

TRIBOLOGIA – NAUKA O PROCESACH ZUŻYCIA

Wprowadzenie

Tribologia (określana też trybologią), jest nauką o procesach zachodzących w ruchomym styku ciał stałych. Słowo tribologia pochodzi od greckich słów „tribos” – tarcie i „logos” – słowo, mowa, wiedza. Używa się także pojęć „tribotechnika” – jako określenie przede wszystkim praktyczne zastosowanie tribologii, oraz „tribotechnologia” – mająca określać istniejące technologie zmniejszania zużycia materiałów tribologicznych. Jednak nazwa „tribologia” jest obecnie najbardziej rozpowszechniona na świecie. W zakres tribologii wchodzi badania nad **tarciem**, **zużyciem** i **smarowaniem** zespołów ruchomych w celu poznania tych procesów i umożliwienia racjonalnego sterowania nimi. Szczególnie dla mechaników podobnie jak mechanika, wytrzymałość materiałów i materiałoznawstwo, tribologia jest fundamentalną wiedzą dla konstrukcji i eksploatacji **ruchomych węzłów maszyn**, takich jak: łożyska, prowadnice, przekładnie, sprzęgła, hamulce itp., ze względu na ich sprawność, niezawodność, i trwałość. Intensywne kształcenie w dziedzinie tribologii i wykorzystanie tej wiedzy w technice przynosi ogromne korzyści wskutek oszczędności uzyskanych dzięki odpowiednim obliczeniom i odpowiednim doborze cech konstrukcyjnych elementów maszyn. Zastosowania tribologii oraz badania nad tarcie i jego skutkami sięgają epoki Odrodzenia, a typowy zespół tribologiczny jakim jest łożysko ślizgowe znany był już w starożytności. Badaniom nad zjawiskiem tarcia poświęcił się wielki człowiek Renesansu Leonardo da Vinci (1452 – 1519). To on po raz pierwszy wprowadził nazwę „siła tarcia”, i sformułował po raz pierwszy dwa prawa dotyczące tego zjawiska:

1. Siła tarcia jest wprost proporcjonalna do obciążenia.
2. Siła tarcia jest niezależna od powierzchni tarcia.

Tarcie jest zjawiskiem występującym w przyrodzie bardzo powszechnie. Zjawisko to objawia się jako pozytywne (np. chodzenie) lub negatywne (np.: opory przesuwania przedmiotów). Procesy tarcia również w technice należą do najczęściej spotykanych, także jako zjawiska pozytywne (np. wykorzystanie sprzężenia ciernego: w sprzęgłach ciernych, przekładniach ciernych, w styku kół jezdnych z podłożem, wykorzystanie w hamulcach) oraz negatywne (np. opory ruchu ślizgania lub toczenia: w łożyskach, prowadnicach, przekładniach zębatych itp.).

Procesom tarcia zachodzącym w obrębie określonych układów tribotechnicznych towarzyszą straty energetyczne oraz straty wywołane zużyciem: materiałowe i ekonomiczne. Około $\frac{1}{3}$ światowej energii zużywa się na pokonanie oporów tarcia, a zużycie wskutek tarcia powoduje konieczność wymiany elementów, zespołów lub maszyn, co w wielu wypadkach na skutek postępu maszyn wielokrotnie przewyższa koszty materiałów i robocizny.

Procesy zużywania

Zużywaniami określa się proces zmian w warstwie wierzchniej ciała stałego, czego skutkiem jest zużycie mierzone objętościowo, liniowo, lub wagowo. Ogólnie procesy zużywania można sklasyfikować:

- ze względu na przyczyny: tribologiczne i nietribologiczne
- ze względu na przebieg: ustabilizowane i nieustabilizowane
- ze względu na skutki: normalne i awaryjne (patologiczne)

Zużywanie nietribologiczne

- korozja: niszczenie elementów pod wpływem czynników chemicznych i elektrochemicznych, dotyczy elementów wykonanych z metali i ich stopów nieszlachetnych,

- zachodzi między innymi w cylindrach silników spalinowych, w ich zaworach wydechowych, komorach spalania turbin gazowych, przegrzewaczach pary, w elementach pieców itp.
- erozja: zachodzi przy oddziaływaniu na ciało stałe płynów, cieczy, gazów lub par znajdujących się w ruchu, szczególnie przy dużych prędkościach, występuje między innymi w elementach układów hydraulicznych np. elementy rozrządu stwierdzono w pierścieniach tłokowych silników lotniczych
 - ablacja: szczególnie rodzaj erozji występujący wskutek działania gorących gazów przepływających z dużą prędkością np. pod wpływem gazów wylotowych z dyszy silników odrzutowych
 - kavitacja: zachodzi w układach, w których występuje spadek ciśnienia przepływającej cieczy (poniżej prężności par tych cieczy), występuje między innymi w pompach wirowych
 - zużywanie ustabilizowane: występuje jeżeli w okresie eksploatacji maszyny proces zużywania przebiega w sposób ustabilizowany i cechuje się stałą intensywnością
 - zużycie nieustabilizowane: występuje gdy intensywność zużywania podczas eksploatacji jest zmienna
 - zużywanie normalne: proces zachodzący w tych samych warunkach co tarcie normalne
 - zużywanie awaryjne: niedopuszczalne w eksploatacji maszyn, prowadzi do uszkodzenia ich elementów

Zużywanie tribologiczne

Zużywanie tribologiczne wywołane jest tarcieniem, ma charakter mechaniczno – fizyczno – chemiczny. Towarzyszy zawsze tarcia suchemu i mieszanemu:

- mechaniczne procesy zużywania: polegają na oddzielaniu cząstek ze współpracujących powierzchni przez mikroskrawanie występami mikronierówności lub luźnymi cząstkami ściernymi
- fizyczne procesy zużywania: związane jest z adhezją trących się ciał, (szczepianie, zrastanie, dyfuzja) wywołują zużycie przez oddzielenie cząstek z jednego ciała i nanoszenie ich na ciało współpracujące, lub przez mikroskrawanie przeciwpowierzchni utworzonymi narostami
- chemiczne procesy zużywania: zachodzą pomiędzy trącymi się materiałami i ośrodkiem, w którym przebiega proces tribologiczny

Podstawowe rodzaje tarcia tribologicznego

1. Zużywanie utleniające
2. Zużywanie wodorowe
3. Zużywanie ściernie
4. Zużywanie zmęczeniowe
5. Zużywanie odkształceniowe
6. Zużywanie adhezyjne
7. Zużywanie cieplne
8. Fretting

Zużywanie utleniające

Chemiczno – mechaniczna postać zużywania, którego proces polega na stopniowym usuwaniu (niszczeniu) i odtwarzaniu warstewek tlenkowych na powierzchni metali. Należy do normalnego rodzaju zużywania. Zachodzi najczęściej przy tarcia metali i ich stopów, różniących się własnościami chemicznymi i mechanicznymi, o strukturze heterogenicznej, oraz stopów z podwyższoną twardością i granicą plastyczności. Produkty zużycia mają postać cienkich łusek o ostrych brzegach (kruche pękanie tlenków). Tego typu zużycia spotyka się np. w układach:

cylinder – tłok – pierścienie tłokowe w dobrze smarowanych spalinowych silnikach tłokowych. Zużywanie utleniające jest bardziej intensywne gdy szybkość niszczenia tlenków jest większa od ich powstania.

Zużywanie wodorowe

Proces tego typu zużywania polega na niszczeniu warstwy wierzchniej wskutek adsorpcji wodoru na powierzchni stali i żeliwa i jego dyfuzji w głąb materiału co powoduje kruche pękanie w mikroobjętościach warstwy wierzchniej i jej niszczenie pod wpływem sił tarcia. Rozróżnia się dwa podstawowe rodzaje zużywania wodorowego stali i żeliw: dyspersyjne i wykruszanie. Dyspersyjne polega na rozluźnianiu struktury przypowierzchniowych warstw stali i żeliw i oddzielaniu drobnych cząstek wskutek działania sił tarcia. Wykruszanie wodorowe występuje, gdy warstewka przypowierzchniowa zostanie nasycona wodorem i jednocześnie następuje odkształcenie warstwy wierzchniej wskutek działania sił tarcia. Wodór wypełnia pustki w zdeformowanej strukturze tej warstwy i przy obciążeniach nie mając ujścia powoduje naprężenia prowadzące do tworzenia szczelin a następnie wykruszania materiału z warstwy przypowierzchniowej. Zużywanie wodorowe zaobserwowano na powierzchniach wirników i tarcz rozrządu pomp naftowych, w układach hamulcowych (przenoszenie żeliwa na okładziny cierne z tworzyw sztucznych). Zużywanie wodorowe występuje także przy tarcu tocznym. Aby zapobiegać procesom zużywania wodorowego należy przy wyborze materiałów węzła tarcia uwzględnić ich skłonność do nawadniania. Należy unikać skojarzeń stali i żeliw z polimerami. Zmniejszać możliwość wnikania wodoru do materiału poprzez wprowadzanie do niego chromu, tytanu i wanadu.

Zużywanie ściernie

Ten rodzaj zużywania można zaliczyć do procesów chemiczno mechanicznych lub procesów mechanicznych. Granicą podziału tych rodzajów zużywania jest stosunek twardości metalu zużywanego (H_m) do twardości ścierniwa (H_s).

Gdy $H_m / H_s > 0,6$ to zachodzi łagodniejsza postać ścierna typu chemiczno – mechanicznego, natomiast gdy $H_m / H_s < 0,6$ zachodzi mikroskrawanie, a więc ściernie uszkodzenie powierzchni. Ścieranie jest najpowszechniejszym rodzajem zużywania. Występuje zawsze tam, gdzie luźne ścierniwo przesuwa się względem powierzchni ciała stałego.

Podstawowymi procesami występującymi przy zużywaniu ściernym są: bruzdowanie i mikroskrawanie. Różnica między tymi mikroprocesami polega na kształcie ziarna skrawającego lub występu nierówności, a szczególnie na wartości kąta spływu wióra. Przy dużych kątach spływu wióra występuje mikroskrawanie, a przy małych kątach – bruzdowanie. Zazwyczaj obywa te rodzaje występują jednocześnie i któryś z nich przeważa, co wpływa na intensywność zużywania ściernego. Bruzdować lub mikroskrawać powierzchnie mogą: luźne ścierniwo, ścierniwo utwierdzone w bardziej miękkim materiale oraz występy chropowatości powierzchni a także ścierniwo zawarte w płynach. Intensywność zużywania zależy od własności ścierniwa (twardość, wielkość ziarn, ich kształt) i od własności materiału ściernego (twardości i modułu sprężystości) oraz od warunków w jakich przebiega (obciążenie, prędkość względna, temperatura, otoczenie).

Przed nadmiernym zużywaniem przez ścieranie zapobiega się poprzez dobór odpowiednich materiałów twardych (np. kompozyty z węglnikami wolframu, stale martenzytyczne, stopowe stale kobaltowe i niklowe, perlityczne, manganowe), skuteczne uszczelnianie szczelin smarowych oraz smarując odpowiednio układ a także filtrując płyny robocze (np. oleje smarne, powietrze w silniku spalinowym, powietrze doprowadzone do sprężarki).

Zużywanie zmęczeniowe

Obciążenia cykliczne – ciągle trących się elementów powoduje ich zmęczenie a w konsekwencji zużycie. Typowym układem, w którym występują procesy zmęczeniowe warstw wierzchnich jest układ tarcia tocznego. W układzie tym występują obciążenia cykliczne miejsc styku. Jest to styk skoncentrowany. W skutek wielokrotnie powtarzających się styków, w warstwie podpowierzchniowej występują mikropęknięcia, które wychodząc na powierzchnię powodują jej ubytki. Wyróżnia się dwa rodzaje tarcia zmęczeniowego:

- zużywanie przez łuszczenie (spalling): występuje w suchym styku podczas toczenia lub toczenia z poślizgiem, a także w styku słabo smarowanym (np. w słabo smarowanych łożyskach tocznych i przekładniach zębatych, w walcach hutniczych, w układach koło – szyna)
- zużywanie przez wykruszanie (pitting): występuje w smarowanym styku podczas toczenia lub toczenia z poślizgiem, składa się z trzech faz (zmęczeniowe pęknięcie warstwy wierzchniej i tworzenie się mikroszczelin – rozklinowujące działanie oleju –wrywanie nadwyrężonych fragmentów szczelin z warstwy wierzchniej wskutek adsorpcji oleju i rozciągających naprężeń w styku) np. łożyska toczne, przekładnie zębate, napędy krzywkowe.

Do zużycia zmęczeniowego zalicza się także pęknięcie i wykruszanie zmęczeniowe warstw stopów łożyskowych oraz pęknięcie warstw wierzchnich wskutek zmęczenia cieplnego. Takiemu zużyciu podlegają stopy cyny i stopy ołowiu (babity) szczególnie przy dużych przekrojach odlewu.

Zużywanie odkształceniowe

Zachodzi w wypadkach przeciążeń, obciążeń udarowych i drgań. Podlegają mu zazwyczaj miękkie stale i metale kolorowe. Zużywanie to polega na zmianie kształtu lub wymiarów trących się elementów w wyniku odkształceń plastycznych. Tego typu zużycia występują np.: podczas transportu maszyny lub pojazdu podczas którego występują drgania, jako wynik drgań łożysk toczących pozostających w bezruchu, w stykach twardych stali: (obręcze kół lokomotyw).

Zużywanie adhezyjne

Proces ten zachodzi najczęściej przy małych prędkościach i dużych naciskach, przy niedostatecznym smarowaniu lub jego braku. Jest to proces polegający na niszczeniu powierzchni wywołany tworzeniem się szczepień i zrostów w mikroobszarach rzeczywistej powierzchni styku. Duże naciski powodują przerwanie warstewki środka smarnego a następnie ochronnej warstewki tlenków. Po zbliżeniu się od krytych występow nierówności powierzchni na odległość działania sił międzycząsteczkowych następuje ich szczepianie lub zrastanie tarciove, a następnie ścinanie tych połączeń. Zużywanie adhezyjne może zajść w wolnobieżnych łożyskach ślizgowych, przegubach, spotyka się także w słabo smarowanych zespołach ślizgowych silników spalinowych, takich jak układ tłok – pierścienie tłokowe – cylinder i elementy rozrządu, a także w niedostatecznie smarowanych przekładniach ślimakowych i wysokoobciążonych przekładniach zębatych. Ostry przebieg zużywania adhezyjnego prowadzi często do zatrucia, jest to więc zazwyczaj niedopuszczalny patologiczny rodzaj zużywania.

Zużycie cieplne

Duże prędkości tarcia i duże naciski w zespołach tribomechanicznych powodują wytwarzanie się dużej ilości ciepła wskutek czego na rzeczywistych powierzchniach styku może nastąpić mięknienie, a nawet nadtapianie metalu. Sprzyja to odkształceniu warstwy wierzchniej, odsłanianiu czystych powierzchni metalu i ich zbliżeniu na odległość sił międzycząsteczkowych. Staje się to przyczyną szczepiania i uszkodzenia powierzchni przez wrywanie z niej cząstek i

ich rozmazywaniu na przeciwpowierzchni. Proces przebiega lawinowo i zazwyczaj kończy się zatarciem. Jest to patologiczne, niedopuszczalne zużywanie.

Fretting

Proces tego typu zużywania przebiega w spoczynkowych złączach takich jak np. złącza wpustowe i wielowypustowe, złącza wciskowe wałów z wirnikami (kołami zębatymi, kołami pasowymi itp.), połączenia nitowe śrubowe itp. Wywołany jest mikroprzemieszczeniami względnymi połączonych elementów, spowodowanymi bądź drganiami danego zespołu lub całej maszyny, bądź ruchami roboczymi danego zespołu maszynowego. Obciążenia styku i wywoływane nimi odkształcenia powodują adhezję i intensywne utlenianie powierzchni styku. Oderwane cząstki tlenków pozostają w styku, intensyfikują ścierne zużycie. Ochroną przed frettingiem jest: zlikwidowanie lub przynajmniej zmniejszenie mikroprzesunięć, stosowanie niskociernych powłok powierzchni, stosowanie twardych stali oraz stosowanie skojarzeń stal – polimer (PTFE, poliamidy, polichlorek winylu).

Przeciwdziałanie zużyciu

Zuzywaniu w maszynach powinno się przeciwdziałać zawsze. Jest ono bowiem przyczyną zmniejszania trwałości elementów maszyn a czasem ich awarii (zatarcie), dlatego przeciwdziałamy mu, starając się je albo wyeliminować albo sprowadzić do minimum. Przeciwdziałanie to powinno nastąpić już w procesie konstruowania poprzez dobór przez konstruktora takich postaci zespołu tribomechanicznego, jego materiałów i smarowania, aby zminimalizować zużycie w przyszłym ruchu tego zespołu. Konstruktor podaje też informacje technologiczne i eksploatacyjne. Innym sposobem zapobiegania zużyciu to sposób technologiczny w którym możemy wyróżnić:

- obróbkę cieplną (hartowanie powierzchniowe: płomieniowe, indukcyjne i laserowe)
- obróbkę cieplno chemiczną (nawęglanie, azotowanie utwardzające, cyjanowanie, cyjanonasiarczanie kąpielowe, azotonasiarczanie gazowe, chromowanie dyfuzyjne, tytanowanie dyfuzyjne)
- obróbkę plastyczną (np. dogniatanie, śrutowanie, młotkowanie)
- powłoki i pokrycia (np. niklowanie chemiczne, fosforowanie, napawanie)

Nawet doskonała konstrukcja oraz wysoka jakość wykonania maszyny lub urządzenia nie gwarantują jej dużej trwałości i niezawodności. Warunkiem dodatkowym bezawaryjnego ruchu maszyn jest ich prawidłowa eksploatacja, to jest jej użytkowanie zgodne z założeniami konstrukcyjnymi i warunkami technicznymi, oraz właściwa odnowa, rozumiana jako okresowe przeglądy i remonty.

opracował mgr Stanisław Krajewski