені загальні закономірності кінетики зміни реологічних властивостей граничних плівок мастильного матеріалу, що характеризують незворотні зміни в трибосистемах: стрімке збільшення градієнта швидкості зсуву, напруги зсуву мастильних шарів, зниження ефективної в'язкості в контакті.

6. Встановлено підвищення температурно–механічної стійкості граничних змащувальних шарів зі збільшенням в'язкості базової основи олив, наявністю поліфункціональних присадок при тисках, що призводять до пружньо-пластичної деформації контактних поверхонь, і швидкостях ковзання, що обумовлюють появу високих градієнтів швидкості зсуву змащувальних шарів. Термомеханічна стійкість граничних шарів, сформованих на контактних поверхнях сталі 40Х (імпульсне термоциклічне іонне азотування), зростає в 1,7 рази, в порівнянні з граничними шарами, утвореними на сталі 40Х (загартування + відпуск (400⁰С)). Формування мастильними матеріалами хемосорбційних або хімічно–модифікованих шарів оливою ТСп–14гіп сприяє зменшенню поширення пружно–пластичної деформації вглиб зміцнених азотованих шарів металу, що обумовлює зниження зносу контактних поверхонь в 1,5 – 1,9 разів, в порівнянні з оливою МС–20.

7. Встановлено взаємозв'язок енергетичного параметра (питомої роботи тертя) і зносостійкості сталі від типів вторинних структур, що утворюються на контактних поверхнях в процесі самоорганізації. Для вторинних структур I типу характерні низькі показники питомої роботи тертя ($2 - 10 \text{ Дж/мм}^2$), високий ступінь знеміцнення поверхневих шарів металу, аморфізація приповерхневих шарів металу на глибину $40 - 50 \text{ мкм}$, відсутність насичення активними елементами, що призводить до інтенсифікації зношування ($I = 10^{-8} - 10^{-9}$). Вторинні структури II типу характеризуються підвищенням зносостійкості внаслідок збільшення енергоємності контакту (A_T становить $900 - 4000 \text{ Дж/мм}^2$), формування граничних хемосорбційних плівок, зміцнення поверхневих шарів металу (на $180 - 650 \text{ МПа}$), збільшення масової частки кисню в $1,2 - 1,7$ раз і сірки в $1,2 - 3$ рази в приповерхневих шарах металу на глибині до 50 мкм . Найменша інтенсивність зношування вторинних структур II типу на рівні $10^{-10} - 10^{-11}$ характерна для поверхонь в умовах кочення з проковзуванням $10 - 20\%$.

8. Визначено механізми поширення напружено-деформованого стану приповерхневих шарів металу, які полягають в зростанні механічного та теплового впливів, питомої роботи тертя при збільшенні проковзування від 3 до 40% . Підвищення енергетичного балансу трибосистеми, локалізація дотичних напруг зсуву в приповерхневих шарах металу, процеси знеміцнення – зміцнення приповерхневих шарів призводять до утворення дрібнозернистої структури деформованих шарів металу, глибина поширення яких становить $25 - 350 \text{ мкм}$. Встановлено появу центру концентратора напружень і виникнення зони локального підвищеного зносу по центральній ділянці лінійного контакту, де лінійний знос в $1,5 - 3,2$ рази перевищує показники, характерні для периферійних ділянок по лінії контактування.

9. Розроблено методику прогнозування зносу контактних поверхонь в умовах кочення з проковзування $3 - 40\%$ за характером зміни величини інтегральної мікротвердості, яка враховує кінетику зміни мікротвердості поверхневих шарів металу в процесі структурної пристосованості і градієнтний розподіл мікротвердості по глибині деформованого шару до $80 - 100 \text{ мкм}$. Дана методика дозволяє розробляти практичні

рекомендації по режимам технологічної та експлуатаційної модифікації елементів трибоспряжень.

10. Визначені залежності щодо локалізації вектора дотичних напружень зсуву в приповерхневих шарах матеріалу контактних поверхонь при переході трибосистеми від гідродинамічного до граничного та напівсухого режимів мащення в умовах кочення з проковзуванням. Запропоновані емпіричні залежності величини максимальних дотичних напружень в контакті та глибини їх залягання з урахуванням триботехнічних параметрів контакту. Зростання швидкості ковзання обумовлює зміну напружено-деформованого стану контактних поверхонь за рахунок появи дотичних напружень зсуву при терті, вектор яких локалізується не тільки по товщині змащувального шару, але й опускається в приповерхневі шари металу. Збільшення проковзування до 20% та 40% обумовлює підвищення максимальних дотичних напружень в 1,7 та 2,27 раз та зростання глибини їх залягання в 1,85 та 3,65 разів в умовах граничного / напівсухого режимів мащення відповідно, в порівнянні з гідродинамічним режимом мащення.

11. Зростання величини проковзування з 3 до 40% в умовах кочення обумовлює прояв ряду дифракційних ефектів і структурно-фазових перетворень у поверхневих шарах сталі 45, які полягають в наступному: зміщення дифракційних максимумів у бік менших кутів дифракції, обумовлене формуванням у деформованих тертях приповерхневих шарах макронапружень стиснення, які викликані зростанням міжплощинних відстаней у кристалічній ґратці; розширення дифракційних максимумів (лінія $(200)\alpha$), яке пов'язане як із зменшенням розмірів областей когерентного розсіяння, так і з зростанням мікронапружень; зміна співвідношення інтенсивності дифракційних максимумів від різних площин (наприклад $(110)\alpha$ / $(200)\alpha$), яка пов'язана переорієнтацією зерен у приповерхневих деформованих шарах; поява дифракційних максимумів, що відповідають гцк аустенітній фазі $((111)\gamma)$.

12. Рівень енергії активації руйнування при терті для різних марок сталей (сталь 45, 9ХС, ШХ–15, 40Х, 30ХГСА) знаходиться в діапазоні 110 – 300 кДж/моль і залежить від ступеня зміцнення приповерхневих шарів, типу вторинних структур і плівок

мастильного матеріалу, утворених в результаті структурної пристосованості. Підвищення ступеня проковзування до 40% при коченні обумовлює інтенсифікацію пластичної деформації приповерхневих шарів металу (структурно-чутливий коефіцієнт, що характеризує роботу руйнування від зовнішнього впливу, зростає в 3 – 5 разів), збільшення рівня накопичення енергії активації руйнування, в середньому, в 2,5 рази, зниження граничного значення контактного тиску на 140 – 180 МПа. Визначено вплив зовнішніх чинників на енергію активації руйнування – параметр ΔG , залежно від типу мастильного матеріалу та матеріалу контактних поверхонь, знаходиться в діапазоні - 10...+35 кДж/моль.

13. Запропоновано застосування покриттів самофлюсуючого гранульованого порошку ПГ-АН9 та порошкового дроту ПП-Нп-30ХГСА для оптимізації технологічних процесів нанесення покриттів при виготовленні та зміцненні, ремонті та відновленні зубчастих коліс та шестерен. Проведений аналіз змашувальних, антифрикційних та протизношувальних властивостей сформованих в процесі тертя захисних поверхневих метастабільних структур свідчить, що вони характеризуються ефективною несучою здатністю, високою стійкістю та адгезійною міцністю в умовах динамічного навантаження, зниженням в 2...3 рази приросту питомої роботи тертя в триботехнічному контакті та проявляють високий опір зношуванню. Зносостійкість контактних поверхонь з товщиною напиленого шару до 1,0...1,2 мм підвищується, в середньому, в 2...2,5 рази, антифрикційні властивості зростають в 1,5...2 рази, в порівнянні з товщиною напиленого шару покриттів до 0,3...0,5 мм.

14. На основі результатів мікрометричного вимірювання зносу гільзи циліндру моделей двигунів внутрішнього згорання (ABC V6, M 50, M102-16V, 18S, EA65 та ін.) ряду марок автомобілів при першому капітальному ремонті створена методика розрахунку основних трибологічних характеристик пари ковзання верхнє компресійне кільце – гільза циліндра двигуна внутрішнього згорання, яка дозволяє спрогнозувати ефективність мащення та ступінь зношування контактних поверхонь залежно від конструкційних параметрів двигуна та матеріалів кільце – гільза циліндра, режимів

технічної експлуатації двигуна, основних параметрів робочого процесу ДВЗ та фізико-хімічних властивостей змащувальної рідини.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А. с. 527624 СССР, G 01 М 13/00. Способ приработки кинематических пар трения скольжения / А. Т. Бородин, И. Т. Бородин (СССР). – 1977, бюл. № 33. – 2с.
2. А. с. № 1490592, СССР. Способ оценки энергии активации материалов / Громаковский Д. Г., Беленьких Е. В., Ибатуллин И. Д. [и др.]; опубл. в бюл. изобретений Государственного комитета СССР № 24 от 30.06.89.
3. Алгоритм визначення товщини мастильного шару між першим компресійним кільцем та гільзою циліндра ДВЗ залежно від робочого процесу / О. О. Мікосянчик, З. Є. Новохатська, М. О. Хом'якова, М. В. Ціркун // Авіа-2013: XI Міжнародної наук.-техн. конф., 21-23 травня, 2013 р., Київ: матеріали. – К.: НАУ, 2013. – Т. 3. – С. 25-28.
4. Александров А. В. Сопротивление материалов: учебник для вузов / А. В. Александров, В. Д. Потапов, Б. П. Державин. – М.: Высш. школа, 1995. – 560 с.
5. Александров В. И. Материалы зубчатых колес грузовых автомобилей / В. И. Александров, А. С. Соболев. – Минск: АНБССР Институт проблем надежности и долговечности машин, 1978. – 58 с.
6. Алехин В. П. Влияние особенностей микропластической деформации вблизи свободной поверхности твердого тела на общую кинетику макропластического течения (обзор) / В. П. Алехин, М. Х. Шоршоров // Физика и химия обработки металлов. – 1973. – № 5. – С. 84–101.
7. Анализ триботехнических характеристик самофлюсующихся покрытий в условиях качения со скольжением при нестационарном нагружении / О. А. Микосянчик, Б. А. Ляшенко, М. С. Агеев, В. М. Лопата // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 2/1 (28). – С. 4-9.
8. Аналитическое описание структурированного смазочного слоя / Е. В. Березина, В. А. Годлевский, А. Г. Железнов, Д. С. Фомичёв // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2014. – № 1. – С. 74-79.

9. Аналіз взаємозв'язку триботехнічних параметрів суспензії графіту ГС-4 на основі факторного методу / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, С. С. Кроль, О. О. Мікосянчик // Вісник: наук.-техн. зб. – К.: НТУ, 2006. – № 11. – С. 3-5.
10. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. Т. 2 / В. И. Анурьев. – М.: Машиностроение, 2000. – 784 с.
11. Ахматов А. С. Граничный смазочный слой как квазитвердое тело / А. С. Ахматов // II Всесоюзная конференция по трению и износу в машинах, 1949: труды. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1949. – Т. III. – С. 144-154.
12. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1967. – 472 с.
13. Ахметов С. А. Физико-химическая технология глубокой переработки нефти и газа: уч. пособие для вузов / С. А. Ахметов. – Уфа: Гилем, 2002. – 672 с:
14. Баранов А. В. Математическая модель процесса окислительного изнашивания / А. В. Баранов, А. М. Гвоздев, В. А. Вагнер // Расчет, диагностика и повышение надежности элементов машин. – Барнаул: АГТУ, 2001. – № 3. – С. 23-26.
15. Баранов А. В. Описание процессов механохимического изнашивания / А. В. Баранов, В. А. Вагнер // Ползуновский вестник. – 2005. – № 2. – С. 50-54.
16. Баранов А. В. Физические основы процесса изнашивания металлов / А. В. Баранов, В. А. Вагнер, С. В. Тарасевич // Ползуновский вестник. – Барнаул: АлтГТУ, 2009. – № 2. – С. 40-48.
17. Баранов А. В. Явления самоорганизации при трении металлов / А. В. Баранов // Ползуновский альманах. – 2003. – № 4. – С. 130-131.
18. Барышев В. И. Температурно-силовая совместимость материалов подшипников скольжения шестеренных насосов типа НШ / В. И. Барышев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2005. – № 1 (6). – С. 105-113.
19. Башнин Ю. А. Технология термической обработки: учебник для вузов / Ю. А. Башнин, Б. К. Ушаков, А. Г. Секей. – М.: Metallurgy, 1986. – 424 с.

20. Безбородов Ю. Н. Методы контроля и диагностики эксплуатационных свойств смазочных масел по параметрам термоокислительной стабильности / Ю. Н. Безбородов: дис. ... докт. техн. наук: 05.11.13 / Ю. Н. Безбородов. – Красноярск, 2009. – 402с.
21. Безъязычный В. Ф. Влияние качества поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства деталей машин / В. Ф. Безъязычный // Инженерный журнал. – 2001. – № 4. – С. 9-16.
22. Беркович И. И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / И. И. Беркович, Д. Г. Громаковский. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т. – 2000. – 268 с.
23. Бернштейн М. Л. Структура деформированных металлов / М. Л. Бернштейн. – М.: Металлургия, 1977. – 431 с.
24. Бершадский Л. И. О самоорганизации и концепциях износостойкости трибосистем / Л. И. Бершадский // Трение и износ. – 1992. – Т. 13, № 6. – С. 1021-1025.
25. Бершадский Л. И. О самоорганизации трибосистем / Л. И. Бершадский // Проблемы трения и изнашивания. – 1982. – Вып. 21 – С. 10-25.
26. Бершадский Л. И. Самоорганизация и надежность трибосистем / Л. И. Бершадский. – К.: Об-во «Знание» УССР, 1981. – 35 с.
27. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин / И. А. Биргер, Б. Ф. Шор, Р. М. Шнейдерович. – М.: Гос.науч.-техн.изд-во машиностроит. лит-ры, 1959. – 459 с.
28. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин / И. А. Биргер, Б. Ф. Шор, Р. М. Шнейдерович. – М.: ГНТИМЛ, 1959. – 459 с.
29. Бишутин С. Г. Состояние тонких поверхностных структур шлифованных сталей и их изменения в процессе трения / С. Г. Бишутин // Вестник Брянского гос. техн. ун-та. – 2010. – № 1(25). – С. 5-9.
30. Бишутин С. Г. Структурирование поверхностных слоев деталей при финишной абразивной обработке/ С. Г. Бишутин. – Брянск: БГТУ, 2009. – 100 с.
31. Богданофф Дж. Вероятностные модели накопления повреждений / Дж.

Богданофф, Ф. Козин; пер. с англ. – М.: Мир, 1989.

32. Борисов А. О. Моделирование изнашивания поршневого кольца двигателей внутреннего сгорания / А. О. Борисов, С. А. Загайко // Ползуновский вестник. – 2006. – № 4. – С. 27-31.

33. Боуден Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор: пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.

34. Брейтуэйт Е. Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия / Е. Р. Брейтуэйт. – М.: Химия, 1967. – 320 с.

35. Буше Н. А. Совместимость трущихся поверхностей / Н. А. Буше, В. В. Копытко. – М.: Наука, 1981. – 223 с.

36. Бэр Э. Конструкционные свойства пластмасс / Э. Бэр. – М.: Химия, 1967. – 464 с.

37. Варлимонт Х. Мартенситные превращения в сплавах на основе меди, серебра и золота / Х. Варлимонт, Л. Дилей. – М.: Наука, 1980. – 205 с. 56тт.

38. Веников В. А. Развитие методов подобия и планирования эксперимента / В. А. Веников, С. Ю. Сыромятников // Электронное моделирование. – 1980. – № 6. – С. 35-44.

39. Веселовский А. А. Восстановление чугуновых зубчатых колёс термодиффузионным способом / А. А. Веселовский // VI Уральская научно-практическая конференция «Сварка. Реновация. Триботехника»: тез. докл. – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УРФУ, 2013. С. 57.

40. Виды повреждений зубчатых колес: типология и рекомендации по предупреждению повреждений / В. Е. Старжинский, Ю. Л. Солитерман, Е. И. Тескер [и др.] // Трение и износ. – 2008. – № 5 (29). – С. 465-482.

41. Виноградов Г. В. Опыт исследования противозадирных и противоизносных свойств смазочных материалов / Г. В. Виноградов // Методы оценки противозадирных и противоизносных свойств смазочных материалов. – М.: Наука, 1969. – С. 3-11.

42. Витязь П. А. Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди / П. А. Витязь, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Минск: Беларуская навука, 1998. – 351 с.
43. Витязь П. А. Роль неравновесных дефектов деформационной природы в формировании структуры сплавов при механическом легировании / П. А. Витязь, Ф. Г. Ловшенко, В. А. Старенченко // Материалы, технологии, инструменты. – 1996. – № 4. – С. 88-91.
44. Влияние состояния поверхностного слоя на механизм пластического течения и сопротивление деформации малоуглеродистой стали / А. В. Панин, В. А. Клименов, Ю. И. Почивалов, А. А. Сон // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 4, № 4. – С. 85-92.
45. Воробьев Ю. В. Аналитические основания для оценки долговечности рабочих поверхностей при качении с проскальзыванием / Ю. В. Воробьев // Машиноведение. – 1984. – № 4. – С. 68-75.
46. Воробьев Ю. В. Проектирование зубчатых передач на долговечность с учетом трения / Ю. В. Воробьев, А. Д. Ковергин // Вестник ТГТУ. – 2004. – Т. 10, № 1Б. – С. 205-211.
47. Воробьев Ю. В. Физические основы усталостной прочности при качении / Ю. В. Воробьев // Тр. 5-й Науч.-техн. конф. фак. мат. знаний, посвящ. 50-летию Куйбышев. политехн. ин-та. Куйбышев, май, 1980. Ч.1. – Куйбышев, 1980. – С. 170-175.
48. Воронин С. В. Влияние электрического и магнитного поля на механизм действия присадок к маслам / С. В. Воронин, А. В. Дунаев // Трение и износ. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2015. – Т. 36, № 1. – С. 41-49.
49. Восстановление деталей машин: справочник / Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов, В. М. Константинов; под. ред. В. П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
50. Вплив нанодисперсної добавки фулерена C_{60} на триботехнічні характеристики трансмісійного масла в період припрацювання / М. Ф. Дмитриченко, Р.

Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куц // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – Київ: НТУ, 2007. – № 4. – С. 5-7.

51. Вплив фізико-хімічного складу масел для гідромеханічних коробок передач на кінетику формування мастильного шару / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, С. С. Кроль, О. О. Мікосянчик // *Materialy XVII Konf. Miedzynarodowej: "Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych"*, (Rzeszów, 20-23 wrzesień 2006 r.). – Rzeszów: Politechnika, 2006. – P. 43-48.

52. Выбор критерия при оценке параметров прочности функционально-градиентных конструкций / Н. О. Кузин, Б. А. Ляшенко, В. П. Ламашевский // *Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – № 6/1 (26). – С. 4-8.*

53. Галахов М. А. Дифференциальные и интегральные уравнения математической теории трения / М. А. Галахов, П. П. Усов. – М.: Наука, 1990. – 287 с.

54. Гарбар И. И. Некоторые особенности формирования структуры при трении / И. И. Гарбар // *Трение и износ. – 1981. – Т. 2. – С. 1076-1084.*

55. Гаркунов Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

56. Гаркунов Д. Н. Триботехника, износ и безызносность / Д. Н. Гаркунов. – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.

57. Глива В. А. Дослідження структурних змін сплаву АМГ6 за рахунок термічних впливів та пластичної деформації / В. А. Глива // *Вісник КрНУ. – Кременчук: КДПУ, 2015. – Вип. 4 (93). – С. 71-75.*

58. Гнюсов С. Ф. Особенности изнашивания композиционного покрытия на основе стали Р6М5 в трибоконтакте со сталью ШХ15 в широком интервале скоростей и нагрузок / С. Ф. Гнюсов, А. А. Игнатов, В. Г. Дураков // *Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323, № 2. – С. 76-84.*

59. Годлевский В. А. Особенности смазочного действия водных растворов ПАВ при лезвийном резании труднообрабатываемых материалов / В. А. Годлевский, В. В.

Марков // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2004. – Т. 47, № 9. – С. 120-124.

60. Годлевский В. А. Поверхностные явления: учебн. пособие / В. А. Годлевский. – Иваново: Изд-во Иван. гос. ун-та, 1995. – 164 с.

61. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 478 с.

62. ГОСТ 21354-87 Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. Дата издания: 18.08.1988; дата введения в действие: 01.01.1989; дата последнего изменения: 18.05.2011. – 129 с.

63. ГОСТ 30479-97. Обеспечение износостойкости изделий. Методы установления предельного износа, обеспечивающего требуемый уровень безопасности. Общие требования.

64. Гриб В. В. Решение триботехнических задач численными методами. – М.: Наука, 1982. – 112 с.

65. Грозин Б. Д. Износ металлов / Б. Д. Грозин. – К.: Гостехиздат УССР, 1951. – 252 с.

66. Гурский Б. Э. Тепловая задача трения и ее развитие. Ч. 2. Роль тепловых явлений в разрушении зубчатых колес цилиндрических эвольвентных передач реальных размеров / Б. Э. Гурский, А. В. Чичинадзе // Трение и износ. – 2007. – № 4 (28). – С. 418-425.

67. Гусев А. В. Ремонт клапана ДВС / А. В. Гусев, И. З. Аширов // Вестник ОГУ. – 2006. – № 13. – С. 81.

68. Дедков А. К. Скорость окислительного изнашивания металлических твердых тел / А. К. Дедков // Задачи нестационарного трения в машинах, приборах и аппаратах. – М.: Наука, 1978. – С. 129-139.

69. Демкин Н. Б. Моделирование фрикционного контакта и его свойства / Н. Б. Демкин // Трение, износ, смазка. – 1999. – № 3.

70. Детали машин: справочник. Т. 3 / под ред. Н. С. Ачеркана. – М.: Машиностроение. 1969. – 472 с.

71. Динамика интенсивности изнашивания контактных поверхностей при использовании добавки фуллерена C_{60} / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куц // Полимерные композиты и трибология : междунар. науч.-техн. конф., 22-25 июня 2009 г., Гомель: тезисы докл. – Гомель: ИММС им. В. А. Белого НАН Беларуси, 2009. – С. 72.

72. Динник А. Н. Избранные труды / А. Н. Динник. – К.: Изд. АН УССР, 1952. – 120 с.

73. Диха О. В. Принципи побудови структурно-динамічної схеми при граничному змащуванні / О. В. Диха // Зносостійкість і надійність вузлів тертя машин: міжнар. наук.-техн. конф., Хмельницький, 2001 р.: тези допов. – Хмельницький: ТУП, 2001. – С. 52.

74. Дмитриченко М. Ф. Вплив навантаження на динаміку формування мастильного шару в еластогідродинамічному контакті / М. Ф. Дмитриченко, О. О. Мікосянчик, І. М. Козоріз // LXVI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2010. – С. 7.

75. Дмитриченко М. Ф. Динаміка зношування контактних поверхонь при введенні нанодобавки / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куц // Вісник: наук.-техн. зб. - К.: НТУ, 2008. – № 16. – С. 3-6.

76. Дмитриченко М. Ф. Кінетика формування експлуатаційної шорсткості контактних поверхонь / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куц // Вісник: наук.-техн. зб. в 2-х частинах: Ч.1. – К.: НТУ, 2007. – № 15. – С. 15-18.

77. Дмитриченко М. Ф. Моделювання та розрахунків трибологічних процесів пар тертя в двигуні внутрішнього згоряння / М. Ф. Дмитриченко, О. О. Мікосянчик, Ю. П. Ярошенко // LXVII наукова конференція професорсько-викладацького складу,

аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2011. – С. 6.

78. Дмитриченко М. Ф. Розроблення методики прогнозування довговічності вузлів тертя двигунів внутрішнього згоряння та трансмісій автомобілів в нестационарних умовах / М. Ф. Дмитриченко, О. О. Мікосянчик, І. М. Козоріз // LXV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2009. – С. 6-7.

79. Дмитриченко Н. Ф. Смазочные процессы в условиях нестационарного трения / Н. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов. – Житомир: ЖИТИ, 2002. – 308 с.

80. Дмитриченко М. Ф. Триботехніка та основи надійності машин: навч. посібник / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик. – К.: ІНФОРМАВТОДОР, 2006. – 216 с.

81. Докшанин С. Г. Моделирование напряженного состояния в роликовом подшипнике качения для случая граничного трения / С. Г. Докшанин, И. И. Докшанина // Проблемы механики современных машин: материалы 5 междунар. конф. ВСГУТУ. – Улан-Удэ, 2012. – Т. 2. – С. 162-165.

82. Докшанин С. Г. Снижение контактных напряжений в подшипниках качения за счет применения смазочных материалов с наночастицами / С. Г. Докшанин, И. И. Докшанина // Вестник СибГАУ. – 2006. – № 5 (12). – С. 83-86.

83. Домінуючий вплив еластогідродинамічних чинників в нестационарних режимах тертя / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куш // Вісник: наук.-техн. зб. в 2-х ч. Ч. 1. – К.: НТУ, 2006. – Вип. 13 – С. 3-5.

84. Дроздов Ю. Н. Прикладная трибология (трение, износ и смазка) / Ю. Н. Дроздов, Е. Г. Юдин, А. И. Белов; под ред. Ю. Н. Дроздова. – М.: Эко-Пресс, 2010. – 604с.

85. Дроздов Ю. Н. Противозадирная стойкость трущихся тел / Ю. Н. Дроздов, В. Г. Арчegov, В. И. Смирнов. – М.: Наука, 1981. – 275 с.

86. Дударев Е. Ф. Микропластическая деформация и предел текучести поликристаллов / Е. Ф. Дударев. – Томск: Изд-во Том.ун-та, 1988. – 256 с.
87. Дунин-Барковский И. В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. – М. : Машиностроение, 1978. – 232 с.
88. Дымшиц И. И. Коробки передач / И. И. Дымшиц. – М.: Машгиз, 1960. – 360с.
89. Дыха А. В. Структурно-термодинамические подходы в механизмах граничного смазывания / А. В. Дыха // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2006, № 3. – С. 62-65.
90. Евдокимов Ю. А. Применение методов физического моделирования в электрическом скользящем контакте / Ю. А. Евдокимов, В. Г. Козубенко, В. М. Коротков // Трение и износ. – 1988. – Т. 9, № 4. – С. 696-700.
91. Ермаков С. Ф. Трибология жидкокристаллических наноматериалов и систем / С. Ф. Ермаков. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 380 с.
92. Ермаков С. Ф. Трибофизика жидких кристаллов / С. Ф. Ермаков. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2008. – 232 с.
93. Ермичев В. А. Износ и трибоусталость зубчатых колес / В. А. Ермичев, П. В. Тихомиров // Состояние и перспективы развития дорожного комплекса: сб. науч. трудов. – Брянск: БГИТА, 2001. – Вып. 3. – С. 16-18.
94. Ермичев В. А. Моделирование процесса трения в открытых зубчатых передачах / В. А. Ермичев, П. В. Тихомиров // Вклад ученых и специалистов в национальную экономику: матер, регион, науч.-техн. конф., г. Брянск, 16-18 мая 2002 г. / под ред. Е. Н. Самошкина, И. М. Барановой, А. В. Городкова. – Брянск: БГИТА, 2002. – С. 218-221.
95. Ермичев В. А. Прогнозирование оптимального ресурса работы открытых зубчатых передач в сельскохозяйственных и лесохозяйственных машинах / В. А. Ермичев, П. В. Тихомиров // Конструирование, использование и надежность машин

сельскохозяйственного назначения: сб. науч. работ. – Брянск: Изд-во БГСХА, 2003. – С. 200-207.

96. Ефективність мащення олів в контактi залежно від терміну їх експлуатації / Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, Ю. О. Туриця, О. В. Руденко // Ольвійський форум-2011: стратегії України в геополітичному просторі: міжнарод. наук.-практ. конф., 8-12 червня 2011 р., Ялта, Крим, Україна: тези доп. – Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. –Т. 11 – С. 5.

97. Жаров А. В. Влияние структурных превращений при трении на работоспособность сопряжения верхнее компрессионное кольцо – гильза цилиндра автомобильного дизеля / А. В. Жаров, В. Г. Новиков, А. А. Павлов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2008. – № 2. – С. 83-86.

98. Жевнов В. В. О влиянии ультрадисперсных наполнителей на реологические свойства пластичных смазок / В. В. Жевнов, В. А. Смуругов, И. О. Деликатная [и др.] // Трение и износ. – 2001. – № 6 (22). – С. 699-702.

99. Железнов А. Г. Диагностика надмолекулярной структуры смазочного слоя методом поляризационной трибометрии: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / А. Г. Железнов. – Иваново, 2015. – 147 с.

100. Жильников Е. П. Основы триботехники: учеб. для вузов / Е. П. Жильников, В. Н. Самсонов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 136 с.

101. Журков С. Н. Временная зависимость прочности твердого тела / С. Н. Журков, Б. Н. Нарзуллаев // Журнал технической физики. – Т. 23. – Вып. 10. – 1953. – С. 1677-1689.

102. Журков С. Н. Проблема прочности твердых тел / С. Н. Журков // Вестник АН СССР. – 1957. – № 11. – С. 78-82.

103. Загиров И. И. Совершенствование технологии восстановления автотракторных деталей типа "ВАЛ" электроконтактной наплавкой проволокой: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / И. И. Загиров – Уфа: БГАУ, 2008. – 160 с.

104. Закономірності зношування пар тертя в умовах динамічного навантаження / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, Ю. О. Туриця // Вісник: наук.-техн. зб. в 2-х ч. Ч.2. – К.: НТУ, 2010. – № 21. – С. 48-52.

105. Запорожец В. В. Динамические характеристики прочности поверхностных слоев и их оценка / В. В. Запорожец // Трение и износ. – 1980. – № 4, Т. 1. – С. 602-609.

106. Заренбін В. Г. Оцінка середньої відстані між плямами контакту в парі тертя гільза циліндра – поршневе кільце ДВЗ / В. Г. Заренбін, Г. Г. Карасьов // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Дніпропетровськ: ПДАБта А, 2010. – № 2. – С. 11-16.

107. Зинченко В. М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки / В. М. Зинченко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 303 с.

108. Змащувальна дія олив при нестационарних процесах в умовах припрацювання / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, В. М. Лопата, В. І. Калініченко // Проблеми трибології. – 2016. – №1 (79). – С. 69-76.

109. Змащувальна здатність, антифрикційні та протизношувальні властивості масел для гідромеханічних коробок передач / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, С. С. Кроль, Мікосянчик О.О. // Вісник: наук.-техн. зб. – К.:НТУ, 2006. - №12. – С. 5-9.

110. Ибатуллин И. Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография / И. Д. Ибатуллин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 387 с.

111. Ибатуллин И. Д. Применение энергетического критерия прочности при анализе кинетики усталостного разрушения поверхностных слоев / И. Д. Ибатуллин // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. Н. Б. Демкина. – Тверь: ТГТУ, 2006. – С. 152-159.

112. Игнатищев Р. М. Основы новых путей упреждения питтинга в зубчатых передачах / Р. М. Игнатищев, Ю. В. Машин, П. В. Другаченко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2006. – № 3 (12). – С. 88-96.

113. Износостойкость пар трения с поверхностями, легированными электроискровой технологией / Ф. Х. Бурумкулов, С. А. Величко, В. В. Власкин [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2006. – № 5. – С. 14-19.

114. Йошида С. Интерпретация мезомеханических характеристик пластической деформации на основе аналогии с теорией электромагнитного поля Максвелла / С. Йошида // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т. 4, № 3. – С. 29-34.

115. Йошида С. Оптико-интерферометрические исследования деформации и разрушения на основе физической мезомеханики / С. Йошида // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2, № 4. – С.5-12.

116. Исследование влияния продуктов температурной деструкции и нагрузки на противоизносные свойства частично синтетического моторного масла ТНК Супер 5w-40SL/CF. Ч. 2 / В. Г. Шрам, Б. И. Ковальский, Ю. Н. Безбородов [и др.] // Вестник КузГТУ. – 2012. – № 6 (94). – С. 67-74.

117. Исследование влияния продуктов температурной деструкции на противоизносные свойства минерального трансмиссионного масла ТНК ТРАНС 80W-85GL4 / Б. И. Ковальский, В. Г. Шрам, Ю. Н. Безбородов [и др.] // Технологии нефти и газа. – 2013. – № 2 (85). – С. 27-35.

118. Исследование пятен износа при изучении противоизносных свойств масел на четырёхшариковой машине / И. А. Буяновский, В. Л. Лашхи, Р. М. Матвеевский [и др.] // Трение и износ. – 1992. – Т. 13, № 2. – С. 311-316.

119. Исследование структурно-фазового состояния металла как параметра качества обрабатываемых поверхностей деталей машин / А. Н. Смирнов, Н. А. Конева, Н. А. Попова, А. С. Глинка // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12, № 1(2). – С. 525-528.

120. Канарчук Е. А. Влияние режимов работы на износ двигателей внутреннего сгорания / Е. А. Канарчук, В. Е. Канарчук. – К.: Наукова думка, 1970. – 312 с.

121. Каплун В. Г. Исследование остаточных напряжений в стали 45Х после ионного азотирования. Лазерная, термическая и химико-термическая обработка в

машиностроении : сб. науч. тр. / В. Г. Каплун, А. Е. Рудык. – М.: МАДИ, 1987. – С.109-112.

122. Каплун В. Г. Підвищення довговічності важко навантажених пар кочення за циклічного контактного навантаження / В. Г. Каплун, П. В. Каплун, К. А. Паршенко // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. Fracture mechanics of materials and structural integrity: The 4th International Conference, June 23-27, 2009, Lviv, Ukraine. – Л.: ФМІ НАН України, 2009. – С. 823-828.

123. Каплун В. Г. Пути повышения износостойкости и долговечности конструктивных элементов при действии циклических контактных напряжений / В. Г. Каплун, П. В. Каплун, К. А. Паршенко // Прогрессивные технологии и системы в машиностроении: сб. науч. труд. междунар. конф. – Донецк: ДНТУ, 2005 – Вып. 30. – С. 97-104.

124. Каплун П. В. Влияние ионного азотирования на долговечность открытых зубчатых передач / П. В. Каплун, В. А. Гончар // Проблемы трибологии (Problems of Tribology). – 2015. – № 2. – С. 84-90.

125. Каплун П. В. Кинетика износа сталей с диффузионными покрытиями при контактном циклическом нагружении / П. В. Каплун // Проблемы трибологии. – 2001. – № 1. – С. 199-124.

126. Каратушин С. И. Влияние цементации на остаточные напряжения в зубчатом зацеплении / С. И. Каратушин, Д. В. Спиридонов, Ю. А. Плешанова // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – № 3. – С. 79-81.

127. Каратушин С. И. Моделирование остаточных напряжений при цементации / С. И. Каратушин, Д. В. Спиридонов, Ю. А. Плешанова // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 49-52.

128. Каратушин С. И. Напряженно-деформированное состояние при качении с противодействующим моментом / С. И. Каратушин, Н. А. Бильдюк, Ю. А. Плешанова // □ Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2013. – № 4(26). – С. 42-44.

129. Качество машин: справочник. В 2 т. Т. 2 / А. Г. Суслов, Ю. В. Гуляев, А. М. Дальский [и др.] – М.: Машиностроение, 1995. – 430 с.
130. Качество машин: справочник. В 2 т. Т. 1 / А. Г. Суслов, Э. Д. Браун, Н. А. Виткевич [и др.] – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
131. Кинетика и термо-динамика смазочного действия / Р. М. Матвеевский, И. А. Буяновский, В. Л. Лашхи [и др.] // Трение, износ и смазочные материалы: труды междунар. научн. конф., Ташкент, 1985. – М., 1985. – Т. 2. – С. 7-15.
132. Кинетика изнашивания контактных поверхностей при использовании добавки фуллерена C_{60} к моторному маслу / Н. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. А. Микосянчик, А. И. Куш // Трение и износ – 2009. – Т. 30, № 6. – С. 550-555.
133. Кламанн Д. К. Смазки и родственные продукты / Д. К. Кламанн. – М.: Химия, 1988. – 488 с.
134. Ковальский Б. И. Результаты испытания минерального моторного масла на температурную стойкость / Б. И. Ковальский, С. Б. Ковальский, А. В., А. В. Берко, Н. Н. Малышева // Известия Томского политехнического университета. – 2010 – Т. 316, № 2. – С. 46-50.
135. Когаев В. П. Прочность и износостойкость деталей машин / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. – М.: Высш.шк., 1991. – 319 с.
136. Коган А. С. Некоторые закономерности образования так называемого «аустенита трения» / А. С. Коган, Т. Т. Расс, Т. Я. Гораздовский // Теория смазочного действия и новые материалы. – М.: Наука, 1965. – С. 223-227.
137. Коллинз Д. А. Повреждение материалов в конструкциях: Анализ, предсказание, предотвращение / Дж. Коллинз; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 624 с.
138. Колубаев А. В. Формирование субструктуры поверхностного слоя при трении / А. В. Колубаев, В. Л. Попов, С. Ю. Тарасов // Изв. вузов. Физика. – 1997. – Т. 40. – № 2. – С. 89-95.

139. Копф И. А. Нестационарная термическая модель заедания и износа эвольвентных зубчатых передач / И. А. Копф, В. В. Корнилов, Е. В. Ефимов // Техника машиностроения. – 1998. – № 1 (15). – С. 54-59.

140. Костецкий Б. И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания / Б. И. Костецкий // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, № 4 – С. 57-68.

141. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, А. К. Караулов. – К.: Техніка, 1976. – 296 с.

142. Костецкий Б. И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении / Б. И. Костецкий // Проблемы трения и изнашивания. – 1986. – № 6. – С. 287-295.

143. Костецкий Б. И. Фундаментальные закономерности трения и износа / Б. И. Костецкий. – К.: РДЭНТП, 1981. – 30 с.

144. Костецкий Б. И. Поверхневая прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, А. К. Караулов. – К.: Техніка, 1976. – 296 с.

145. Кравчук А. С. Механика контактного взаимодействия тел с круговыми границами / А. С. Кравчук, А. В. Чигарев. – М.: Технопринт, 2000. – 197 с.

146. Крагельский И. В. Трение и износ: 2-е изд., перераб. и доп. / И. В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.

147. Крагельский, И. В. Узлы трения машины: справ. / И. В. Крагельский, Н. М. Михин. – М.: Машиностроение, 1983. – 320 с.

148. Кудрявцев В. Н. Детали машин / В. Н. Кудрявцев. – Л.: Машиноведение, 1980. – 464 с.

149. Кузин Н. О. Выбор критерия при оценке параметров прочности функционально-градиентных конструкций / Н. О. Кузин, Б. А. Ляшенко, В. П. Ламашевский // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – № 6/1 (26). – С. 4-8.

150. Кукареко В. А. Роль упрочняющих частиц в формировании трибологических свойств дисперсионно-твердеющего сплава ХН77ТЮР / В. А. Кукареко // Трение и износ. – 1999. – Т. 20, № 6. – С. 630-638.

151. Кулиев А. М. Химия и технология присадок к маслам и топливам / А. М. Кулиев. – Л.: Химия, 1985. – 312 с.

152. Ларсен-Бассе Коянаги. Износ твердых сплавов типа WC при работе по кварцевому абразиву / Ларсен-Бассе Коянаги // Проблемы трения и смазки. – 1979. – № 5. – С. 103–107.

153. Лейкин А. Е. Материаловедение / А. Е. Лейкин, Б. И. Родин. – М.: Высшая школа, 1971. – 416 с.

154. Лин Т. Х. Скрытая энергия упругой деформации, обусловленная остаточными напряжениями в пластически деформированном поликристалле / Т. Х. Лин, М. Ито // Труды Американского общества инженеров-механиков. – 1967. – С. 158-169.

155. Лосиков Б. В. Нефтепродукты. Свойства, качество, применение: справочник / под ред. Б. В. Лосикова. – М.: Химия, 1966. – 398 с.

156. Лотков А. И. Наноинженерия поверхности. Формирование неравновесных состояний в поверхностных слоях материалов методами электронно-ионно-плазменных технологий / А. И. Лотков [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 276 с.

157. Любарский И. М. Металлофизика трения / И. М. Любарский, Л. С. Палатник. – М.: Металлургия, 1976. – 176 с. – (Серия «Успехи современного материаловедения»).

158. Любарский И. М. Об обратимости структурных превращений при трении / И. М. Любарский // Теория смазочного действия и новые материалы. – М.: Наука, 1965. – С. 237-241.

159. Любарский И. М. Фазовые превращения на поверхности трения и их влияние на износостойкость сталей в вакууме / И. М. Любарский // Трение и износ. – Т. 1, № 2. – 1980. – С. 280-292.

160. Люты М. Методология создания смазочных материалов с наномодификаторами / М. Люты, Г. А. Костюкович, А. А. Скаскевич [и др.] // Трение и износ. – 2002. – № 4 (25). – С. 411-424.

161. Ляшенко Я. А. Прерывистый режим плавления граничной смазки с учетом пространственной неоднородности / Я. А. Ляшенко // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, № 7. – С. 1-7.

162. Ляшенко Я. А. Трибологическая система в режиме граничного трения под периодическим внешним воздействием / Я. А. Ляшенко // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, № 6. – С. 125-132.

163. Ляшенко Я. А. Трибологические свойства режимов сухого, жидкостного и граничного трения / Я. А. Ляшенко // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, № 5. – С. 115-121.

164. Ляшенко Я. А. Фазовые переходы между кинетическими режимами граничного трения: дис. ... докт. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Я. А. Ляшенко. – Сумы: СумГУ, 2016. – 325 с.

165. Ляшенко Я. А. Фазовый переход первого рода между жидкоподобной и твердоподобной структурами граничной смазки / Я. А. Ляшенко // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, вып. 1. – С. 19-28.

166. Ляшенко Я. А. Феноменологическая теория плавления тонкой пленки смазки между двумя атомарногладкими твердыми поверхностями / Я. А. Ляшенко, А. В. Хоменко, Л. С. Метлов // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, № 8. – С. 120-126.

167. Мамаев О. А. Исследование тепловых процессов и триботехнических свойств несмазываемых металлополимерных трибосистем / О. А. Мамаев, Ю. К. Машков, А. С. Рубан // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2008. – № 4. – С. 3-7.

168. Маринушкин Д. А. Повышение долговечности гипоидных передач применением твердых добавок к смазочному материалу: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02, 05.02.04 / Д. А. Маринушкин. – Красноярск, 2008. – 123 с.

169. Матвеевский Р. М. Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки / Р. М. Матвеевский, И. А. Буяновский, О. В. Лазовская. – М.: Наука, 1978. – 192 с.

170. Матейчик В. П. Визначення оптимальних регулювань автомобільного бензинового двигуна з відключенням групи циліндрів / В. П. Матейчик, А. К. Колодійчук, Н. Г. Куць // Автошляховик України. – 1998. – № 2 (окремий вип.). – С. 37-40.

171. Матейчик В. П. Наукові основи підвищення екологічної безпеки дорожніх транспортних засобів: дис. ... докт. техн. наук: 05.22.02/ В. П. Матейчик. – К.: Нац. транспортний ун-тет, 2004. – 405 с.

172. Матейчик В. П. Оцінка впливу регулювань системи живлення двигуна з відключенням групи циліндрів на показники автомобіля при русі за їздовим циклом / В. П. Матейчик, А. К. Колодійчук, Н. Г. Куць // Вісник ТАУ та УТУ. – К.: ТАУ, УТУ, 1998. – № 2. – С. 137-142.

173. Математична модель оцінки ефективності мащення механізмів з локальною формою контакту / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куш // Автошляховик України (окремий вип.). – Вісник Центр. наук. центру транспортної акад. України. – 2009. – № 12. – С. 133-134.

174. Мацкевич Д. В. Управление реологическими характеристиками моторных масел судовых дизелей / Д. В. Мацкевич // Проблемы техники. – 2013. – № 2 – С. 8.

175. Машков Ю. К. Трибология конструкционных материалов: учеб. пособие / Ю. К. Машков. – Омск: ОмГТУ, 1996. – 304 с.

176. Машков Ю. К. Трибофизика металлов и полимеров: монография / Ю. К. Машков. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – 240 с.

177. Медеяев И. А. Особенности схватывания металлов при трении и изнашивании в условиях граничной смазки / И. А. Медеяев, А. Ю. Албагачиев // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. – 2007. – № 6. – С. 28-44.

178. Медеяев, И. А. Научное обоснование технических решений по управлению изнашиванием в условиях граничного трения / И. А. Медеяев // Вестник машиностроения. – 2008. – № 11. – С. 37-42.

179. Мерзляков А. А. Моделирование теплового режима в металлополимерной трибосистеме поршневое кольцо-цилиндр / А. А. Мерзляков, Ю. К. Машков // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 6. – С. 981-985.

180. Методы контроля и диагностики эксплуатационных свойств смазочных материалов по параметрам термоокислительной стабильности и температурной стойкости: монография / Ю. Н. Безбородов, Б. И. Ковальский, Н. Н. Малышева [и др.]. – Красноярск: Сиб.федер.ун-т, 2011. – 366 с.

181. Механизм образования вторичных структур в процессе трения и износа / С. Г. Агбалян, Г. Х. Карапетян, А. А. Петросян, А. С. Агбалян // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. – 2010. – Т. LXIII, № 2. – С. 139-147.

182. Механизм формирования защитного граничного смазочного слоя / Б. И. Ковальский, В. Г. Шрам, О. Н. Петров, А. Н. Сокольников // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: ТулГУ, 2014. – Вып. 3. – С. 26-32.

183. Механика пластической деформации и разрушения поверхностно упрочненных твердых тел в условиях трения / П. А. Витязь, В. Е. Панин, А. В. Белый, А. В. Колубаев // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5, № 1. – С. 15-28.

184. Механізм зношування Ст45 при додаванні до мастильного матеріалу бутилкаучуку / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, Ю. О. Туриця // Машинознавство. – 2009. – № 11 (149). – С. 36-38.

185. Микосянчик О. О. Влияние переменного градиента скорости сдвига на реологические и противоизносные свойства контакта в режиме пуск – остановка / О. А. Микосянчик // Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип. 3 (98), ч. 1. – С. 48-55.

186. Микосянчик О. О. К вопросу выбора методики установления функциональных взаимосвязей трибопроцессов при экспериментальном исследовании

пар трения с локальным контактом / О. О. Мікосянчик, Н. О. Кузин // Проблеми тертя та зношування. – 2016. – № 4 (73). – С. 4-12.

187. Миронов А. Е. Особенности структурной самоорганизации бронзовых деталей локомотивов / А. Е. Миронов // Вестник ВНИИЖТ. – 1999. – № 2. – С. 24-26.

188. Мікосянчик О. О. Автоматизований триботехнічний комплекс для оцінки змащувальних процесів в парах тертя / О. О. Мікосянчик, О. І. Запорожець, Р. Г. Мнацаканов // Проблеми трибології. – 2015. – № 4 (78). – С. 42-48.

189. Мікосянчик О. О. Вплив контактного навантаження на антифрикційні властивості базових олів / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, М. С. Хімко, М. А. Петренко // Авіа-2015: XII Міжнародної наук.-техн. конф., 28-29 квітня 2015, Київ: матеріали. – К.: НАУ, 2015. – С. 25-28.

190. Мікосянчик О. О. Износостойкость покрытия стали на чугуна в условиях качения с проскальзыванием / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов // Трибологія, енергетика та ресурсозбереження: міжнарод. наук.-практ. конф. в рамках X Міжнар. наук.-практ. конф. „Ольвійський форум-2016”, 9-12 червня 2016 р., Миколаїв, Коблево, Україна: тези доп. – Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2016. –Т. 12 – С. 31-33.

191. Мікосянчик О. О. Кінетика зміни мікротвердості поверхневих шарів металу при адаптації граничних адсорбційних шарів мастильного матеріалу в зоні контакту / О. О. Мікосянчик // Проблеми тертя та зношування. – 2013. – № 2 (61). – С. 56-61.

192. Мікосянчик О. О. Моделювання інтенсивності зношування гільзи циліндра двигуна внутрішнього згорання / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, М. С. Хімко // Проблеми тертя та зношування. – 2015. – № 1 (66). – С. 140-145.

193. Мікосянчик О. О. Нестационарні процеси як фактор припрацювання пар тертя / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, С. В. Шакулів // Технічна творчість: зб. наук. праць (вип. присвячено Міжнародній наук.-техн. конф. молодих науковців «Сучасні технології в механіці», 21-23 квітня 2016 р., м. Хмельницький. – Хмельницький: ХНУ, 2016. – № 1. – С. 101-103.

194. Мнацаканов Р. Г. Визначення впливу трибологічних процесів на міцнісні характеристики приповерхневих шарів контактних поверхонь / Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, Ю. О. Туриця // Ольвійський форум-2012: стратегії України в геополітичному просторі: міжнар. наук.-практ. конф., 6-10 червня 2012 р., Севастополь, Крим, Україна: тези доп. – Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2012. – Т. 12. – С. 24-25.

195. Модифікація поверхонь тертя чавун-сталь нанодисперсною добавкою фулерен C_{60} / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, С. С. Кроль, О. О. Мікосянчик // Дороги і мости: зб. наук. статей. – К. : ДерждорНДІ, 2006. – Вип. 5. – С. 312-320.

196. Морозов Е. М. Контактные задачи механики разрушения / Е. М. Морозов. – М.: Машиностроение, 1999. – 544 с.

197. Муравьева Т. И. Методология структурных исследований поверхности контакта / Т. И. Муравьева, И. И. Курбаткин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13, № 4 (3). – С. 1144-1147.

198. Мышкин Н. К. Трибология полимеров: трение, изнашивание, адгезия и фрикционный перенос (обзор) / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец, А. В. Ковалев // Трение и износ. – 2006. – Т. 17, № 4. – С. 429-431.

199. Неравновесная кинетика фазовых переходов в режиме граничного трения / Я. А. Ляшенко, Л. С. Метлов, А. В. Хоменко, С. Н. Чепульский // Трение и износ. – 2012. – № 4 (Т. 33). – С. 330-341.

200. Носко Л. Математическое моделирование трибологических систем (применительно к тормозным устройствам птм) / Л. Носко, А. П. Носко // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2006. – № 1. – С. 83-98. – (Сер. “Машиностроение”).

201. Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости / Б. А. Ляшенко, Е. К. Соловых, В. И. Мирненко [и др.]; под ред. В. В. Харченко. – К.: Ин-т проблем прочности, 2010. – 193 с.

202. Ориентационная упорядоченность граничных слоев и смазочная способность масел / И. А. Буяновский, З. В. Игнатьева, В. А. Левченко [и др.] // Трение и износ. – 2008. – Т. 29, № 4. – С. 375-381.

203. Орлов А. В. Испытания конструкционных материалов на контактную усталость / А. В. Орлов, О. Н. Черменский, В. М. Нестеров. – М.: Машиностроение, 1980. – 110 с.

204. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учеб. для техн. вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше [и др.]; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2001. – 664 с.

205. Оценка структурно-энергетических показателей пар трения при работе в режиме пуск – остановка / О. О. Микосянчик, Р. Г. Мнацаканов, А. Ю. Кумурджи, С. В. Шакулієв // Проблеми тертя та зношування. – 2016. – № 1 (70). – С. 11-20.

206. Оценка температур на фактических пятнах контакта в условиях двигателя внутреннего сгорания / В. Г. Новиков, В. И. Пикус, Б. С. Стефановский, Т. А. Липанова // Двигатели внутреннего сгорания. – Ярославль, 1976. – С. 63-67.

207. Оценка энергетических, реологических и противоизносных характеристик контакта в условиях качения с переменным скольжением / О. А. Микосянчик, Р. Г. Мнацаканов, В. И. Калиниченко, А. В. Куцев // Проблеми трибології. – 2016. – № 3 (81). – С. 6-14.

208. Оценка энергии активации процесса химического модифицирования поверхностей трения в условиях граничной смазки / Р. М. Матвеевский, И. А. Буяновский, В. Л. Лахши [и др.] // Химия и технология топлив и масел. – 1976. – № 2. – С. 50-52.

209. Оцінка динамічної ефективної в'язкості мастильних матеріалів в триботехнічному контакті / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, М. В. Кіндрачук, М. С. Хімко // Проблеми тертя та зношування. – 2014. – № 4 (65). – С. 83-89.

210. Панасюк В. В. Основы механики разрушения материалов Т. 1 / В. В. Панасюк, А. Е. Андрейкив, В. З. Партон. – К.: Наук. думка, 1988. – 488 с.

211. Панин В. Е. Поверхностные слои нагруженных твердых тел как мезоскопический структурный уровень деформации / В. Е. Панин // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т. 4, № 3. – С. 5-22.

212. Панин В. Е. Современные проблемы пластичности и прочности твердых тел / В. Е. Панин // Известия вузов. Физика. – 1998. – Т. 41, № 1. – С. 7-34.

213. Панин В. Е. Физическая мезомеханика поверхностных слоев твердых тел / В. Е. Панин // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2, № 6. – С. 5-23.

214. Паршев С. Н. Испытание металлов на усталостное изнашивание: метод. указания к лабораторной работе / С. Н. Паршев. – Волгоград: Изд-во ИУНЛ ВолгГТУ, 2010. – 16 с.

215. Пат. № 216645 РФ. Способ оценки энергии активации разрушения материала поверхностного слоя деформированного трением / Громаковский Д. Г., Беленьких Е. В., Ибатуллин И. Д. [и др.]; опубл. 10.05.2001.

216. Пат. 88748, Україна, МПК G01N 3/56. Пристрій для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів / Мікосянчик О. О.; заявник та патентовласник Мікосянчик О. О. – № u 2013 13450; заявл. 19.11.2013; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6. – 4с.

217. Пат. 89261, Україна, МПК G01N 11/00. Спосіб оцінки динамічної ефективності в'язкості мастильних матеріалів в триботехнічному контакті / Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Кіндрачук М. В.; заявник та патентовласник Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Кіндрачук М. В. – № u 2013 14086; заявл. 04.12.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7. – 4 с.

218. Пат. 92071, Україна, МПК G01N 3/56. Спосіб припрацювання пар тертя в нестационарних умовах роботи / Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко М. С.; заявник та патентовласник Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко М. С. – № u 2014 02492; заявл. 13.03.2014; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14. – 4 с.

219. Пат. 98452, Україна, МПК G23C 14/00. Спосіб отримання твердого покриття з підвищеним опором втомному руйнуванню на поверхні металевого виробу / Кіндрачук М. В., Духота О. І., Кудрін А. П., Тісов О. В., Мікосянчик О. О., Науменко Н. О.; заявник та патентовласник Кіндрачук М. В., Духота О. І., Кудрін А. П., Тісов О. В., Мікосянчик

О. О., Науменко Н. О. – № и 2014 12654; заявл. 25.11.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8. – 6 с.

220. Патент № 2166745, РФ. Способ оценки энергии активации разрушения материала поверхностного слоя, деформированного трением / Громаковский Д. Г., Беленьких Е. В., Ибатуллин И. Д., Ковшов А. Г. [и др.]; заявитель и патентообладатель Самарский государственный технический университет (RU) – 97109187/28; заявл. 28.05.1997; опубл. 10.05.2001. – 6 с.

221. Перевірка адекватності математичної моделі руху дорожнього транспортного засобу за їздовим циклом при роботі на природному газі / Ю. Ф. Гутаревич, В. П. Матейчик, Р. В. Сидоренко, В. В. Яновський // Вісник НТУ і ТАУ. – К.: НТУ, ТАУ, 2002. – № 6. – С. 300-304.

222. Перель Л. Я. Подшипники качения: справочник / Л. Я. Перель, А. А. Филатов. – М.: Машиностроение, 1992. – 608 с.

223. Пинегин С. В. Трение качения в машинах и приборах / С. В. Пинегин. – М.: Машиностроение, 1976. – 264 с.

224. Підвищення надійності трансмісії автомобіля шляхом оптимізації робочих параметрів зони контакту / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. В. Руденко // Вісник: наук.-техн. зб. – К.: НТУ, 2007. – № 14. – С. 5-8.

225. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, А. К. Караулов [та ін.]. – К.: Техника, 1976. – 292 с.

226. Повышение износостойкости деталей поверхностным пластическим деформированием с помощью ультразвуковых крутильных колебаний / Г.А. Осипенкова, В.Ф. Пегамник // Вестник машиностроения. – 2009. – №2. – С 74-76.

227. Повышение эффективности обработки поверхностей деталей применением ультразвукового поля / Д. П. Клочкив, О. В. Бурлаченко // Изв. Волгогр. гос. техн. ун-та. Сер.: Прогрессивные технологии в машиностроении. – 2009. – Т. 8, № 5. – С. 8-9.

228. Повышение износостойкости узлов трения применением композиционных смазок с гетерогенной структурой / О. В. Лебедев, О. М. Пономарева, Р. Р. Хакимзянов,

Г. К. Аннакулова [и др.] // Научн. журнал Братского гос. университета: Системы. Методы. Технологии. – 2009. – № 2. – С. 20-23.

229. «ПОЛЕМА» АО [Электронный ресурс]. URL: <http://www.polema.net>

230. Получение покрытий высокотемпературным распылением: сб. статей / под ред. Л. К. Дружинина, В. В. Кудинова. – М.: Атомиздат, 1973. – 312 с.

231. Поляков С. А. Обоснование метода подбора сочетаний триботехнических материалов при использовании избирательного переноса / С. А. Поляков, А. А. Поляков // Трение и износ. – 1983. – Т. 4, № 1. – С. 121-131.

232. Попов В. Л. Анализ механизмов формирования поверхностных слоев при трении / В. Л. Попов, А. В. Колубаев // Трение и износ. – 1997. – Т. 18. – № 6. – С. 818-826.

233. Попов В. Л. Термодинамика и кинетика плавления сдвигом тонкого слоя смазки, заключенного между твердыми телами / В. Л. Попов // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71, № 5. – С. 100-110.

234. Порівняльні реологічні характеристики мінеральних і синтетичних масел / В. І. Маленко, Р. Г. Мнацаканов, О. Є. Якобчук, О. О. Мікосянчик // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2006. – Вип. 45. – С. 170-178.

235. Порохов В. С. Трибологические методы испытания масел и присадок / В. С. Порохов. – М.: Машиностроение, 1983. – 183 с.

236. Праведников И. С. Контактное взаимодействие твердых тел с учетом давления, температуры и твердости / И. С. Праведников [Электронный ресурс] // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2005. – № 1. – URL: http://www.ogbus.ru/authors/Pravednikov/Pravednikov_2pdf.

237. Приходько В. М. Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами: монография / В. М. Приходько, И. А. Медеяев, Д. С. Фатюхин. – М.: МАДИ, 2015. – 264 с.

238. Проблема оценки износа сопряжений зубчатых колес транспортных машин и энергетического оборудования / А. В. Баранов, В. А. Вагнер, С. В. Тарасевич [и др.] // Ползуновский вестник. – 2010. – № 1. – С. 99-105.

239. Проектирование механизмов и приборов / К. И. Заблонский, М. С. Беляев, И. Я. Телис, С. И. Филипович [и др.]. – К. :Вища школа, 1971. – 520 с.

240. Проников А. С. Надежность и долговечность машин и оборудования (опыт и теоретические исследования) / А. С. Проников. – М.: Издательство стандартов, 1972. – 314 с.

241. Прохоров В. П. Алгоритм анализа эволюции геометрии зубчатых передач с плоским зацеплением при износе / В. П. Прохоров, Г. А. Тимофеев, И. Н. Чернышёва // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2014. – № 12. – С. 7-12.

242. Прохоров В. П. Эволюция плоского эвольвентного зацепления при износе от истирания / В. П. Прохоров, Г. А. Тимофеев, И. Н. Чернышёва // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – № 2 (659). – С. 14-21.

243. Прудников М. И. Метод триботехнических испытаний цилиндрических поверхностей трения / М. И. Прудников // Вестн. БГТУ. – 2008. – № 2. – С.48-56.

244. Радченко С. Г. Устойчивые методы оценивания статистических моделей / С. Г. Радченко. – К.: Санспарель, 2005. – 504 с.

245. Райко М. В. Исследование смазочного действия нефтяных масел в условиях работы зубчатых передач: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.04 / М. В. Райко – К.: КИИГА, 1974. – 369 с.

246. Райко М. В. Смазка зубчатых передач / М. В. Райко. – К.: Техника, 1970. – 196 с.

247. Расчет на прочность деталей машин. Справочное пособие для конструкторов / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Р. М. Шнейдерович [и др.]. – М.: ГНТИМЛ, 1959. – 460 с.

248. Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избр. труды / П. А. Ребиндер. – М.: Наука, 1979. – 384 с.

249. Регель В. Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. И. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
250. Регель В. Р. Кинетическая теория прочности / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер // Физика сегодня и завтра. – Л.: Наука, 1973. – С. 90-175.
251. Регель В. Р. О кинетике механического и электрического разрушения / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер. – К 90-летию С. Н. Журкова. – СПб.: ФТИРАН, 1995. – С. 14-20.
252. Регель В. Р. Структурно-динамическая гетерогенность – основа физикиразрушения твердых тел / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер // Соросовский образовательный журнал. – Т. 8, № 1. – 2004. – С. 86-92.
253. Реологічні властивості змашувальних шарів та енергонавантаженисть в контактї тертя при змінних контактних напругах / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, М. С. Хімко, С. В. Шакулієв // Проблеми тертя та зношування. – 2015. – № 4 (69). – С. 140-145.
254. Рыбакова Л. М. Структура и износостойкость металла / Л. М. Рыбакова, Л. И. Куксенова. – М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.
255. Сагин С. В. Исследование корреляционной взаимосвязи жидко-кристаллических свойств граничных смазочных слоев и реологических характеристик моторных масел судовых дизелей / С. В. Сагин // Судовые энергетические установки. – 2014 – № 33. – С. 67-76.
256. Самоорганизация вторичных структур при трении / И. С. Гершман, Н. А. Буше, А. Е. Миронов, В. А. Никифоров // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 3. – С. 329-334.
257. Самоорганизация смазочных слоев при граничном трении / С. В. Короткевич, С. М. Мартыненко, В. В. Кравченко, М. В. Парамонов // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – Гомель: ГГТУ имени П.О. Сухого, 2004. – № 4 (17). – С. 13-16.
258. Сахно В. П. Економічні та екологічні показники автомобіля з різними типами двигунів / В. П. Сахно, В. П. Матейчик, О. П. Сітовський // Автошляховик України. – 2001. – № 4 (окремий вип.). – С. 27-30.

259. Свідоцтво 38664. Методика розрахунку триботехнічних параметрів парковання двигуна внутрішнього згоряння / Мікосянчик О. О.; заявник та власник Національний транспортний університет. – № 38824, заявл. 31.03.2011; зареєстровано 21.06.2011. – 2 с.

260. Свідоцтво про внесення суб'єкта підприємницької діяльності до Реєстру виробників та розповсюджувачів програмного забезпечення ВР № 01059 Україна. Математична модель розрахунку робочого процесу двигуна з іскровим запалюванням, електронним управлінням та системою нейтралізації і рециркуляції відпрацьованих газів / В. П. Матейчик, М. П. Цюман, С. А. Левківський, А. Б. Сінкевич (Україна). – Зареєстр. 16.04.2009.

261. Свідоцтво про внесення суб'єкта підприємницької діяльності до Реєстру виробників та розповсюджувачів програмного забезпечення ВР № 01152 Україна. Програма розрахунку індикаторних показників циклу і характеристик тепловиділення за експериментальними індикаторними діаграмами двигуна внутрішнього згоряння / В. П. Матейчик, М. П. Цюман (Україна). – Зареєстр. 22.12.2009.

262. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 31962 Україна. Комп'ютерна програма «Математична модель розрахунку робочого процесу двигуна з іскровим запалюванням, електронним управлінням та системою нейтралізації і рециркуляції відпрацьованих газів» / В. П. Матейчик, М. П. Цюман (Україна). – № 32115; заявл. 07.12.2009; зареєстр. 05.02.2010.

263. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 32176 Україна. Науковий твір «Розрахунок індикаторних показників циклу і характеристик тепловиділення за експериментальними індикаторними діаграмами двигуна внутрішнього згоряння» / В. П. Матейчик, М. П. Цюман (Україна). – № 32325; заявл. 24.12.2009; зареєстр. 24.02.2010.

264. Сдвиговая пластическая деформация и износостойкость ионно-модифицированных материалов с твердыми слоями / А. В. Белый, В. А. Кукареко, В. Е. Рубцов, А. В. Колубаев // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5, № 1. – С. 51-57.

265. Семенов Ю. С. Изменение параметров зубчатого зацепления при износе / Ю. С. Семенов // Известия Томского политехн. института им. С. М. Кирова. – 1961. – Т. 96. – С. 171-175.

266. Синтез плоских зацеплений по критерию относительной скорости точки контакта / В. П. Прохоров, В. А. Щипаков, Г. А. Тимофеев, И. Н. Чернышёва // Вестник Севастопольского национального технического университета: сб. науч. тр. – 2012. – № 133. – С. 306–311. – (Сер. «Механика, энергетика, экология»).

267. Скаков М. К. Изменения микроструктуры и микротвердости поверхностных слоев стали 30ХГСА, модифицированных электролитно-плазменной цементацией / М. К. Скаков, Л. Г. Журерова // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: в 2-х ч. Ч. 2: материалы 15-й Междунар. научн.-практ. конф. – Санкт-Петербург, 2013. – С. 259-263.

268. Скрэтч-анализ формирования подповерхностных слоев при трении термообработанной стали / В. В. Шевеля, В. П. Олександренко, А. С. Трытек, Ю. С. Соколан // Проблемы трибології. – 2015. – № 2. – С. 6-18.

269. Совершенствование метода фрикционно-электрического модифицирования стальных поверхностей трения деталей машин / В. Р. Эдигаров, Г. Г. Макаров, И. В. Гусев, Б. Ш. Алимбаева // Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-техн. конф. – Брянск: БГИТА, 2010. – №11. – С. 131-134.

270. Современные технологии и долговечность поверхностей трения при усталостном механизме изнашивания / Д. Г. Громаковский, В. А. Горохов, Г. А. Кулаков [и др.] // Трение и смазка в машинах и механизмах. – Вып. 3. – 2006. – С. 11-20.

271. Соколан Ю. С. Влияние термообработки стали на реолого-диссипативные свойства и износостойкость трибосистем: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / Ю. С. Соколан. – Хмельницкий, 2016. – 217 с.

272. Солодова И. Л. Структурные превращения при трении и износостойкость закаленных углеродистых сталей: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / И. Л. Солодова. – Екатеринбург, 2006. – 154 с.

273. Сорокатый Р. В. Метод трибоэлементов: монография / Р. В. Сорокатый. – Хмельницкий: ХНУ, 2009. – 242 с.

274. Сорокатый Р. В. Моделирование поведения трибосистем методом трибоэлементов / Р. В. Сорокатый // Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 1. – С. 16-22.

275. Сорокин Г. М. Некоторые аспекты выбора и создания износостойких металлических материалов для условий абразивного изнашивания / Г. М. Сорокин, А. Ю. Албагачиев, И. А. Медеяев // Трение и износ. – 1990. – Т. 11, № 5. – С. 773-781.

276. Способ получения износостойких покрытий / М. И. Черновол, Т. В. Ворона, О. О. Микосянчик, Л. А. Лопата, В. И. Жорник // Инженерия поверхности и реновация изделий: 15-я международ. науч.-техн. конф., 1-5 июня 2015 г., Одесская обл., Затока: тезисы докл. – К., 2015 – С. 206-208.

277. Степанов В. А. Кинетика хрупкого разрушения твердых тел и возможность его прогнозирования для статического и циклического нагружения / В. А. Степанов, В. В. Шпейзман, Л. В. Жога // ФХММ. – 1979. – Т. 15, № 2. – С. 20-26.

278. Степанов В. А. Прочность и релаксационные явления в твердых телах / В. А. Степанов, Н. Н. Песчанская, В. В. Шпейзман. – Л.: Наука, 1984. – 246 с.

279. Степанов В. А. Температурно-временные зависимости прочности твердых тел в хрупком состоянии / В. А. Степанов, В. В. Шпейзман, Л. В. Жога // ФХММ. – 1976. – Т. 42, № 5. – С. 1068-1074.

280. Структура и свойства стали 30ХГСА после лазерно-плазменного азотирования и наноструктурирования / М. Д. Павлов, В. В. Чердынцев, А. А. Степашкин, В. Д. Данилов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 62.

281. Структурно-фазовые превращения в покрытиях из сталей ферритного и мартенситного классов при их напылении и модифицировании электроконтактной обработкой / М. И. Черновол, Т. В. Ворона, Е. Е. Кожевникова, О. А. Микосянчик, Л. А. Лопата // Проблеми тертя та зношування. – 2015. – № 2 (67). – С. 99-109.

282. Суслов А. Г. Инженерия поверхности деталей – резерв в повышении конкурентоспособности машин / А. Г. Суслов // Инженерия поверхности. Пр. к журналу «Справочник. Инженерный журнал». – М.: Машиностроение. – 2001. – № 4. – С. 3-9.

283. Суслов А. Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей машин, технологической оснастки и инструментов / А. Г. Суслов // Инженерный журнал. – 2000. – № 1. – С. -13.

284. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь, В. С. Ивашко, А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Мн.: Беларуская навука, 1998. – 583 с.

285. Тихомиров В. П. Методы моделирования процессов в трибосистемах / В. П. Тихомиров, О. А. Горленко, В. В. Порошин: уч. Пособие. – М.: МГИУ, 2004. – 292 с.

286. Тихомиров В. П. Нейросетевые модели в трибологии / В. П. Тихомиров, П. Ю. Шалимов // Трение и износ. – 2000, Т. 21, № 3. – С. 246-251.

287. Тихомиров В. П. Прогнозирование ресурса зубчатых передач / В. П. Тихомиров, О. А. Горленко, П. В. Тихомиров: монография. – М.: Машиностроение, 2007. – 148 с.

288. Тихомиров В. П. Трибология: уч. пособие / В. П. Тихомиров, О. А. Горленко, В. В. Порошин. – М.: МГИУ, 2002. – 224 с.

289. Тодер И. А. Об образовании вторичных структур при трении металлополимера со сталью / И. А. Тодер, Н. А. Буше, С. М. Захаров [и др.] // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2009. – № 2. – С. 38-45.

290. Тодер И. А. Синергетические процессы в парах трения с использованием композиционного полиуретана / И. А. Тодер, А. Е. Миронов, Т. Ф. Маркова // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2007. – № 1. – С. 27-30.

291. Трение и модифицирование материалов трибосистем / Ю. К. Машков, К. Н. Полещенко, С. Н. Поворознюк, П. В. Орлов. – М.: Наука, 2000. – 280 с.

292. Трение, изнашивание и смазка: справочник. В 2-х кн. Кн. 1 / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978. — 400 с.

293. Трубин Г. К. Контактная усталость материалов для зубчатых колес / Г. К. Трубин. – М.: Машгиз, 1962. – 404 с.

294. Усовершенствованная модель реологических свойств граничного слоя смазки / И. В. Мухортов, Н. А. Усольцев, Е. А. Задорожная, И. Г. Леванов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – № 5. – С. 8-19.

295. Федоров В. В. Кинетика повреждаемости и разрушения материалов / В. В. Федоров. – Ташкент: ФАН, 1985. – 175 с.

296. Федоров В. В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел / В. В. Федоров. – Ташкент: ФАН, 1979. – 168 с.

297. Физическое металловедение Т. 3: Физико-механические свойства металлов и сплавов / под ред. Р. У. Кана, П. Т. Хаазена: пер. с англ. – М.: Металлургия, 1987. – 663 с.

298. Фридель Ж. Дислокации / Ж. Фридель. – М.: Мир, 1967. – 643 с.

299. Хайнике Г. Трибохимия / Г. Хайнике. – М.: Машгиз, 1987. – 533 с.

300. Характер и причины разрушения шестерён дорожно-строительных и сельскохозяйственных машин / С. И. Бондаренко, В. А. Карпенко, Е. А. Нестеренко, Л. В. Пирогова // Вестник ХНАДУ, 2011. – Вып. 54. – С. 127-133.

301. Харламов Ю. А. Основы технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ю. А. Харламов, И. А. Будагьянц. – Луганськ: СУНУ ім. Володимира Даля, 2003. – 495 с.

302. Хоменко А. В. Статистическая теория граничного трения атомарно-гладких твердых поверхностей при наличии смазочного слоя / А. В. Хоменко, Я. А. Ляшенко // Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182, № 10. – С. 1083-1110.

303. Хрущов М. М. Абразивное изнашивание / М. М. Хрущов, М. А. Бабичев. – М.: Наука, 1970. – 252 с.

304. Черменский О. Н. Накопление усталостных повреждений в опорах качения / О. Н. Черменский // Пробл. машиностр. и надеж. машин. – 1996. – № 5. – С. 44-49.

305. Черножуков Н. И. Технология переработки нефти и газа / под ред. А. А. Гуреева, Б. И. Бондаренко. Ч. 3. – 6-е изд. – М.: Химия, 1978. – 424 с.
306. Чичинадзе А. В. Материалы в триботехнике нестационарных процессов / А. В. Чичинадзе, Р. М. Матвеевский, Э. Д. Браун. – М.: Наука, 1986. – 248 с.
307. Чичинадзе А. В. Трение, износ и смазка / под ред. А. В. Чинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
308. Чумичев А. А. Ускорение процесса приработки пар трения металл – металл за счет использования состава на основе неорганического полимера: дис. на соискание ученой степени кандидата техн. наук: 05.02.04 / А. А. Чумичев. – К.: КИИГА, 1974. – 369 с.
309. Шаблій О. Дослідження мікроструктури і властивостей наплавленого металу, отриманого при індукційному нагріванні / О. Шаблій, Ч. Пулька // Вісник ТДТУ. – 2009. – Т. 14, № 1. – С. 46-55.
310. Шалобаев Е. В. Микросистемная техника и тенденции развития современной трибологии / Е. В. Шалобаев // Микросистемная техника. – 2003. – № 9. – С. 26-27.
311. Шевеля В. В. Трибохимия и реология износостойкости / В. В. Шевеля, В. П. Олександренко. – Хмельницкий: ХНУ, 2006. – 278 с.
312. Шимкович Д. Г. Расчет конструкций MSC/NASTRAN for Windows [Текст] / Д. Г. Шимкович. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 448 с.
313. Шпеньков Г. П. Физико-химия трения / Г. П. Шпеньков. – [2-е изд.]: Минск: Университетское, 1991. – 397 с.
314. Шульц В. В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента / В. В. Шульц. – Л.: Машиностроение, 1990. – 217 с.
315. Экспериментальная оценка активационных параметров повреждаемости и разрушения деформируемых поверхностей / Д. Г. Громаковский, А. Г. Ковшов, М. В. Карпухин, С. В. Шигин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 4(3). – 709-712.

316. Экспериментальная установка для исследования поверхностной энергии металлов и сплавов / Г. М. Сорокин, А. Ю. Албагачиев, И. А. Медеяев, В. А. Коркин // Трение и износ. – 1986. – Т. 7, № 6. – С. 98-984.

317. Электроискровая обработка инструментальных сталей порошковыми самофлюсующимися сплавами типа ПГ-СР / В. Н. Гадалов, Е. В. Павлов, И. В. Павлов [и др.] // Медико-экологические информационные технологии-2004: сб. материалов VII межд. научн.-техн. конф., 2004 г., 25-26 мая. – Курск: КГТУ, 2004. – С. 202-206.

318. Эффекты локализации деформации в композитах на основе Al с включениями Al_2O_3 / Е. Е. Дерюгин, В. Е. Панин, З. Шмаудер, И. В. Стороженко // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т. 4, № 3. – С. 35-47.

319. Якубов Ф. Я. К термодинамике упрочнения и изнашивания режущего инструмента / Ф. Я. Якубов, В. А. Ким, С. М. Тимофеев // Резание и инструмент в технологических системах. – Вып. 50. – Харьков: ХГПУ, 1996. – С. 211-216.

320. Якубов Ф. Я. Синергетика и процессы самоорганизации при трении и изнашивании / Ф. Я. Якубович // Сучасні технології в машино-будуванні: зб. наук. пр. – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – Вип. 5. – С. 122-133.

321. Яхьяев Н. Я. Влияние параметров рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания на износ втулок цилиндров / Н. Я. Яхьяев // Трение и износ. – 2002. – № 5. – С. 571-574.

322. A fracture mechanics model for the analysis of micro-pitting in regard to lubricated rolling–sliding contact problems / B. Zafosnik, S. Glodez, M. Ulbin, J. Flasket // International J. Fatigue. – 2007. – Vol. 29. – P. 1950-1958.

323. Abdel-Aal H. A. On the role of intrinsic material response in failure of tribo systems / H. A. Abdel-Aal // Wear. – 2005. – Vol. 259. – P. 1372-1381.

324. Advanced Theory of Mechanisms and Machines / M. Z. Kolovsky, A. N. Evgrafov, Y. A. Semenov, A. V. Slousch. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2000. – 396 p.

325. Akira Y. Study on pitting of surface rolled steel rollers. 2. In the case of steel rollers surface-rolled under stiding-rolling condition / Y. Akira, F. Kmei. // J. JSLE. Int. Ed. – 1988. – № 9. – P. 35-40.

326. Al-quraan Tareq M. A. Temperature Resistance of the Boundary Lubrication Layers Under Rolling With Slippage Condition / Tareq M.A. Al-quraan, O.O. Mikosyanchik, R.G. Mnatsakanov // International Journal of Mechanical Engineering and Applications. – 2017. – Vol. 5, № 2. – P. 78-86.

327. Al-quraan Tareq M. A. The Effect of the Slippage Degree at Rolling with Slipping on the Wear Resistance of Contact Surfaces / Tareq M.A. Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov // Mechanical Engineering Research. – 2016. – Vol. 6, № 2. – P. 48-61.

328. An energy-based model for the wear of UHMWPE / R. Colaco, M. P. Gispert, A. P. Serrob, B. Saramago // Tribol. Lett. – 2007. – Vol. 26. – P. 119-124.

329. Analytical model for predicting friction coefficient in point contacts with thermal elastohydrodynamic lubrication / J. Echávarri, P. Lafont, E. Chacón [et al.] // Proceedings IMechE Part J. Journal of Engineering Tribology. – 2011. – Vol. 225. – P. 181-191.

330. Analytical model for predicting friction in line contacts / Echávarri Otero, J., de la Guerra Ochoa, E., Chacón Tanarro [et al.] // Lubrication Science. – 2016. – Vol. 28. – P. 189-205. Doi:[10.1002/ls.1325](https://doi.org/10.1002/ls.1325)

331. Assessment of oxide scales influence on wear damage of HSM work rolls / O. Joos, C. Boher, C. Vergne [et al.] // Wear. – 2007. – Vol. 263. – P. 198-206.

332. Bayati M. R. Surface alloying of carbon steels from electrolytic plasma / M. R. Bayati, R. Molaei, K. Janghorban // Metal Science and Heat Treatment. – 2011. – Vol. 53. – P. 91-94.

333. Bernd N. Beanspruchungen von Wälzelementen in oberflächennahen Randschichten / N. Bernd // VDI-Zeitschrift. – 1983. – Vol. 125, № 23-24. – P. 979-987, XIX.

334. Blencoe K. A. The influence of lubricant rheology and surface topography in modelling friction at concentrated contacts, Proceedings of the Institution of Mechanical

Engineers Part J / K. A. Blencoe, G. W. Roper, J. Williams // *J. Engineering Tribology*. – 1998. – Vol. 212, № J6. – P. 391-400.

335. Blok H. “Seizure-delay method for determining the seizure protection of E.P. lubricants / H. Blok // *SAE J. (Trans.)*. – 1939. – Vol. 44, № 5. – P. 193.

336. Bordarier P. Stick-slip phase transitions in confined solidlike films from an equilibrium perspective / P. Bordarier, M. Schoen, A. Fuchs // *Physical Review E*. – 1998. – Vol. 57, № 2. – P. 1621-1635.

337. Bowden F. P. Friction and lubrication of solids / F. P. Bowden, D. Tabor. – Oxford, 1950. – 199 p.

338. Bowden F. P. The friction and lubrication of solids. Part II / F. P. Bowden, D. Tabor. – Oxford, 1964. – P. 370.

339. Brenner D. W. Empirical potential for hydrocarbons for use in simulating the chemical vapordeposition of diamond films / D. W. Brenner // *Physical Review B – Condensed Matter*. – 1990. – Vol. 42, № 15. – P. 9458-9471.

340. Bridgman P. W. The physics of high pressure / P. W. Bridgman. – New York, NY: Macmillan Press, 1931. – 398 p.

341. Briscoe B. J. Microscopic origins of the interface friction of organic films: the potential of vibrational spectroscopy / B. J. Briscoe, P. S. Thomas, D. R. Williams // *Wear*. – 1992. – Vol. 153. – P. 263.

342. Briscoe B. J. The shear strength of thin lubricant films, *Proceedings of the Royal Society of London Series a* / B. J. Briscoe, B. Scruton, F. R. Willis // *Mathematical Physical and Engineering Sciences*. – 1973. – Vol. 333. – P. 99-114.

343. Buckley D. H. Surface effects in adhesion, friction, wear, and lubrication / D. H. Buckley // *Tribology Series 5*. – New York, NY: Elsevier Science, 1981. – 630 p.

344. Buyanovsky I. A. Temperature-kinetic method for the determination of oil transition temperatures under boundary lubrication conditions / I. A. Buyanovsky, R. M. Matveevsky // *Tribology International*. – 1991. – Vol. 24, № 1. – P. 17-19.

345. Byerlee J. D. Friction of rocks / J. D. Byerlee // *Pure Appl. Geophys.* – 1978. – Vol. 116. – P. 615-626.

346. Calculation of friction coefficient and temperature field of line contacts lubricated with a non-Newtonian fluid [Electronic resource] / A. Mihailidis, J. Retzepis, C. Salpistis, K. Panajiotidis // *Wear.* – 1999. – Vol. 232, № 2. – P. 213-220. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00148-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00148-9)

347. Castro M. J. D. Coefficient of friction in mixed film lubrication: Gears versus Twin-discs / M.J. D. Castro, J. Seabra // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology.* – 2007. – Vol. 221, № 3. – P. 399-411.

348. Characterisation of nickel based hardfacing deposits on austenitic stainless steel / C. R. Das, S. K. Albert, A. K. Bhaduri [et al.] // *Surface Engineering.* – 2005. – Vol. 21. – P. 290-296.

349. Characterization of films formed at a lubricated cam/tappet contact / N. E. Lindsay, R. O. Carter, P. J. Schmitz // *Spectrochimica Acta.* – 1993. – Vol. 49A. – P. 2057.

350. Chen Q. A computational study of frictional heating and energy conversion during sliding processes / Q. Chen, D. Y. Li // *Wear.* – 2005. – Vol. 259. – P. 1382-1391.

351. Chen Q. Investigation on the mechanisms of corrosive wear process of alloy with a micro-scale dynamic model / Q. Chen, D.Y. Li. *Mater // Sci. Eng. A.* – 2004. – Vol. 369. – P. 284-293.

352. Cheng, H. S. Modeling of thin-film lubrication breakdown in sliding contacts / H. S. Cheng, S. I. Lee // *Abstracts of Papers of the American Chemical Society.* – 1989. – Vol. 197. – P. 108-COLL.

353. Ciftan M. Chemostress effect in tribology / M. Ciftan // *Running process in tribology*; ed. D. Dowson, C. V. T aylor, M. Godet, D. Berthe. – Guilford: Butterworth edition, 1981. – P. 3-5.

354. Davidge R. W. Grain-size dependence of the wear of alumina / R. W. Davidge, F. L. Riley // *Wear.* – 1995. – Vol. 186-187. – P. 45-49.

355. Defect site effects on chlorine chemistry on silicon / J. T. Yates, Z. Dohnalek, W. Yang, W. J. Choyke // Abstracts of Papers of the American Chemical Society. – 1996. – Vol. 211 – P. 18-27.

356. Dimofte F., Krantz T.L. Tests of bearings and gears with PVD coatings for aerospace transmissions; results and problems / F. Dimofte, T. L. Krantz // Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN), 2008, 1-3 October / Ed. Prof. K.-D. Bouzakis. – Chalkidiki, Greece: EEΔM and PCCM, 2008. – P. 33-44.

357. DIN 3990-4 Calculation of load capacity of cylindrical gears; calculation of scuffing load capacity. – 1987. – 22 p.

358. Disckinso J. T. Nanotribology: rubbing on a small scale / J. T. Disckinso // J. Chem. Educ. – 2005. – Vol. 82, № 5. – P. 734-742.

359. Dynamic observation of localized strain pulsation generated in the plastic deformation process by electronic speckle pattern interferometry / S. Toyooka, R. Widiastuti, Q. Zhang Q., H. Kato // Jpn. J. Appl. Phis. – 2001. – Vol. 40. – P. 873-876.

360. Effect of temperature on friction and adhesion of crystalline polymers / G. V. Vinogradov, G. M. Bartenev, F. I. Elkin, V. K. Mikhailov // Wear. – 1970. – Vol. 16. – P. 358-368.

361. Effect of Viscoelastic Properties of Treated Steel on the Rheology and Dissipative Properties of Frictional Contact / V. Shevelya, J. Sokolan, B. Kupiec, M. Korenivskiy // Archives of Foundry Engineering. – 2014. – Vol. 14, Special Issue 1. – P. 193-198.

362. Electrolytic-plasma processing for cleaning and metal-coating of steel surface / E. I. Meletis, X. Nie, F. L. Wang, J. C. Jiang // Surface and Coatings Technology. – 2002. – Vol. 150. – P. 246-256.

363. Esbensen K. H. Multivariate Data Analysis // Practice. 5-th ed. / K. H. Esbensen. – Oslo, Norway: CAMO Software AC, 2006. – 587 p.

364. Evaluation of effectiveness the breaking-in of friction pair in the non-stationary work conditions / Tareq M.A. Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov, M. S. Khimko // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. – 2015. – № 9 (33). – P. 301-307.

365. Fatigue and failure mechanism of bearings / H. Schlicht, E. Schreiber, O. Zwirlein // Int. Conf. Fatigue Eng. Mater. And Strct., Sheffield, 15-16 Sept. 1986. Vol. 1. – P.85-91
366. Fink M. Wear Oxidation a New Component of Wear / M. Fink // Trans. Amtr. Soc. For Stil Trting. – 1930. – Vol. 18. – P. 1026-1034.
367. Floding A. Simulation of Mild Wear in Spur Gears / A. Floding, S. Andersson // Wear. – 1997. – Vol. 207. – P. 16-23.
368. Garbar I. Structure-based selection of wear-resistant materials / I. Garbar // Wear. – 1995. – Vol. 181-183. – P. 50-55.
369. Garg H. C. Thermohydrostatic analysis of capillary compensated Asymmetric holes-entry hybrid journal bearing operating with non-Newtonian lubricant / H. C. Garg, V. Kumar, H. B. Sharda // Industrial Lubrication and Tribology. – 2009. – Vol. 61, № 1. – P. 11-21; doi:10.1108/00368790910929485
370. Gates R. S. A study on the nature of boundary lubricating film – analytical methods of development / R. S. Gates, K. L. Jewett, S. M. Hsu // Tribology Trans. – 1989. – Vol. 32, № 4. – P. 423-430.
371. Gerkema J. Adhesion between solid metals: observation of interfacial segregation effects in metal film lubrication experiments / J.Gerkema, A. R. Miedema // Surface Science. – 1983. – Vol. 124, № 2. – P. 351-371.
372. Gurskii B. E. Thermal friction problem and its development: Part 2. The role of heat phenomena in fracture of tooth wheels of cylindrical involute gears of real dimensions / B. E. Gurskii, A. V. Chichinadze // J. Friction and Wear. – 2007. – Vol. 28, № 4. – P. 395-400.
373. Hall W. H. X-ray line broadening in metals / W.H. Hall // Proc. Phys. Soc. – 1949. – Vol. A62. – P. 741-743.
374. Handbook of Hard Coatings. Deposition Technolgies, Properties and Applications / Ed. Rointan F. Bunshah. – Los Angeles, USA: University of California, 2001. – 538 p.
375. Hanlon D. N. The rolling sliding wear response of conventionally processed and spray formed high speed steel at ambient and elevated temperature / D. N. Hanlon, W. M. Rainforth // Wear. – 2003. – Vol. 255. – P. 956-966.

376. Harrison J. A. Simulated tribochemistry – an atomic-scale view of the wear of diamond / J. A. Harrison, D. W. Brenner // J. American Chemical Society. – 1994. – Vol. 116, № 23. – P. 10399-10402.

377. Hattori S. Cavitation erosion mechanisms and quantitative evaluation based on erosion particles / S. Hattori, E. Nakao // Wear. – 2002. – Vol. 249. – P. 839-845.

378. Heinicke G. Tribochemistry / G. Heinicke. – Berlin, 1984. – 495 p.

379. Hemmati I. Effects of the Alloy Composition on Phase Constitution and Properties of Laser Deposited Ni-Cr-B-Si Coatings / I. Hemmati, V. Ocelík, J. Th. M. De Hosson // Physics Procedia – 2013. – Vol. 41. – P. 302-311.

380. Hemmati I. Evolution of microstructure and properties in laser cladding of a Ni-Cr-B-Si hardfacing alloy / I. Hemmati, V. Ocelik, J. T. M. De Hosson // Contact Mechanics and Surface Treatments X . – Malta: WIT Press, 2004. – P. 287-296.

381. Hermance H. The Examination of Electric Contacts by the Plastic Replica Method / H. Hermance, T. Egan // AIEE Commun. Electron. Trans. – 1987. – Vol. 76. – P. 756-763.

382. Heuberger M. Topographic information from multiple beam interferometry in the surface forces apparatus / M. Heuberger, G. Luengo, J. Israelachvili // Langmuir. – 1997. – Vol. 13, № 14. – P. 3839-3848.

383. Hohn B. R. Influence of oil temperature on gear failures / B. R. Hohn, K. Michaelis // Tribology International. – 2004. – Vol. 37. – P. 103-109.

384. Hohn B. R. Laboratories at Work: Institute for Machine Elements, Gear Research Centre (FZG) / B. R. Hohn, H. Winter // Tribology journal. – 1997. – Vol. 3-3. – P. 325-340.

385. Hsu S. M. A mechano-chemical descriptive model for wear under mixed lubrication conditions / S. M. Hsu, E. E. Klaus, H. S. Cheng // Wear. – 1988. – Vol. 128, № 3. – P. 307-323.

386. Hsu S. M. Boundary lubrication of advanced materials / S. M. Hsu // Mrs Bulletin. – 1991. – Vol. 16, № 10. – P. 54-58.

387. Hsu S. M. Boundary Lubrication and Boundary Lubricating Films. Ch. 12 / Stephen M. Hsu, Richard S. Gates // Modern Tribology Handbook. Vol. One. Principles of

Tribology / Ed.-in-Chief Bharat Bhushan. – CRC Press, 2000. – 1760p. – P. 484-485. DOI: 10.1201/9780849377877.ch12

388. Hsu S. M. Lubrication and Boundary Lubricating Films. Chapter 12 / Stephen M. Hsu, S. Richard // *Modern Tribology Handbook*. Vol. 1. Principles of Tribology / Bharat Bhushan, ed. – CRC Press, 2000. – 1760 p. – P. 484-485. DOI: 10.1201/9780849377877.ch12

389. Influence of the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions / O. Mikocyanchyk, R. Mnatsakanov, A. Zaporozhets, R. Kostynik // *Eastern-European J. Enterprise Technologies*. – 2016. – № 4/1 (82). – P. 24-31.

390. Investigation on the molecular shear-induced organization in a molecularly thin film of N-hexadecane / E. Charrault, X. Banquy, K. Kristiansen [et al.] // *Tribology Letters*. – 2013. – Vol. 50, № 3. – P. 421-430.

391. ISO 6336 – 1 Calculation of load capacity of spur and helical gears. Part 1: Basic principles, introduction and general influence factors. – 2006. – 109 p.

392. Israelachvili J. Adhesion forces between surfaces in liquids and condensable vapours / J. Israelachvili // *Surface Science Reports*. – 1992. – Vol. 14, № 3. – P. 109-159.

393. Israelachvili J. N. Intermolecular and surface forces, 3-rd ed. / J. N. Israelachvili. – USA: Academic Press, 2011. – 674 p.

394. Johnson K. L. The strength of surfaces in rolling contact / K. L. Johnson // *Proc. Inst. Mech. Eng. C*. – 1989. – Vol. 203, № 3. – P. 151-163.

395. Kapoor A. Tribological layers and the wear of ductile materials / A. Kapoor, F. J. Franklin // *Wear*. – 2000. – Vol. 245. – P. 294-215.

396. Kassner M. E. Harper-Dorn creep / M. E. Kassner, P. K. Kumar, W. Blum // *International Journal of Plasticity*. – 2007. – № 25. – P. 980-1000.

397. Kjer A. A lamination wear mechanism based on plastic waves / A. Kjer. – New York: Proc. Int. Conf. on Wear of Materials, ASME, 1987. – P. 191-198.

398. Klaus E. E. A study of wear chemistry using a micro sample fourball wear test / E. E. Klaus, J. L. Duda, K. K. Chao // *STLE Tribology Trans*. – 1991. – Vol. 34, № 3. – P. 426.

399. Komvopoulos K. The mechanism of friction in boundary lubrication / K. Komvopoulos, N. Saka, N. P. Suh // *Trans. ASME, J. Tribol.* – 1985. – Vol. 107, № 4. – P. 453-462.
400. Lee L. H. *Fundamental of Adhesion* / L. H. Lee. – Springer Science and Business Media, 2013. – 454 p.
401. Lee S. C. On the relation of load to average gap in the contact between surfaces with longitudinal roughness / S. C. Lee, H. S. Cheng // *Tribology Trans.* – 1992. – Vol. 35, № 3. – P. 523-529.
402. Lemaître A. Boundary lubrication with a glassy interface / A. Lemaître, J. Carlson // *Physical Review.* – 2004. – E 69. – P. 061611-1–061611-18.
403. Lemaître A. Rearrangements and dilatancy for sheared dense materials / A. Lemaître // *Physical Review Letters.* – 2002. – Vol. 89. – P. 195503-1–195503-4.
404. Lenahan P. M. First observation of the (29) Si hyperfine spectra of silicon dangling bond centers in silicon nitride / P. M. Lenahan, S. E. Curry // *Appl. Phys. Lett.* – 1990. – Vol. 56, № 157. – P. 207.
405. Liquid dynamics in molecularly thin films / J. Israelachvili, P. McGuiggan, M. Gee [et al.] // *J. Physics: Condensed Matter.* – 1990. – Vol. 2, Suppl. 1. – P. SA89-SA98.
406. Litin F. L. *Gear geometry and applied theory* / F. L. Litin, A. Fuentes. – Cambridge: Cambridge University Press, 2004. – 800 p.
407. Lu K. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment/ K. Lu, J. Lu // *Mater. Sci. and Eng. A.* – 2004. – № 375-377. – P. 38-35.
408. Lubricating calculation for area contact of regular concave profiles / W. Jiadao, C. Darong, K. Xianmei, J. Kaiyuan // *Journal of Tsinghua University.* – 2001. – Vol. 41, № 2. – P. 42-45.
409. Ludwig M. Simulation of Dynamic Lubricant Effects in Sheet Metal Forming Processes / M. Ludwig, C. Müller, P. Groche // *Key Engineering Materials.* – 2010. – Vol. 438. – P. 171-178.

410. Luengo G. Generalized effects in confined fluids: new friction map for boundary lubrication / G. Luengo, J. Israelachvili, S. Granick // *Wear.* – 1996. – Vol. 200, № 1-2. – P. 328-335.

411. Lyashenko Y. O. The Account of Spatial Inhomogeneity of the Temperature in the Synergetic Model of Boundary Friction [Electronic resource] / Y. O. Lyashenko, N. M. Manko // *J. Nano-Electron. Phys.* – 2013. – Vol. 5, № 3. – P. II. – 03040 (5pp.). URL http://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2013/3/articles/jnep_2013_V5_03040.pdf

412. Machutov N. A. Tasks of tribo-fatigue in problems of safety of technical system / N. A. Machutov, M. M. Gadenin // *Proc. III Int. Symposium on Tribo-Fatigue, 22-26 October 2000.* – Beijing: Human University Press, 2000. – P. 56-62.

413. Maeda K. Effect of bulk deformation on rubber adhesion / K. Maeda, A. Bismarck, B. Briscoe // *Wear.* – 2007. – Vol. 263. – P. 1016-1022.

414. Matveevskij R. M. Verbindungen von Elementen der 4 Hauptgruppe des Periodensystems als er Zusatze für Ole / R. M: Matveevskij, I. A. Bujanovskij, V. V. Baginskij // *Schmierungstechnik.* – 1985. – № 5. – S. 132-135.

415. Matveevsky R. M. Friction power as a criterion of seizure with sliding lubricated contact / R. M. Matveevsky // *Wear.* – 1992. – Vol. 155. – P. 1-5.

416. Matveevsky R. M. Temperature kinetic aspect of friction and wear under boundary lubrication / R. M. Matveevsky, I. A. Buyanovsky // *Proc. JSLE International Tribology conference, Tokyo, Japan, 1985.* – P. 339-344.

417. Mechano-chemical model: Reaction temperatures in a concentrated contact / S. M. Hsu, M. C. Shen, E. E. Klaus [et al.] // *Wear.* – 1994. – Vol. 175, № 1-2. – P. 209-218.

418. Menezes P. L. Studies on friction and transfer layer: role of surface texture / P. L. Menezes, Kishore, S. V. Kailas // *Tribology Letters.* – 2006. – Vol. 24, № 3. – P. 265-273.

419. Menter J. W. Physics of lubrication / J. W. Menter // *British J. Applied Phisics.* – 1951. – № 1, Suppl. – P. 52-54.

420. Modeling abrasive wear of homogeneous and heterogeneous materials / K. Elalem, D. Y. Li, M. J. Anderson, S. Chiovelli // ASTM STP. – 2001. – Vol. 1339. – P. 90-104.
421. Molinari A. Oxidation behaviour of ledeburitic steels for hot rolls / A. Molinari, M. Pellizzari // Mater. Sci. Eng. A. – 2000. – Vol. 280. – P. 255-262.
422. Mori S. Adsorption of model compounds of lubricant on nascent surfaces of mild and stainless steels under dynamic conditions / S. Mori, Y. Imaizumi // STLE Trans. – 1988. – Vol. 31. – P. 449.
423. Nanomechanical properties of films derived from zinc dialkyldithiophosphate / O. L. Warren, J. F. Graham, P. R. Norton [et al.] // Tribology Letters. – 1998. – Vol. 4. – P. 189-198.
424. Offner G. A Generic Friction Model for Radial Slider Bearing Simulation Considering Elastic and Plastic Deformation / G. A. Offner, A. Knaus // Lubricants. – 2015. – Vol. 3. – P. 522-538; doi:10.3390/lubricants3030522
425. Ognjanovic M. Progressive Gear Teeth Wear and Failure Probability Modeling / M. Ognjanovic // Tribology in industry. J. Serbian Tribology Society. – 2004. – Vol. 26, № 3-4. – P. 44-49.
426. Panin V. E. Overview on mesomechanics and fracture of solids / V. E. Panin // J. Theor. Appl. Frac. Mech. – 1998. – Vol. 30, № 1. – P. 1-11.
427. Pellizzari M. Tribological behavior of hot rolling rolls / A. Molinari, M. Pellizzari // Wear. – 2005. – Vol. 259. – P. 1281-1289.
428. Prokhorov V. P. Variational and non-variational solution methods of flat engagements optimization problem by friction power criterion / V. P. Prokhorov // IFToMM-2011, 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guandjuato, Mexico, 2011. – Mexico, 2011. – P. A9-274.
429. Quinn T. An Experimental Study of Heat and Surface Temperature Sliding Steel Intefacas and their Relation to Oxidational Wear / T. Quinn // ASLET. – 1978. – Vol. 21. – P. 78-86.

430. Quinn, T. Application of the Oxidational Theory of Hild Wear to the Slidin Wear of Low-Alloy Steel / T. Quinn, D. M. Rowson // *Wear*. – 1980. – Vol. 85. – P. 1-20.
431. Rabinovich E. Practical uses of the surface energy criterion / E. Rabinovich // *Wear*. – 1964. – Vol. 7. – P. 9-22.
432. Rabinowicz E. Friction and Wear of Materials / E. Rabinowicz. – New York: John Wiley & Sons, 1965. – 65 p.
433. Rapoport L. A model of brittle- dominated wear due to delaed fracture (vertical crack growth) / L. Rapoport, R. L. Salganik, V. A. Gotlib // *Wear*. – 1995. – Vol. 188. – P. 166-174.
434. Rice J. R. Off-fault secondary failure induced by a dynamic slip pulse / J. R. Rice, C. G. Sammis, R. Parsons // *Bull. Seism. Soc. Am.* – 2005. – № 95 (1). – P. 109-134; doi: 10.1785/0120030166
435. Rise of wear resistance of metals by electroarc treatment / V. Shevelya, A. Trytek, V. Oleksandrenko, J. Sokolan // *Interdisciplinary integration of science in technology, education and economy*. – Khmelnskiy - Yaremche. – 2013. – Issue 2. – P. 336-342.
436. Robbins M. O. Critical velocity of stick-slip motion / M. O. Robbins, P. A. Thompson // *Science*. – 1991. – Vol. 253, № 5022. – P. 916.
437. Rymuza C. Energy concept of the coefficient of friction / C. Rymuza // *Wear*. – 1996. – Vol. 199. – P. 187-196.
438. Sadeghi Farshid. Subsurface Stresses in Rolling/Sliding Machine Components [Electronic resource] / Sadeghi Farshid, Ping C. Sui // *International Compressor Engineering Conference*. – 1988. – Paper 680. – URL: <http://docs.lib.purdue.edu/icec/680/>
439. Shchukin E. D. Influence of the nature of non-polar phase on the mechanical stability of adsorption layers of hydrocarbon and fluorocarbon surfactants at the interface between their aqueous solutions and non-polar media / E. D Shchukin, E. A. Amelinaa, A. M. Parfenova // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspect s*. – 2001. – Vol. 176, № 1. – P. 35-51.

440. Shevelya V. V. Dynamic relaxation processes in steel friction under the action of heat treatment / V. V. Shevelya, Yu. S. Sokolan // *Strength of Materials*. – 2015. – Vol. 47, № 4. – P. 524-531.

441. Siegl J. Fatigue processes in bodies with surface coating / J. Siegl, P. Kantor, J. Adamek // *Surface Modification Technologies XIV, Proceedings of the XIV International Conference on Surface Modification Technologies, Paris, 2000* / T. S. Sudarshan, M. Yeandin, ed. – ASM International Materials Park, Ohio and IOM Communications Ltd., UK, 2001. – P. 64-70.

442. Simulation of Tribosystems and Tribometry / F. Franek, G. Vorlaufer, W. Edelbauer, S. Bukovnik // *Tribology in industry*. – 2007. – Vol. 29, № 1-2. – P. 3-12.

443. Simulation of wear on sheet metal forming tools – An energy approach / K. E. Nurnberg, G. Nurnberg, M. Golle, H. Hoffmann // *Wear*. – 2008. – Vol. 265. – P. 1801-1807.

444. Some aspects of AFM nanomechanical probing of surface polymer films / H. Shulga, A. Kovaiev, N. Myshkin, V. V. Tsukruk // *European Polymer J.* – 2004. – Vol. 40. – P. 949-956.

445. Structural-Energy characteristics of tribotechnical contact in unsteady / M. A. Tareq Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov, A. Zaporozhets // *Modern Mechanical Engineering*. – 2016. – № 6. – P. 91-97.

446. Stuart S. J. Molecular dynamics study of lubrication by small hydrocarbons / S. J. Stuart, J. A. Harrison // *Abstracts of Papers of the American Chemical Society* – 1999. – Vol. 217. – P. U589.

447. Suh N. P. The delamination theory of wear / N. P. Suh // *Wear*. – 1973. – Vol. 25. – P. 111-124.

448. Surfactant effects on the residual internal stresses in hydrated mineral binders / E. D. Shchukin, E. A. Amelina, V. N. Izmailova [et al.] // *Abstracts of the 13-th International Symposium on Surfactants in Solution, Gainesville, Florida, June 11-16, 2000*. – P. 163.

449. Tanaka K. Kinetic friction and elastic contact behavior of polymers / K. Tanaka // *Wear*. – 1984. – Vol. 100. – P. 243-262.

450. The influence of contact stress distribution and specific film thickness on the wear of spur gears during pitting tests / M. A. Muraro, F. Koda, U. Reisdorfer Jr., C. Henrique da Silva // *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.* – 2012. – Vol. 34, № 2.

451. Thompson P. A. Origin of stick-slip motion in boundary lubrication / P. A. Thompson, M. O. Robbins // *Science*. – 1990. – Vol. 250 (4982). – P. 792-794.

452. Thompson P. A. Phase transitions and universal dynamics in confined films / P. A. Thompson, G. S. Grest, M. O. Robbins // *Physical Review Letters*. – 1992. – Vol. 68, № 23. – P. 3448-3451.

453. Tonck A. Mechanical behavior of tribochemical films under a cyclic tangential load in a ball flat contact / A. Tonck, Ph. Kapsa, J. Sabot // *J. Tribology*. – 1986. – Vol. 108, № 117.

454. Tribotechnical characteristics of self-fluxing covering in non-stationary condition of friction / O. O. Mikosianchik, R. G. Mnatsakanov, A. M. Khimko, M. S. Khimko, M. S. Shakuliev // *Aviation in the XXI-st century: Safety in Aviation and Space Technologies*, 19-21 september, 2016 Kyiv, Ukraine: proceedings the seventh world congress. – Kyiv: NAU, 2016. – P. 1.4.51-1.4.56.

455. Voronin S. V. The research of tribological characteristics of smectic layer of boundary film / S. V. Voronin, V. O. Stefanov // *Проблеми трибології*. – 2014. – № 2 (72). – С. 58-64.

456. Wang Y. Wet Friction-Elements Boundary Friction Mechanism and Friction Coefficient Prediction / Y. Wang, B. Wei, X. Wu // *Tribology in Industry*. – 2012. – Vol. 34, № 4. – P. 198-205.

457. Wear analysis in fretting of hard coatings through a dissipated energy concept / S. Fouvry, Ph. Kapsa, H. Zahouani, L. Vincent // *Wear*. – 1997. – Vol. 203-204. – P. 393-403.

458. Weck M. Service Behaviour of PVD-Coated Gearing Lubricated with Biodegradable Synthetic Ester Oils / M. Weck, O. Hurachy-Schonwerth, Ch. Bugiel // *Proceedings of the International Conference on Gears, VDI Berichte*. – 2002. – № 1665. – P. 677-690.

459. Williamson G. K. Dislocation Densities in Some Annealed and Cold-Worked Metals from Measurements on X-Ray Debye-Sherrer Spectrum / G. K. Williamson, R. E. Smallman // *Phil. Mag.* – 1956. – Vol. 1, № 1. – P. 34-46.

460. Winter H. Investigations on the Thermal Balance of Gear Drives / H. Winter, K. Michaelis // *Proceedings of the Fifth World Congress on Theory of Machines and Mechanisms.* – 1979. – Vol. 1. – P. 354-358.

461. Yang, Y. Y. Modelling mechanical wear processes in metallic sliding friction / Y. Y. Yang, A. A. Torrance, P. L. B. Oxley // *J. Physics D. Applied Physics.* – 1996. – Vol. 29, № 3. – P. 600-608.

462. Yanzhong W. Wet Friction-Elements Boundary Friction Mechanism and Friction Coefficient Prediction / W. Yanzhong, W. Bin, W Xiangyu // *Tribology in Industry.* – 2012. – Vol. 34, № 4. – P. 198-205.

463. Yoshizawa H. Fundamental mechanism of interfacial friction. 1. Relation between adhesion and friction / H. Yoshizawa, You Lung Chen, J. Israelachvili // *J. Physical Chemistry.* – 1993. – Vol. 97. – P. 4124-4127.

464. Yoshizawa H. Fundamental mechanisms of interfacial friction. 2. Stick-slip friction of spherical and chain molecules / H. Yoshizawa, J. Israelachvili // *J. Physical Chemistry.* – 1993. – Vol. 97, № 43. – P. 11300-11313.

465. Zhang J. A model for friction in quasi-steady-state sliding Part I. Derivation, *Wear* / J. Zhang, F. A. Moslehy, S. L. Rice. – 1991. – Vol. 149, № 1-2. – P. 1-12.

ДОДАТКИ

- А.** Структура та функціональна схема електронного блоку керування програмно-апаратним комплексом для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів.
- Б.** Функціональні схеми програмних модулів програмного забезпечення «Гертя».
- В.** Моделювання НДС зубчастої передачі.
- Г.** Список публікацій за темою дисертації.
- Д.** Акти впровадження та реалізації результатів наукових досліджень.

Структура та функціональна схема електронного блоку керування програмно-апаратним комплексом для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів.

Розташування плат і модулів електронного блоку приведено на рисунку А.1.

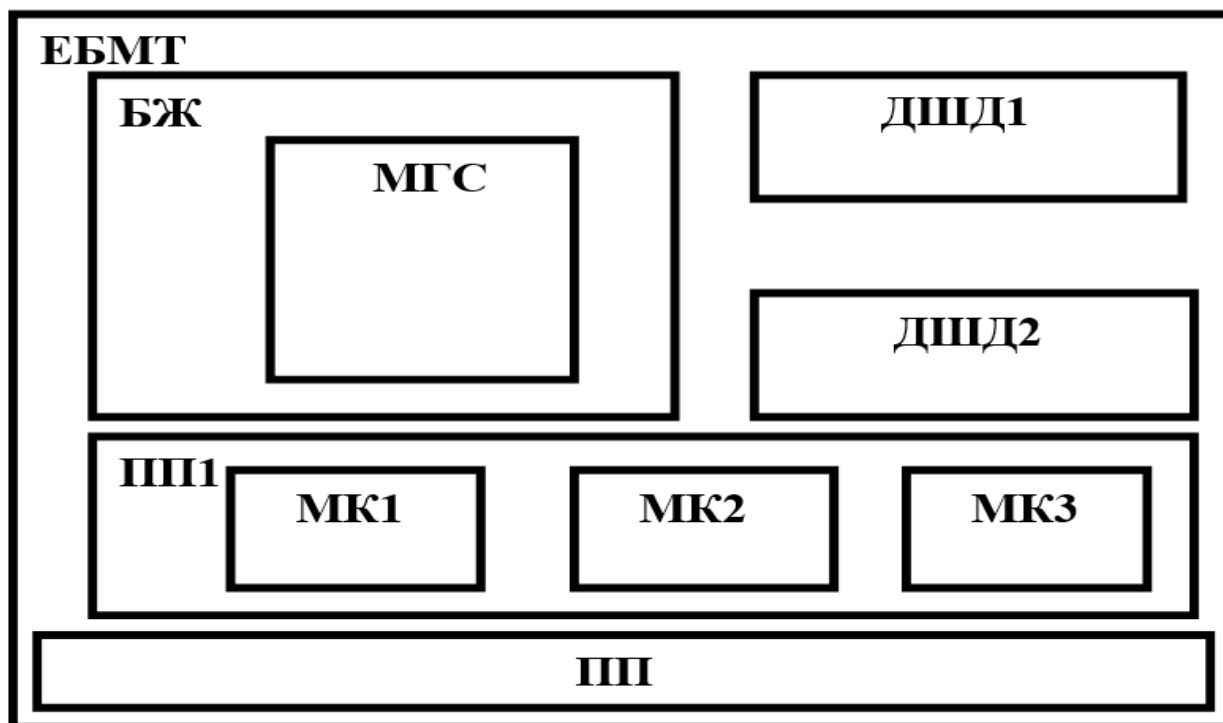


Рис. А.1. Схематичне розташування плат і модулів ЕБМТ: БЖ – блок живлення; ПП – передня панель с органами управління і індикацією; МК1, МК2, МК3 – модулі мікроконтролерів; МГС – модуль генератора струму; ДШД1, ДШД1 – драйвера шагових двигунів; ПП1 – плата погодження.

Блок живлення (БЖ) призначений для формування напруги 70В, 12В, 5В, необхідних для ЕБМТ и МГС із напружень електричного ланцюга (220В 50Гц).

На передній панелі (ПП) та задній панелі розміщені органи управління і індикації ЕБМТ (рис. А.2, А.3).

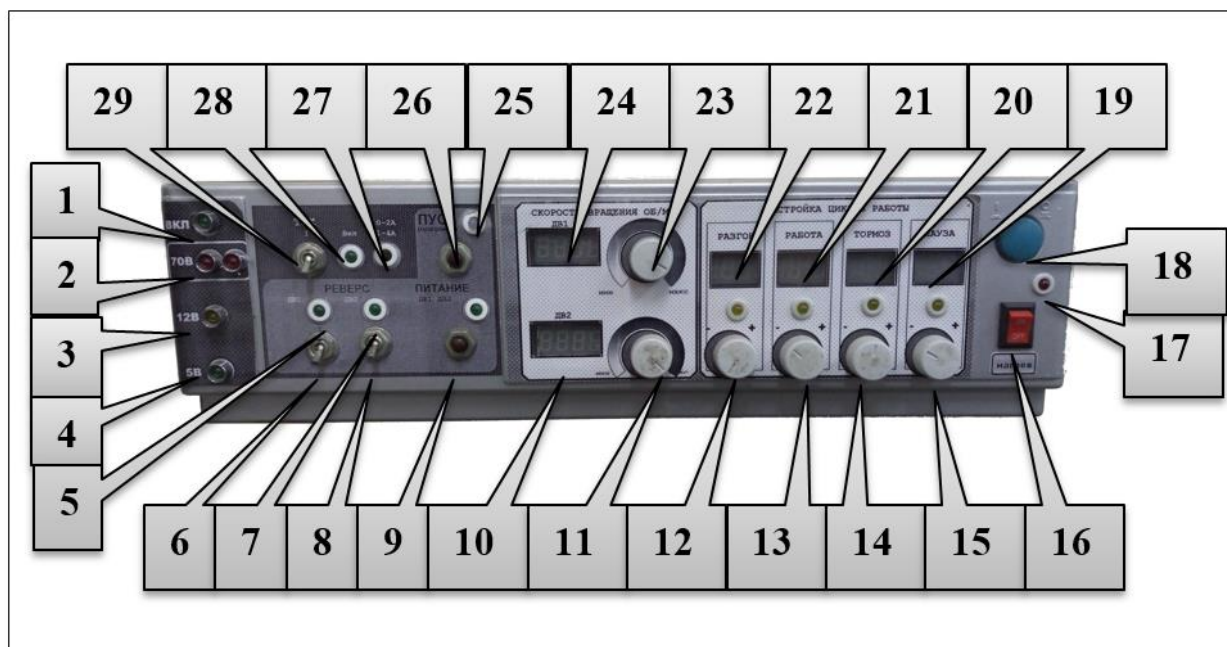


Рис А.2. Передня панель електронного блоку: 1 – індикатор включення сітьового живлення (220 В 50 Гц); 2 – індикатор живлення ДШД1, ДШД2 (70 В); 3 – індикатор живлення МГС (12 В); 4 – індикатор живлення МК1, МК2, МК3 (5 В); 5 – індикатор включення реверса ШД1; 6 – тумблер включення реверса ШД1; 7 – індикатор включення реверса ШД2; 8 – тумблер включення реверса ШД2; 9 – кнопка подачі живлення ДШД1, ДШД2; 10 – цифровий індикатор максимальної швидкості ШД2; 11 – регулятор максимальної швидкості ШД2; 12 – регулятор часу розгону ШД1, ШД2; 13 – регулятор часу роботи на максимальних швидкостях ШД1, ШД2; 14 – регулятор часу гальмування ШД1, ШД2; 15 – регулятор паузи; 16 – включення підігріву оливи; 17 – індикатор включення підігріву оливи; 18 – кнопка включення живлення (220 В 50 Гц); 19 – цифровий індикатор часу паузи; 20 – цифровий індикатор часу гальмування ШД1, ШД2; 21 – цифровий індикатор часу роботи на максимальних швидкостях ШД1, ШД2; 22 – цифровий індикатор часу розгону ШД1, ШД2; 23 – регулятор максимальної швидкості ШД2; 24 – цифровий індикатор максимальної швидкості ШД2; 25 – індикатор запуску циклів; 26 – кнопка запуску програми; 27 – індикатор переключення МГС 2 А/4 А; 28 – індикатор живлення МГС; 29 – тумблер включення живлення МГС.

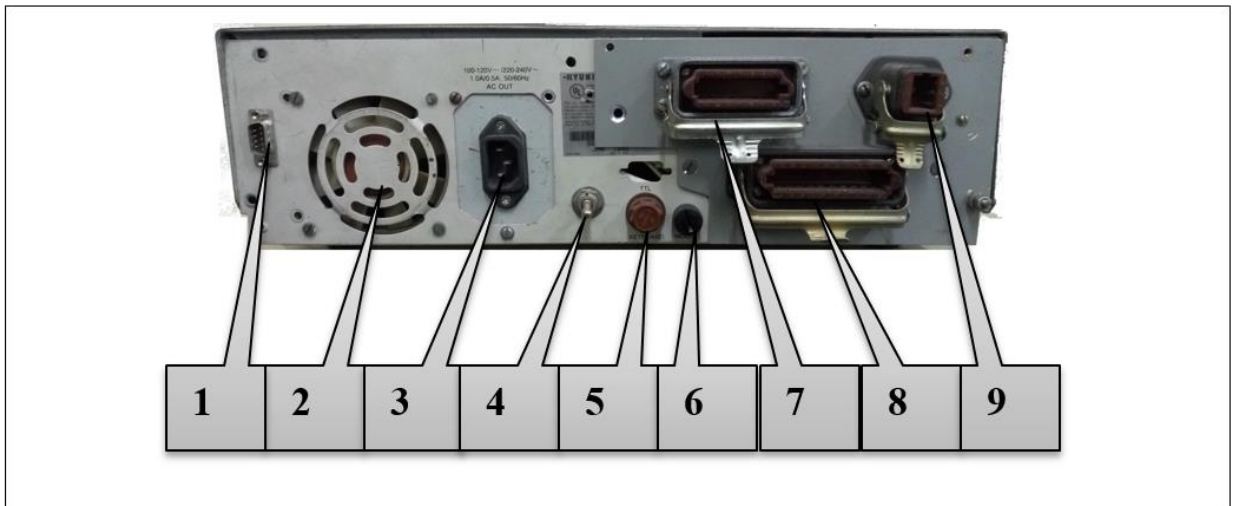


Рис. А.3. Задня панель електронного блоку: 1 – RS-232 канал для передачі результатів вимірювання на ПК; 2 – вентилятор; 3 – роз'єм живлення (220 В 50 Гц); 4 – тумблер включення живлення (220 В 50 Гц); 5 – запобіжник; 6 – клемма заземлення; 7 – роз'єм підключення датчиків МТ; 8 – роз'єм підключення ШД1, ШД2; 9 – роз'єм підключення струмоприймачів.

Органи управління ЕБМТ:

- вкл/відкл живлення блока (18);
- встановлення максимальних обертів ШД1 (23), ШД2 (11);
- встановлення тимчасових інтервалів виходу на режим (12), роботи в режимі (13), виходу із режиму (14) та паузи (15);
- програмування реверса ШД1 (6) и ШД2 (8);
- вкл/викл генератора струма МГС (29);
- подача живлення ДШД1, ДШД2 (9);
- запуск програми роботи ЕБМТ (26);
- вкл/відкл підігріву оливи.

Органи індикації ЕБМТ:

- індикатор вмикання сітьового живлення (220 В 50 Гц) (1);
- індикатор вихідної напруги БП 70 В (2), 12 В (3) и 5В (4);

- індикатори вмикання реверсу ШД1 (5) и ШД2 (7);
- індикатори вмикання (28) та перемикачів 2А/4А (27) генератора струму;
- індикатор вмикання підігріву оливи (17);
- цифрові індикатори максимальної швидкості ШД1 (24) ШД2 (10) і тимчасових інтервалів виходу на режим (22), роботи в режимі (21), виходу з режиму (20) і паузи (19).

Модулі мікроконтролерів (МК1), (МК2), (МК3) призначені для обробки вхідних і формування вихідних керуючих сигналів для модулів блока за заданими алгоритмами, а також формування даних індикації передньої панелі.

Драйвера шагових двигунів ДШД1, ДШД2 формують вихідні силові сигнали для шагових двигунів ШД1, ШД2 машини тертя МТ. Управляючі вхідні сигнали драйверів ДШД1, ДШД2 (керування швидкістю обертання, вкл/відкл реверсу) формують відповідно модулі мікроконтролерів МК2, МК3 за заданими алгоритмами у відповідності з установками органів управління ПП.

Плата погодження (ПП) призначена для посилення і нормування сигналів від датчиків машини тертя для наступної попередньої обробки модулями мікроконтролерів, а також для перетворення прийомо-передатчика RS 232 для зв'язку з ПК.

Модуль генератора струму (МГС) формує вихідні токи 2А або 4А для машини тертя і управляється мікроконтролерним модулем МК1 за заданими алгоритмами у відповідності з установками органів керування ПП.

Роботу ЕБМТ можливо представити наступним чином. Після включення живлення кнопкою 18 (рис. А.2) включаються індикатори 1, 2, 3, 4. Регуляторами 23, 11 встановлюємо максимальну швидкість обертання ШД1 і ШД2. Регуляторами 12, 13, 14, 15 встановлюємо тимчасові інтервали розгону, роботи на максимальних швидкостях, гальмування і паузи. Модулі мікроконтролерів МК2, МК3 обробляють положення регуляторів і формують дані для відповідних цифрових індикаторів передньої панелі. При необхідності тумблерами 6, 8 встановлюється реверс ШД1, ШД2 і тумблером 29 включається генератор струму МГС. Положення перемикачів реверсу контролюється

МК2 і МК3 відповідно для ШД1 і ШД2, а положення тумблера включення генератора струму – МК1.

Після подачі живлення на драйвера шагових двигунів ДШД1, ДШД2 кнопкою 9, і запуском програми кнопкою 26, модулі мікроконтролерів МК1, МК2 і МК3 за заданими алгоритмами формують (рис. А.4):

- частоту, пропорційну швидкості обертання ШД1, ШД2, також сигнал вмикання / вимикання реверсу для ДШД1, ДШД2;
- сигнали на вмикання, перемикання 2А/4А, вимикання для генератора струму МГТ;
- обробляють нормовані сигнали плати погодження ПП від датчиків МТ;
- передачу результатів вимірювань на ПК.

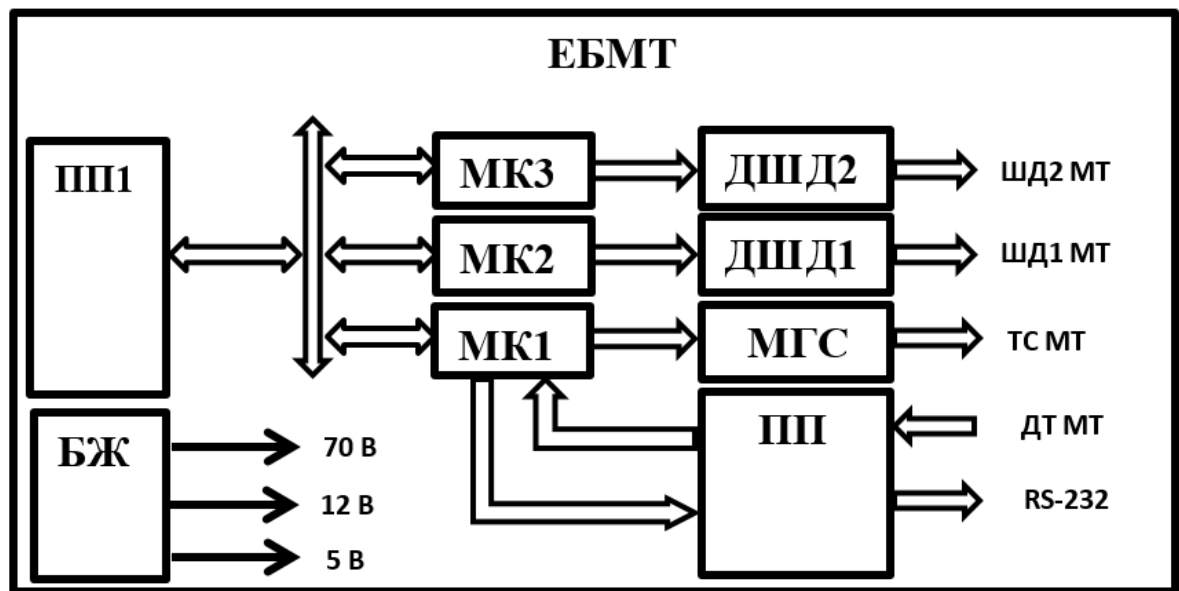


Рис. А. 4. Блок – схема електронного блоку.

Зв'язок між мікроконтролерними модулями організований за UART каналу, а синхронізація роботи – через систему переривань.

Функціональні схеми програмних модулів програмного забезпечення «Тертя».

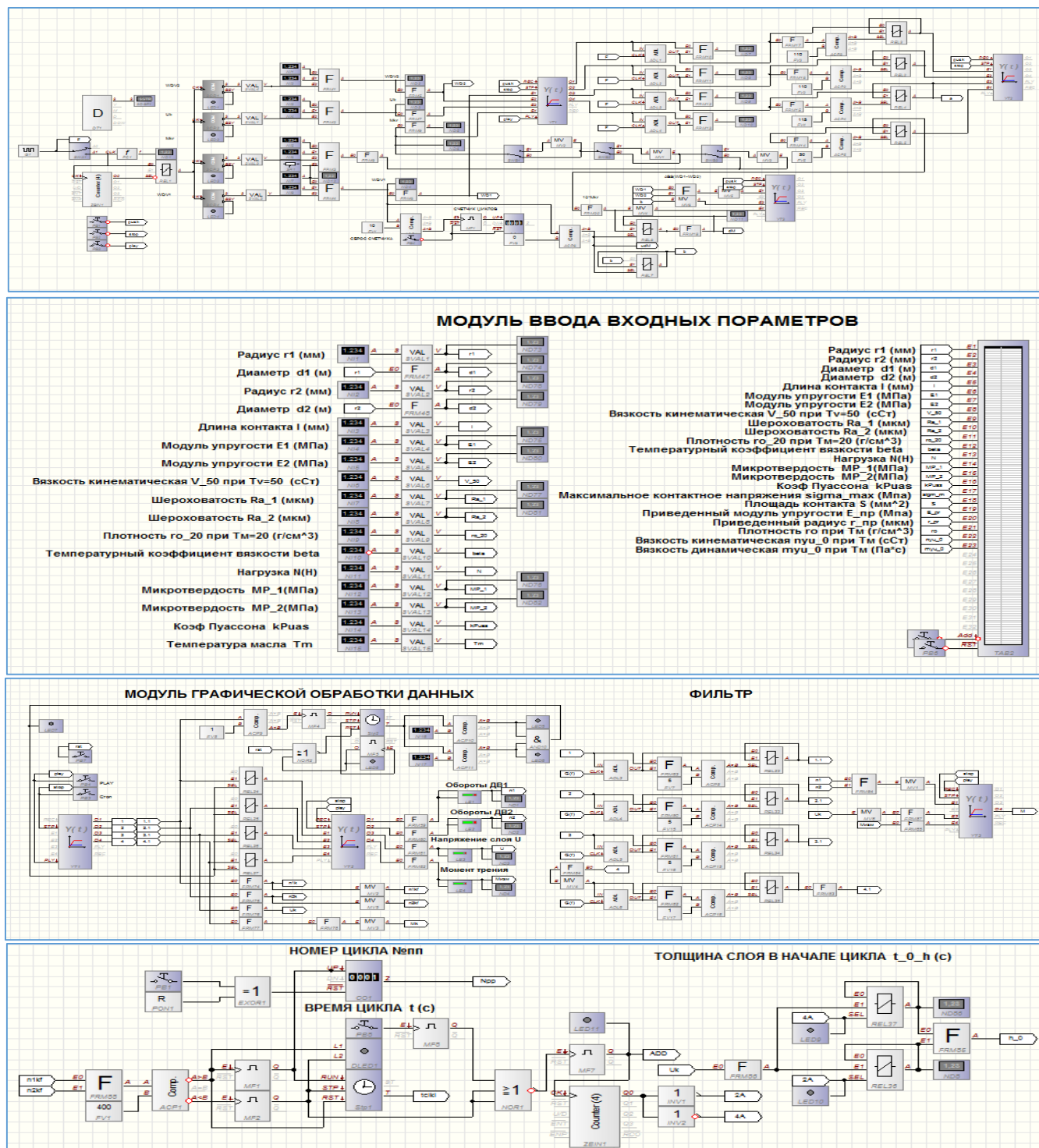


Рис. Б.1. Схематичне розташування плат та модулів електронного блоку.

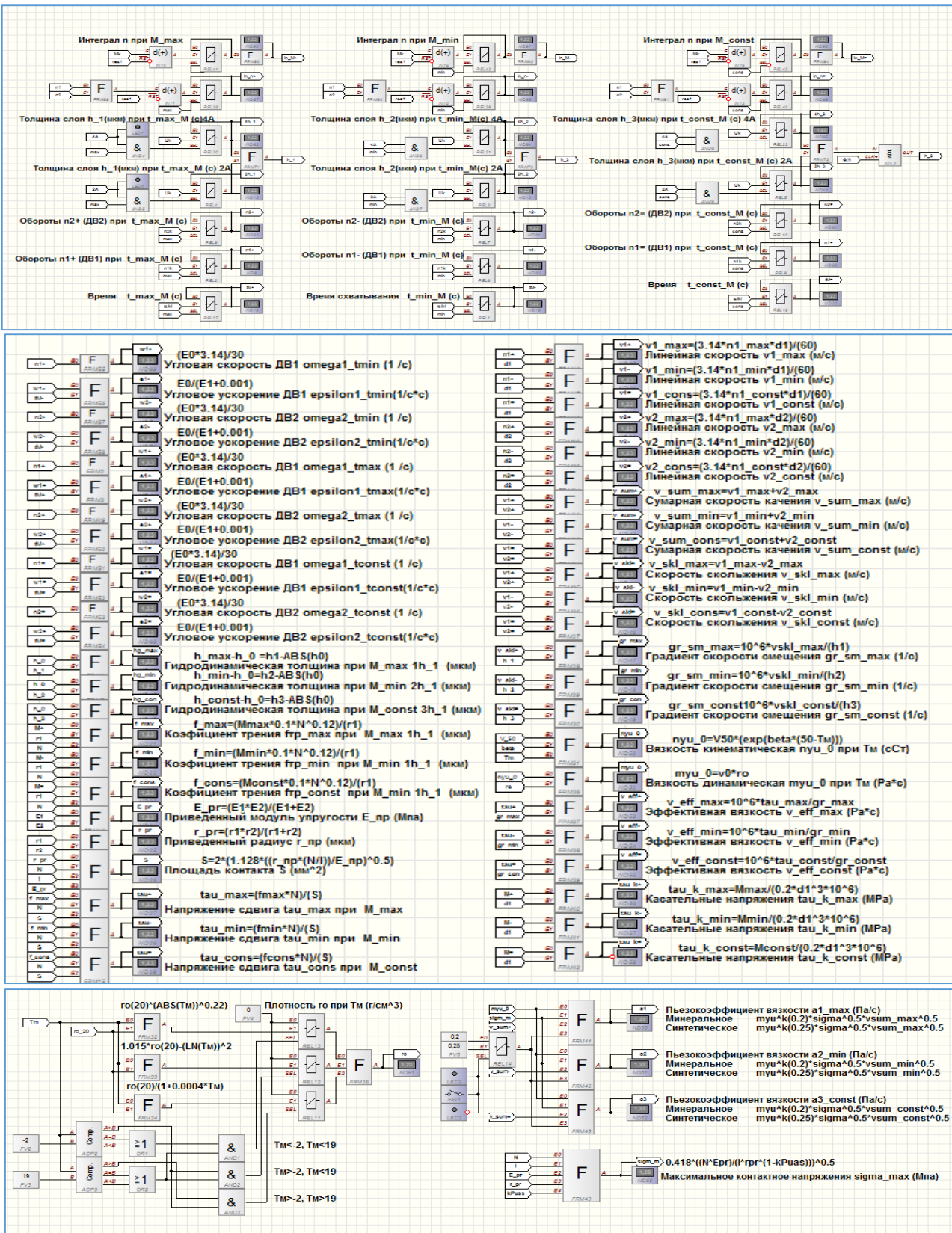


Рис. Б.2. Модулі оцінки вхідних та розрахункових параметрів в кожному циклі напрацювання.

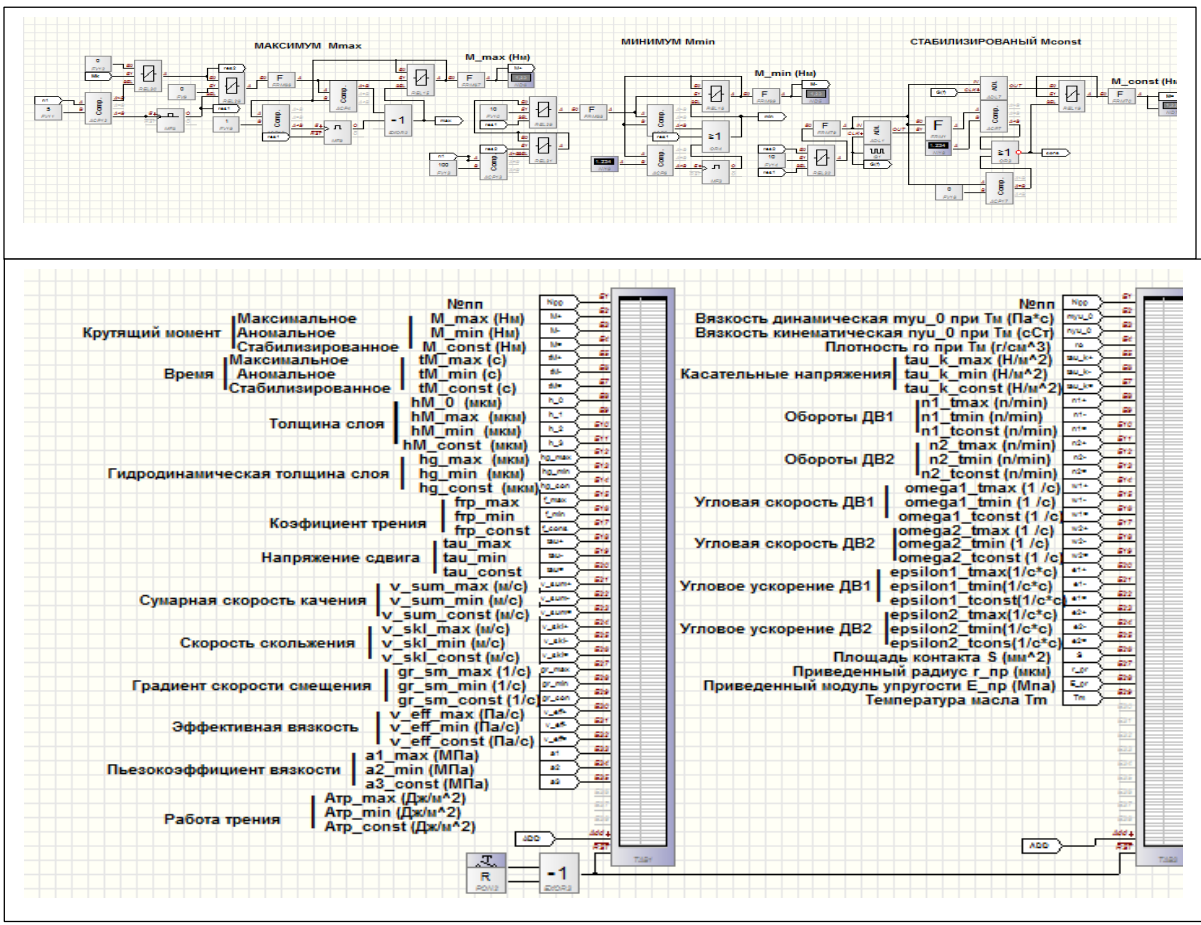


Рис. Б.3. Модулі виводу вхідних та розрахункових параметрів.



Рис. Б.4. Інтерфейс підпрограми прийому даних: 1 – прийом даних; 2 – дані після фільтрації і нормалізації; 3 – установка тарувальних коефіцієнтів; 4, 5, 6 – графічне представлення даних; 7 – управління фільтрами.

Моделювання НДС зубчастої передачі.

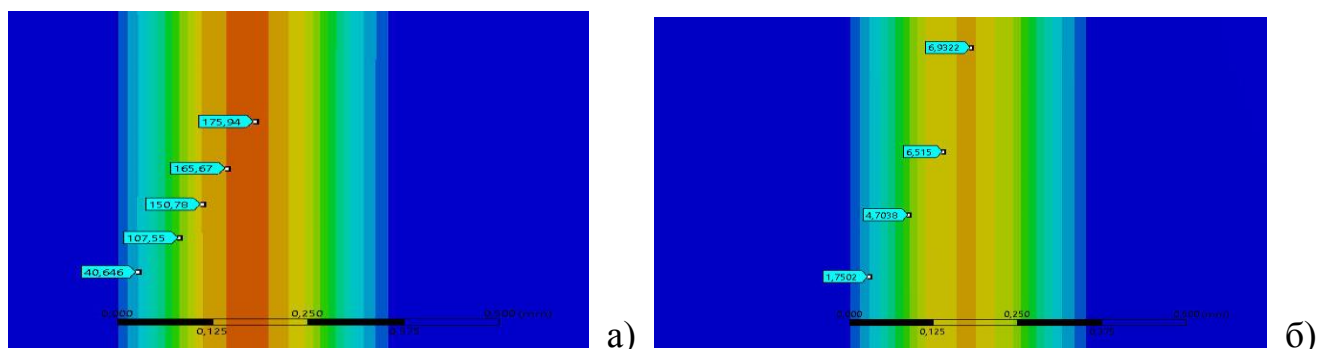


Рис. В.1. Компоненти напружено-деформованого стану зубчастої пари (коефіцієнт тертя 0,1), МПа: *a* – розподіл контактних тисків по площі контакту; *b* – розподіл контактних тисків від сил тертя.

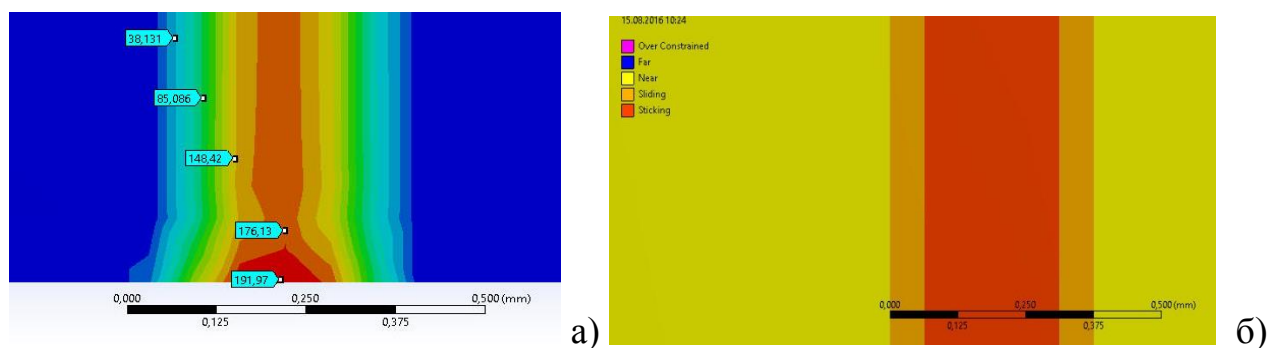


Рис. В.2. Компоненти напружено-деформованого стану зубчастої пари (коефіцієнт тертя 0,1), МПа: *a* – розподіл контактних тисків на межі контакту; *b* – зони зчеплення-проковзування на площадці контакту.

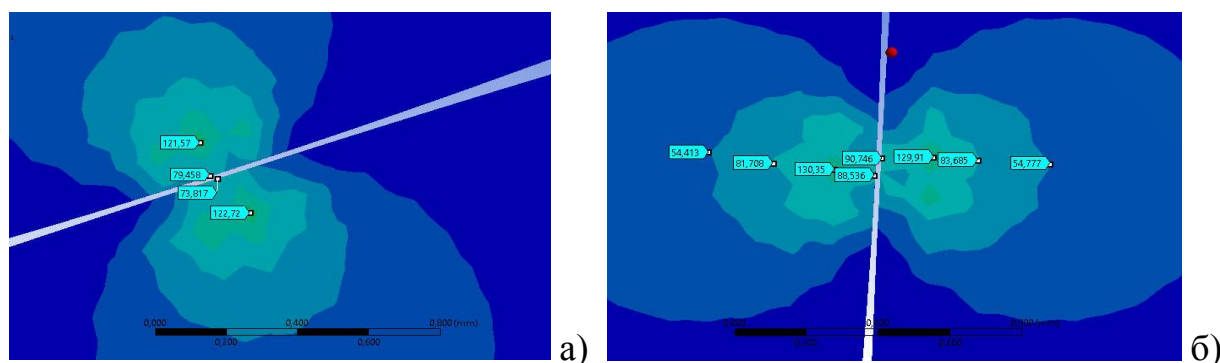


Рис. В.3. Компоненти напружено-деформованого стану зубчастої пари (коефіцієнт тертя 0,1), МПа: *a* – розподіл еквівалентних напружень по Мізесу; *b* – розподіл інтенсивності напружень.

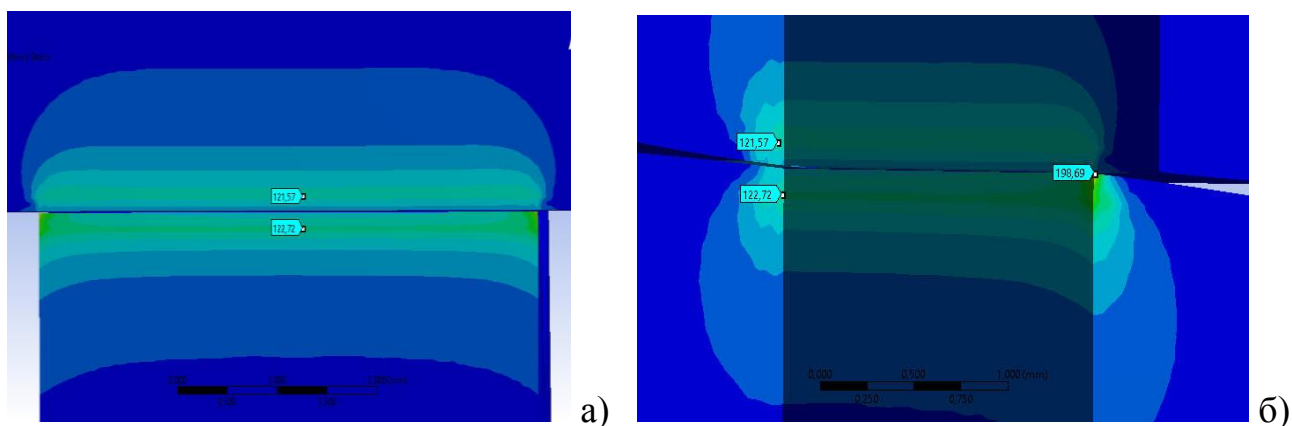


Рис. В.4. Компоненти напружено-деформованого стану зубчастої пари (коефіцієнт тертя 0,1), МПа: *a* - розподіл еквівалентних напружень по Мізесу в осьовому перетині зубчастої пари; *b*- розподіл еквівалентних напружень по Мізесу в осьовому та радіальному перетинах зубчастої пари.

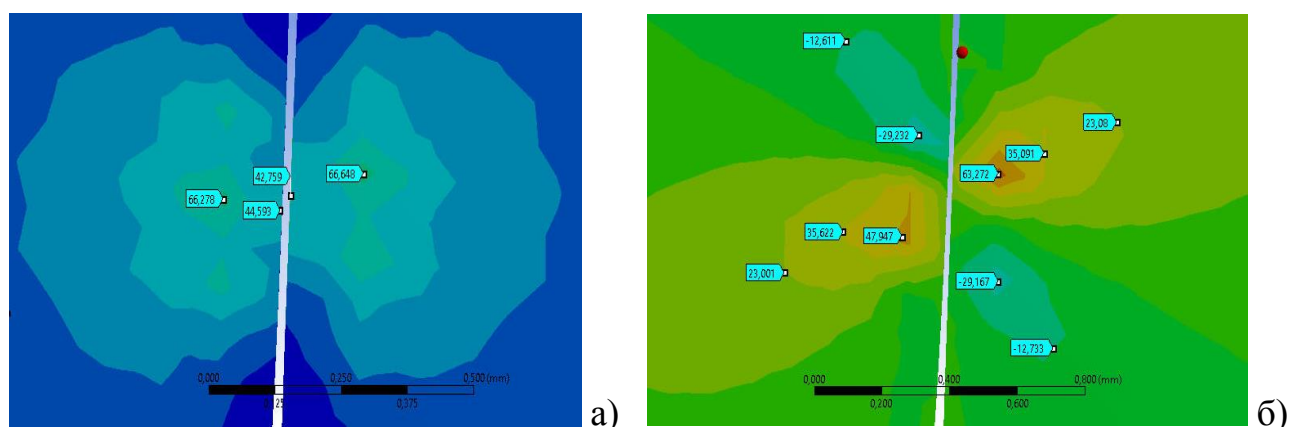


Рис. В.5. Компоненти напружено-деформованого стану зубчастої пари (коефіцієнт тертя 0,1), МПа: *a* – розподіл максимальних дотичних напружень; *b* – розподіл дотичних напружень в площині XY.

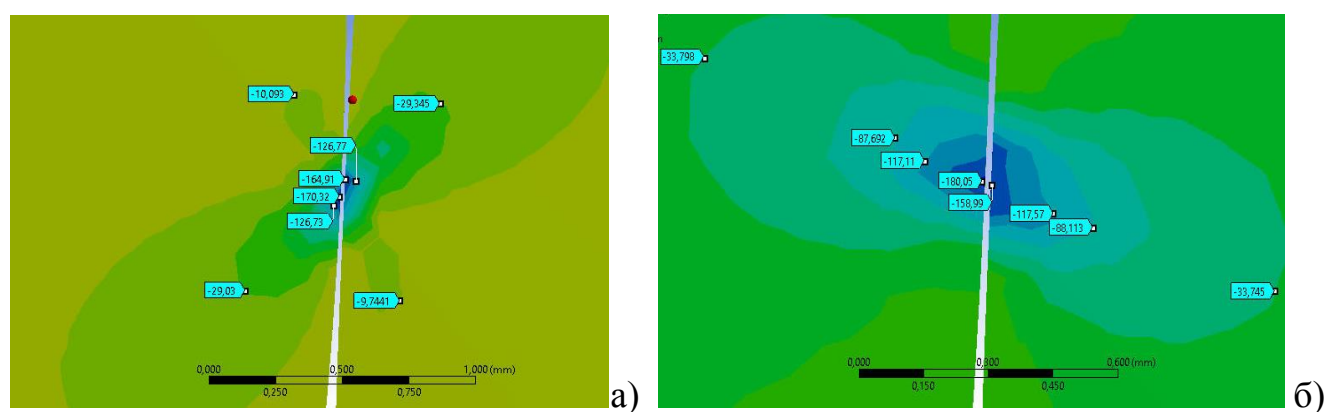


Рис. В.6. Компоненти напружено-деформованого стану зубчастої пари (коефіцієнт тертя 0,1), МПа: *a* – розподіл нормальних напружень в напрямку осі X; *b* – розподіл нормальних напружень в напрямку осі Y.

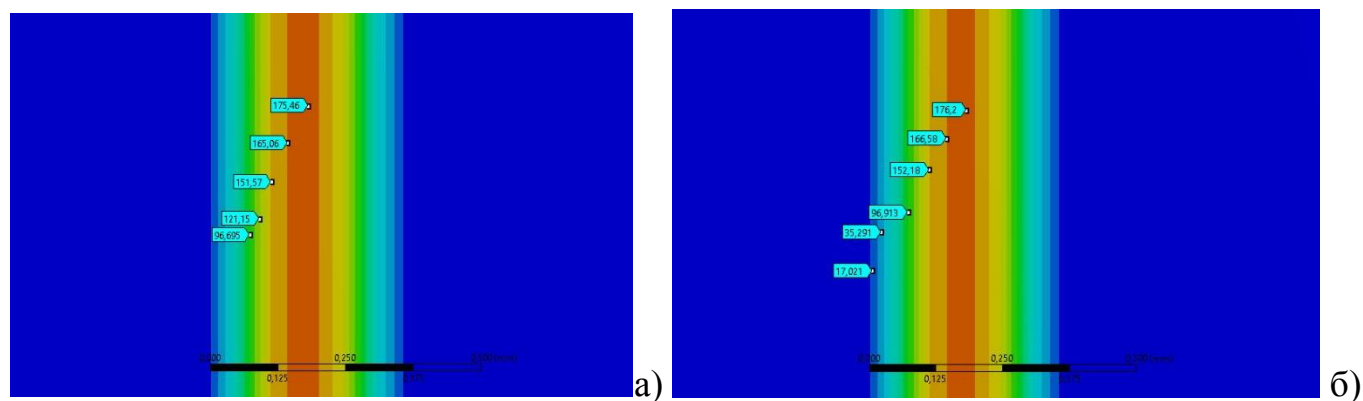


Рис. В.7. Розподіл контактних тисків по площді контакту при різних значеннях коефіцієнту тертя, МПа: $a - 0,05$; $b - 0,2$.

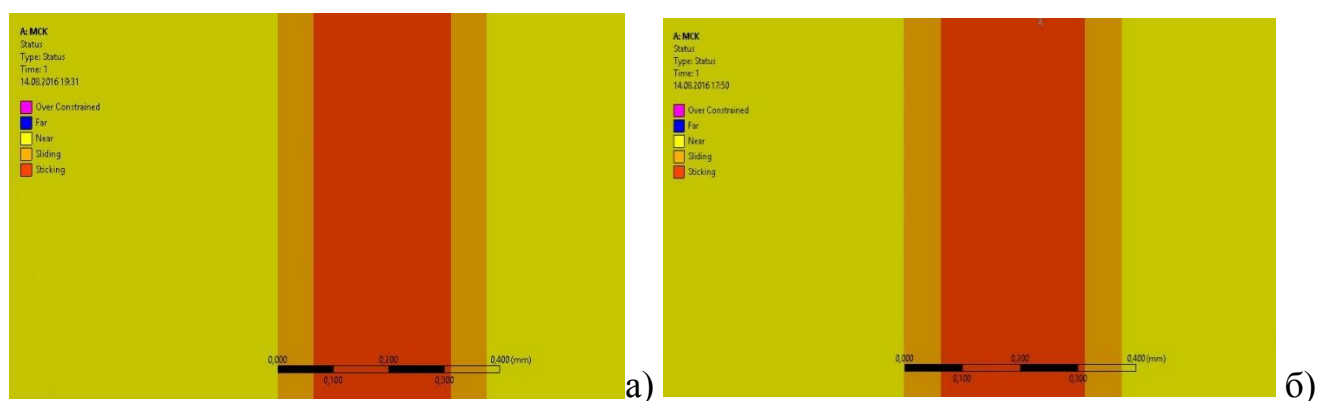


Рис. В.8. Зони зчеплення-проковзування на площді контакту при різних значеннях коефіцієнту тертя: $a - 0,05$; $b - 0,2$.

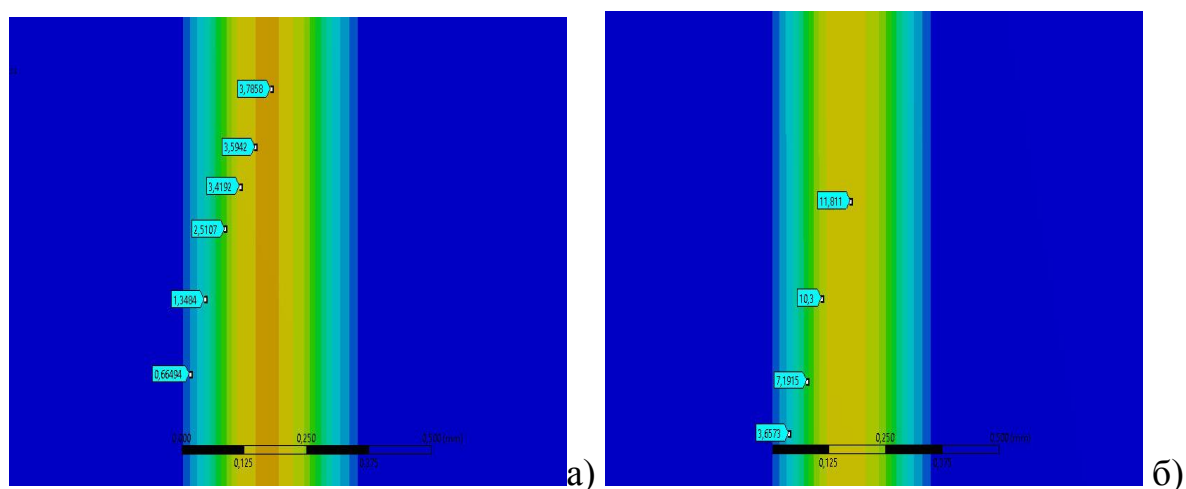


Рис. В.9. Розподіл напружень від сил тертя по площі контакту при різних значеннях коефіцієнту тертя, МПа: $a - 0,05$; $b - 0,2$.

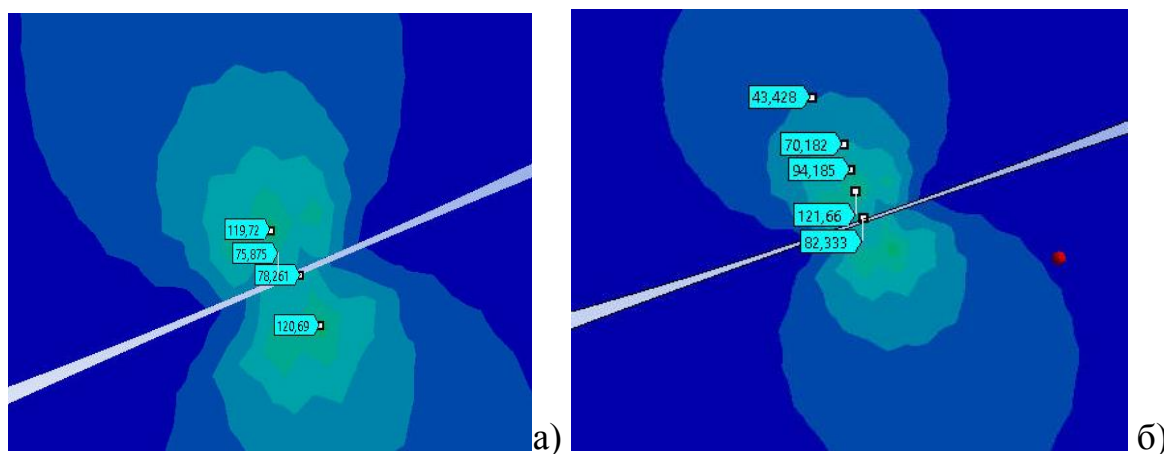


Рис. В.10. Розподіл еквівалентних напружень по Мізесу при різних значеннях коефіцієнта тертя, МПа: $a - 0,05$; $b - 0,2$.

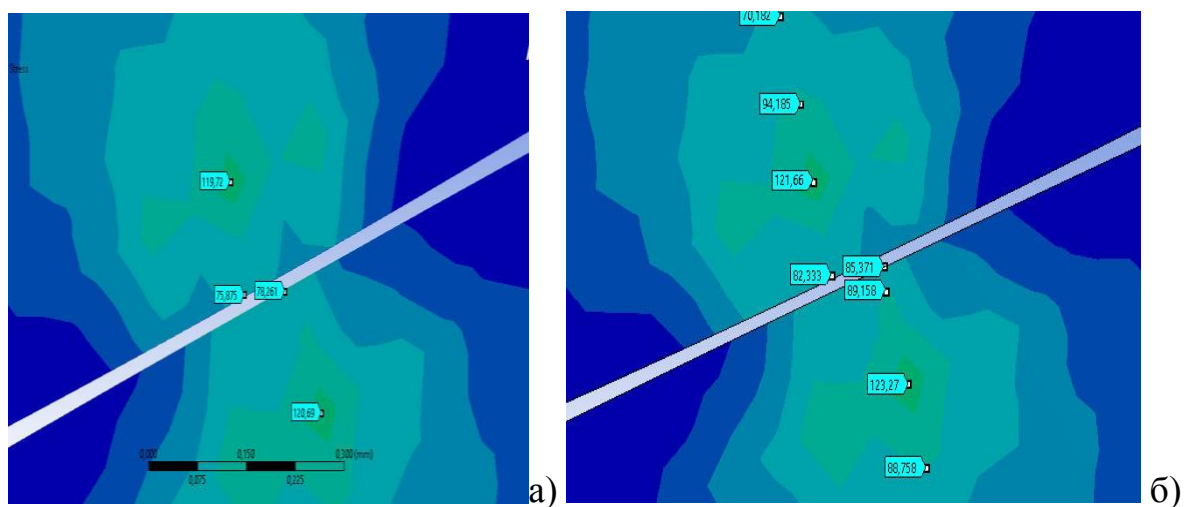


Рис. В.11. Розподіл еквівалентних напружень по Мізесу при різних значеннях коефіцієнта тертя, МПа: $a - 0,05$; $b - 0,2$.

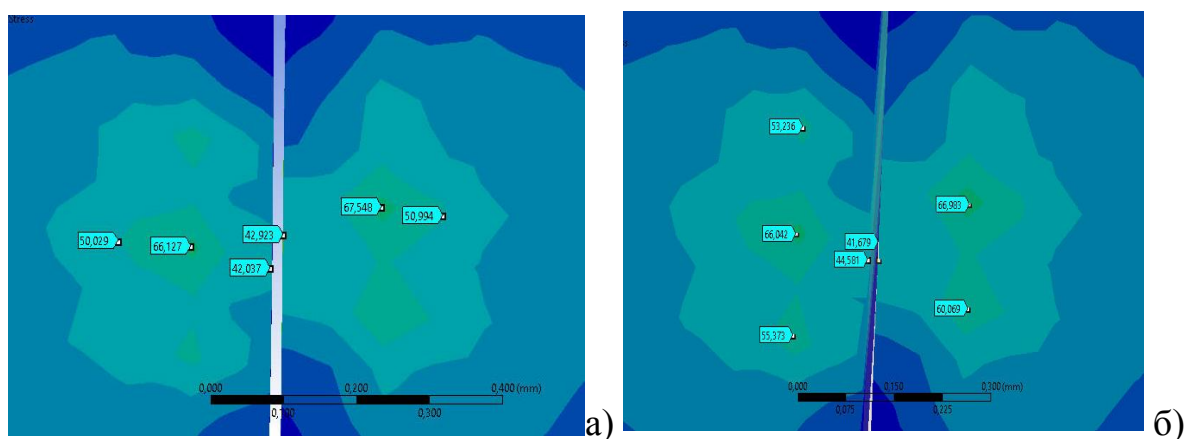


Рис. В.12. Розподіл максимальних дотичних напружень при різних значеннях коефіцієнта тертя, МПа: $a - 0,05$; $b - 0,2$

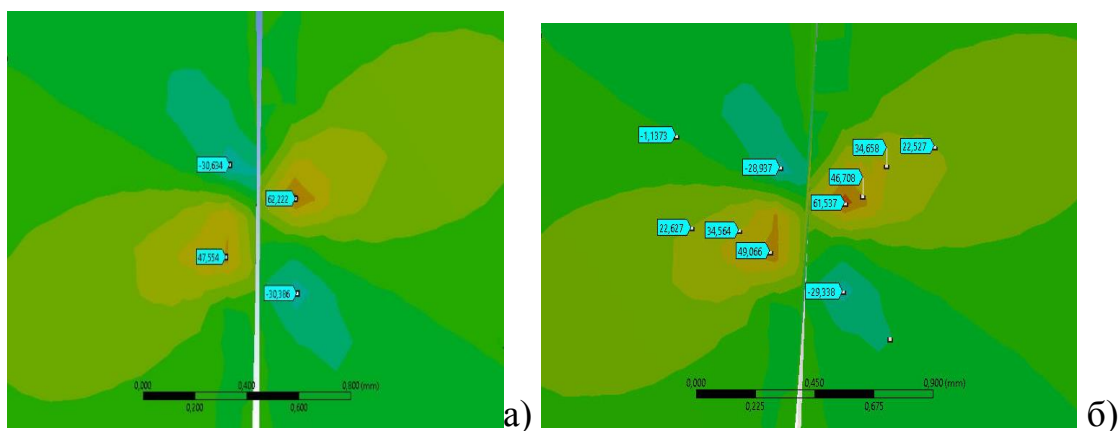


Рис. В.13. Розподіл максимальних дотичних напружень в площині ХУ при різних значеннях коефіцієнту тертя, МПа: $a - 0,05$; $b - 0,2$.

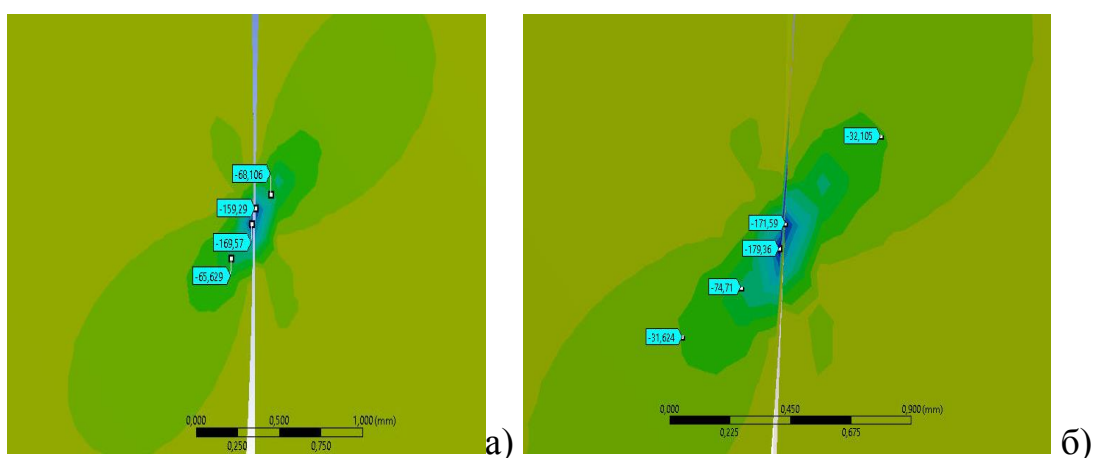


Рис. В.14. Розподіл нормальних напружень в напрямку осі Х при різних значеннях коефіцієнту тертя, МПа: $a - 0,05$; $b - 0,2$.

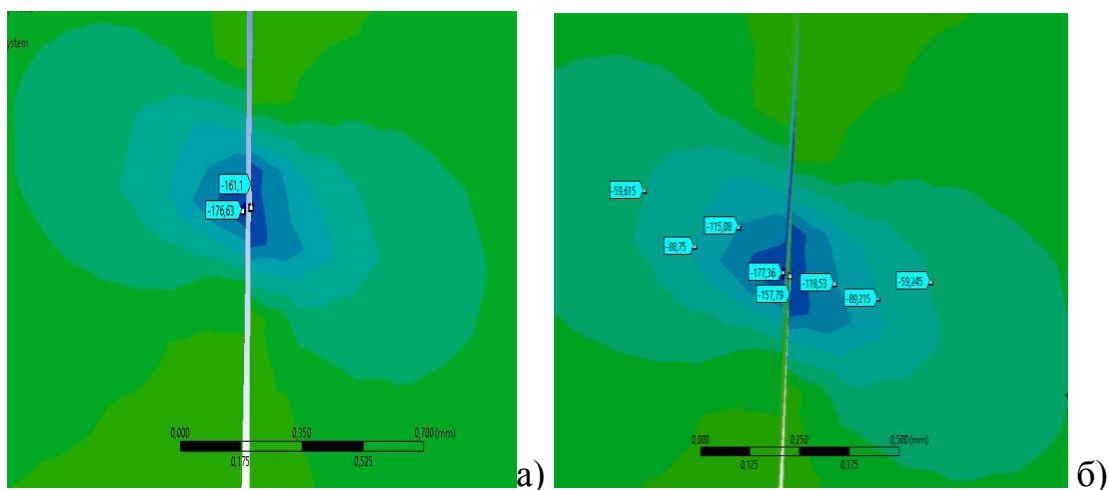


Рис. В.15. Розподіл нормальних напружень в напрямку осі Y при різних значеннях коефіцієнту тертя, МПа: $a - 0,05$; $b - 0,2$.

Для даної розрахункової моделі не спостерігається істотних змін максимальних дотичних напружень і глибини їх розташування від змін коефіцієнта тертя (рис. В.13).

Результати аналізу розподілів дотичних напружень в площині ХУ (рис. В.13) для різних значень коефіцієнта тертя показують, що характер розподілу не змінюється зі збереженням зон знакозмінних напружень.

Аналіз розподілів нормальних напружень (рис. В.14, В.15) вказує на утворення на поверхні істотних напружень стиску, максимальні значення яких виникають на поверхні і досягають значень 169 і 179 МПа по осі Х для коефіцієнтів тертя 0,05 і 0,2 відповідно і 176, 177 МПа по осі У.

Список публікацій за темою дисертації.**У фахових виданнях:**

1. Порівняльні реологічні характеристики мінеральних і синтетичних масел / Р. Г. Мнацаканов, В. І. Маленко, О. О. Мікосянчик, О. Є. Якобчук // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2006. – Вип. 45. – С. 170-178.
2. Модифікація поверхонь тертя чавун-сталь нанодисперсною добавкою фулерен C_{60} / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, С. С. Кроль, О. О. Мікосянчик // Дороги і мости: зб. наук. статей. – К. : ДерждорНДІ, 2006. – Вип. 5. – С. 312-320.
3. Математична модель ефективності мащення нанодисперсної добавки C_{60} в контакті тертя / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, С. С. Кроль // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К. : НТУ, 2006. – № 3. – С. 5-7.
4. Аналіз взаємозв'язку триботехнічних параметрів суспензії графіту ГС-4 на основі факторного методу / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, С. С. Кроль, О. О. Мікосянчик // Вісник: наук.-техн. зб. – К.: НТУ, 2006. – № 11. – С. 3-5.
5. Змащувальна здатність, антифрикційні та протизношувальні властивості масел для гідромеханічних коробок передач / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, С. С. Кроль, Мікосянчик О.О. // Вісник: наук.-техн. зб. – К.:НТУ, 2006. – № 12. – С. 5-9.
6. Домінуючий вплив еластогідродинамічних чинників в нестационарних режимах тертя / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куц // Вісник: наук.-техн. зб. в 2-х ч. Ч. 1. – К.: НТУ, 2006. – № 13. – С. 3-5.
7. Вплив нанодисперсної добавки фулерена C_{60} на триботехнічні характеристики трансмісійного масла в період припрацювання / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куц // Управління проектами, системний аналіз і логістика. – К.: НТУ, 2007. – № 4. – С. 5-7.

8. Підвищення надійності трансмісії автомобіля шляхом оптимізації робочих параметрів зони контакту / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. В. Руденко // Вісник: наук.-техн. зб. – К.: НТУ, 2007. – № 14. – С. 5-8.
9. Кінетика формування експлуатаційної шорсткості контактних поверхонь / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куш // Вісник: наук.-техн. зб. в 2-х частинах: Ч.1. – К.: НТУ, 2007. – № 15. – С. 15-18.
10. Динаміка зношування контактних поверхонь при введенні нанодобавки / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куш // Вісник: наук.-техн. зб. - К.: НТУ, 2008. – № 16. – С. 3-6.
11. Математична модель оцінки ефективності мащення механізмів з локальною формою контакту / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куш // Автошляховик України (окремий вип.). – Вісник Центр. наук. центру транспортної акад. України. – 2009. – № 12. – С. 133-134.
12. Механізм зношування Ст45 при додаванні до мастильного матеріалу бутилкаучуку / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, Ю. О. Туриця // Машинознавство. – 2009. – № 11 (149). – С. 36-38.
13. Закономірності зношування пар тертя в умовах динамічного навантаження / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, Ю. О. Туриця // Вісник: наук.-техн. зб. в 2-х ч. Ч.2. – К.: НТУ, 2010. – № 21. – С. 48-52.
14. Мікосянчик О. О. Кінетика зміни мікротвердості поверхневих шарів металу при адаптації граничних адсорбційних шарів мастильного матеріалу в зоні контакту / О. О. Мікосянчик // Проблеми тертя та зношування. – 2013. – № 2 (61). – С. 56-61.
15. Оцінка динамічної ефективної в'язкості мастильних матеріалів в триботехнічному контакті / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, М. В. Кіндрачук, М. С. Хімко // Проблеми тертя та зношування. – 2014. – № 4 (65). – С. 83-89.
16. Мікосянчик О. О. Моделювання інтенсивності зношування гільзи циліндра двигуна внутрішнього згорання / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, М. С. Хімко // Проблеми тертя та зношування. – 2015. – № 1 (66). – С. 140-145.

17. Структурно-фазовые превращения в покрытиях из сталей ферритного и мартенситного классов при их напылении и модифицировании электроконтактной обработкой / М. И. Черновол, Т. В. Ворона, Е. Е. Кожевникова, О. А. Микосянчик, Л. А. Лопата // Проблемы тертя та зношування. – 2015. – № 2 (67). – С. 99-109.

18. Реологічні властивості змащувальних шарів та енергонавантаженисть в контактї тертя при змінних контактних напругах / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, М. С. Хімко, С. В. Шакулієв // Проблемы тертя та зношування. – 2015. – № 4 (69). – С. 140-145.

19. Мікосянчик О. О. Автоматизований триботехнічний комплекс для оцінки змащувальних процесів в парах тертя / О. О. Мікосянчик, О. І. Запорожець, Р. Г. Мнацаканов // Проблемы трибології. – 2015. – № 4 (78). – С. 42-48.

20. Оценка структурно-энергетических показателей пар трения при работе в режиме пуск – остановка / О. О. Микосянчик, Р. Г. Мнацаканов, А. Ю. Кумурджи, С. В. Шакулієв // Проблемы тертя та зношування. – 2016. – № 1 (70). – С. 11-20.

21. Микосянчик О. О. К вопросу выбора методики установления функциональных взаимосвязей трибопроцессов при экспериментальном исследовании пар трения с локальным контактом / О. О. Мікосянчик, Н. О. Кузин // Проблемы тертя та зношування. – 2016. – № 4 (73). – С. 4-12.

22. Змащувальна дія олив при нестационарних процесах в умовах припрацювання / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, В. М. Лопата, В. І. Калініченко // Проблемы трибології. – 2016. – № 1 (79). – С. 69-76.

23. Оценка энергетических, реологических и противоизносных характеристик контакта в условиях качения с переменным скольжением / О. А. Микосянчик, Р. Г. Мнацаканов, В. И. Калиниченко, А. В. Куцев // Проблемы трибології. – 2016. – № 3 (81). – С. 6-14.

24. Микосянчик О. О. Влияние переменного градиента скорости сдвига на реологические и противоизносные свойства контакта в режиме пуск – остановка / О. А.

Микосянчик // Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип. 3 (98), ч. 1. – С. 48-55.

25. Анализ триботехнических характеристик самофлюсующихся покрытий в условиях качения со скольжением при нестационарном нагружении / О. А. Микосянчик, Б. А. Ляшенко, М. С. Агеев, В. М. Лопата // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 2/1 (28). – С. 4-9.

26. Микосянчик О. О. Термо - кинетическая модель оценки долговечности контактных поверхностей в условиях смазочного действия в нестационарных режимах работы / О. О. Микосянчик // Проблеми тертя та зношування. – 2017. – №1 (74). – С. 65–77.

27. Influence of the nature of boundary lubricating layers on adhesion component of friction coefficient under rolling conditions / O. Mikosyanchyk, R. Mnatsakanov, A. Zaporozhets, R. Kostynik // Eastern-European J. Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/1 (82). – P. 24-31.

У іноземних спеціалізованих виданнях:

28. Кинетика изнашивания контактных поверхностей при использовании добавки фуллерена C_{60} к моторному маслу / Н. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. А. Микосянчик, А. И. Куш // Трение и износ. – 2009. – Т. 30, № 6. – С. 550–555.

29. Evaluation of effectiveness the breaking-in of friction pair in the non-stationary work conditions / Tareq M.A. Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov, M. S. Khimko // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. – 2015. – № 9 (33). – P. 301–307.

30. Structural-Energy characteristics of tribotechnical contact in unsteady / M. A. Tareq Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov, A. Zaporozhets // Modern Mechanical Engineering. – 2016. – № 6. – P. 91–97.

31. Al-quraan Tareq M. A. The Effect of the Slippage Degree at Rolling with Slipping on the Wear Resistance of Contact Surfaces / Tareq M.A. Al-quraan, O. O. Mikosyanchik, R. G. Mnatsakanov // Mechanical Engineering Research. – 2016. – Vol. 6, № 2. – P. 48–61.

32. Al-quraan Tareq M. A. Temperature Resistance of the Boundary Lubrication Layers Under Rolling With Slippage Condition / Tareq M.A. Al-quraan, O.O. Mikosyanchik, R.G. Mnatsakanov // International Journal of Mechanical Engineering and Applications. – 2017. – Vol. 5, № 2. – P. 78–86.

Матеріали та тези конференцій:

33. Вплив фізико-хімічного складу масел для гідромеханічних коробок передач на кінетику формування мастильного шару / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, С. С. Кроль, О. О. Мікосянчик // Materialy XVII Konf. Miedzynarodowej: “Metody obliczeniowe i badawcze w rozwoju pojazdów samochodowych i maszyn roboczych samojezdnych”, (Rzeszów, 20-23 wrzesień 2006 r.). – Rzeszów: Politechnika, 2006. – P. 43–48.

34. Дмитриченко М. Ф. Розроблення методики прогнозування довговічності вузлів тертя двигунів внутрішнього згоряння та трансмісій автомобілів в нестационарних умовах / М. Ф. Дмитриченко, О. О. Мікосянчик, І. М. Козоріз // LXV наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2009. – С. 6-7.

35. Динамика интенсивности изнашивания контактных поверхностей при использовании добавки фуллерена C_{60} / М. Ф. Дмитриченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, О. І. Куц // Полимерные композиты и трибология : междунар. науч.-техн. конф., 22-25 июня 2009 г., Гомель: тезисы докл. – Гомель: ИММС им. В. А. Белого НАН Беларуси, 2009. – С. 72.

36. Дмитриченко М. Ф. Вплив навантаження на динаміку формування мастильного шару в еластогідродинамічному контакті / М. Ф. Дмитриченко, О. О. Мікосянчик, І. М. Козоріз // LXVI наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2010. – С. 7.

37. Дмитриченко М. Ф. Моделювання та розрахунок трибологічних процесів пар тертя в двигуні внутрішнього згоряння / М. Ф. Дмитриченко, О. О. Мікосянчик, Ю.

П. Ярошенко // LXVII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та працівників відокремлених структурних підрозділів університету: тези доповідей. – К.: НТУ, 2011. – С. 6.

38. Ефективність мащення олив в контактї залежно від терміну їх експлуатації / Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, Ю. О. Туриця, О. В. Руденко // Ольвійський форум-2011: стратегії України в геополітичному просторі: міжнарод. наук.-практ. конф., 8-12 червня 2011 р., Ялта, Крим, Україна: тези доп. – Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. –Т. 11 – С. 5.

39. Мнацаканов Р. Г. Визначення впливу трибологічних процесів на міцнісні характеристики приповерхневих шарів контактних поверхонь / Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик, Ю. О. Туриця // Ольвійський форум-2012: стратегії України в геополітичному просторі: міжнар. наук.-практ. конф., 6-10 червня 2012 р., Севастополь, Крим, Україна: тези доп. – Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2012. – Т. 12. – С. 24-25.

40. Способ получения износостойких покрытий / М. И. Черновол, Т. В. Ворона, О. О. Микосянчик, Л. А. Лопата, В. И. Жорник // Инженерия поверхности и реновация изделий: 15-я международ. науч.-техн. конф., 1-5 июня 2015 г., Одесская обл., Затока : тезисы докл. – К., 2015 – С. 206-208.

41. Мікосянчик О. О. Износостойкость покрытия стали на чугуне в условиях качения с проскальзыванием / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов // Трибологія, енерго-та ресурсозбереження: міжнарод. наук.-практ. конф. в рамках X Міжнар. наук.-практ. конф. „Ольвійський форум-2016”, 9-12 червня 2016 р., Миколаїв, Коблево, Україна: тези доп. – Миколаїв: ЧДУ ім. Петра Могили, 2016. –Т. 12 – С. 31–33.

42. Алгоритм визначення товщини мастильного шару між першим компресійним кільцем та гільзою циліндра ДВЗ залежно від робочого процесу / О. О. Мікосянчик, З. Є. Новохатська, М. О. Хом'якова, М. В. Ціркун // Авіа-2013: XI Міжнародної наук.-техн. конф., 21-23 травня, 2013 р., Київ: матеріали. – К.: НАУ, 2013. – Т. 3. – С. 25–28.

43. Мікосянчик О. О. Вплив контактного навантаження на антифрикційні властивості базових олів / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, М. С. Хімко, М. А. Петренко // Авіа-2015: XII Міжнародної наук.-техн. конф., 28-29 квітня 2015, Київ: матеріали. – К.: НАУ, 2015. – С. 25–28.

44. Мікосянчик О. О. Нестационарні процеси як фактор припрацювання пар тертя / О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, С. В. Шакулієв // Технічна творчість: зб. наук. праць (вип. присвячено Міжнародній наук.-техн. конф. молодих науковців «Сучасні технології в механіці», 21-23 квітня 2016 р., м. Хмельницький. – Хмельницький: ХНУ, 2016. – № 1. – С. 101–103.

45. Tribotechnical characteristics of self-fluxing covering in non-stationary condition of friction / O. O. Mikosianchik, R. G. Mnatsakanov, A. M. Khimko, M. S. Khimko, M. S. Shakuliev // Aviation in the XXI-st century: Safety in Aviation and Space Technologies, 19-21 september, 2016 Kyiv, Ukraine: proceedings the seventh world congress. – Kyiv: NAU, 2016. – P. 1.4.51–1.4.56.

Патенти та свідоцтва:

46. Пат. 88748, Україна, МПК G01N 3/56. Пристрій для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів / Мікосянчик О. О.; заявник та патентовласник Мікосянчик О. О. – № у 2013 13450; заявл. 19.11.2013; опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6. – 4 с.

47. Пат. 89261, Україна, МПК G01N 11/00. Спосіб оцінки динамічної ефективності в'язкості мастильних матеріалів в триботехнічному контакті / Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Кіндрачук М. В.; заявник та патентовласник Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Кіндрачук М. В. – № у 2013 14086; заявл. 04.12.2013; опубл. 10.04.2014, Бюл. № 7. – 4 с.

48. Пат. 92071, Україна, МПК G01N 3/56. Спосіб припрацювання пар тертя в нестационарних умовах роботи / Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко М. С.; заявник та патентовласник Мікосянчик О. О., Мнацаканов Р. Г., Хімко М. С. – № у 2014 02492; заявл. 13.03.2014; опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14. – 4 с.

49. Пат. 98452, Україна, МПК G23C 14/00. Спосіб отримання твердого покриття з підвищеним опором втомному руйнуванню на поверхні металевого виробу / Кіндрачук М. В., Духота О. І., Кудрін А. П., Тісов О. В., Мікосянчик О. О., Науменко Н. О.; заявник та патентовласник Кіндрачук М. В., Духота О. І., Кудрін А. П., Тісов О. В., Мікосянчик О. О., Науменко Н. О. – № u 2014 12654; заявл. 25.11.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8. – 6 с.

50. Свідоцтво 38664. Методика розрахунку триботехнічних параметрів паркування двигуна внутрішнього згорання / Мікосянчик О. О.; заявник та власник Національний транспортний університет. – № 38824, заявл. 31.03.2011; зареєстровано 21.06.2011. – 2 с.

Акти впровадження та реалізації результатів наукових досліджень.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора

з наукової роботи

Інституту проблем міцності

імені Г.С.Писаренка НАН України

докт. техн. наук

А.П.Зіньковський

2016 р.



А К Т

про реалізацію наукових досліджень

Мікосянчик Оксани Олександрівни

В Національному авіаційному університеті розроблено методику та створено автоматизований триботехнічний комплекс для дослідження зносостійкості сучасних матеріалів та зміцнюючі покриттів. Автор розробки – к.т.н., доцент О.О.Мікосянчик. Комплекс забезпечує нестационарні умови тертя, які характеризуються циклічністю проведення експериментів в режимі запуск (чисте кочення) – стаціонарна робота (кочення з різним ступенем проковзування) – гальмування (чисте кочення) – зупинка. Напруження в зоні контакту досягають 300 МПа.

Комісія у складі: голови комісії – завідувача лабораторії 6.1 „Зміцнення поверхні елементів конструкцій”, д.т.н., професора Б.А.Ляшенка, членів комісії: докторів техн. наук О.Г.Трапезона і М.А.Долгова, к.т.н., ст. наук. співробітника В.І.Калініченка встановила:

– з допомогою триботехнічного комплексу досліджено зносостійкість покриттів, нанесених газотермічним методом, вакуум-плазмовим, іонним азотуванням, електроіскровим легуванням та їх різними комбінаціями;

– результати наукових досліджень дозволили оптимізувати склад, структуру та технології по триботехнічним характеристикам. Оптимізація термоциклічного іонного азотування по триботехнічним характеристикам дозволила підвищити твердість на 20% та підвищити продуктивність в 3 рази;

– впровадження результатів триботехнічних досліджень при виконанні проекту Р8.19 програми „Ресурс” „Продовження ресурсу вертолїтних редукторів та високоточних деталей авіаційної техніки термоциклічним іонним азотуванням” на ПК „Авікпром” підвищило довговічність мотор-редукторів від 10 тис. годин до 50 тис.;

– результати триботехнічних досліджень використані при виконанні промислових замовлень ряду підприємств України, в тому числі Сумихімпром, Одесаавіаремсервіс, Авіакон, Дніпровський завод прокатних валків та ін.

Голова комісії:
д.т.н., професор

Б.А.Ляшенко

Члени комісії:
д.т.н.

О.Г.Трапезон

д.т.н.

М.А.Долгов

к.т.н.

В.І.Калініченко

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор державного заводу
 «Паллада» Маломан В.Ф.
 17 лютого 2016 р.



АКТ

про реалізацію результатів наукових досліджень

Мікосянчик Оксани Олександрівни

Комісія у складі:

голови комісії - директор державного заводу «Паллада» Маломан В.Ф.

та членів комісії - головний інженер Марченко В.М.

- начальник технічного відділу Шарафанов Ю.І.

встановила, що результати наукових досліджень, які отримані особисто Мікосянчик О.О., реалізовані в розробленому комплексі технологічно-експериментальних методів дослідження триботехнічних властивостей матеріалів з покриттями, що призначені для оптимізації технологічних процесів нанесення покриттів при виготовленні та зміцненні, ремонті та відновленні зубчастих коліс НШ 250-04 насосів НШ-250 та шестерень НШ 63М-03/09-00-02 насосів НШ 63М насосів методом газополуменевого напилення самофлюсуєчого гранульованого порошку ПГ-АН9 (гранулометричний склад основної фракції порошку відповідає розміру часток 40...80 мкм; товщина напиленого шару за один прохід складає 0,1...0,25 мм; загальна товщина покриття по профілю зуба після шліфування складає 0,7...1,0 мм).

За результатами триботехнічних випробовувань покриття самофлюсуєчого порошку ПГ-АН9 на сталених поверхнях встановлено:

- збереження стійкості та адгезійної міцності в умовах динамічного навантаження;

– підвищення антифрикційних властивостей в 1,5...2 рази;
 – висока змащувальна здатність в умовах кочення та кочення з проковзуванням;

– зниження в 2...3 рази приросту питомої роботи тертя в триботехнічному контакті;

– зменшення ступеня пластифікування (розміцнення) поверхневих шарів покриття при формуванні на них граничних змащувальних шарів;

– збільшення зносостійкості в 2 рази нанесеного покриття товщиною 0,7...1,0 мм за рахунок зростання вихідної мікротвердості поверхневих напилених шарів, в порівнянні з покриттям товщиною 0,3...0,5 мм.

Даний акт не є основою для фінансових претензій до підприємства.

Голова комісії:



Маломан В.Ф.

(прізвище, ініціали)

Члени комісії:


(підпис)

Марченко В.М

(прізвище, ініціали)


(підпис)

Шарафанов Ю.І.

(прізвище, ініціали)



АКТ
про реалізацію результатів наукових досліджень
Мікосянчик Оксани Олександрівни

Комісія встановила, що результати наукових досліджень, які отримані особисто Мікосянчик О.О., реалізовані в розробленому комплексі технологічно-експериментальних методів дослідження триботехнічних властивостей матеріалів з покриттями, що призначені для оптимізації технологічних процесів нанесення покриттів при виготовленні та зміцнення, ремонті та відновленні зубчастих коліс НШ 250-04 насосів НШ-250 та шестерень НШ 63М-03/09-00-02 насосів НШ 63М методом електродугового напилення дроту марки ПП-Нп-40Х13 та ПП-Нп-30ХГСА ТУУ 05416923.019-97 DIN 8555-MF-6-50-GT DIN 8555-UP6-GF-SF2-50 (діаметр дроту 1.6 мм) з послідуочим імпульсним іонним азотуванням. Товщина напиленого шару за один прохід складає 0,1...0,25 мм, загальна товщина напиленого шару покриття зі сталі 40Х13 та 30ХГСА на робочій поверхні після шліфування складає 1,0 – 1,2 мм. Режими азотування (концентрація аргону 80%, концентрація азоту 20%, тривалість азотування - 6 годин, робочий тиск азотування 200 МПа, температура процесу - 500-550⁰С. Глибина азотованого шару 0,2 мм. Твердість азотованого гару 60-70 HRC.

Для визначення змашувальних, антифрикційних, протизношувальних властивостей напиленого покриття в нестаціонарних умовах роботи при коченні та коченні з проковзуванням та дослідження сформованих в процесі тертя захисних поверхневих структур розроблена і використовувалась спеціальна методика та проведено лабораторні випробування дослідних зразків з напиленим шаром. Для оцінки напружено – деформованого стану поверхневих шарів металу та локалізації максимальних дотичних напруг зсуву при терті запропонована математична модель. Проведений аналіз змашувальних, антифрикційних та протизношувальних властивостей сформованих в процесі тертя захисних поверхневих структур свідчить, що вони характеризуються ефективною несучою здатністю та проявляють високий опір зношуванню. Зносостійкість контактних поверхонь з товщиною напиленого шару до 1,0 – 1,2 мм підвищується, в середньому, в 2...2,5 рази, в порівнянні з товщиною напиленого шару покриття до 0,3 мм.

Керівник комісії:
 Начальник дільниці

Золотуєв В.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «Стокхолдер»



Б.В.Львов

"30" серпня 2016 р.

АКТ

про реалізацію результатів наукових досліджень
Мікосянчик Оксани Олександрівни

Комісія встановила, що результати наукових досліджень, які отримані особисто Микосянчик О.О., реалізовані в розробленому комплексі технологічно-експериментальних методів дослідження триботехнічних властивостей матеріалів з покриттями, що призначені для оптимізації технологічних процесів нанесення покриттів при виготовленні та зміцненні, ремонті та відновленні зубчастих коліс НШ 250-04 насосів НШ-250 та шестерень НШ 63М-03/09-00-02 насосів НШ 63М насосів методом газополуменевого напилення самофлюсуючого гранульованого порошку ПГ-АН9 (гранулометричний склад основної фракції порошку відповідає розміру часток 40 – 80 мкм; товщина напиленого шару за один прохід складає 0,1...0,25 мм; загальна товщина покриття по профілю зуба після шліфування складає 0,7 – 1,0 мм).

За результатами триботехнічних випробовувань покриття

самофлюсуючого порошку ПГ-АН9 на сталених поверхнях встановлено:

- збереження стійкості та адгезійної міцності в умовах динамічного навантаження;
- підвищення антифрикційних властивостей в 1,5 – 2 рази;
- висока змащувальна здатність в умовах кочення та кочення з проковзуванням;
- зниження в 2 – 3 рази приросту питомої роботи тертя в триботехнічному контакті;
- зменшення ступеня пластифікування (розміцнення) поверхневих шарів покриття при формуванні на них граничних змащувальних шарів;
- збільшення зносостійкості в 2 рази нанесеного покриття товщиною 0,7 – 1,0 мм за рахунок зростання вихідної мікротвердості поверхневих напилених шарів, в порівнянні з покриттям товщиною 0,3 – 0,5 мм.

Керівник комісії:

Начальник дільниці

Handwritten signature of V.V. Zolotushev.

Золотуєв В.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор ТОВ «Стокхолдер»
 Б.В.Львов
 23099170
 «30» серпня 2016 р.

АКТ
про реалізацію результатів наукових досліджень
 Мікосянчик Оксани Олександрівни

Комісія встановила, що результати наукових досліджень, які отримані особисто Микосянчик О.О., реалізовані в розробленому комплексі технологічно-експериментальних методів дослідження триботехнічних властивостей матеріалів з покриттями, що призначені для оптимізації технологічних процесів нанесення покриттів при виготовленні та зміцненні, ремонті та відновленні зубчастих коліс НШ 250-04 насосів НШ-250 та шестерень НШ 63М-03/09-00-02 насосів НШ 63М методом електродугового напилення порошкового дроту марки ПП-Нп-40Х13 та ПП-Нп-30ХГСА ТУУ 05416923.019-97 DIN 8555-MF-6-50-GT DIN 8555-UP6-GF-SF2-50 (діаметр дроту 1.6 мм). Товщина напиленого шару за один прохід складає 0,1...0,25 мм, загальна товщина напиленого шару покриття зі сталі 40Х13 та 30ХГСА на робочій поверхні після шліфування складає 1,0 – 1,2 мм.

Для визначення змащувальних, антифрикційних, протизношувальних властивостей напиленого покриття в нестационарних умовах роботи при коченні та коченні з проковзуванням та дослідження сформованих в процесі тертя захисних поверхневих структур розроблена і використовувалась спеціальна методика та проведено лабораторні випробування дослідних зразків з напиленим шаром. Для оцінки напружено – деформованого стану поверхневих шарів металу та локалізації максимальних дотичних напружень при терті запропонована математична модель. Проведений аналіз змащувальних, антифрикційних та протизношувальних властивостей сформованих в процесі тертя захисних поверхневих структур свідчить, що вони характеризуються ефективною несучою здатністю та проявляють високий опір зношуванню. Зносостійкість контактних поверхонь з товщиною напиленого шару до 1,0 – 1,2 мм підвищується, в середньому, в 2...2,5 рази, в порівнянні з товщиною напиленого шару покриття до 0,3 мм.

Керівник комісії:
 Начальник дільниці



Золотуєв В.В.

„ЗАТВЕРДЖУЮ „
 Директор Заводу технічних масел «АРІАН»
 Е.Г.Рудик
 2010 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів науково-дослідної роботи

Ми, представники Національного транспортного університету, наук. керівник Дмитриченко М.Ф., відп. виконавець Мнацаканов Р.Г., доц. Мікосянчик О.О., асист. Туриця Ю.О.

посада (науковий керівник, відповідальний виконавець), прізвище, ім'я, по батькові та підприємства (організації) – ТОВ ЗТМ «АРІАН»

повна назва підприємства (організації)

м.Київ, вул. Кучера, 3, директор Рудик Едуард Григорович

адреса, посада; прізвище, ім'я, по батькові

склали дійсний акт в тому, що результати науково-дослідної роботи № ДЗ/499-2009 „Розроблення моторних масел з нанодисперсними добавками для двигуна, що працює на дизельному та альтернативному паливі, з метою підвищення його надійності та ресурсу”, шифр та назва НДР

впроваджені в виробництво.

Назва впровадженого результату НДР

Досягнутий фактичний ефект
 (соціальний, технічний, організаційний,
 економічний (грн. в рік))

«Технологія компаундування композицій товарних масел з поліфункціональними присадками та нанодисперсними добавками».

Розроблені рекомендації щодо виготовлення моторних олів для дизельних двигунів з покращеними антифрикційними та протизношувальними властивостями за рахунок введення нанодисперсних модифікаторів тертя.

Представники НТУ
 М.Ф.Дмитриченко
 Р.Г.Мнацаканов
 О.О.Мікосянчик
 Ю.О.Туриця



Представники підприємства,
 які впроваджують результати НДР

Директор виробництва Заводу технічних масел «АРІАН»

В.Ф.Ісламов



АКТ

про реалізацію результатів наукових досліджень

Мікосянчик Оксани Олександрівни

Комісія у складі:

голови комісії – директора управління виробництвом Ісламова В.Ф.,

та членів комісії – начальника заводської вимірювальної нафтохімічної лабораторії
Олійник Н.М.

- лаборанта заводської вимірювальної нафтохімічної лабораторії
Довчунас О.О.

встановила, що результати наукових досліджень, які отримані особисто Мікосянчик О.О. при дослідженні змащувальних, антифрикційних, протизношувальних та реологічних характеристик мастильних матеріалів на автоматизованому комплексі для оцінки триботехнічних характеристик пар тертя, реалізовані в наступних методиках.

1. Методика оцінки триботехнічних характеристик промислових зразків мастильних матеріалів. Методика оцінки триботехнічних властивостей мастильних матеріалів та пар тертя дозволяє визначити кінетику зміни товщини мастильного шару, коефіцієнта тертя, питомої роботи тертя, градієнта швидкості зсуву і напруги зсуву змащувальних шарів, ефективну в'язкість в контакті, інтенсивність зношування контактних поверхонь в нестационарних умовах тертя. За результатами досліджень надаються рекомендації щодо застосування мастильного матеріалу в конкретних вузлах та механізмах пар тертя.

2. Методика оцінки термомеханічної стійкості граничних плівок, сформованих на активованих тертях контактних поверхнях. Методика включає:

- припрацювання контактних поверхонь в нестационарних умовах тертя (в гідродинамічному та еластогідродинамічному режимах мащення) при контактному тиску по Герцу (100 - 500 МПа) в умовах кочення з різним ступенем проковзування (від 3 до 40%) до стабілізації основних триботехнічних показників контакту (товщини мастильного шару на стоянці, в пусковий період і в період, який відповідає обраним максимальним швидкостям кочення випереджаючої і відстаючої поверхонь; коефіцієнта тертя; питомої роботи тертя), які характеризують формування стабільного граничного шару компонентами мастильного матеріалу;

- оцінка зміни основних триботехнічних показників контакту в умовах примусового припинення подачі мастильного матеріалу в зону тертя (в граничному та напівсухому режимі мащення) до прояву перших ознак схоплювання контактних поверхонь.

Даний акт не є основою для фінансових претензій до підприємства.

Голова комісії:



Ісламов В.Ф.

Члени комісії:



Олійник Н.М.



Довчунас О.О.