

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

Журавель Д.П., Новік О.Ю., Бондар А.М., Петренко К.Г.

ТРИБОТЕХНІКА

КУРС ЛЕКЦІЙ

для здобувачів ступеня вищої освіти «Магістр»
спеціальності 133 – «Галузеве машинобудування»



Мелітополь, 2019

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО**

**Журавель Д.П., Новік О.Ю.,
Бондар А.М., Петренко К.Г.**

ТРИБОТЕХНІКА

Курс лекцій

Мелітополь, 2019

УДК 620.179.621.112

Т 67

Автори: Журавель Д.П., Новік О.Ю., Бондар А.М., Петренко К.Г.

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради механіко-технологічного факультету Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного

Рецензенти:

К.О. Самойчук – д.т.н., доцент, в.о. зав. кафедри обладнання переробних і харчових виробництв імені професора Ф.Ю. Ялпачка, Таврійський державний агротехнологічний університет;

В.В. Черкун – к.т.н., доцент кафедри технології конструкційних матеріалів, Таврійський державний агротехнологічний університет.

Журавель Д.П.

Триботехніка: курс лекцій / Д.П.Журавель, О.Ю. Новік, А.М. Бондар, К.Г. Петренко. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. – 280 с.

У курсі лекцій наведено структуру дисципліни «Триботехніка». Розглянуто питання теорії тертя і зношування твердих тіл в різних умовах на основі сучасного рівня знань з врахуванням фізики явищ, які протікають в зоні контакту взаємодіючих поверхонь. Наведено способи змащування, індивідуальні і групові властивості елементів і моделі трибологічних систем. Приведені методи розрахунку сил тертя і строку служби деталей і матеріалів. Наведені відомості про самоорганізуючі процеси при фрикційній взаємодії і моделюванні триботехнічних характеристик. Приведені рекомендації по вибору матеріалів вузлів тертя і їх змащування, способи підвищення зносостійкості, а також методологію розрахунку і прогнозування зносостійкості при проектуванні.

© Д.П. Журавель, О.Ю. Новік,
А.М. Бондар, К.Г. Петренко, 2019

ЗМІСТ

1	Триботехніка та її структура	4
2	Характеристика поверхні твердих тіл	29
3	Фізико-хімічні властивості поверхонь тертя	50
4	Теоретичні основи тертя і зношування	60
5	Особливості тертя матеріалів трибоспряжень	77
6	Види тертя	85
7	Види зношування і пошкоджуваності поверхонь тертя	105
8	Втомне, корозійне, кавітаційне, ерозійне, водневе та зношування при фретінг-корозії	115
9	Змащувальні матеріали	136
10	Режими мащення	165
11	Триботехнічні матеріали	181
12	Діагностика вузлів тертя	219
13	Методи і засоби досліджень тертя і зношування	230
14	Технологічні засоби підвищення зносостійкості	246
15	Практичне використання триботехніки в технології виробництва	261

Лекція 1

ТРИБОТЕХНІКА ТА ЇЇ СТРУКТУРА

План

- 1.1. Вступні відомості
- 1.2. Значення тертя в проблемі матеріало- та енергозбереження
- 1.3. Вклад вітчизняних і зарубіжних вчених у створенні і формуванні науки про тертя і зношування в машинах
- 1.4. Основні терміни й визначення
- 1.5. Тертя і підвищення надійності машин
- 1.6. Збитки від тертя і зношування в машинах

1.1. Вступні відомості

З розвитком техніки питання підвищення довговічності й надійності машин набувають все більшого значення. Вивченням причин руйнування деталей в експлуатації та розроблення методів підвищення довговічності машин займаються вчені і спеціалісти промислово розвинених країн світу.

Зменшення матеріало- та енергомісткості об'єктів виробництва і промислового виробництва в цілому, підвищення рівня автоматизації промисловості й сільського господарства, збільшення потужності і швидкохідності машин, необхідність роботи механізмів і приладів в різних газових і рідинних середовищах за низьких і високих температур висувають, в наш час, ряд додаткових вимог із підвищення надійності й довговічності технологічного обладнання, приладів та інших технічних систем.

У результаті підвищення довговічності деталей машин скорочуються витрати запасних частин і матеріалів на їх виготовлення, зменшується кількість працюючих і трудомісткість при експлуатації, технічному обслуговуванні та ремонті. Збільшення терміну служби машин рівноцінне збільшенню їх випуску на тих же виробничих площадках. Вирішуючи завдання підвищення надійності і довговічності машин, ми тим самим збільшуємо виробничі потужності машинобудівних підприємств.

У загальній проблемі надійності, точності і довговічності машин, механізмів і приладів основне місце належить питанням тертя, змащувальній дії, зношуванню поверхонь деталей і робочих органів, які є між собою в дуже складних кореляційних залежностях.

З розвитком науково-технічного прогресу необхідно проводити складніші розрахунки сил опору у важконавантажуваних, автоматичних і особливо точних вузлах тертя і забезпечувати їх антифрикційність в експлуатаційних умовах. У багатьох галузях промисловості виникла необхідність створення спеціальних фрикційних пристроїв і гальмівних систем, для чого потрібно

керувати процесами зовнішнього тертя, знати і використовувати його закони. Наука про тертя відстає від потреб практики і в наш час не може дати відповіді на багато важливих питань у реальному масштабі. Сучасний стан теорії зовнішнього тертя не дозволяє конструктору проводити необхідні розрахунки сил тертя в машинах, які проектують.

В останні роки досягнуто значних успіхів у створенні нових матеріалів (композиційні сплави, полімерні матеріали, тверді мастила), однак спеціалісти не мають необхідної інформації про зовнішнє тертя і зношування в машинах і механізмах, яка потрібна для їх розроблення і застосування.

Одним із актуальних завдань сучасного машинобудування є раціональне застосування мастил, що в багатьох випадках визначає працездатність і довговічність машин. Складні умови експлуатації сучасних машин різко підвищили вимоги до змащувальних матеріалів. У результаті цього отримала подальший розвиток теорія змащувальної дії, особливо при граничному терті. Виникла необхідність глибокого вивчення механізмів і закономірностей механічного і фізико-хімічного впливу мастил з різним складом за різноманітних умов тертя. Особливе місце зайняло використання присадок до змащувальних матеріалів (поверхнево-активних, хімічно-активних) і твердих мастил. Значну увагу при цьому слід приділяти створенню сучасних автоматизованих систем змащування технічних засобів і машин.

Питання зношування є центральними в загальній проблемі тертя, змащувальної дії і зношування матеріалів. Кожен новий крок з розвитку машин, механізмів і приладів пов'язаний з вивченням явищ, що відбуваються на контакті спряжених деталей, з урахуванням міцності поверхні і їх руйнування (зношування). В боротьбі зі зношуванням на першому місці стоїть завдання створення загальної теорії опору зношування матеріалів. Ця теорія необхідна для обґрунтованого застосування конструкційних, технологічних і експлуатаційних засобів, недопущення патологічних процесів пошкоджуваності й досягнення мінімального зношування у вузлах тертя. Важливе значення має розроблення методів розрахунків нормального зношування і граничних умов переходу до патологічних процесів руйнування при терті.

Тертя, змащування та зношування в машинах органічно пов'язані між собою. Неможливо говорити про вирішення завдання зносостійкості без допомоги теорії тертя і зношування чи про розроблення змащувальної техніки і матеріалів без розуміння природи явищ тертя і зношування. Нерозривний зв'язок між завданнями задачами тертя, змащування і зношування твердих тіл завжди виступає на перший план у дослідницьких роботах, що мають прикладний напрямок. Між тим, ці три взаємопов'язані області в багатьох теоретичних роботах розглядають окремо, як самостійні.

При аналізі сучасного стану теорії і практики необхідно наголосити ще про одну важливу особливість. Усі прикладні роботи направлені на досягнення

добрих умов тертя і зношування матеріалів, на усунення патологічних процесів у зоні контакту, на різке зменшення величини зношування. В багатьох випадках надійність машин, як вказувалось вище визначається довговічністю пар тертя і для більшості видів технологічного обладнання і машин першорядне значення має підвищення зносостійкості деталей. Тому важливою проблемою є впровадження і подальший розвиток робіт зі знаходження ефективних заходів зміцнення поверхневих шарів деталей.

Необхідність дослідження зносостійкості деталей машин витікає і з економічних витрат. Однією з найголовніших причин зношувальних відмов є власне зношування рухомих спряжень машин. Втрати в машинобудуванні високорозвинених держав унаслідок зношення і тертя досягають 8% національного доходу. Характерно, що хоча відносні розміри зношування, наприклад, відношення втрати маси машини до її первинної маси, дуже малі, вони призводять до виходу з ладу всього дорогого виробу. Можна навести такі приклади. Легковий автомобіль має в середньому масу, яка дорівнює 1000 кг. Якщо втрата його маси внаслідок зношування вузлів тертя складе 1 кг, то він вже не підлягає ремонту. Костюм, зшитий з 3 м² тканини, непридатний, якщо зношеною виявляється частина його поверхні площею лише 0,001 м².

На сьогодні застосовують різноманітні ефективні способи підвищення зносостійкості і довговічності деталей машин. Провідна роль у створенні довговічних і надійних конструкцій машин належить конструкторам і технологам, які на всіх етапах їх створення (конструювання, виготовлення, доведення) безпосередньо впливають на технічні характеристики машини і працездатність окремих її вузлів і деталей. На основі наукового аналізу літературних джерел, а також особистого досвіду і знань конструктор і технолог повинні знайти оптимальні конструктивні вирішення, правильно вибрати матеріал і визначити раціональні технологічні методи виготовлення і зміцнення деталей машин.

Складність проблеми, що розглядається, зумовила формування і створення самостійної науки про тертя і зношування - трибології (цей термін увійшов у світову наукову практику в 1966р.), яка визначається як наука і технологія взаємодії поверхонь, що знаходяться у відносному русі, а також пов'язаних із цим явищем наслідків. Як окрема **прикладна галузь трибології, що охоплює всі стадії процесу створення, технічного обслуговування, експлуатації і ремонту технічних засобів і яка в наш час розвивається самостійно, носить назву «Триботехніка».**

Роботи українських учених в галузі трибології добре відомі, їх визнають в

усьому світі. Вітчизняну наукову школу з трибології створив і сформував у 50...70 роках 20-го століття видатний вчений Борис Іванович Костецький. Професор Б.І. Костецький і його учні розробили структурно-енергетичну теорію тертя і зношування в машинах, яка найсучасніша і широко відома в світі. Структурно-енергетична теорія тертя базується на відкритих професором Б.І. Костецьким явищах структурної пристосовності матеріалів при терті та окисного зношування. В деяких теоретичних розробках зарубіжних учених питання про окисне зношування, як про певний процес так званого нормального тертя, донедавна піддавалося сумніву. Широкі експериментальні дослідження й теоретичні обґрунтування, які очолював професор Б.І. Костецький, практика космічного машинобудування, ядерної енергетики і провідних галузей хімічного і спеціального машинобудування підтвердили провідну роль процесів окислення і самоорганізації при терті в машинах.

1.2. Значення тертя в проблемі матеріало- та енергозбереження

Всебічне підвищення ефективності та якості виробництва, створення умов суворої економії енергії і матеріалів є дуже важливою народно-господарською і соціальною проблемою. Особливе місце у вирішенні цієї проблеми займають досягнення в області тертя, змашування і зношування твердих тіл у вузлах тертя. Кожна технічна система (машина, технологічне обладнання, апарат, робочий орган, агрегат, механізм, деталь) складається з більшого або меншого числа вузлів тертя.

Встановлено, що *на сьогодні приблизно від однієї третини до половини світових енергетичних ресурсів* в тій чи іншій формі витрачається на тертя, тому значення проблеми тертя та зношування деталей машин в сучасному висококомеханізованому світі важко переоцінити. Оскільки зношування рухомих спряжень під впливом сил тертя призводить до передчасного виходу з ладу машин і невиправдано великим затратам на їх ремонт, боротьбі з тертям і зношуванням в машинах і механізмах в усіх промислово розвинених країнах світу приділяють підвищену увагу.

Із середини минулого століття всі завдання і питання, наукові дослідження, їх практична реалізація пов'язані з проблемою тертя. *Змашування і зношування в машинах були об'єднані у самостійному науковому напрямку, який з 1966 р. отримав назву "трибологія". Слово "Трибологія" походить від грецького слова "трибос", що означає тертя, було визначено як "наука і технологія взаємодії поверхонь, що перебувають у відносному русі, а також пов'язаних з цим явищем наслідків".*

Значущість трибології в останні десятиріччя неухильно підвищується.

Вона охоплює різні сфери діяльності людини, але особливу вагомість набуває у зв'язку з необхідністю підвищення зносостійкості машин, приладів, обладнання, інструментів, робочих органів, інших виробів машинобудування, а також зменшення втрат на тертя при їх використанні. Вирішення завдань із застосування досягнень трибології носить яскраво виражений міжгалузевий характер і здійснюється на державному рівні в багатьох високорозвинених в науково-технічному напрямку західних країнах.

Професор Джост Х.П. у праці “Прошлое и будущее трибологии” (“Трение и износ”, 1990. – Т.11, №1. – С. 149–160) наводить деякі приклади економічного значення цього напрямку: “Звіт DES констатує, що тільки в Сполученому Королівстві Великобританії можна б було зекономити 515 млн. фунтів стерлінгів (за оцінкою 1965 р.), якби більше уваги приділялося трибології.

Досвід останніх 22 років показав, що ця цифра складає близько 1% валового національного доходу, але вона суттєво занижена. Нині вважають, що **достатня увага до трибології, особливо на стадії навчання, наукових досліджень та використання, могла б дати економію від 1,3% до 1,6% валового національного доходу. І найважливіше, що перші 20% такої економії можна отримати без значних капіталовкладень**” [1].

У багатьох ширших офіційних дослідженнях, аніж у Великобританії, ФРН, Канаді, Китаї і деяких інших країнах, в кожному окремому випадку підтверджувалася справедливність розміру вказаної економії від валового національного доходу. Тому термін “трибологія” тепер включено до словника кожної промислово розвиненої країни світу. Він отримав завершальне етимологічне визнання і занесений у додаток до Оксфордського словника англійської мови.

Слід звернути увагу, що в усіх університетах та політехнічних вузах світу нині є професорські кафедри і курси з трибології. Ця наука проникла навіть у шкільні програми. Громади, які вивчають трибологію, успішно функціонують у всіх розвинених країнах.

В Україні до 80-х років ХХ століття не існувало подібних кафедр або дисциплін при кафедрах, а слово „трибологія” навіть не було відоме більшості інженерів, що займалися проектуванням, експлуатацією та ремонтом техніки. Однак слід відзначити, що останнім часом пройшли певні зрушення в цьому напрямку. В багатьох технічних вищих навчальних закладах України введено

навчальні курси з трибології. В 1993 році в Україні створено Спілку трибологів із центром у Київському національному авіаційному університеті, мета котрої – втілення перспективних ідей і розроблень у промисловість.

Важко навести приклади з економічних втрат в Україні, оскільки в друкованих виданнях такі не зустрічаються. Однак в 1990 р. у журналі “Тертя та зношування” акад. В.С. Авдуєвський написав: ***“На практиці недостатня зносостійкість призводить до простоїв машин, спричинених непрацездатністю, надзвичайно велике завантаження основних виробничих потужностей для виготовлення запасних частин (до 30% для автотракторної техніки), розростання мережі ремонтних організацій та майстерень (4 млн. працюючих у країні зайнято ремонтом), дуже складна та неефективна система розподілу запасних частин”***.

Наведена інформація стосується не лише народного господарства, але й усіх галузей техніки, особливо тих, що стосуються ремонтних підприємств і системи розподілу запасних частин.

Провідні конструкторські бюро і підприємства, які займаються проектуванням і виготовленням складних агрегатів, не мають у своєму складі спеціалістів-трибологів і вирішують раніше перераховані завдання методом «спроб та помилок», шляхом стендових випробувань, що неефективно і неекономічно. Виходячи з викладеного, можна констатувати, що розвиток і реалізація потенціалу фундаментальних і прикладних знань в області трибології в багатьох випадках відстають від потреб науково-технічного прогресу, а ті знання котрі є, не повною мірою використовують провідні конструкторські організації через нестачу спеціалістів. Тому останніх два-три десятиріччя в усіх промислово розвинених країнах характеризуються посиленою увагою до проблем тертя та зношування в машинах, шкідливі наслідки яких оцінюються багатьма мільярдами доларів щорічно.

Аналіз наукових публікацій та тематика крупних комплексних і спеціалізованих науково-технічних конференцій останніх років, думки багатьох провідних учених-трибологів дають змогу виділити в сучасній трибології, як області знань і її додатків, шість найважливіших і перспективних областей, які самостійно розвиваються: ***трибоаналіз (теоретичні положення трибомеханіки, трибофізики та трибохімії), трибоматеріалознавство (вивчення триботехнічних матеріалів та керування їх властивостями); триботехнологія (технологічні методи керування фрикційними характеристиками рухомих спряжень); триботехніка (сукупність технічних засобів, що підлягають тертю та зношуванню); трибомоніторинг (засоби та методи діагностики, контролю та випробування трибосистем); трибоінформатика (засоби та методи опрацювання, зберігання та передавання трибологічної інформації)***.

Трибоаналіз – важливий розділ трибології, що охоплює проблеми

накопичення і систематизації наукової інформації про фундаментальні дослідження основних фрикційних процесів, а також побудову моделей цих процесів з метою прогнозування результатів контактної взаємодії твердих тіл у заданих умовах. Трибоаналіз є базисом для побудови та розвитку решти п'яти областей і мають метою побудову моделей процесів для практичного використання результатів у реальних конструкціях вузлів тертя.

Триботехнічне матеріалознавство (трибоматеріалознавство) складає специфічний розділ науки про матеріали для вузлів тертя. Трибоматеріалознавство є зв'язуючою ланкою між результатами теоретичних досліджень, що проводять в області трибоаналізу, і комплексів знань, що втілюються в триботехніці у вигляді реальних конструкцій вузлів тертя.

Метали та їх сплави відіграють роль основних матеріалів для вузлів тертя. В останні роки вони активно витісняються перш за все різноманітними композитами, але в багатьох випадках зберігають своє значення і продовжують вдосконалюватися. Тому метою цієї галузі є розроблення вимог до матеріалів для вузлів тертя, технологій створення таких матеріалів, основ їх підбору у вузли тертя і аналіз закономірності їх роботи. Сказане справедливе і стосовно змащувальних матеріалів – твердих, рідких, газоподібних і гібридних.

Триботехнологія, так само, як і трибоматеріалознавство, є зв'язуючою ланкою між трибоаналізом і реальними конструкціями вузлів тертя й охоплюють два великих напрямки прикладної трибології: **1 – вивчення триботехнічних аспектів формоутворення деталей, обробки матеріалів руйнуванням та деформуючими способами; 2 – вивчення та розроблення методів дослідження потрібних триботехнічних властивостей поверхонь тертя за рахунок зміцнюючої дії та нанесення спеціальних покриттів.**

Зауважимо, що особливо важливою технологічною характеристикою поверхні тертя є шорсткість та її орієнтація відносно напрямку переміщення тіл тертя. Вона визначає коефіцієнт тертя, зношування, контактну жорсткість, час припрацювання, фактичну площу дотику, тепло- та електропровідність контакту. Оптимальний вибір технологічної шорсткості, її орієнтація на деталях дає значне скорочення часу припрацювання виробів і зменшення зношування на цьому етапі. При неправильному врахуванні цих факторів зношування за час припрацювання може досягти величин, які дорівнюють зношуванню на весь період експлуатації виробу, що залишився.

Трибомоніторинг – самостійна область трибології, котра, ґрунтуючись на трибоаналізі, повинна використовувати як на етапі випробування і доведення вузлів тертя, так і на етапі їх експлуатації. Трибомоніторинг включає два напрямки – трибометрію і трибодіагностику.

Трибометрія охоплює методи і засоби вимірювання основних параметрів тертя і є важливим елементом усіх видів експериментальних, модельних і натурних досліджень вузлів тертя.

Трибодіагностика – як сукупність методів і засобів неперервного контролю і керування станом фрикційних параметрів деталей та вузлів машин – один із наймолодших напрямків у забезпеченні створення сучасної та надійної триботехніки. Одночасне використання трибометрії і трибодіагностики на модельних і реальних конструкціях дозволить забезпечити створення оптимальної конструкції вузла тертя, визначити можливі області його функціонування і спрогнозувати ресурс. Наявність вбудованих систем контролю на реальних конструкціях призведе до значного скорочення матеріальних засобів у процесі експлуатації й ремонту машин і механізмів.

У коло проблем моніторингу входить все більше завдань із усіх областей трибоаналізу, трибоматеріалознавства, триботехнології, бо всі вони служать для створення надійних і довговічних вузлів тертя, тобто є основою для розвитку триботехніки і трибоінформатики.

Триботехніка як прикладна область трибології охоплює кінцеву стадію процесу створення вузлів тертя, акумулюючи в них найновіші досягнення **трибоаналізу, трибоматеріалознавства, триботехнології і трибомоніторингу**. Перш за все це знаходить відображення в методах розрахунку і конструювання, оскільки від правильного визначення конфігурації, призначення розмірів, вибору матеріалів і технології виготовлення конструкції та її елементів тертя залежить працездатність машин і механізмів.

Однак уважне співставлення свідчить про відставання в багатьох випадках практичних додатків триботехніки від рівня досягнутих результатів наукових досліджень, з одного боку, і неготовність трибоаналізу дати відповіді на багато питань конструкторів і технологів – з іншого. До цього часу не розроблені надійні модельні схеми і критерії переходу від простих схем випробовування на тертя і зношування до реальних вузлів. Це призводить до того, що закладені в трибоконтрукцію завищені запаси “незнання” не часто зводять до мінімуму використання досягнень в області трибоматеріалів і триботехнології. Значні резерви підвищення працездатності закладені в удосконаленні конструктивних вирішень вузлів тертя.

Триботехніка визначається як наукова і технічна дисципліна, яка вивчає взаємодію поверхонь при їх відносному русі.

Завдання триботехніки полягає у дослідженні тертя, змащування і зношування механічно оброблених поверхонь з метою отримання детальної уяви про їх взаємодію.

Мета досліджень з триботехніки – свідоме мінімізування і виключення непотрібних втрат всюди, де є поверхні тертя. Поверхні ковзання і кочення – це ключ до підвищення ефективності в сучасному промислово розвиненому високотехнізованому суспільстві.

Трибоінформатика є заключною ланкою в наукових дослідженнях і практичних додатках трибології. Метою трибоінформатики є отримання, узагальнення, зберігання й використання інформації, отриманої в усіх раніше перерахованих областях трибології. Дану інформацію повинні широко використовувати вчені-трибологи в процесі аналізу, створення нових матеріалів і технологій для вузлів тертя, розроблення методик діагностування. Використання такої інформації на етапі проектування дозволить конструктору приймати вірні рішення у створенні нових конструкцій.

1.3. Вклад вітчизняних і зарубіжних вчених у створенні і формуванні науки про тертя і зношування в машинах

Тертя – дивний феномен природи. Воно подарувало людству тепло і вогонь, можливість за короткий час зупинити швидкісний поїзд і автомобіль, і навпаки, забезпечити їх переміщення, здійснити механічну обробку металу, прискорити хімічну реакцію в сто тисяч разів, записати людський голос на платівку, почути звуки скрипки і багато іншого.

Дослідження, присвячені розробленню теорії тертя, проводили багато вчених протягом віків. *Тертя вивчали Леонардо да Вінчі і Ломоносов, Амонтон і Кулон, Петров і Ейлер, Менделєєв і Рейнальдс та інші вчені.* Перші відомі досліди поставив Леонардо да Вінчі (1508р.). У результаті цих робіт вперше було сформульовано поняття про коефіцієнт зовнішнього тертя. Леонардо да Вінчі вважав, що коефіцієнт тертя є величиною постійною (0,25) для різних тіл за умови однакової “гладкості” поверхонь.

Цю ж точку зору в подальшому підтримували Г.Амонтон і Т.Бюлфінгер. У ранніх дослідженнях переважали чисто механічні уявлення. В основу вивчення було покладено взаємодію шорстких твердих поверхонь. У подальшому була висунута гіпотеза і розвивались ідеї про молекулярні сили взаємодії при терті. У відповідності з цією гіпотезою думали, що тертя зумовлене подоланням сил молекулярного притягування, яке виникає між двома твердими тілами, і що сила тертя зростає зі зменшенням шорсткості, бо при тіснішому зближенні поверхонь збільшується молекулярне зчеплення між ними.

Еволюція механічної гіпотези, яку вперше сформулював І. Делагір, пов’язана з іменами А. Парана, Л. Ейлера, Д. Леслі, Л. Гюмбеля та ін. Виникнення й обґрунтування гіпотези про молекулярну взаємодію поверхонь тертя пов’язана з іменами І.Дезагюльє, М.Бріллюена, В.Гарді, Р.Томлінсона, Б.Дерягіна.

Перший етап розвитку класичної науки про зовнішнє тертя

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Антипенко А.М. та ін. Основи трибології / А.М. Антипенко, О.М. Белас, В.А.Войтов, О.С. Вотченко – Харків : ХНТУСГ, 2008. – 342 с.
2. Закалов О.В. Основи тертя і зношування в машинах / О.В. Закалов, І.О. Закалов – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. – 322 с.
3. Закалов, О.В. Триботехніка і підвищення надійності машин [Текст]: О.В.Закалов. – Тернопіль: ТДТУ, 2000. – 354 с.
2. Костецкий, Б.И. Трение, смазка и износ в машинах [Текст]: Б.И. Костецкий. – К.: Техніка, 1970. – 396с.
3. Кондрачук, М.В. Трибологія / М.В. Кондрачук, В.Ф. Хабутель, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут. – К.: Вид-во Національного Авіаційного університету «НАУ-друк», 2009. – 232 с.
4. Гаркунов, Д.Н. Триботехника [Текст]: Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
5. Костецкий, Е.И. Сопротивление изнашиванию деталей машин [Текст]: Б.И. Костецкий. – Киев – Москва: Машгиз, 1959.
6. Костецкий, Б.И. Поверхностная прочность [Текст]: Б.И. Костецкий. – К.:Техника, 1975.
7. Крагельский, И.З. Основы расчетов на трение и знос [Текст]: И.З. Крагельский., М.Н. Добнчин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977.
8. Крагельский, И.В. Трение и знос [Текст]: И.В. Крагельский. – М.: Машгиз, 1962.
9. Костецкий, Б.И. Качество поверхности и трение в машинах [Текст]: Б.И. Костецкий, Н.Ф. Колисниченко. – К.: Техника, 1969.
10. Зозуля, В.Д. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин [Текст]: В.Д.Зозуля, Е. Лубведков, Д.Я. Ровенский, З.Д. Брау; 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Наукова думка, 1990.
11. Трение, изнашивание и смазка [Текст]: справочник; в 2-х кн.; под ред. И.В.Крагельского и В.З.Алисины. – М.: Машиностроение, 1978, 1979.
12. Андреев, А.В. Передача трением [Текст]: А.В. Андреев // Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978.
13. Балакин, В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения [Текст]: В.А. Балакин. – М.: Машиностроение, 1980.
14. Внутреннее трение в исследовании металлов, сплавов и неметаллических материалов [Текст]: сборник научных трудов. – М.:Наука, 1989.
15. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ [Текст]: И.В. Крагельский и др. – М.: Машиностроение, 1977.
16. Крагельский, И.В. Узлы трения машин [Текст]: И.В.Крагельский, Н.М.Михин // Справочник. – М.: Машиностроение, 1984.
17. Польцер, Г. Основы трения и изнашивания [Текст]: Г. Польцер, Ф. Майсенер; пер. с нем. О.Н.Озерского; под ред. М.Н.Добычина. – М.: Машиностроение, 1984.