

Zawód: Lakiernik samochodowy

Przedmiot: Techniki wytwarzania (26.01.2022 r.) – Marek Krukowski

Temat: Fizykochemiczne podstawy eksploatacji maszyn cz. 1

Proszę o zapoznanie się z poniższą literaturą.

W razie pytań pozostaję do dyspozycji pod nr tel. 794 306 917; adres mail marek.ckz@interia.pl

1.2.1. Tarcie

Tarcie to zjawisko przeciwdziałające ruchowi względnemu stykających się ze sobą dwóch ciał (tarcie zewnętrzne) lub elementów tego samego ciała (tarcie wewnętrzne).

W przyrodzie tarcie jest zjawiskiem powszechnym i stanowi podstawową przyczynę niszczenia części maszyn i utraty ich właściwości użytkowych. Wywołuje powstawanie ubytku materiału z powierzchni i narastanie zmian w warstwie wierzchniej materiału. Towarzyszą mu: korozja, erozja, odkształcenie plastyczne itp. Tarcie i towarzyszące mu zużywanie części maszyn z reguły prowadzą do pogorszenia się jakości powierzchni części trących, co powoduje utratę ich właściwości użytkowych lub nawet konieczność wycofania z eksploatacji, a także pęknięcia lub złamania części przy dostatecznie dużym zmniejszeniu ich przekroju, co zawsze jest przyczyną awarii.

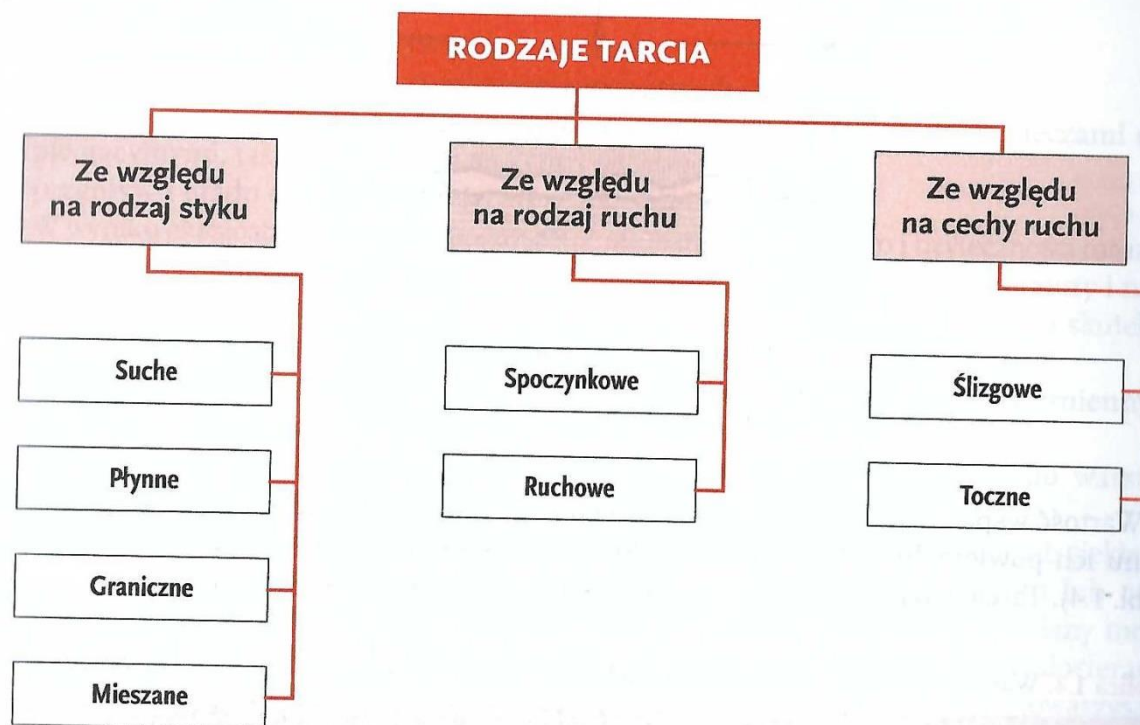
Tarcie powoduje straty energii, zużywanie powierzchni części współpracujących i wzrost ich temperatury, a także drgania i efekty akustyczne. Nie można uniknąć tarcia, można natomiast je złagodzić przez zmianę jego rodzaju.

W urządzeniach mechanicznych tarcie występuje we wszystkich zespołach i mechanizmach ruchowych. Może mieć charakter pozytywny (pożądany), np. w takich zespołach, jak: sprzęgła cierne, hamulce, niektóre napędy cięgnowe (paski klinowe), przekładnie cierne i inne, lub negatywny, gdy powoduje niepożądane opory ruchu, a przez to straty energii i zużywanie części współpracujących, np. w łożyskach, przekładniach zębatych, prowadnicach i różnego rodzaju przegubach.

Rodzaje tarcia

Rozróżnia się tarcie wewnętrzne i zewnętrzne. **Tarcie wewnętrzne** to opór powstający między elementami jednego ciała. W ciałach stałych tarcie jest uzależnione od właściwości tłumiących materiałów, natomiast w płynach – od lepkości. Opory tarcia wewnętrznego wynikają z istnienia sił kohezji, czyli sił wzajemnego przyciągania się cząsteczek ciała, i zależą od swobody przemieszczania się tych cząsteczek. Najmniejsze występują w gazach, a największe w ciałach stałych. Tarcie wewnętrzne występuje również w cieczy podczas przesuwania względem siebie dwóch ciał oddzielonych całkowicie warstwą cieczy. Nazywa się je **tarciem płynnym**, gdyż jest wywołane oporem wewnętrznym warstwy płynu – środka smarnego. Tarcie suche, graniczne i mieszane będzie omówione później (patrz: s. 33÷34).

Tarcie zewnętrzne występuje w obszarze styku dwóch ciał stałych, będących w ruchu lub wprawianych w ruch bez udziału czynnika smarowego. Jeżeli powierzchnie styku tych ciał są elementami idealnie sztywnymi i pozbawionymi błędów kształtu i chropowatości, to opory tarcia zewnętrznego są wynikiem oddziaływania sił powierzchniowych (adhezji). Jeżeli tarcia podlegają elementy maszyn, to występują między nimi nie tylko oddziaływania o charakterze adhezyjnym, ale również oddziaływania mechaniczne, spowodowane nierównościami współpracujących powierzchni. Stąd opory tarcia zewnętrznego to pokonywanie zarówno sił adhezyjnych, jak i spójności. Na rysunku 1.6 przedstawiono klasyfikację rodzajów tarcia.



Rys. 1.6. Rodzaje tarcia

Tarcie spoczynkowe (statyczne) występuje wtedy, kiedy dwa ciała nie przemieszczają się względem siebie, i jest równe sile, jakiej należy użyć, aby wprowadzić w ruch jedno ciało względem drugiego.

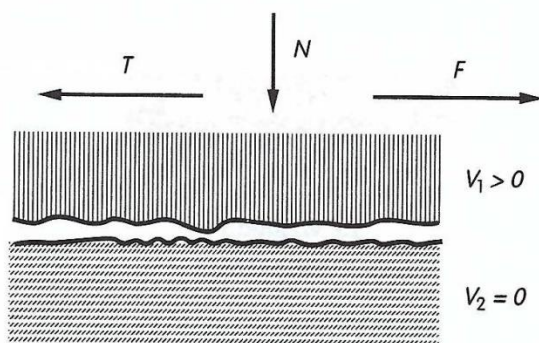
Tarcie ruchowe (kinetyczne) występuje wtedy, kiedy dwa ciała ślizgają się lub toczą po sobie. Siła tarcia przeciwstawia się wówczas ruchowi i powstają opory tarcia, których pokonywanie wymaga odpowiednich sił. W odróżnieniu od tarcia spoczynkowego tarcie ruchowe zawsze wywołuje zużycie elementów trących. Dzieli się je na toczne (potoczyste) oraz ślizgowe (posuwiste).

Tarcie toczne występuje np. w łożyskach tocznych, przekładniach zębatych oraz w układzie koło–szyna. Tocząca się rolka powinna stykać się z teoretycznie gładką powierzchnią. W praktyce rolka ta odkształca się, wywierając pewien nacisk na powierzchnię, która również ulega odkształceniu. Następują sprężyste, a niekiedy nawet plastyczne odkształcenia obu materiałów, powodując tzw. **styk strefowy** elementów. W strefie tej występuje tarcie ślizgowe zewnętrzne na powierzchni elementów oraz tarcie wewnętrzne w odkształconej warstwie wierzchniej. Źródłem oporów tarcia tocznego są mechaniczno-molekularne oddziaływania, zachodzące na styku elementów podczas ich przemieszczania.

Tarcie ślizgowe (rys. 1.7) występuje przy postępowym, postępowo-zwrotnym, obrotowym, obrotowo-zwrotnym lub wiertnym¹ ruchu względnym współpracujących elementów. Siła tarcia ślizgowego:

$$T = \mu N \text{ [N]},$$

gdzie: N – siła dociskająca powierzchnie trące [N], μ – współczynnik tarcia.



Rys. 1.7. Model tarcia ślizgowego:

T – siła tarcia, N – siła dociskająca powierzchnie trące, F – siła powodująca ruch, v_1 , v_2 – prędkość

Wartość współczynnika μ tarcia ślizgowego zależy m.in. od rodzaju materiałów oraz od stanu ich powierzchni. W odniesieniu do metali zawiera się ona w granicach 0,10÷0,25 (tabl. 1.4). Tarcie ślizgowe występuje w większości urządzeń mechanicznych.

Tablica 1.4. Wartości współczynnika tarcia suchego niektórych materiałów

Skojarzenie	Współczynnik tarcia μ	Skojarzenie	Współczynnik tarcia μ
Stal–staliwo	0,18	Stal–Cu	0,10
Stal–stal	0,10	Stal–poliestry	0,11
Stal–mosiądz	0,15	Stal–poliamidy	0,05
Żeliwo–żeliwo	0,16	Stal–teflon	0,04
Stal–żeliwo	0,15	Stal–szkło	0,08

W zależności od tego, czy elementy trące pracują na sucho, czy też z zastosowaniem środka smarnego, rozróżniamy tarcie: **suche**, **płynne**, **mieszane** oraz **graniczne** (patrz rys. 1.6 oraz 1.12).

¹ Ruch wiertny to złożenie ruchu postępowego i obrotowego.

1.2.2. Zużywanie części maszyn

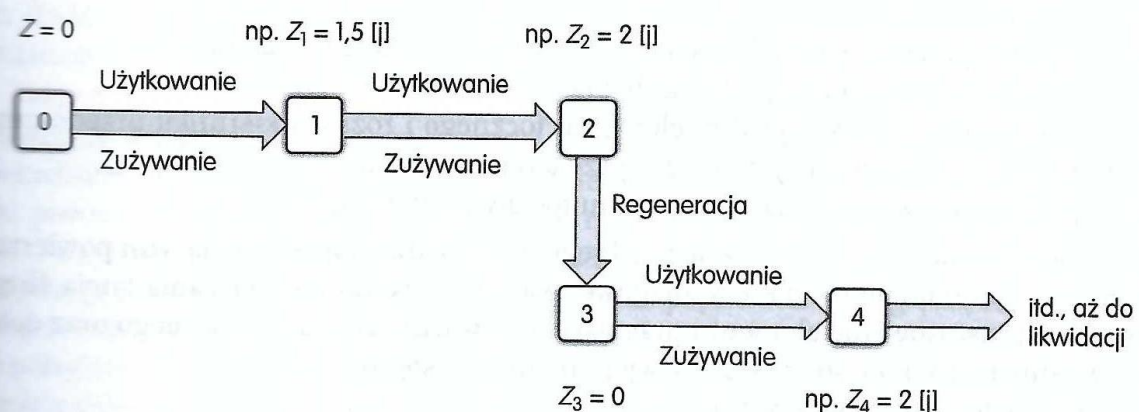
Warunki pracy poszczególnych mechanizmów i węzłów kinematycznych¹ maszyn są różne i zależą od:

- rodzaju tarcia uwarunkowanego rodzajem ruchu (ślizgowe, toczne), kształtu geometrycznego powierzchni trących oraz obciążenia;
- rodzaju tarcia uwarunkowanego smarowaniem lub jego brakiem (suche, płynne, mieszane, graniczne);
- obciążenia wywołującego naprężenia wewnętrzne materiału części trących;
- prędkości poślizgu lub toczenia;
- temperatury otoczenia;
- obecności środowiska agresywnego korozyjnie;
- wnikania między trące powierzchnie niepożądanych ciał obcych;
- jakości procesu eksploatacji (tzn. użytkowania, obsługi i zasilania cieczami eksploatacyjnymi, takimi jak środki smarne i paliwa);
- przepływu prądu elektrycznego (w szczególnych przypadkach).

W wyniku eksploatacji następuje pogorszenie się stanu technicznego i użyteczności maszyn, co objawia się zmniejszeniem ich sprawności mechanicznej, wzrostem temperatury i natężenia hałasu podczas pracy maszyny oraz występowaniem nadmiernych drgań na skutek:

- tarcia powodującego niszczenie warstwy wierzchniej par trących;
- zmęczenia prowadzącego do powstania przełomów w wyniku działania zmiennych obciążeń;
- korozji przeważnie obniżającej wytrzymałość i powodującej zmianę składu warstwy wierzchniej materiału;
- erozji naruszającej powierzchnię poddaną przepływowi czynnika gazowego lub ciekłego.

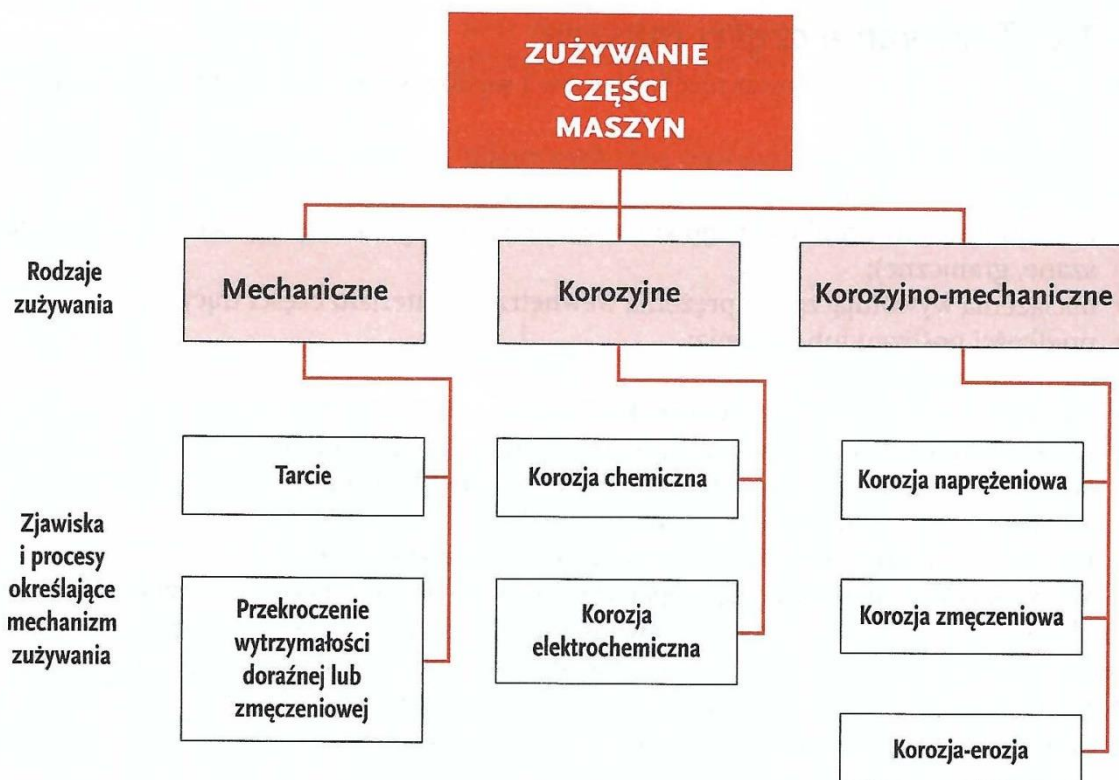
Zużywanie to proces zmian stanu części, węzła kinematycznego, zespołu lub całej maszyny, powodujący utratę ich właściwości użytkowych. Niekiedy jednak zmiany mogą wpływać korzystnie bądź stabilizująco na te właściwości. Na przykład podczas docierania maszyny następuje poprawa jej właściwości użytkowych, chociaż może temu towarzyszyć niewielki ubytek materiału warstw wierzchnich elementów współpracujących. Natomiast **zużycie** to stan poszczególnych części, węzła kinematycznego, zespołu lub maszyny na określonym etapie procesu zużywania (rys. 1.8).



Rys. 1.8. Zużywanie jako proces i zużycie jako stan części

l – jednostka zużycia (miara), Z_i – zużycie mierzone jako zmiana masy, wymiarów liniowych lub objętości, 0, 1, 2, ... – stan obiektu w chwili obserwacji

¹Węzeł kinematyczny to co najmniej dwie części, które wykonują ruch względem siebie.



Rys. 1.9. Rodzaje zużycia części maszyn

Zużycia nie da się uniknąć, ale można i należy je opóźniać. Ze względu na rodzaj oddziałującego czynnika rozróżnia się zużycie mechaniczne, korozyjne i korozyjno-mechaniczne (rys. 1.9).

Zużycie mechaniczne części maszyn wskutek tarcia

W urządzeniach mechanicznych podstawowymi częściami trącymi są:

- łożyska ślizgowe poprzeczne, pracujące w ruchu obrotowym – tarcie ślizgowe;
- łożyska ślizgowe poprzeczne, pracujące w ruchu obrotowo-zwrotnym (wahadłowym) – tarcie ślizgowe;
- prowadnice pracujące w ruchu postępowo-zwrotnym – tarcie ślizgowe;
- przekładnie zębate, pracujące z reguły przy tarcu ślizgowo-tocznym;
- łożyska toczne o różnym profilu elementu tocznego i różnym kierunku przenoszenia sił (wzdłużne, poprzeczne) pracujące przy tarcu tocznym;
- napędy krzywkowe, pracujące przy tarcu tocznym lub ślizgowym.

Trwałość elementów maszyn zależy od tego, czy między współpracującymi powierzchniami występuje tarcie toczne czy ślizgowe. Należy dążyć do zmniejszania tarcia ślizgowego przez zastosowanie elementu pracującego w warunkach tarcia tocznego oraz dobór odpowiednich środków smarnych. W wyniku tarcia następuje:

- ubytek materiału z powierzchni tarcia;
- zmiana właściwości warstwy wierzchniej (zwykle zmniejsza się odporność na zużycie);
- pogarszanie jakości powierzchni tarcia, zwiększenie chropowatości, powstanie rys, pęknięć powierzchniowych i jam po wyrwanych cząstkach materiału.

Zjawiska cieplne, które towarzyszą tarcu, powodują zmiany strukturalne w warstwach wierzchnich, w związku z czym zmniejsza się ich twardość i wytrzymałość. Przeróbka

plastyczna i prawidłowo przeprowadzona obróbka skrawaniem uodparnia tę warstwę przed zużywaniem, natomiast tarcie powoduje takie odkształcenia mechaniczne i zmiany termiczne, w wyniku których szybciej się ona zużywa. W miarę ubywania materiału z powierzchni odkształcenie i inne zmiany postępują w głąb materiału. Wskutek deformacji powierzchni, gdy występy nie mają kształtu ostrza, lecz są zaokrąglone, następuje wyrywanie cząstek materiału. Jest to powszechne niemal we wszystkich przypadkach tarcia suchego.

Łagodniejsze tarcie to mniejsze zmiany w warstwie wierzchniej i mniejszy ubytek materiału, a więc powolniejszy proces zużywania. Dlatego podstawowym zadaniem eksploatatora jest stworzenie takich warunków, w których wartość współczynnika tarcia będzie jak najmniejsza.

W praktyce występuje głównie zużywanie mechaniczne, które można podzielić na dwie grupy (rys. 1.10):

1. zużywanie ustabilizowane,
2. zużywanie nieustabilizowane.

Podczas zużywania ustabilizowanego ubytek materiału z powierzchni następuje przez cały czas trwania procesu. W przypadku zużywania nieustabilizowanego w warstwie wierzchniej elementu przez pewien czas zauważa się jedynie zmiany jakościowe, takie jak zgniot czy narastanie mikropęknięć, a zauważalny ubytek materiału występuje znacznie później.

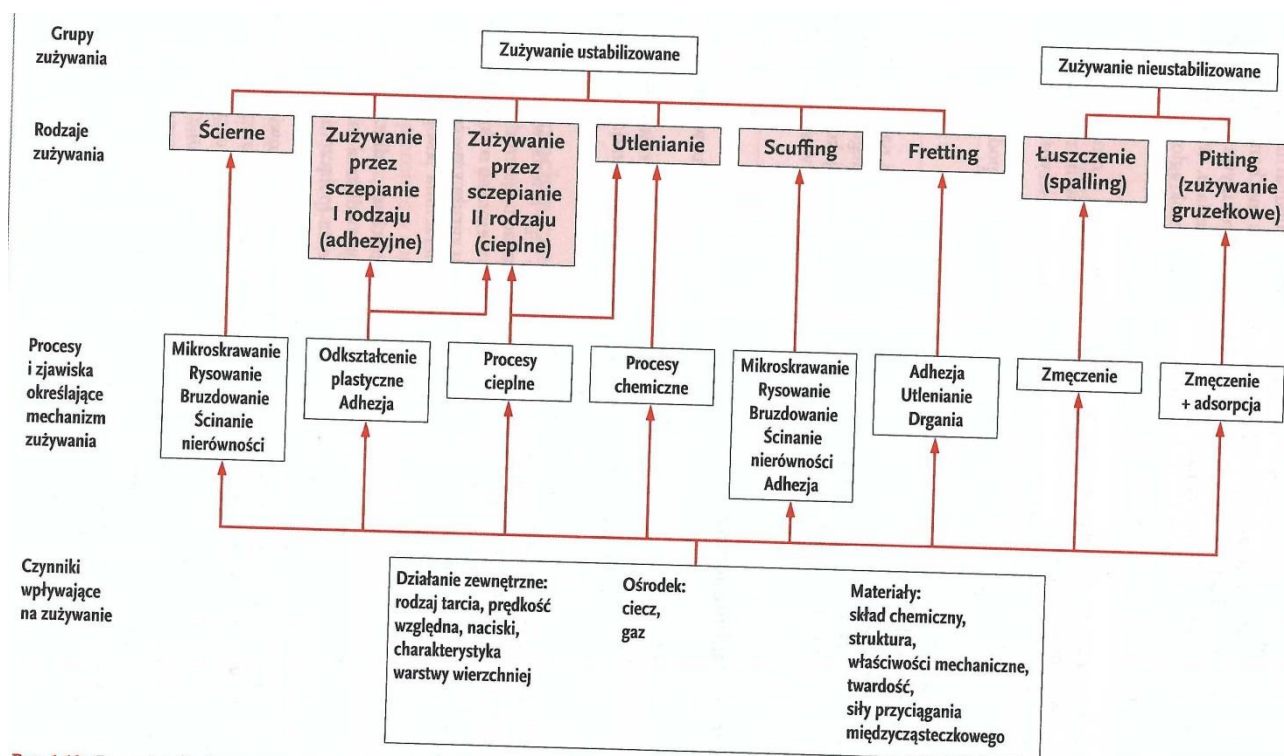
Zużywanie ustabilizowane

Do tej grupy zalicza się zużywanie: ścierne, przez szepianie I i II rodzaju, w wyniku utleniania oraz scuffing i fretting (terminy te objaśniono na s. 27).

Zużywanie ścierne to proces niszczenia warstw wierzchnich elementów współpracujących ze sobą w wyniku skrawającego, bruzdzącego, rysującego i ścinającego oddziaływania nierówności powierzchni lub cząstek ciał obcych (ścierniwa) oraz produktów zużywania, znajdujących się między tymi powierzchniami.

Zużywanie ścierne to zjawisko typowe dla tarcia suchego. Jego intensywność jest bardzo duża. W czystej formie występuje rzadko – np. w przegubach gąsienic pojazdów gąsienicowych lub podczas tarcia elementów roboczych maszyn ziemnych o skrawany grunt. Powierzchnia tarcia przypomina powierzchnię po szlifowaniu zgrubnym – jest czysta, nie ma śladów szepienia ani głębokiego wyrywania. Warstwa wierzchnia jest zazwyczaj odkształcona jedynie sprężyscie.

Zużywanie przez szepianie I rodzaju (przez szepianie tarciove, adhezyjne) to proces intensywnego niszczenia powierzchni tarcia z plastycznym odkształceniem warstwy wierzchniej. W jego wyniku pojawiają się miejscowe szepienia (połączenia) metaliczne obu powierzchni trących oraz następuje ich niszczenie wskutek odrywania cząstek metalu. Powierzchnia tarcia ma rysy, których kierunek odpowiada kierunkowi ruchu. Takie zużywanie występuje przy stosunkowo niewielkich prędkościach względnych, dużych naciskach i zbyt ubogim smarowaniu. Po zbliżeniu się występow nierówności powierzchni na odległość działania sił międzyatomowych następuje ich szepianie tarciove, a następnie ścinanie tych połączeń. Procesowi temu towarzyszy niezbyt wysoka temperatura, dlatego mówimy o zgrzewaniu na zimno. W jego wyniku następuje zwiększenie chropowatości i powstawanie głębokich wyrw na powierzchniach elementów trących, połączone z nalepianiem cząstek metalu, oraz umocnienie warstwy wierzchniej elementów, a także obniżenie ich wytrzymałości zmęczeniowej. Skuteczną metodą przeciwdziałającą temu procesowi jest obfitsze smarowanie.



Rys. 1.10. Grupy i rodzaje zużywania mechanicznego metalowych części maszyn w wyniku tarcia

Zużywanie przez ścieranie II rodzaju (przez zrastanie tarciove, ciepłne) występuje podczas intensywnego niszczenia powierzchni metali wskutek tarcia ślizgowego i jest wywołane nagrzaniem strefy tarcia do temperatury zmiękczenia metalu. Stanowi to rezultat dużych nacisków i dużych prędkości względnych. Warstwa wierzchnia zostaje wyraźnie i głęboko odkształcona. Powierzchnia tarcia jest bardzo chropowata, ma kolor srebrny lub ciemnoniebieski, co świadczy o jej wysokiej temperaturze. Taki wygląd powierzchni wskazuje na brak środka smarnego oraz zbyt częste i długotrwałe przeciążenia, powodujące tarcie suche. Pierwsze ślady takiego zużycia (wywołane np. chwilowym brakiem środka smarnego) utrudniają uzyskanie stabilnej warstwy smarnej, zwanej **klinem smarowym**. Zużycie takie uniemożliwia dalszą pracę mechanizmów precyzyjnych, a nawet zespołów maszynowych. Dlatego już w fazie początkowej skutki zużywania ciepłego muszą być usunięte.

Zużywanie w wyniku **utleniania** występuje na skutek reakcji metalu z tlenem, zarówno podczas tarcia ślizgowego, jak i tocznego, i jest typowe dla części obficie smarowanych. Podczas tarcia tocznego towarzyszy mu zawsze zużywanie zmęczeniowe (łuszczenie, pitting). Powierzchnia tarcia jest czysta, przeważnie błyszcząca, pokryta dość dużymi, czasem błyszczącymi różnobarwnymi plamami – od srebrnej do jasnoniebieskiej lub jasnobrunatnej. Warstwa wierzchnia jest nieznacznie odkształcona. Proces ten występuje powszechnie w urządzeniach mechanicznych, szczególnie w przypadku tzw. tarcia granicznego. Intensywność procesu jest najmniejsza w porównaniu z innymi rodzajami zużywania, zatem należy tworzyć warunki sprzyjające zużywaniu przez utlenianie, a eliminować zużywanie przez ścieranie.

Scuffing (ang. *scuff* – zdierać) to gwałtowne zużywanie ściernie i adhezyjne, spowodowane przerwaniem warstwy smarnej (w wyniku dużego obciążenia) lub zastosowaniem zbyt cienkiej warstwy smarnej. Podczas procesu następuje łączenie i rozrywanie połączeń wierzchołków nierówności współpracujących powierzchni. Scuffing może być lekki, umiarkowany i intensywny; w trakcie tego ostatniego występuje zdzieranie powierzchni współpracujących elementów (pod wpływem ciepła). Scuffing powoduje zachwianie równowagi termicznej i mechanicznej w węzłach tarcia, czego wynikiem jest lawinowy proces zużywania.

Fretting (ang. *frett* – wgryzać, strzępić) to zużywanie mechaniczne połączeń spoczynkowych, poddanych drganiom. W procesie tym występuje jednocześnie oddziaływanie adhezyjne (ścieranie) oraz intensywne utlenianie. Ponieważ powierzchnia zużyta jest podobna do powierzchni skorodowanej, czasami fretting jest mylnie klasyfikowany jako zużywanie korozyjne.

Zużywanie nieustabilizowane

Zużywanie przez **łuszczenie** (**spalling**, ang. *spall* – odprysk) jest procesem dynamicznym, zmęczeniowym, występującym podczas tarcia tocznego przy braku lub niedostatku środka smarnego, np. w przekładniach zębatych i łożyskach. Polega na stopniowym narastaniu naprężeń w warstwie wierzchniej, a następnie tworzeniu i rozprzestrzenianiu się mikropęknięć, prowadzących do odrywania cząstek materiału z podłoża. Na powierzchniach tarcia powstają kratery i wżery. Pierwsze mikropęknięcia pojawia się w miejscu największego wyężenia materiału w wyniku wielokrotnego działania maksymalnych naprężeń stycznych. Szybko powstają kolejne mikropęknięcia. W wyniku ich łączenia płatki materiału oddzielają się, pozostawiając wgłębienia w kształcie ściętego stożka. Powierzchnia tarcia nie wykazuje śladów mikroskrawania i między wżerami jest pozbawiona śladów ścierania. Procesowi łuszczenia towarzyszy utlenianie odsłoniętego materiału warstwy wierzchniej.

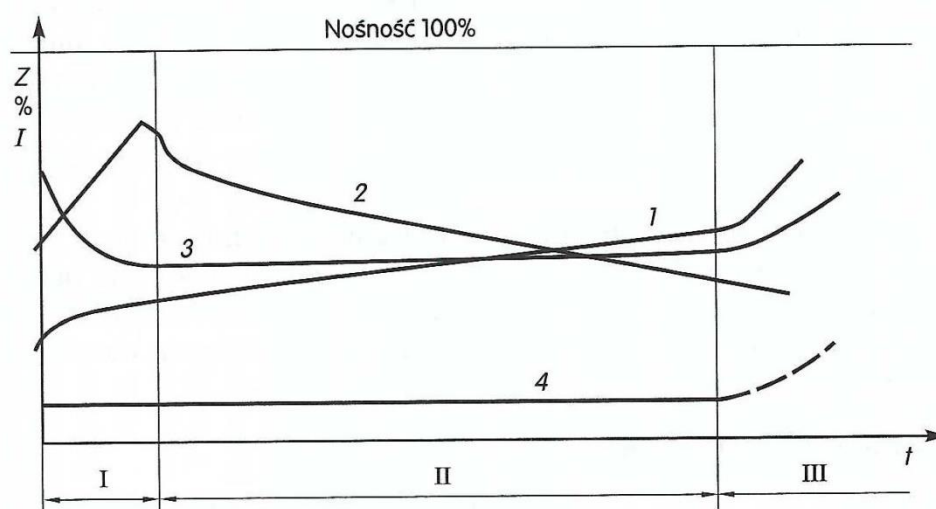
Zużywanie **gruzelkowe** (**pitting**, ang. *pitt* – wgłębienie) powstaje w wyniku tarcia tocznego w obecności środka smarnego. Proces zużywania w porównaniu z łuszczeniem jest bardziej intensywny. Wskutek zmęczenia warstwy wierzchniej pod wpływem cyklicznych obciążeń powstają mikroszczeliny, w które, w strefach styku, pod dużym ciśnieniem wciśkany jest czynnik smarujący, tworzący kliny smarowe. Przetaczanie się współpracującego elementu tocznego powoduje zamykanie się szczelin z równoczesnym odkształceniem materiału oraz ogromny wzrost ciśnienia czynnika smarującego zamkniętego w szczelinie. W wyniku dynamicznego działania klinów smarowych mikroszczeliny są rozłupywane. Powierzchnia tarcia ma dość gęsto rozłożone ślady wyrwań, z reguły w kształcie koła. Między wgłębieniami powierzchnia jest gładka, bez śladów szkiepców adhezyjnych. Kratery pittingowe (miejsca wyrwań) są niebezpieczne – tworzą karby i mogą być źródłem pęknięć zmęczeniowych. Pitting występuje najczęściej w łożyskach tocznych, napędach krzywkowych i przekładniach zębatych.

Proces zużywania mechanicznego

W przypadku tarcia ślizgowego, powodującego zużywanie ściernie, adhezyjne, erozyjne i fretting, wyodrębnia się trzy typowe okresy:

- I – docieranie;
- II – zużywanie umiarkowane – normalna praca, zwykle o stałej intensywności;
- III – zużywanie awaryjne (patologiczne).

Proces zużywania części współpracujących w wymienionych okresach odzwierciedla rys. 1.11.



Rys. 1.11. Proces zużywania ustabilizowanego współpracujących części wskutek tarcia lub erozji:
 1 – zużycie podczas tarcia ślizgowego; 2 – nośność powierzchni (zdolność do przenoszenia obciążenia) podczas tarcia ślizgowego; 3 – intensywność zużywania podczas tarcia ślizgowego; 4 – zużycie podczas tarcia tocznego;
 I, II, III – odpowiednio: docieranie, okres normalnej pracy i przekroczenie dopuszczalnego luzu pary trącej;
 Z – zużycie, I – intensywność zużywania

Okres I, zwany docieraniem, jest stosunkowo krótki, a zarazem bardzo ważny dla prawidłowego działania urządzenia. Następuje wówczas doglądanie i dopasowywanie się współpracujących powierzchni. W początkowej fazie ubytki materiału są dość spore. W końcu okresu rzeczywista powierzchnia styku obu części powiększa się,

maleje intensywność zużywania oraz stabilizuje się stan naprężeń i odkształceń w warstwie wierzchniej.

Okres II to normalna praca elementów maszyn. Charakteryzuje się powolnym przebiegiem zachodzących zjawisk oraz zmniejszoną i prawie stałą intensywnością zużywania. Trwałość części maszyn określa się na podstawie tego okresu.

Okres III zaczyna się w chwili, gdy zostaje przekroczony dopuszczalny luz danej pary trącej. Występuje wówczas zakłócenie normalnej współpracy części, co objawia się stukami, nadmiernym nagrzewaniem się, obniżeniem sprawności mechanicznej, wzrostem zużycia środka smarnego, obniżeniem dokładności oraz sztywności połączenia. Dalsza eksploatacja w tych warunkach powoduje zniszczenie lub awarię pary trącej.

W przypadku tarcia tocznego zmiany zachodzące w okresie docierania i normalnego zużywania, wywołane zgniotem materiału warstwy wierzchniej, są w zasadzie niezauważalne. Wskutek zmian zmęczeniowych w tej warstwie, po pewnym czasie następuje odrywanie się cząstek materiału (pitting lub łuszczenie), co jest początkiem zużywania lawinowego, awaryjnego.

Długość oraz intensywność poszczególnych okresów zużywania zależą od:

- cech konstrukcyjnych współpracujących części, kształtu ich powierzchni, rodzaju materiałów, obciążenia i smarowania;
- cech technologicznych współpracujących części: rodzaju ostatecznej obróbki, jakości obróbki cieplnej lub cieplno-chemicznej, chropowatości powierzchni i jakości montażu;
- cech eksploatacji: prawidłowego użytkowania, konserwacji oraz obsługi między naprawami.

Zupełnie inaczej przebiega zużywanie w wyniku łuszczenia (spallingu) oraz zużywania gruzelkowego (pittingu).

Zużywanie mechaniczne wskutek przekroczenia wytrzymałości doraźnej lub zmęczeniowej

Dotychczasowe rozważania dotyczyły procesów zużywania przede wszystkim warstwy wierzchniej części. Niszczenie mechaniczne powstaje nie tylko w wyniku tarcia, lecz również na skutek odkształceń plastycznych i zmęczenia. Odkształcenia trwałe, powodujące uszkodzenia elementów maszyn, powstają w wyniku działania obciążeń statycznych i dynamicznych, których wartości przekraczają granicę sprężystości materiału. Powstają one również po osiągnięciu przez materiał granicznej liczby cykli zmęczeniowych przy obciążeniach zmiennych, których wartość nie przekracza granicy sprężystości materiału.

Niszczeniem zmęczeniowym materiału nazywamy zmiany występujące w nim podczas działania okresowo zmiennych odkształceń lub naprężeń, które powodują zmniejszenie wytrzymałości i trwałości, a nawet całkowite zniszczenie. Najczęściej jest to awaryjny przypadek niszczenia i dlatego części maszyn projektuje się z dużym zapasem wytrzymałości zmęczeniowej.

Wartości obciążeń i naprężeń podczas pracy maszyn zmieniają się cyklicznie. Jest to spowodowane spadkiem wytrzymałości materiału. Elementy konstrukcyjne pękają wskutek jego zmęczenia. Pęknięcia te często są niezauważalne, a więc zniszczenie następuje niespodziewanie.

Pęknięcia zmęczeniowe zwykle powstają w miejscach gwałtownego wzrostu naprężeń wywołanych obecnością karbów (o charakterze konstrukcyjnym lub technologicznym; są to: pory, wtrącenia, nacięcia, rysy powierzchniowe, korozja, podtoczenia, nawiercenia, nagłe zmiany przekroju elementu konstrukcyjnego). Pęknięcia zaczynają się

zwykle na powierzchni i stopniowo postępują w głąb materiału, aż osiągną przekrój krytyczny elementu. Gdy przekrój ten zostanie ostatecznie osłabiony, następuje nagłe pęknięcie elementu.

W przełomach zmęczeniowych można wyróżnić dwie strefy. Pierwsza, nazywana **strefą zniszczenia zmęczeniowego**, ma zwykle powierzchnię gładką, często błyszczącą. Druga – **strefa przełomu zmęczeniowego** – jest bardziej gruboziarnista; powstaje nagle, w ostatnim okresie pracy elementu, i nazywamy ją **strefą doraźną** lub **strefą dołamania**.

Wytrzymałość zmęczeniową można zwiększyć przez:

- wyeliminowanie ostrych przejść i podcięć oraz obszarów gwałtownego spiętrzenia naprężeń (w tym celu stosujemy zaokrąglenia i opływowe kształty, które zapewniają łagodne, stopniowe zmiany naprężeń w przekrojach elementu);
- unikanie ostrych rys podczas obróbki powierzchni;
- zapobieganie odwęgleniu powierzchni w trakcie obróbki;
- kontrolowanie lub zapobieganie korozji, erozji i agresji chemicznej podczas pracy urządzenia;
- zmianę konstrukcji, polegającą na eliminowaniu połączeń pasowanych na wcisk, kołków i innych części łączących, które zawsze wywołują zaburzenia w makroskopowym stanie naprężeń;
- wywołanie odpowiedniego zgniotu w warstwie wierzchniej, szczególnie w miejscach spiętrzenia naprężeń (powierzchnie elementu poddajemy krążkowaniu, śrutowaniu, młotkowaniu lub innego rodzaju obróbce plastycznej).