

21. Zużycie trybologiczne

W skali światowej ok. 30÷50% energii produkowanej corocznie pochłaniają opory tarcia. Wskutek zużycia corocznie eliminowane są setki tysięcy maszyn. Nauką o tarcu i procesach towarzyszących tarcu jest **trybologia**, której zakres nie ogranicza się tylko do procesów tarcia w maszynach, lecz dotyczy także wszystkich procesów tarcia w przyrodzie i technice.

Ważnymi zjawiskami towarzyszącymi tarcu, o dużym znaczeniu technicznym, są procesy zużywania materiałów trących oraz smarowanie.

Zużycie trybologiczne jest rodzajem zużycia spowodowanego procesami tarcia, w którym następuje zmiana masy oraz struktury i fizycznych własności warstw wierzchnich obszarów styków. Intensywność zużycia trybologicznego zależy od odporności obszarów tarcia warstw wierzchnich oraz od rodzaju oddziaływania.

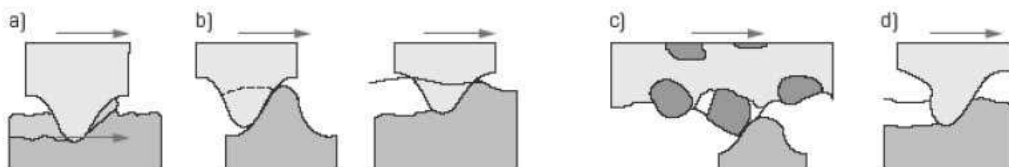
Procesy zużycia trybologicznego, które zwykle jest częstą, chociaż pośrednią przyczyną niesprawności i niezdatności maszyn i urządzeń, można podzielić między innymi na:

- zużycie ścierne,
- zużycie adhezyjne,
- scuffing,
- zużycie z udziałem utleniania,
- zużycie zmęczeniowe.

Zużycie ścierne ma miejsce, gdy w obszarach tarcia współpracujących elementów występują utwardzone albo luźne cząstki ścierniwa, lub wystające nierówności twardego materiału. Zużycie ścierne może następować przez:

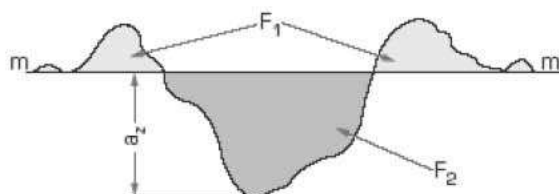
- ziarna umocowane we współpracujących powierzchniach,
- luźne pojedyncze ziarna ścierne, w tym także powstające w obszarze tarcia w wyniku utleniania produktów zużycia,
- warstwę ścierną występującą między współpracującymi powierzchniami,
- strumień ścierny, tj. strumień płynu, w którym są zawieszone cząstki ścierniwa,
- ściernie w środowisku ściernym, gdy styk ziarna ze ścierną powierzchnią następuje pod działaniem sił wykonujących pracę ścierną i zgniatania materiału ścierniwa.

Elementarne procesy zużywania ściernego przedstawiono na rysunku 54.



Rysunek 54. Model dynamiczny elementarnych procesów zużycia a) bruzdowanie, b) ścinanie nierówności, c) ścinanie nierówności ścierniwem przez występ nierówności, d) odkształcanie plastyczne materiału

Podziału zużycia ściernego dokonuje się ze względu na kryterium, którym jest iloraz powierzchni przekrojów poprzecznych sumy obustronnych spęceń materiału obok rysy F_1 i zagłębienia rysy F_2 (rys. 55).



Rysunek 55. Kryterium wyróżniające rodzaje zużycia; a_2 – głębokość brzozy, $m-m$ – poziom odniesienia

Ubytek materiału w warstwie wierzchniej podczas zużycia ściernego związany jest z:

- **bruzdowaniem**, czyli odkształceniem plastycznym obszarów styku i spęceń materiału z obu stron brzozy, gdy stosunek $F_1/F_2 = 1$,
- **mikroskrawaniem**, gdy stosunek $F_1/F_2 = 0$,
- **rysowaniem**, gdy materiał jest częściowo odkształcany plastycznie oraz częściowo skrawany w postaci wiórów jako produktów zużycia, gdy stosunek $0 \leq F_1/F_2 \leq 1$.

Zużycie adhezyjne polega na lokalnym **sczepianiu metalicznym** (adhezji) powierzchni trących w mikroobszarach odkształcenia plastycznego warstwy wierzchniej, a zwłaszcza najwyższych wierzchołków chropowatości zbliżonych na odległość działania sił molekularnych i następnym ich rozrywaniu związanym z odrywaniem cząstek metalu lub jego rozmazywaniem na powierzchniach tarcia.

Zużycie adhezyjne występuje przy styku dwóch powierzchni metali, charakteryzujących się dużym powinowactwem chemicznym.

O skłonności do szepiania się metali decydują siły elektrodynamiczne wywołane drganiami atomów powierzchniowych. Zdolność metali do połączeń adhezyjnych zależy przede wszystkim od struktury elektronowej ich atomów, rodzaju sieci krystalicznej i plastyczności. Metale wzajemnie nierozpuszczalne w stanie stałym lub tworzące fazy między-metaliczne cechują się najmniejszą intensywnością szepiania się. Atomy obce w sieci, dodatki stopowe i domieszki zwykle utrudniają szepianie się.

Szepianiu się sprzyja podobieństwo struktury krystalicznej oraz zbliżone wartości parametru sieci. W podwyższonej temperaturze zwiększa się skłonność do szepiania się elementów z tego samego metalu lub metali o zbliżonej strukturze krystalicznej. Sprzyjają temu także zgniot oraz sprężyste odkształcenie sieci.

W wysokiej temperaturze oraz przy dużych odkształceniach plastycznych mikroobszarów tarcia następuje, jako odmiana szepiania adhezyjnego, **zrastanie tarciove**, które polega na trwałym łączeniu się stykających się obszarów trących powierzchni metalowych w wyniku dyfuzji poprzez granicę styku.

Proces ten zależy od wzajemnej rozpuszczalności w stanie stałym materiałów pary trącej, współczynników dyfuzji lub samodyfuzji, temperatury mikroobszarów tarcia, czasu styku i wartości odkształcenia plastycznego.

Oprócz skłonności metali do szepiania i zrastania drugim czynnikiem decydującym o podatności na zużycie adhezyjne jest skłonność metalu do tworzenia na powierzchni **warstw tlenkowych**. Tlenki metali o wiązaniach atomowych tworzą potencjał sił elektrostatycznych powierzchni, których zasięg jest mniejszy od sił charakterystycznych dla metali. Warstwy tlenkowe praktycznie nie wykazują skłonności do szepiania. Warstwa tlenków na powierzchni metalu zmniejsza oddziaływanie adhezyjne obszarów styku metali.

Całkowita siła przyciągania adhezyjnego zależy od wartości sił międzycząsteczkowych i rzeczywistej powierzchni styku. Przyciąganie adhezyjne bez trwałych wiązań międzypowierzchniowych nie powoduje zużycia.

Rozrywanie szepień powoduje często na granicy umocnionego materiału ubytki na powierzchni i tworzenie na drugiej powierzchni narostów o twardości większej od rdzenia. Narosty działają jak mikroostrza umocowane w jednej z powierzchni.

Gwałtowne zużycie spowodowane zachwianiem równowagi termicznej i mechanicznej w wyniku przerywania warstwy olejowej, polegające na zaczepianiu nierówności powierzchni i podwyższeniu temperatury w warunkach, gdy warstwa olejowa istnieje, lecz jest zbyt

cienka w stosunku do wysokości nierówności, nazywane jest **scuffingiem**. Ten rodzaj zużycia łączy w sobie elementy zużycia ściernego i adhezyjnego i polega na szczepianiu się i następnym rozrywaniu połączeń wierzchołków nierówności w mikroobszarach styku.

W przypadku gdy intensywność niszczenia powierzchni przez ścieranie jest mniejsza od intensywności tworzenia warstw tlenków, występuje **zużycie z udziałem utleniania**. Zużycie to polega na niszczeniu warstwy wierzchniej metali i stopów w warunkach tarcia w wyniku oddzielania warstw tlenków utworzonych w strefie tarcia wskutek adsorpcji tlenu oraz warstw roztworów stałych powstałych następnie w wyniku dyfuzji tlenu w odkształcone plastycznie lub sprężyste obszary metalu.

Zużycie z udziałem utleniania występuje przy tarcu:

- ślizgowym,
- tocznym.

Przy tarcu tocznym, zużyciu z udziałem utleniania zawsze towarzyszy zużycie zmęczeniowe.

Cykliczne oddziaływanie naprężeń kontaktowych w warstwach wierzchnich współpracujących elementów tarciovych wywołuje zmęczenie materiału i w wyniku tego miejscową utratę spójności i związane z tym ubytki materiału, co stanowi istotę **zużycia zmęczeniowego**. Ubytek masy następuje dopiero po przekroczeniu przez poszczególne mikroobszary materiału granicznej liczby cykli obciążenia i granicy zmęczenia. W zależności od parametrów i rodzaju procesu tarcia oraz od wielkości obciążenia ubytek masy poprzedzony jest powstawaniem mikropęknięć, a następnie makropęknięć materiału.

Zużycie zmęczeniowe może być:

- **powierzchniowe**, charakteryzujące się miejscowymi ubytkami warstwy wierzchniej materiału spowodowanymi obciążeniami kontaktowymi,
- **objętościowe**, związane z tworzeniem się pęknięć zmęczeniowych w wyniku wielokrotnych makroskopowych odkształceń sprężystych oraz wielokrotnych odkształceń sprężysto-plastycznych lub plastycznych spowodowanych przez tarcie i wywołujących powierzchniowe pęknięcia zmęczeniowe.

Do rodzajów zużycia zmęczeniowego należą:

- **zużycie przez łuszczenie** (spalling),
- **zużycie gruzelkowe** (pitting).

Zużycie przez łuszczenie (spalling) polega na odpadaniu od podłoża cząstek materiału, utworzonych w wyniku rozprzestrzeniania się mikropęknięć zainicjowanych wewnątrz

warstwy wierzchniej skojarzonych elementów tarciovych, wskutek cyklicznego oddziaływania naprężeń kontaktowych i dochodzenia tych mikropęknięć do powierzchni przez narastanie naprężeń.

Na zużycie przez łuszczenie wpływają następujące czynniki:

- głębokość warstwy wierzchniej odkształconej plastycznie,
- wartość odkształcenia plastycznego warstwy wierzchniej.

Zużycie przez łuszczenie występuje przy tarcii tocznym metali twardych o wysokiej granicy plastyczności. Procesom zużycia zmęczeniowego przez łuszczenie towarzyszą zwykle procesy utleniania materiału warstwy wierzchniej.

Zużycie gruzelkowe (pitting) występuje w obecności oleju i w warstwach wierzchnich skojarzonych elementów tarciovych wskutek cyklicznego oddziaływania naprężeń kontaktowych. Można wyróżnić następujące etapy zużycia gruzelkowego przez pitting:

- zmęczenie materiału i inicjacja pęknięć, w obecności oleju opóźnione w porównaniu ze zużyciem niesmarowanych skojarzonych elementów tarciovych,
- rozwój i rozprzestrzenianie się pęknięć w wyniku wtlaczania oleju pod znacznym ciśnieniem w szczeliny istniejące na powierzchni i ich rozklinowywania pod działaniem dużych nacisków,
- wyrywanie przez olej cząstek, które utraciły lub zmniejszyły spójność z rodzimym materiałem.

Frettingiem jest zużycie związane ze zjawiskami mechanicznymi, cieplnymi, chemicznymi i elektrycznymi zachodzącymi w obszarze kontaktu skojarzonych elementów tarciovych, przemieszczających się w wyniku drgań lub pulsacji obciążeń wzajemnie względem siebie o kilkadziesiąt do kilkuset μm , przy ruchu postępowo- lub obrotowo-zwrotnym.