ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1995
Seria: **GÓRNICTWO** z. 223 Nr kol. 1273

Stanisław F.**ŚCIESZKA**

ZUŻYCIE - PODSTAWOWA PRZYCZYNA NISZCZENIA TRIBOSYSTEMÓW

Streszczenie. W artykule dokonano przeglądu przyczyn zniszczeń typowych tribosystemów w maszynach górniczych, takich jak: łożyska, przekładnie zębate i hamulce. Wykazano, że zużycie, a w szczególności zużycie ślizgowe, jest ważnym czynnikiem wywołujące te zniszczenia. Zniszczenia w maszynach górniczych często są wynikiem złego doboru materiałów nie wykazujących właściwych własności tribologicznych.

WEAR - A BASIC CAUSE OF FAILURE OF TRIBOSYSTEMS

Summary. The causes of failure of common tribosystems in mining machinery such as bearing, gears and brakes are reviewed in this paper and it is shown that wear, in particular sliding wear, is an important factor in those failure. Failures in mining machinery are often due to the choice of materials which do not have the appropiate tribological behaviour.

ИЗНОС - ОСНОВНАЯ ПРИЧИНА РАЗРУШЕНИЯ ТРИБОСИСТЕМ

Резюме. В статье представлен обзор причин разрушения в горном оборудовании типичных трибосистем как подшипники, редукторы и тормоза. Доказано, что износ, особенно вызванный скольжением, является существенным фактором вызывающим данный износ. Разрушение узлов горного оборудования часто является следствием плохого подбора материалов, не проявляющих соответствующих трибологических свойств.

1. WPROWADZENIE

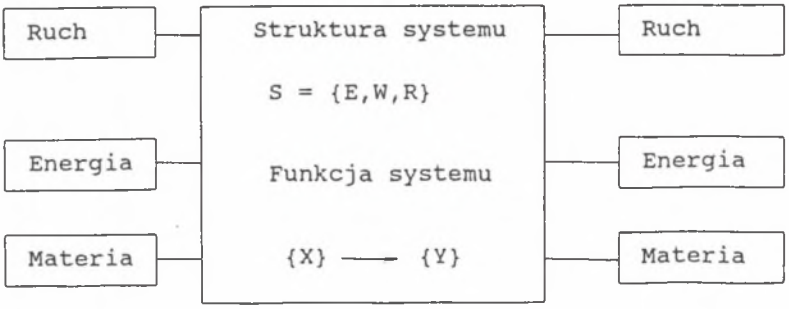
Tribosystemy są to takie systemy mechaniczne, w których dokonuje się transmisja ruchu, energii i materiałów w różnej wzajemnej proporcji zgodnie z przeznaczeniem systemu (tabl. 1).

Tablica 1

Klasyfikacja tribosystemów według ich funkcji

Wejście i wyjście zgodne z techniczną funkcją systemu		Najważniejsza funkcja systemu	Przykład
Główne wejście X	Główne wyjście Y		
Ruch + Praca	Ruch	Ograniczenie stopni swobody Zatrzymanie ruchu	Łożyska Hamulce
	Praca	Transmisja mocy	Przekładnie
	Informacja	Generowanie informacji	Zegary, krzywki, wodziki
Ruch + Materiały	Materiały	Transport materiałów	Rurociągi, koło/szyna
		Kształtowanie materiałów	Walcarki

Ruch występuje w każdym tribosystemie, chociaż funkcją niektórych z nich jest zmniejszenie intensywności ruchu lub jego całkowite zatrzymanie (np. hamulce, tłumiki). Ruch lub jego zmiana wywołuje niepożądane zjawiska, takie jak generowanie ciepła oraz nie wynikająca z funkcji transmisja materiału (zużycie, przenoszenie). Funkcją np. przekładni zębatej jest przenoszenie ruchu i mocy ale również niepożądane przenoszenie materiału towarzyszyć może wzajemnym oddziaływaniom powierzchni elementów. To samo dotyczy układów: koło-szyna, krzywka-popychacz, zawór-gniazdo, cylinder-tłok itd. We wszystkich tych systemach występuje w różnej proporcji przenoszenie ruchu, energii i materiałów (rys.1).



Rys. 1. System tribologiczny w postaci blokowej
Fig. 1. Tribo-technical system's structure

Systemy te ulegają zniszczeniu, jeżeli ww. proporcje na wyjściu ulegają istotnej zmianie w stosunku do proporcji zamierzonej przez konstruktora.

2. PRZYCZYNY USZKODZEŃ TRIBOSYSTEMÓW

2.1. Łożyska ślizgowe

W łożyskach ślizgowych najczęstszą przyczyną uszkodzeń jest obecność cząstek obcego pochodzenia, np. metalicznych opiłków, które cyrkulują razem ze środkiem smarnym. Nawet jeśli układ smarowania zawiera filtr, to nie wszystkie cząsteczki

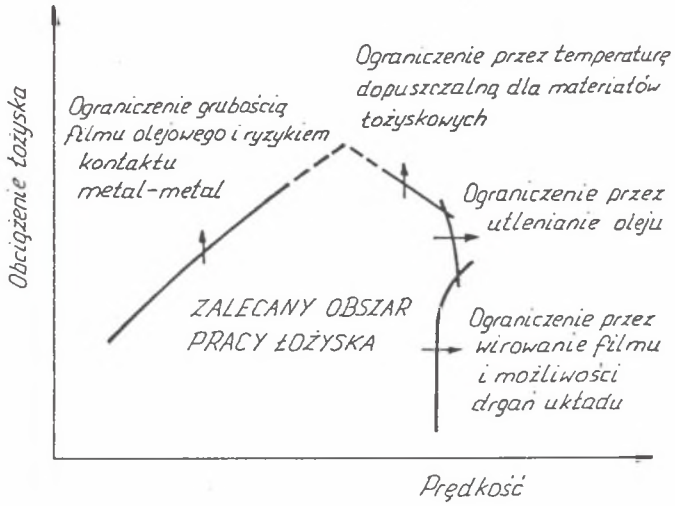
przedostające się lub generowane w systemie zostają wyłapane. Część średniej wielkości cząstek zostaje wgnieciona w miękki materiał łożyskowy, a najmniejsze z nich dalej pozostają w obiegu oleju. Akumulujące się w oleju bardzo drobne cząsteczki metalowe i niemetaliczny pył z otoczenia, posiadający wymiary mniejsze od grubości filmu hydrodynamicznego, cyrkulują z olejem i powodują erozyjne ubytki stopów łożyskowych. Jednak największy udział w procesie uszkodzenia łożysk mają cząsteczki metaliczne (pochodzące z czopa) o wymiarach większych od grubości filmu olejowego,wgniecione w stop łożyskowy. Te wgniecione produkty zużycia są źródłem tarcia metal-metal i dalszego progresywnie narastającego zużycia.

Uszkodzenie łożysk ślizgowych pochodzenia metalurgicznego są bardzo rzadkie i jeżeli występują, ujawniają się we wczesnych etapach eksploatacji. Na przykład wiązanie między białym metalem a oprawą okazuje się czasami wadliwe. Innym źródłem problemów mogą być duże objętości fazy Sn-Sb, które mają tendencję do pękania i inicjowania zatarcia. Jeżeli stop łożyskowy zawiera ponad 0,5% Pb, to może się tworzyć eutektyka Pb-Sn o bardzo niskiej temperaturze topnienia na granicach ziarn, osłabiając odporność łożyska na wycieranie.

Niewłaściwe dopasowanie lub montaż może być powodem nierównomiernego zużycia na powierzchni łożyska lub też korozji tarciowej (frettingu) na powierzchni między obudową łożyska i łożyskiem, jeżeli to niedopasowanie wywołuje oscylacyjne wzajemne przemieszczanie się tych elementów.

Zwiększenie prędkości obwodowej i obciążenia łożysk we współczesnych maszynach powoduje, że coraz częściej natrafia się na przeszkody dalszego wzrostu tych wielkości operatywnych w postaci kawitacji. Kawitacja występuje w tej przestrzeni filmu olejowego, w której mają miejsca gwałtowne zmiany ciśnienia na skutek zmian obciążenia lub drgań powierzchni łożyska. Przyczyny wystąpienia kawitacji i samą kawitację można dość łatwo usunąć przez wprowadzenie odpowiednich zmian konstrukcyjnych.

Chociaż właściwa filtracja, montaż, umiejętne zestawienie podstaw konstruowania i nauki o materiałach (rys.2, tabl.2) eliminuje wiele przyczyn niszczenia powierzchni tarcia przez zjawiska erozji, kawitacji i ścierania, niewiele można zrobić dla powstrzymania zużycia w wyniku rysowania i bruzdowania powierzchni przez wgniecione w materiały łożyskowe twarde cząsteczki już po fakcie dostania się tych cząsteczek do układu tribologicznego.



Rys. 2. Ograniczenia parametrów operacyjnych łożyska smarowanego hydrodynamicznie
Fig. 2. Limits of safe operation for hydrodynamic journal bearing

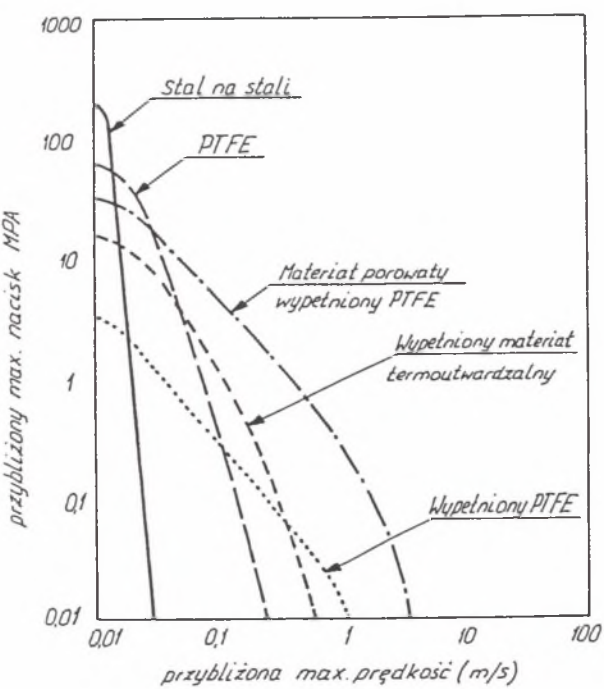
Tablica 2

Niektóre ważniejsze materiały łożyskowe.

Lp.	Materiał	Główne składniki stopowe	Dopuszczal-ne obciążenie [MPa]	Odporność na zanie-czyszczenie	Odporność na zatarcie	Maksymal-na dopusz-czalna temp. [°C]
1.	Biały metal na bazie ołowiu	8-16% anty-mon, 5-11% cyna	14	b.dobra	b.dobra	130
2.	Biały metal na bazie cyny	7-14% anty-mon, 3-9% miedź	14	b.dobra	b.dobra	130
3.	Stop miedzi	20-30% ołów	28-41	dostatecz.	dostatecz.	150
4.	Stop aluminium	20% cyna 1% miedź	35	zła	dość dobra	170
5.	Porowaty brąz	8-12% cyna impregnowana olejem	14-28	dostatecz.	dobra	130
6.	Kompozyt brąz-grafit	5-40% grafit	zmienne	dostatecz.	dobra	150
7.	PTFE w osno-wie metalowej	ołów	niskie	dostatecz.	b.dobra	250
8.	Osnowa PTFE metalowy wypełniacz	brąz, grafit	niskie	dostatecz.	b.dobra	250

2.2. Łożyska samosmarujące

Występuje dość duże zapotrzebowanie na łożyska samosmarujące, które charakteryzują się jednocześnie dużą trwałością. Jeżeli łożysko jest słabo obciążone, to para cierna policzterofluoroetylen (PTFE) - metal jest dobrym rozwiązaniem. Niestety, dla większości rozwiązań technicznych łożyskowań, w których smarowanie cieczami jest nieracjonalne (np. w próżni kosmicznej) lub niepożądane (np. w przemyśle spożywczym), skojarzenie cierne PTFE - metal charakteryzuje zbyt mała odporność na zużycie. Dlatego większość materiałów samosmarujących to kompozyty złożone z osnowy polimerowej z wypełniaczami (np. włóknami węglowymi). Najpoważniejszą przyczyną uszkodzeń tych łożysk są zanieczyszczenia stałe (jak np. pyły) lub ciekłe w postaci wody, oleju lub benzyny. Jest możliwe, że przyczyną dużego zużycia w tych łożyskach są reakcje między osnową polimerową i zanieczyszczeniami. Grafit i włókno węglowe są dobrymi samosmarnymi wypełniaczami w podwyższonych temperaturach.



Rys. 3. Przybliżony zakres zastosowania łożysk ślizgowych o ruchu oscylacyjnym
Fig. 3. Approximate indication of the performance of dry rubbing bearing with oscillating motion

Dwusiarczek molibdenu (MoS_2) natomiast traci własność środka smarnego w wysokich temperaturach ale zachowuje je nawet w bardzo wysokiej próżni.

Łożyska samosmarujące są szczególnie korzystnym rozwiązaniem dla węzłów tarcia o ruchu wahadłowym (oscylacyjnym), gdyż ich prawidłowe - optymalne działanie nie zależy od wytworzonego filmu olejowego, tak jak to jest w łożyskach smarowanych hydrodynamicznie.

Na rys.3 pokazano porównanie między kilkoma typami łożysk w układzie współrzędnych: dopuszczalny nacisk, dopuszczalne prędkości. Wartości na rysunku są przybliżone, ale dają pogląd na możliwości zastosowania przedstawionych materiałów łożyskowych.

2.3. Łożyska toczne

Jeżeli łożysko jest prawidłowo zamontowane i eksploatowane, przebiegają w nim naturalne procesy zużycia, ograniczające jego trwałość do skończonej wartości czasu, liczby cykli obciążenia lub liczby obrotów do utraty zdolności pracy (resursu). Związek trwałości i obciążenia łożyska jest określony w kategoriach prawdopodobieństwa i stanowi podstawę obliczania i doboru łożysk tocznych.

Zależności między trwałością L a dowolnym obciążeniem P ma postać:

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^p,$$

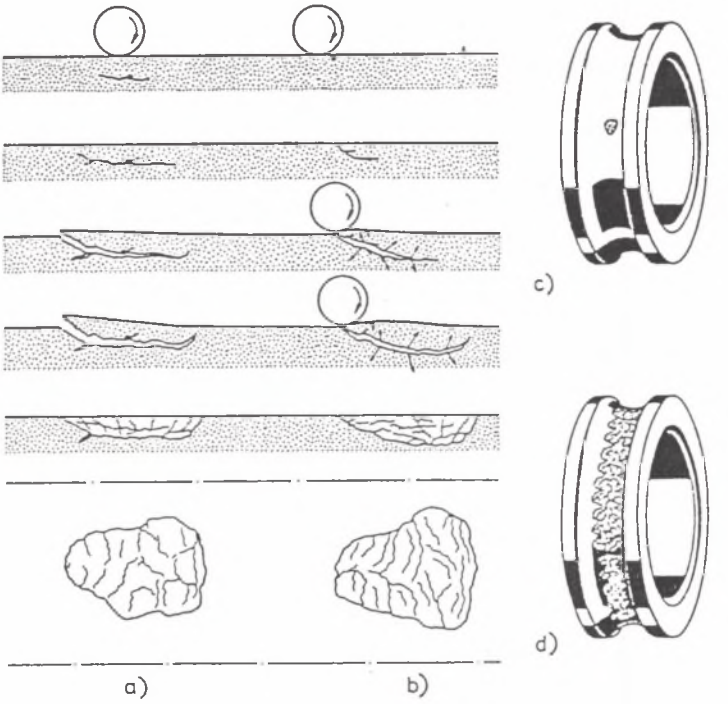
gdzie:

C - jest obciążeniem łożyska, które powoduje, że 90% badanych łożysk wykazuje trwałość jednego miliona obrotów,

p - jest wykładnikiem potęgowym: p = 3 dla łożysk kulkowych, p = 10/3 dla łożysk wałeczkowych.

Oprócz naturalnych procesów zużycia łożyska mogą tracić zdolność do pracy wskutek nieprawidłowości: procesu technologicznego, konstrukcji węzła łożyskowego oraz jego montażu i eksploatacji.

W łożyskach tocznych występują dwa naturalne procesy zużycia: zmęczeniowe i ścierne zużycie powierzchni roboczych. Ścieranie powierzchni narasta przez cały okres eksploatacji, ciągłe zaś przetaczanie się części tocznych powoduje jedynie zmiany jakościowe w materiale, czyli zmęczenie powierzchni ujawnia się w postaci wykruszeń dopiero w końcowym okresie trwałości łożyska (rys.4).



Rys. 4. Zmęczeniowe zużycie powierzchni:
a - rozwój pęknięcia podpowierzchniowego,
b - rozwój pęknięcia powierzchniowego,
c - pojedyncze wykruszenie,
d - rozwalcowane wykruszenie zmęczeniowe

Fig. 4. Fatique failure of surface:
a - sub-surface progress of the crack,
b - surface progress of the crack,
c - single typical pit,
d - rolled down fatique pits

Od momentu pojawienia się pierwszego wykruszenia proces postępuje lawinowo i prowadzi do wyłączenia łożyska z ruchu. Ponieważ skutek zmęczeniowego zużycia powierzchni jest ewidentny, zostało ono przyjęte za podstawowe kryterium obliczania trwałości łożysk. Niemniej jednak około 20-30% eksploatowanych łożysk traci zdolność do pracy wskutek nadmiernego wzrostu luzu spowodowanego zużyciem ściernym i zarówno jeden jak i drugi proces zużycia może być przyczyną kresu trwałości łożyska. W rezultacie zaleca się, aby rzeczywista trwałość łożyska była określana jedną z granic: zużycia zmęczeniowego lub ściernego. Te dwie granice nie

były traktowane do tej pory z jednakową uwagą i o ile wystarczająco dużo opracowań wykonano na temat powierzchniowego zużycia zmęczeniowego, to na temat zużycia ściernego w łożyskach tocznych jest ich bardzo mało.

2.4. Hamulce

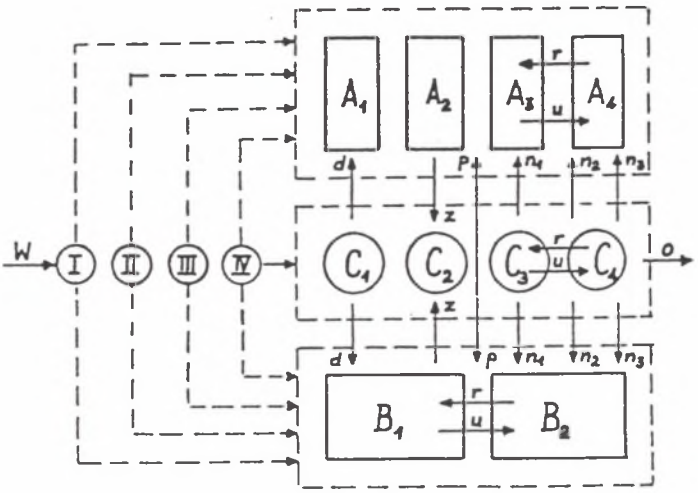
W warstwach wierzchnich elementów ciernych hamulców zachodzi kompleks zjawisk tribologicznych i innych zjawisk związanych z procesem hamowania. Zjawiska te mogą prowadzić do gwałtownej utraty resursu przez hamulce (np. na skutek nieprawidłowej eksploatacji, termicznej dekompozycji lepiszcza materiału ciernego, zaolejenia elementów ciernych) lub do powoli postępującego zużycia materiałów ciernych, nie zmieniającego zasadniczo charakterystyk sprzężenia ciernego. Fizyczna istota utraty resursu w czasie hamowania zależy od rodzaju materiału elementów ciernych (np. metale, polimery, kompozyty o lepiszczu żywicznym, spieki itd.).

W hamulcach, podobnie jak w innych węzłach tarcia, zasadniczy wpływ na zużycie elementów ma stan ich warstwy wierzchniej. Pod wpływem występujących na powierzchniach tarcia wysokich temperatur, fizykochemicznego oddziaływania środowiska itd. generowane są zmiany w warstwach wierzchnich, do których najczęściej należą:

- sprężysto-plastyczne deformacje,
- procesy dyfuzyjne i przemiany chemiczne,
- zmiany fazowe i strukturalne,
- odgazowanie, odparowanie, kondensacja, adsorpcja.

Przykładowo system tribologiczny: kompozytowe tworzywo cierne-stal można przedstawić za pomocą schematu jak na rys.5.

System składa się z trzech ciał: A - okładzina hamulca (A_1 -lepiszcze, A_2 -wypełniacze, A_3 -tlenki Fe, A_4 -faza α - Fe), B - tarczy hamulca (B_1 -stal, B_2 - tlenki Fe), C - ciała "trzeciego" (C_1 - płynne produkty zużycia tworzyw ciernych, C_2 - stałe produkty zużycia, C_3 - cząsteczki fazy α - Fe, C_4 - tlenki Fe). Układ trący poddany jest zewnętrznemu wymuszeniu kinematycznemu i dynamicznemu (W), co wywołuje w układzie odpowiedni stan obciążeń mechanicznych (I), pole temperatur (II) oraz pole elektrostatyczne (III). Układ działa w otoczeniu (IV). W warunkach tarcia technicznie suchego można w układzie wyszczególnić następujące dominujące procesy i przemiany: u - utlenianie, r - redukcja, d - dyfuzja (O_2, H_2, CO, CH_4, itd.),



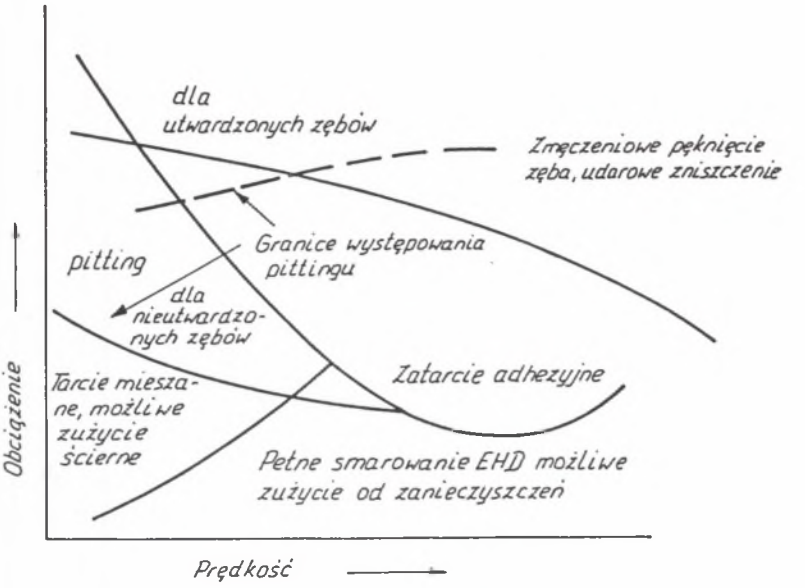
Rys. 5. Schemat tribologiczny układu trącego w hamulcach
Fig. 5. Tribological system of the friction brake

z - zużycie (przejście pewnej masy ciała A lub B do produktów zużycia), p - przenoszenie masy pomiędzy ciałami A i B w wyniku przerwania sczepień adhezyjnych poza granicami pierwotnego rozdziału, n_1 - nanoszenie tlenków Fe, n_2 - nanoszenie fazy α - Fe, n_3 - nanoszenie organicznych i innych składników tworzyw ciernych, o - opuszczenie przez produkty zużycia układu.

W hamulcach wiodące rodzaje zużycia tworzyw ciernych kompozytowych z lepiszczem organicznym to: zużycie cieplne, ścierne i adhezyjne.

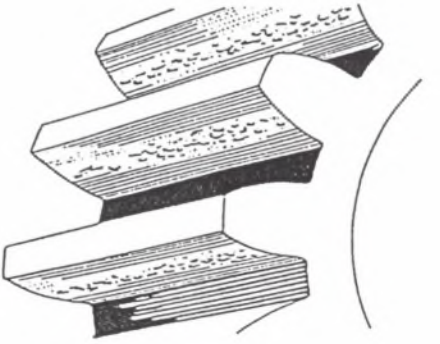
2.5. Przekładnie zębate

Występują trzy główne formy uszkodzeń powierzchni zębów w przekładniach zębatych: zmęczenie powierzchniowe (pitting, spalling itd.), zużycie adhezyjne (scuffing, galling, scoring itd.). Pitting częściej występuje dla niższych zakresów prędkości, podczas gdy warunki do wystąpienia zużycia adhezyjnego charakteryzuje wysoka temperatura, czyli wysokie obciążenie i prędkość (rys.6). Zużycie adhezyjne może mieć miejsce jako rezultat wcześniejszego wystąpienia pittingu. Zużyciu ściernemu i adhezyjnemu natomiast nie towarzyszy pitting.



Rys. 6. Strefy możliwych uszkodzeń kół zębatych
Fig. 6. Zones of gear tooth distress

Pitting jest najczęściej występującą formą uszkodzeń na powierzchni zębów nieutwardzanych lub utwardzanych na wskroś. Mechanizm tego zużycia jest identyczny z zużyciem zmęczeniowym występującym w łożyskach tocznych (rys.7).

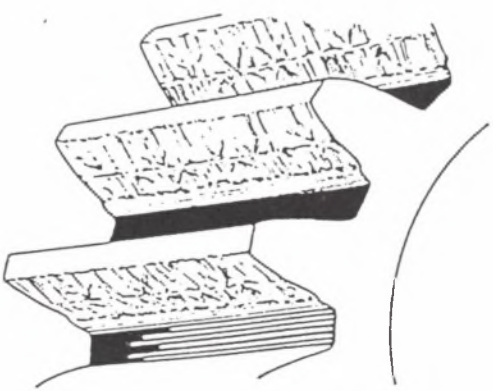


Rys. 7. Typowe rozmieszczenie zmęczeniowych wykruszeń na powierzchni zębów (pitting)
Fig. 7. Typical distribution of the surface fatique pitting

Utwardzanie powierzchniowe kół zębatych redukuje prawdopodobieństwo wystąpienia pittingu (rys.6). Czynniki takie, jak: równomierny rozkład nacisków, wysoka gładkość powierzchni zębów i pełne smarowanie EHD także odsuwają w czasie wystąpienie pierwszych objawów zmęczenia powierzchniowego.

Przeciążenia dynamiczne na powierzchniach styku zębów, które rosną ze wzrostem prędkości, przyśpieszają wystąpienie pittingu, co pokazuje opadająca granica występowania pittingu ze wzrostem prędkości (rys.6).

Zużycie adhezyjne w przekładniach zębatych może przyjmować różny stopień intensywności. Ten rodzaj zużycia dominuje, jeżeli przerwaniu ulegnie film olejowy jako rezultat: wzrostu chropowatości w wyniku innych wcześniej występujących rodzajów zużycia (np. pittingu), wzrostu obciążenia powyżej wartości obliczeniowej lub wzrostu temperatury w strefie styku. Przerwanie filmu oznacza kontakt metal-metal, intensywny wzrost współczynnika tarcia, powstanie i zrywanie sczepień adhezyjnych i dalszy wzrost temperatury i uplastycznienie warstwy wierzchniej (rys.8).



Rys. 8. Typowy obraz powierzchni zębów po intensywnym zużyciu adhezyjnym (galling)
Fig. 8. Typical very severe adhesion wear pattern on tooth surface (galling)

W przekładniach zębatych, w których istnieje duże ryzyko wystąpienia zużycia adhezyjnego (np. przekładnie hipoidalne), powinny być stosowane oleje z dodatkami przeciwzatarciowymi (EP).

Zużycie ścierne występuje wtedy, gdy przyczyną braku pełnego filmu EHD jest zbyt mała prędkość lub gdy olej ulegnie zanieczyszczeniu twardymi cząsteczkami o średnicy większej od grubości filmu olejowego. Przekładnie zębate smarowane

smarami plastycznymi są z reguły bardziej narażone na zużycie ścierne, gdyż obieg środka smarnego jest wolniejszy a sedymentacja i oddzielenie zanieczyszczeń utrudnione.

Ograniczenie zużycia w przekładniach zębatych do wartości technicznie akceptowalnej zależy od spełnienia kilku podstawowych warunków:

- naprężenia w zębach są mniejsze od wartości uznanej za dopuszczalną dla spodziewanego poziomu niezawodności i trwałości,
- materiały na koła zębate są właściwie dobrane,
- dokładność wykonania i tolerancja są odpowiednie,
- środek smarowy i układ smarowania są prawidłowe,
- obudowa przekładni izoluje układ kół przed negatywnym wpływem środowiska.

Obliczenia sprawdzające przekładnie zębate bazują na szeregu kryteriach, w tym na kryterium: ryzyka wystąpienia pittingu, złamania zęba, rodzaju tarcia i smarowania lub zatarcia. Przekładnia, która spełnia te wszystkie kryteria, powinna pracować bez objawów zużycia zębów lub z ubytkiem o wielkości akceptowanej w planowanym czasie życia przekładni z określonym poziomem prawdopodobieństwa (np. 0,9 lub 0,95).

3. PODSUMOWANIE

Ten krótki przegląd niszczenia systemów tribologicznych wykazuje, że w procesie zużycia elementów pary ciernej dominujące jest zużycie spowodowane wzajemnym poślizgiem tych elementów. Na obecnym etapie wiedzy nie jest możliwe ilościowe prognozowanie zużycia dla danego systemu tribologicznego, można natomiast wyznaczyć z określonym prawdopodobieństwem zakresy prawidłowej pracy systemu. Procesy zużyciowe występujące poza ww. zakresami opisane mogą być fenomenologicznie łącznie z uwarunkowaniami przyczynowo - skutkowymi.

LITERATURA

[1] Quinn T.F.: The role of wear in the failure of common tribosystems, Wear, (1984), 100 s. 399-436

[2] Krzemiński-Freda H.: Łożyska toczne. PWN, Warszawa 1989

[3] Jones M., Scott D.: Industrial tribology, Elsevier, Amsterdam 1983

[4] Scieszka S.F.: Problemy hamowania maszyn wyciągowych - Studium ważniejszych zjawisk tribologicznych w parze ciernej tworzywo hamulcowe - stal. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo z.484 - Gliwice 1976

Recenzent: Prof. dr hab. inż. **Jan BROŚ**

Wpłynęło do Redakcji w marcu 1994 r.

Abstract

A tribosystem is a system in which motion, energy and materials are transmitted, in various relative amounts according to the required function of the system from input to desired output. Motion is a characteristic of any tribosystem. Sometimes the purpose of the system may be to change the rate of motion or to eliminate it altogether. Such changes of course, involve undesired output, such as friction heating and the unexpected removal of material from the surface through which the motion is transmitted. Gears are intended to transfer motion and power in rotating machinery, but sometimes unwanted transfer of material may also occur. Dry bearings involve some degree of transfer of motion, energy and materials. All these systems are said to have failed when the actual output deviates significantly from the desired output. With the development of many sophisticated methods of surface analysis, it has become possible to understand many aspects of wear. In the paper the causes of failure in some common tribosystams are discussed. I view of the paper sliding wear is the main problem preventing the designer of a tribosystem from being able to predict the actual life of the systems.