

РОЗДІЛ 1

ЗНАЧЕННЯ ТЕРТЯ В ПРОБЛЕМІ МАТЕРІАЛО- ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

1.1. Загальні аспекти

Всебічне підвищення ефективності та якості виробництва, створення умов суворой економії енергії і матеріалів є дуже важливою народно-господарською і соціальною проблемою. Особливе місце у вирішенні цієї проблеми займають досягнення в області тертя, змащування 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 висококомунікованому світі важко переоцінити. Оскільки зношування рухомих спржень 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. Змащування 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 Спільку 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 деформуваннями 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 випробування 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, змашування 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 високомеханізованому 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.

1.2. 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 дослідження 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 представлений дослідженнями тертя спокою. Питання про динамічну суть зовнішнього тертя вперше було поставлене у відомих роботах Ш.Кулона.

Дослідження Ш.Кулона займають особливе місце. Він вперше вказав, що є необхідність розрізняти тертя спокою і тертя руху і встановив, що тертя зумовлюється рядом причин і природою матеріалів, протяжністю поверхні, тиском, тривалістю контакту, швидкістю ковзання.

Значним досягненням була чітко сформульована Ш.Кулоном подвійна природа тертя. Він вважав, що тертя зв'язок двох видів опору: зчеплення, пропорційне навантаженню і не залежить від площі, і зчеплення, що залежить від площі дотику.

Ця подвійна природа виражається законом

$$F = A + f \cdot N,$$

де F – сила тертя; A – константа, яка характеризує здатність тіл, що труться, до взаємного зачеплення; N – нормальна реакція; f – коефіцієнт пропорційності (коефіцієнт тертя).

Для грубо оброблених поверхонь константа A має малі значення. Тому цю величину тривалий час не брали до уваги. Закон Кулона спрощено набув вигляду $F = f \cdot N$. Ця залежність має назву Амонтона-Кулона про зв'язок між силами тертя і нормальним навантаженням, що було результатом робіт першого етапу науки про тертя. В наступних роботах було зроблено багато спроб експериментальної перевірки і теоретичного обґрунтування закону Амонтона-Кулона, що призвело до накопичення великого експериментального матеріалу з визначення коефіцієнтів тертя для різних матеріалів.

Дослідження Ш.Кулона стали основою для створення формального вчення про тертя в механіці та інженерній справі, в розробленні якого брали участь вчені Д.Леслі, Л.Гюмбель, Г.Лейбніц, С.К.Котельніков, А.В.Вишнеградський та інші.

Подальший розвиток науки про зовнішнє тертя був пов'язаний із загальним прогресом науки і техніки, різким розширенням і ускладненням умов зовнішнього тертя, розробленням і застосуванням нових матеріалів, накопиченням спостереження, які реєстрували відхилення від закону Амонтона-Кулона. Наближений характер закону і його обмежене застосування ставали все очевиднішими.

Механічна і молекулярна концепції з часом значно змінилися: механічна – збагатилася уявою про закони пружно-пластичної деформації і руйнування; молекулярна – дослідженнями з фізики граничного шару і тонкої структури металу поверхонь, що труться.

Комбіновані теорії, основу яких складають механічні (деформаційні) уявлення і припущення про молекулярно-адгезійну взаємодію, розвинені в роботах Ф. Боудена, І. Крагельського, Г. Єпіфанова, Г. Ернста, П. Мерчента та ін.

У роботах Б. Дерягіна, Е. Рабіновича висунуто теорії, в яких на першому плані стоїть атомно-молекулярна взаємодія поверхонь тертя, а механічна взаємодія враховується як результат роботи атомно-молекулярних зв'язків.

Однак велика різноманітність матеріалів, що використовуються, ускладнення умов механічного навантаження і фізико-хімічної дії середовищ зробило неможливим використання класичних понять про взаємодію на молекулярному рівні.

Ці взаємодії стали “затемнюватися” активізацією фізико-хімічних процесів, невід’ємних при навантаженні тертям, явищами фізичної і хімічної адсорбції, дифузії. Природно, що при цьому і механічна взаємодія втратила своє переважаюче значення.

Однією з особливостей більшості досліджень є спроби побудувати загальну теорію для одного із можливих процесів, найбільш виражених за деяких умов тертя.

Запропоновано загальні теорії зовнішнього тертя, засновані на різних “універсальних механізмах” – фізичних, механічних, хімічних, енергетичних та ін. Кількість “універсальних” теорій продовжує зростати. Явища розглядаються у різних масштабах – від макроскопічного до субмікроскопічного, на рівні атомних і електронних взаємодій.

Описування сил тертя проводять, виходячи з найрізноманітніших посилянь, і як наслідок, з’являються різноманітні фізичні параметри: модуль пружності, температура плавлення, поверхнева енергія і т.д. Теорії деформації базуються на врахуванні й аналізі явищ пошкодженості при терті.

Більшість запропонованих теорій базується на деталізованому опрацюванні окремих питань. Водночас загальні їх концепції й принципові положення мало відповідають сучасному рівню фізики твердого тіла.

Постійне зростання потужності машин, складні умови експлуатації, підвищення допустимих показників надійності і зносостійкості вимагають точних і обґрунтованих даних про зовнішнє тертя.

Наука про зовнішнє тертя – область знань, що має прикладне значення, а її зміст є синтезом відповідних розділів механіки, фізики, хімії.

Значний вклад у розвиток сучасної світової науки про тертя і зношування в машинах внесла українська школа, яку створив професор Борис Іванович Костецький, який тривалий час її очолював. Відомими й визнаними представниками цієї школи є професори Л.І. Бершадський, І.Г. Носовський, П.В. Назаренко, Г.А. Прейс та інші.

Б.І.Костецький і його учні зробили цілий ряд фундаментальних відкриттів у проблемі тертя, які значно розширили уяву про явища, що відбуваються на поверхні контакту двох тіл при їх вільному русі.

До нашого часу тертя в усіх його аспектах залишається загадкою. При терті (і тільки при терті) одночасно проходять механічні, електричні, теплові, вібраційні і хімічні процеси. Тертя може збільшити або зменшити міцність металу, підвищити або зменшити в ньому вміст вуглецю чи водню, перетворити золото і платину в окисли, відполірувати деталі або зварити їх.

Процеси тертя і зношування є складними і залежать від ряду факторів, для розуміння яких необхідний синтез знань в областях механіки, теоретичної фізики, фізичної хімії, термодинаміки, металознавства, фізики твердого тіла та ін. У зв'язку з цим нині існують різні уявлення про явища, що відбуваються на поверхні контакту твердих тіл при терті.

Тому спроби вчених вирішити основні завдання теорії тертя з позиції окремих областей знань приречені на невдачу. Неповнота і протиріччя різних "універсальних механізмів", побудованих на окремих явищах, що спостерігаються при терті, призвела до необхідності розглядати завдання на основі загальних фундаментальних принципів і енергетичних співвідношень.

В останні десятиріччя розвиток теоретичної фізики, матеріалознавства і фізичної хімії поверхневих явищ з позиції термодинаміки незворотних процесів дозволяє розглядати процеси тертя і зношування матеріалів, використовуючи уявлення про саморегулювання, структурну адаптивність (приспосовуваність) і самоорганізацію відкритих термодинамічних систем (Гленсдорф, Пригожин). Відкриті термодинамічні системи характеризуються тим, що можуть обмінюватись з середовищем енергією і речовиною (Пригожин, Чіхос).

Результати досліджень Б.І.Костецького дозволяють розглядати енергетичні співвідношення за нормальних умов зовнішнього тертя, в процесі якого відбувається трансформація механічної роботи в енергію внутрішніх процесів. Встановлено, що при зовнішньому терті змінюються властивості поверхневих шарів матеріалів. Відбуваються структурні перетворення, збільшується опір деформації і твердість, зростає електричний опір, підсилюються дифузійні процеси, утворюється теплота і т.п.

Основне принципове положення структурно-енергетичної теорії зовнішнього тертя, яку запропонував професор Б.І. Костецький, описується залежністю

$$A = Q + \Delta E,$$

з якої бачимо, що робота зовнішнього тертя A витрачається на утворення теплоти Q і енергію, що накопичується ΔE .

Наукова школа Б.І. Костецького вперше в світі показала і довела, що тертя є процесом, який самоорганізується, при якому з певною послідовністю і досить "розумно" проходять явища, направлені на руйнування поверхні, або ж,

навпаки, на створення цілої серії систем, що зменшують зношування і тертя. Відкрите раніше невідоме явище отримало назву структурної пристосованості матеріалів при терті. Значення цього відкриття для проблеми, що розглядається, важко переоцінити.

1.3. Основні терміни й означення

Основні терміни, що відносяться до триботехніки, стандартизовані ГОСТом 27674-88 “Трения, изнашивание и смазка. Термины и определения”, який містить 97 термінів, класифікованих за видами тертя, зношування, змащування, методами і змащувальними матеріалами. До загальних понять триботехніки відносять терміни, розглянуті нижче.

Зовнішнє тертя – явище опору відносному переміщенню, яке виникає між двома тілами в зонах дотику поверхонь по дотичних до них, що супроводжуються дисипацією енергії.

Зношування – процес руйнування і відділення матеріалу з поверхні твердого тіла і (або) накопичення його залишкової деформації при терті, що проявляється в поступовій зміні розмірів і (або) форми тіла.

Знос – результат зношування, що визначається в установлених одиницях. Величину зносу можна виразити в одиницях довжини, об’єму, маси і т.д.

Зносостійкість – властивість матеріалу чинити опір зношуванню в певних умовах тертя, що оцінюється величиною, оберненою швидкості зношування, або інтенсивністю зношування.

Зношувальний матеріал – матеріал, що вводиться на поверхню тертя для зменшення сили тертя і (або) інтенсивності зношування.

Змащування (змазка) – дія змащувального матеріалу, в результаті якого між двома поверхнями зменшується сила тертя і (або) інтенсивність зношування.

Змащування – підведення змащувального матеріалу до поверхні тертя.

Тертя спокою – тертя двох тіл при мікропереміщенні в процесі переходу до відносного руху.

Тертя руху – тертя двох тіл, що знаходиться у відносному русі.

Тертя без змащувального матеріалу – тертя двох тіл за відсутності на поверхні тертя введеного змащувального матеріалу будь-якого виду.

Тертя із змащувальним матеріалом – тертя двох тіл за наявності на поверхні тертя введеного змащувального матеріалу будь-якого виду.

Тертя ковзання – тертя руху двох тіл, за якого швидкості тіл в точках дотику різні за величиною і напрямком, або лише за величиною, або лише за напрямком.

Тертя кочення – тертя руху двох твердих тіл, при якому швидкості тіл в точках дотику однакові за величиною і напрямком.

Сила тертя – сила опору за відносного переміщення одного тіла по поверхні другого під дією зовнішньої сили, направленої по дотичній до загальної границі між цими тілами.

Найбільша сила тертя спокою – сила тертя, при якому будь-яке перевищення призводить до виникнення руху.

Попереднє зміщення – відносне мікропереміщення двох твердих тіл при терті в межах переходу від стану спокою до відносного руху.

Швидкість ковзання – різниця швидкостей тіл у точках дотику при ковзанні.

Поверхня тертя – поверхня тіла, що бере участь при терті.

Коефіцієнт тертя – відношення сили тертя двох тіл до нормальної сили, що притискає ці тіла одне до одного.

Коефіцієнт зчеплення – відношення найбільшої сили тертя спокою двох тіл до нормальної відносно поверхонь тертя сили, що притискають тіла одне до одного.

Механічне зношування – зношування в результаті механічної дії.

Молекулярно-механічне зношування – зношування в результаті одночасної механічної дії та молекулярних або атомарних сил.

Корозійно-механічне зношування – зношування при терті матеріалу, який вступив в хімічну взаємодію із середовищем.

Абразивне зношування – механічне зношування матеріалу в результаті різальної або дряпаючої дії твердих тіл або частинок.

Гідроабразивне зношування – зношування в результаті дії твердих тіл або частинок, захоплених потоком рідини.

Газоабразивне зношування – зношування в результаті дії твердих тіл або частинок, захоплених (втягнутих) потоком газів.

Втомне зношування – зношування поверхні тертя або окремих її ділянок в результаті повторного деформування мікрооб'ємів матеріалу, що призводить до виникнення тріщин і відокремлених частинок (зношування втомлення може відбуватися при коченні й ковзанні).

Ерозійне зношування – зношування поверхні в результаті дії потоку рідини або газу.

Кавітаційне зношування – зношування поверхні при відносному русі твердого тіла в рідині в умовах кавітації.

Зношування при заїданні – зношування в результаті схоплення, глибинного виривання матеріалу, перенесення його з однієї поверхні тертя на іншу і дія нерівностей, що утворились, на поверхню спряження.

Окисне зношування – зношування за наявності на поверхні тертя захисних плівок, які утворилися в результаті взаємодії матеріалу з киснем.

Зношування при фреттінг-корозії – корозійно-механічне зношування тіл, які дотикаються при малих коливальних відносних переміщеннях.

Швидкість зношування – відношення значення зносу до інтервалу часу, протягом якого він виник.

Інтенсивність зношування – відношення значення зносу до шляху, на якому відбувається зношування, або об'єму виконаної роботи.

Схоплення при терті – явище місцевого з'єднання двох твердих тіл, яке відбувається внаслідок дії молекулярних сил при терті.

Перенесення матеріалу – явище при терті твердих тіл, коли матеріал одного тіла з'єднується з другим і, відірвавшись від першого, залишається на поверхні другого.

Зайдання – процес виникнення і розвитку пошкоджень поверхонь тертя внаслідок схоплення і перенесення матеріалу.

Задир – пошкодження поверхні тертя у вигляді широких і глибоких борозен (рівчаків) у напрямку ковзання.

Припрацювання – процес зміни геометрії поверхонь тертя і фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів матеріалу в початковий період тертя, що проявляється за постійних зовнішніх умов у зменшенні сили тертя, температури та інтенсивності зношування.

Газове змащування – змащування, коли поділ поверхонь тертя деталей здійснюється газовим мастильним матеріалом.

Рідинне змащування – змащування, коли повний розділ поверхонь тертя здійснюється рідинним мастильним матеріалом.

Тверде змащування – змащування, коли поділ поверхонь тертя деталей, які перебувають у відносному русі, здійснюється твердим мастильним матеріалом.

Гідродинамічне (газодинамічне) змащування – рідинне (газове) змащування, коли повне розділення поверхонь тертя здійснюється в результаті тиску, самовиникаючого в шарі рідини (газу) при відносному русі поверхонь.

Гідростатичне (газостатичне) змащування – рідинне (газове) змащування, при якому повне розділення поверхонь тертя деталей, які перебувають у відносному русі або спокої, здійснюється в результаті надходження рідини (газу) в зазор між поверхнями тертя під дією зовнішнього тиску.

Еласто-гідродинамічне змащування – змащування, при якому характеристики тертя і товщина плівки рідинного мастильного матеріалу між двома поверхнями, які перебувають у відносному русі, визначається пружними властивостями матеріалів тіл, а також реологічними властивостями останнього.

Граничне змащування – змащування, коли тертя і зношування між поверхнями, які перебувають у відносному русі, визначається властивостями поверхонь і властивостями мастильних матеріалів, відмінними від об'ємної в'язкості.

Напіврідинне змащування – змащування, коли здійснюється частково гідродинамічне, частково граничне змащування.

1.4. Тертя і підвищення надійності машин

Нині з тертям і зношуванням деталей пов'язана одна із найгостріших проблем сучасності – підвищення надійності і довговічності машин і механізмів, яка визначається в основному збереженням розмірів їх динамічних елементів, якістю і міцністю поверхонь спряжень. Переважна більшість виходів з ладу рухомих деталей машин і механізмів (від 80 до 90%) відбувається внаслідок руйнування поверхонь тертя.

Затрати на відновлення машин в результаті тертя і зношування в промислово розвинених країнах дуже великі, причому щорічно вони збільшуються. Тому підвищення терміну служби машин і технологічного обладнання навіть незначною мірою рівноцінне введенню в дію нових виробничих потужностей.

Традиційним шляхом інтенсифікації виробництва є підвищення продуктивності машин, технологічного обладнання і агрегатів. Організація сучасних потокових автоматизованих виробництв на базі складних систем машин і верстатів, у першу чергу програмованих, промислових роботів і робото-технологічних комплексів, систем автоматизованого проектування підвищує вимоги до надійності та безвідмовності кожного складового агрегата (кожного структурного елемента, якщо мова йде про автоматичні лінії, дільниці, цехи тощо, то тим більше).

Тому одним із основних показників, що характеризує якість сучасних технічних систем (інструменту, механізму, вузла, агрегата, приладу, машини, системи машин), є надійність – властивість виробу виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники в заданих межах протягом необхідного проміжку часу або напрацювання.

Надійність – одна із властивостей якості продукції. Ця властивість виробів проявляється в процесі використання виробів за призначенням і розглядається нерідко як властивість виробу зберігати якість (значення основних експлуатаційних і споживчих характеристик) з часом.

Поняття “надійність” може відноситися не тільки до виробів, але і до систем “людина-машина”, до інформаційно-керуючих систем, до програмного забезпечення.

У практиці і в нормативно-технічній документації надійність будь-якого технічного виробу (приладу, апарату, інструменту, машини, агрегату, вузлів і деталей, системи машин) визначається як властивість об’єкту зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах використання, технічного обслуговування, ремонту, зберігання і транспортування.

Надійність є складною властивістю, яка залежно від призначення об’єкту і умов його використання, включає безвідказність, довговічність, ремонтпридатність і збереженість в повній цілості.

Безвідказність – властивість об’єкту безперервно зберігати працездатний стан впродовж деякого часу або деякого напрацювання. Напрацювання – це поняття, яке служить для кількісної оцінки надійності об’єкту і характеризує тривалість або об’єм роботи об’єкту. Вона вимірюється в годинах, числах циклів навантаження, кілометрах пробігу та інших величинах, які визначаються специфічними особливостями виробу.

Довговічність – властивість об’єкту зберігати працездатний стан до граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування і ремонту. Довговічність виробів характеризується такими показниками, як середній радіус, призначений або встановлений строк служби тощо.

Ремонтопридатність – властивість об'єкту, яка полягає в пристосовуваності до попередження і виявлення передвідказного стану, відказів і пошкоджень, підтриманню і відновленню працездатного стану шляхом проведення технічного обслуговування і ремонту.

Збереженість (збереження повної цілісності) – властивість об'єкту зберігати значення показників безвідказності, довговічності і ремонтпридатності впродовж і після зберігання і (або) транспортування.

Надійність характеризується подіями:

Відказ (відмова) – подія, яка полягає в повній або частковій втраті об'єктом працездатності.

Відкази поділяють на функціональні, при яких виконання своїх функцій об'єктом, що розглядається, або елементом припиняється (наприклад, поломка зубів шестерні) і параметричні, при яких деякі параметри об'єкта змінюються в недопустимих межах (наприклад, втрата точності верстату).

Надійність є складною властивістю, яка залежно від призначення об'єкта й умов його використання зумовлюється безвідмовністю, довговічністю, ремонтпридатністю, збереженістю (у повній цілісності). Кількісною характеристикою однієї або кількох властивостей, що складають надійність виробів, є показник надійності.

Названі вище показники відносяться до одиничних показників надійності, бо характеризують одну з властивостей надійності. Показники, які характеризують одночасно кілька властивостей надійності, називають комплексними. До них відносяться коефіцієнт готовності, коефіцієнт технічного використання та ін.

Питання підвищення терміну служби машин давно привертало увагу інженерно-технічних працівників, однак у своїй діяльності вони керувалися в основному емпіричними даними. Розвиток техніки і машинобудування надав проблемі підвищення надійності і довговічності машин особливо великого значення з точки зору економії матеріальних та енергетичних ресурсів і робочої сили, залучив до вирішення цієї проблеми широке коло конструкторів, технологів, експлуатаційників і вчених різних спеціальностей. Це дозволило не тільки розробити конструктивні і технологічні заходи з підвищення терміну служби машин і створити раціональні методи догляду за ними, але й на базі досягнень фізики, хімії, механіки, термодинаміки і металознавства закласти основи вчення про тертя, зношування і змащування машин. Цією проблемою широко займаються на заводах, у вузах і галузевих науково-дослідних інститутах, їй присвячують наради і конференції, з цих питань видають монографії і публікують багаточисельні журнальні статті.

На відміну від високого рівня стану розрахунків деталей і конструкцій на міцність, жорсткість і стійкість, сучасний стан теорії тертя і зношування не дає конструктору надійних методів розрахунку пар спряжень на зношування і більшості зношуваних деталей на довговічність на передбачуваний термін служби. Навіть гідродинамічна теорія змащування, розвиток якої почався понад

дев'яносто років назад, не дозволяє виконати розрахунок підшипника з рідинним змащуванням з тією ж надійністю результатів, як і розрахунок балки методами опору матеріалів. Однак теорія й інженерна практика підвищення зносостійкості й надійності роботи деталей, що труться, мають велику кількість важливих якісних залежностей, результатів експериментальних досліджень і спостережень, використання яких дає змогу суттєво підвищити терміни служби машин.

На жаль, ці матеріали не можна повною мірою використовувати внаслідок їх розрізненості й різноманітності. Тому систематизація, узагальнення і представлення їх в доступній формі стосовно запитів конструкторів, технологів і працівників служб головного механіка, заводських лабораторій і експлуатаційників має велике значення для проблеми, що розглядається.

1.5. Терміни служби машин

Термін служби машин – календарна довготривалість експлуатацій виробу до зруйнування або настання граничного стану. Граничний стан може встановлюватися внаслідок морального або фізичного зношування, при зміні параметрів, за умовами безпеки, за економічними показниками, за необхідності першого капітального ремонту.

Вихід з ладу деталей і робочих органів машин за нормальних умов експлуатації відбувається внаслідок різних видів фізичного зношування: втомного руйнування і зламу, повзучості матеріалів, механічного зношування, корозії, ерозії, кавітації, старіння матеріалу тощо.

Сучасний рівень розвитку прикладної теорії і стан конструкторських розрахунків при відносно добрих знаннях фізичних і механічних властивостей матеріалів дозволяють забезпечити міцність деталей машин з великою гарантією від поломок у нормальних умовах експлуатації. Тому найбільш розповсюдженою причиною виходу деталей і робочих органів машин з ладу є не поломка, а зношування і пошкодження робочих поверхонь деталей у вузлах тертя.

Незважаючи на досягнутий прогрес в області збільшення терміну служби машин, останній залишається недостатнім. Тривалість роботи авіаційного поршневого двигуна до ремонту складає 400...1000 годин. Відомі факти надзвичайно недовготривалого терміну служби (менше 1000 год.) циліндрових втулок потужних силових дизелів. Спостерігались випадки виходу з ладу у результаті кавітаційного руйнування потужних насосів і гребних гвинтів менше ніж через рік служби.

Особливо велике зношування деталей і робочих органів машин-знарядь, які експлуатуються в абразивному й агресивному середовищах, деталей транспортних машин, які працюють в умовах бруду і пилу. Наприклад, термін служби каменедробарок становить у середньому 3...4 місяці, зубів ковшів екскаваторів, ножів скреперів і бульдозерів, шнеків – 3...6 міс. Контрольні терміни служби до капітального ремонту вугільних комбайнів і врубуючих машин – 8...12 міс., а транспортних засобів у вугільних шахтах – 2...3 роки.

Дизелі, встановлені на потужних автосамоскидах, потребують капітального ремонту вже після 1200...1500 годин роботи, тобто через 4...6 міс. Бортові шестерні тракторів працюють до заміни не більше 2000...2500 год, термін служби тракторних трансмісій до ремонту складає 2500...3500 год. За сезон роботи тракторів на піщаному ґрунті необхідно замінювати 2-3 комплекти гусениць, що в середньому становить 50% вартості нового трактора. Леміш тракторного плуга обробляє в середньому до повного зношування всього 15...20 га ґрунту, що змушує щорічно виготовляти для сільського господарства понад 20 млн. лемішів, не кажучи вже про те, що на важких ґрунтах ріжуча кромка леміша потребує ремонту через 4...6 год роботи плуга. Річна потреба у запасних ланках привідних ланцюгів сільськогосподарських машин складає 100 млн. штук. У бурякорізках ножі з вуглецевої сталі потребують переточування з наступною термообробкою через кожних 1...2 місяці роботи, що викликає їх потребу в цукровій промисловості до 1 млн. штук на рік. Шнекові гвинти зі сталі 20Х масловідтискних пресів неперервної дії служать 3...6 місяців.

Малу тривалість роботи мають дротяні канати вантажопідіймальних машин, а особливо на металургійних підприємствах. Середні терміни служби канатів доменних підйомників – 3...4 міс., розливних кранів мартенівських цехів – 6...7 місяців.

Досвід показує, що при належному догляді за технікою (із урахуванням правильної конструкції) машини можуть експлуатуватися у важких умовах протягом багатьох років. За даними П.І.Коха, на Ново-Солікамському калійному заводі шахтні вагонетки масою 2т служать 11...12 років, 13...14 років працюють екскаватори в кар'єрах тресту "Коркінвугілля". У цілому за весь термін служби гірничого обладнання на його ремонт потрібно у 10...12 разів більше засобів, ніж на випуск нових машин. Існує лише один шлях скорочення цих витрат – підвищити показники надійності машин і механізмів.

Неправомірним також є єдине оцінювання морального зношування для всіх типів машин галузі, бо вони відрізняються за ступенем функціональної і технічної відпрацьованості. Сільськогосподарські машини і знаряддя давно встановлених конструкцій (плуги, борони, культиватори, сівалки та ін.) мають розраховуватися на значно більший термін служби, ніж машини, які знаходяться на початкових стадіях свого розвитку (картоплезбиральні комбайни, машини для збирання томатів, капусти тощо).

В літературі існують дані про терміни служби різноманітних машин до їх повного морального зношування. Для сільськогосподарських машин за даними В.С.Антошкевича (ВИСХОМ), період складає 12 років без диференціації за типами машин.

Терміни служби і затрати на ремонт великої групи сільськогосподарських машин і знарядь у США наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

Термін служби і затрати на ремонт сільськогосподарської техніки в США

Назва	Термін служби, роки	Сумарний машинний час, год.	Вартість ремонтів, у % від вартості нової машини	Індекс рівностікості і
1	2	3	4	5
Трактор				
Плуг	15	12000	120	0,63
Борона дискова	15	200	80	0,72
Борона зубова	15	2000	30	0,87
Коток	20	2500	30	0,87
Зернова сівалка	25	1500	10	0,95
Кукурудзяна сівалка	20	1200	25	0,89
Обприскувач	20	1200	30	0,87
Культиватор	10	1500	30	0,87
Фреза	12	2500	40	0,83
Косарка	12	2000	35	0,85
Граблі	12	2000	75	0,73
Волок	10	1500	25	0,89
Сінонавантажувач	12	1500	25	0,89
Силосозбиральний комбайн	12	1200	25	0,89
Зернозбиральний комбайн	12	2000	60	0,77
Прес-підбирач	10	2000	40	0,83
Жниварка	12	2500	40	0,83
Качаноочисник	12	1200	25	0,89
Бавовнозбиральний комбайн	10	2500	25	0,89
Розкидувач гною	10	2000	55	0,78
Дробарка кормів	15	2500	25	0,89
	15	2000	25	0,89

Примітка. Індекс рівностікості розрахований виходячи з того, що вартість запасних частин складає половину загальних затрат на ремонт.

Науково обгрунтовані планові начала мають бути покладені в основу визначення раціональних термінів служби машин і загальної технічної політики, забезпечення їх довговічності. Підвищення зносостійкості деталей робочих органів машин і механізмів є важливим складовим елементом роботи для досягнення максимальної економічної ефективності механізації й автоматизації виробництва.

1.6. Збитки від тертя і зношування в машинах

Більшість машин (85–90%) виходять з ладу з причини зношування деталей. Витрати на ремонт машин і обладнання, транспортних засобів складає в нашій країні близько 40 млрд. грн. за рік. Щорічно ця цифра збільшується на понад 1 млрд. грн.

Тільки на ремонт сільськогосподарських машин затрачається 6 млрд. грн. на рік. Витрати на ремонт і технічне обслуговування машин у кілька разів перевищує її собівартість: для автомобілів – у 6 разів, для літаків – до 5, для верстатів – до 8.

Трудомісткість ремонту і технічного обслуговування багатьох будівельних і шляхових машин за термін їх служби приблизно в 15 разів перевищує трудомісткість виготовлення нових. Створення машин, які не мають необхідності в капітальних ремонтах за весь термін їх служби та значне скорочення плинних ремонтів за своєю техніко-економічною ефективністю рівноцінні подвоєнню потужності машинобудівних заводів і збільшенню випуску чорних металів на багато мільйонів тонн за рік.

На частку заводів, які випускають нові трактори, припадає лише 25% потужностей, на частку заводів, які виготовляють запасні частини до тракторів – 34%, а на частку ремонтних підприємств – 44%. Кажучи інакше, на ремонт тракторів витрачається в 4 рази більше виробничих потужностей, ніж на їх виготовлення.

Цікаві дані з розподілу об'єму трудових затрат на весь термін служби автомобіля: на виготовлення – 1,4%, на технічне обслуговування – 45,4%, на плинний ремонт – 46%, на капремонт – 7,2%.

Ремонтом техніки в Україні зайнято понад 3 млн. чоловік. Одна третина верстатного парку держави знаходиться в ремонтних підприємствах. На запасні частини витрачається більше однієї п'ятої металу, який виплавляється в державі.

Простоювання автомобілів через технічні несправності в деяких автомобільних господарствах сягають 30...40% календарного часу. На кожну 1000 вантажних автомобілів, які простоюють, стають непридатними майже 3 тис. тонн металу і 417 тонн гуми. Підраховано, наприклад, що до списання трактора Т-130 на запасні частини, для заміни і ремонту необхідно використати стільки ж металу, скільки він важить сам – близько 12 т.

Народне господарство нашої країни щорічно використовує мільйони вентилів, ущільнюючі пристрої яких працюють на тертя і зношування. Проведені дослідження виявили, що майже 90% регульованих кранів вентилів працюють погано або зовсім не працюють. Причинами поганої роботи вентилів

є: конструктивна недосконалість, низька якість виготовлення і використання низькосортних металів. Однак основні витрати народне господарство несе не на виготовлення вентилів, а в результаті того, що вони не виконують своїх функцій. Підраховано, що при якісній роботі вентилів можна на 10% скоротити витрату тепла, що дозволило б зберегти до 6 млн.т умовного палива за рік або 130 млн. гривнів.

У наш час дизелі Д-54 мають ресурс 7500 мотогодин і вище. Такий показник досягнуто завдяки тому, що на заводах з виготовлення двигунів була проведена величезна робота з підвищення терміну служби основних деталей двигуна: введено гартування гільз циліндрів і шийок компресійного кільця, застосовано відцентроване очищення масла в шатунних шийках колінчастого вала, введено реактивні масляні центрифуги і т.п. Але не всі дизелі, виготовлені на заводах серійної продукції, працюють по 7500 мотогодин. Багато з них мають ресурс 3,5...4 тис. мотогодин. Після ремонту двигуни працюють дуже мало, всього 2,5...3 тис. мотогодин. Причиною є недостатня культура експлуатації і низька якість ремонту.

Торкаючись двигунів автомобілів, тракторів і комбайнів, слід відзначити, що за весь термін служби їх ремонтують до 5 разів.

Ресурс двигуна після ремонту у порівнянні з ресурсом нового двигуна складає 30...50%. Кількість робітників, які зайняті ремонтом двигунів, у кілька разів перевищує кількість робітників, які виготовляють двигуни на заводах серійної продукції. Матеріальні витрати на ремонт також у багато разів перевищують витрати на виготовлення нового двигуна. В цілому в країні на автомобілях, тракторах і комбайнах відремонтованих двигунів у 2 рази більше, ніж нових.

Причинами малого ресурсу машин після ремонту є:

- низька якість обробки поверхонь деталей, які труться;
- металорізальні верстати ремонтних підприємств не забезпечують тієї точності обробки, яку мають деталі, що виготовляються на заводах серійної продукції;
- відсутність засобів надійного промивання деталей перед складанням;
- забрудненість абразивним пилом складальних цехів, низька культура виробництва на ремонтних підприємствах;
- погане припрацювання деталей після ремонту, відсутність сучасних випробувальних стендів, приладів для контролю процесу припрацювання;
- забрудненість абразивом змащувальних і гідравлічних систем;
- недостатня спеціалізація виробництва на ремонтних підприємствах у порівнянні з її рівнем на заводах серійної продукції, що не дозволяє розробляти й реалізовувати найраціональніші технологічні процеси.

Великі матеріальні втрати народне господарство несе від підвищеного тертя у вузлах машин. Відомо, що більше половини палива, яке використовується автомобілями, тепловозами та іншими видами транспорту, витрачається на подолання опору, який створюється тертям у рухомих з'єднаннях. У текстильному виробництві на подолання опору витрачається близько 80% усієї енергії. Низькі ККД багатьох машин зумовлені в основному великими втратами на тертя. ККД глибоїдного редуктора, який встановлюється в ліфтах, металорізальному обладнанні, шахтових підйомниках тощо, складає тільки 0,65...0,70, а в такій розповсюдженій парі як гвинт-гайка – всього лише 0,25.

Згідно з працями П.С.Зака збільшення ККД черв'ячних редукторів за рахунок підвищення їх якості тільки на 4% у масштабі народного господарства дасть економію за рахунок підвищення затрат електроенергії понад 25 млн. грн. на рік.

На багатьох симпозіумах і наукових конференціях з питань зменшення зношування в техніці наголошується, що управління зношуванням є центральною ланкою у вирішенні таких загальнонаціональних проблем, як економія енергії, зменшення затрат матеріалів, а також забезпечення надійності і безпеки механічних і технічних систем.

У Великобританії в межах держави була проведена робота з упровадження досягнень триботехніки. Згідно зі звітом Британської ради з триботехніки, опублікованому в 1966 р., економічний ефект від застосування досягнень триботехніки в практику складав понад 500 млн. фунтів стерлінгів на рік (табл. 1.2), що еквівалентно 2% валового національного продукту.

Таблиця 1.2.

Результати впровадження досягнень триботехніків у практику у Великобританії

Результати впровадження досягнень триботехніки в практику	Річний економічний ефект, млн.фунтів стерлінгів
Зниження споживання енергії за рахунок зменшення тертя	20
Скорочення ручної праці	10
Зменшення витрат на матеріали змащування	10
Зменшення витрат на обслуговування і ремонт	230
Виключення втрат, пов'язаних з відказом обладнання	115
Економія вкладень за рахунок інтенсивнішого використання обладнання і більшого ККД	22
Економія вкладень за рахунок підвищення довговічності машин	100
УСЬОГО	515

Профілактичне обслуговування машин і механізмів стає доцільнішим з точки зору економії ресурсів робочої сили, матеріалів і збільшення довговічності. Досвід експлуатації вертольотів середніх розмірів показує, що 30% часу втрачається на непередбачене обслуговування. Враховуючи, що собівартість роботи гелікоптера складає 1000 доларів на годину, легко оцінити втрати від таких операцій. Аналогічні порівняння можна зробити для літаків і важкого обладнання.

Великі втрати від зношування машин і механізмів несе промисловість Німеччини. В 1974 році в сталеварній промисловості на зміну зношеного обладнання було витрачено більше 1,4 млрд. марок, що разом з витратами, викликаними простоюванням, призвело до подорожчання продукції прокатного обладнання на 10...20% (1 год. простоювання прокатного обладнання коштує 20 тис. марок). У вугільній промисловості втрати від зношування дорівнюють 10 млрд. марок на рік, а в усій промисловості Німеччини – понад 100 млрд. марок, тобто більше 1% річного бюджету. Зменшення втрат енергії в двигунах внутрішнього згорання на 10% дозволить зекономити 0,5 млрд. марок на рік, а застосування правильних триботехнічних рекомендацій зменшить на 50% річні витрати, викликані зношуванням.

У 1976 році у ФРН була створена державна програма зі збереження матеріальних ресурсів у результаті вирішення триботехнічних проблем. У першопочатковому варіанті було сформульовано близько 80 проблем з розділів тертя без змащувального матеріалу, гідродинамічного і напіврідинного змащування, мастильних матеріалів, методів вимірювання та дослідження тертя і зношування. Субсидії склали 84 млн. марок на період до 1984 р.

У результаті були вирішені завдання збільшення довговічності й міжремонтних періодів, збереження рідких металів і енергії, зниження вібрації і шуму в машинах. Для виконання програми були створені координаційні групи з розділів: 1) абразивне зношування; 2) вібраційне зношування; 3) підшипники і циліндропоршнева група; 4) еластогідродинаміка; 5) напіврідинне змащування; 6) техніка вимірювань і методи випробувань; 7) підшипникові матеріали; 8) обробка поверхонь; 9) мастильні матеріали двигунів внутрішнього згорання; 10) технологічні операції; 11) поведінка фрикційних систем; 12) дизельні машини.