

*Dawid Szurgacz**

TRYBOLOGICZNE ASPEKTY EKSPLOATACJI MASZYN W GÓRNICTWIE

Streszczenie

Inżynieria smarowania maszyn pozwala, w sposób systemowy, połączyć podstawową wiedzę z zakresu trybologii z parametrami opisującymi wymuszenia charakterystyczne dla specyfiki ich użytkowania w różnych dziedzinach gospodarki.

W artykule zawarto teoretyczny opis trybologicznych aspektów eksploatacji maszyn i urządzeń w górnictwie oraz przedstawiono wymagania, jakie muszą być brane pod uwagę w procesach ich konstruowania i eksploatacji.

Tribological aspects of operating machinery in mining industry

Abstract

Machines lubrication engineering in the mining industry has an important advantage, which allows connecting basic knowledge in the field of tribology with parameters describing constraint characteristics for the specific use of machinery in various fields.

This paper presents a theoretical description of the tribological aspects of operating machinery in mining industry and presents the requirements that must be taken into account in the process of constructing and operating machinery and equipment.

WPROWADZENIE

Trybologia jest nauką o procesach zachodzących w ruchomym styku ciał stałych. Procesy te są określone przemianami wielkości funkcjonalnych: ruchu, pracy i materiału. Można je ogólnie zaszerzować do jednej z trzech grup, którymi są:

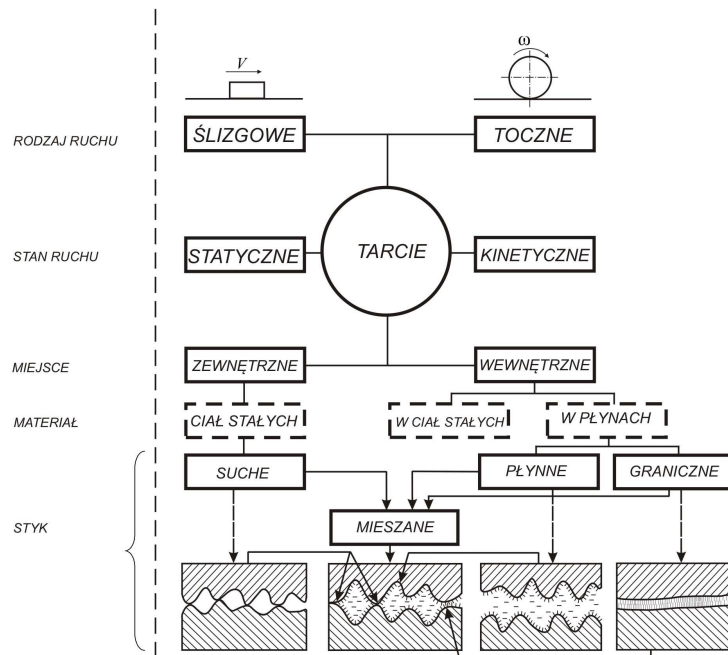
- 1) procesy zachodzące w styku elementów układu trybomechanicznego – odkształcenia i fizykochemiczne oddziaływania powierzchni,
- 2) mechanizmy rozpraszania energii i materiału w procesach tarcia i zużywania,
- 3) profilaktyka tarcia i zużywania materiałów (między innymi procesy smarowania).

Tarcie jest najpowszechniejszym zjawiskiem w przyrodzie i jednym z podstawowych procesów zachodzących w maszynach. Tarcie w maszynach może mieć znaczenie negatywne lub pozytywne. Wszędzie tam, gdzie tarcie powoduje szkodliwe opory ruchu jest procesem negatywnym. Opory obrotu wału w łożyskach, opory przemieszczania się suwaków w prowadnicach, tarcie międzyzębne w przekładniach zębatych, to przykłady negatywnych przejawów tarcia wywołującego straty energii. Najskuteczniejszym sposobem zmniejszenia strat spowodowanych tarciem jest smarowanie. Tarcie jest wykorzystywane w tzw. sprzężeniach ciernych. Jest ich w technice wiele, począwszy od połączeń spoczynkowych (np. wciskowych, klinowych itp.) po połą-

* Śląskie Środowiskowe Studium Doktoranckie w Głównym Instytucie Górnictwa.

czenia ruchowe (przekładnie cierne, sprzęgła cierne), sprzężenia kół jezdnych z podłożem, hamulcem itp.

Tarcie, zależnie od przyjętego kryterium, można podzielić na różne rodzaje. Podstawowy podział tarcia oraz jego rodzaje przedstawiono na rysunku 1 (Lawrowski 1987).



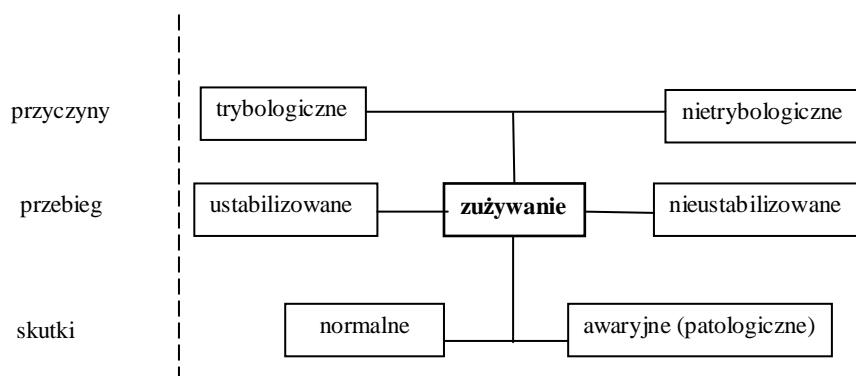
Rys. 1. Podział tarcia (Lawrowski 1987)

Fig. 1. A division of friction (Lawrowski 1987)

Tarcie powoduje zużywanie się materiałów, z których są one wykonywane. Zużywaniami nazywa się proces zmian w warstwie wierzchniej ciał stałych, charakteryzujący się ubytkiem masy lub odkształceniem powierzchni (np. deformacja zębów kół zębatych wykonanych z miękkiej stali). Zużycie jest mierzone objętościowo, liniowo lub wagowo. Na rysunku 2 przedstawiono ogólny podział procesów zużywania.

Zużywanie wywołane tarcie (trybologiczne) ma charakter mechaniczno-fizyczno-chemiczny. Towarzyszy ono zawsze tarcia suchemu i mieszanemu. Niektóre rodzaje zużycia mogą wystąpić także, w ograniczonym zakresie, przy tarcia płynnym (zużycie zmęczeniowe).

Mechaniczne procesy zużywania polegają na oddzielaniu cząstek od współpracujących powierzchni wskutek: mikroskrawania występami nierówności przeciwpoверхni lub luźnym ścierniwem oraz zmęczenia warstwy wierzchniej podczas jej cyklicznych odkształceń. Ponadto, przy współpracy miękkich materiałów może zajść trwałe odkształcenie warstwy wierzchniej, wywołujące zmianę kształtu powierzchni roboczej (Lawrowski 1987).



Rys. 2. Podział zużywania (Lawrowski 1987)

Fig. 2. A division of consumption (Lawrowski 1987)

2. ZUŻYCIE TRYBOLOGICZNE

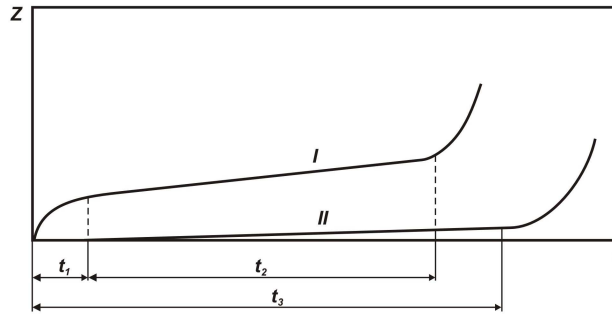
Podczas eksploatacji systemów technicznych wskutek oddziaływania wymuszeń roboczych, takich jak: obciążenia mechaniczne, termiczne itp., przebiegają procesy niszczenia, nazywane procesami starzenia eksploatacyjnego, a częściej zużyciem. Procesy te powodują nagłą lub stopniową utratę właściwości użytkowych elementów bądź węzłów konstrukcyjnych maszyn i urządzeń oraz w konsekwencji ich czasową lub trwałą eliminację z dalszego użytkowania.

W wyniku oddziaływania obciążenia mechanicznego mogą wystąpić różnorodne zniszczenia, które można podzielić na:

- zniszczenia objętościowe – są to zniszczenia typu dekohezji w całej objętości elementu, wynikające z przekroczenia w danym przekroju naprężeń granicznych; do typowych zniszczeń objętościowych zalicza się, tzw. złomy doraźne, zmęczenie lub wskutek pęknięcia kruchego,
- zniszczenia powierzchniowe – są to zniszczenia warstwy wierzchniej spowodowane głównie procesami tarcia (zużycie trybologiczne) lub korozji (Spałek 2003).

W zdecydowanej większości zniszczeń objętościowych, eliminujących elementy z dalszego użytkowania, przyczynę pierwotną stanowią postępujące procesy zużycia trybologicznego bądź korozyjnego. Znamienny jest fakt, że podczas eksploatacji maszyn przemysłowych, a zwłaszcza maszyn górniczych, równocześnie przebiegają procesy niszczenia objętościowego (zwłaszcza zmęczeniowego) oraz powierzchniowego (trybologicznego lub trybologiczno-korozyjnego). Ten negatywny synergizm procesów niszczących jest głównym powodem przedwczesnej utraty trwałości i niezawodności maszyn i urządzeń pracujących w trudnych warunkach eksploatacyjnych. Typowymi przykładami tego negatywnego synergizmu są procesy niszczenia zmęczeniowego-korozyjnego lin nośnych urządzeń wyciągowych czy tzw. proces korozji ciernej, powodujący blokowanie („zapiekanie się”) złączy sworzniowych zawiesi linowych maszyn wyciągowych.

Ogólnie, można jednak stwierdzić, że istnieją znaczne różnice w przebiegu procesu zużycia przy tarcii ślizgowym i tarcii tocznym, co pokazano na rysunku 3 (Spałek 2003).



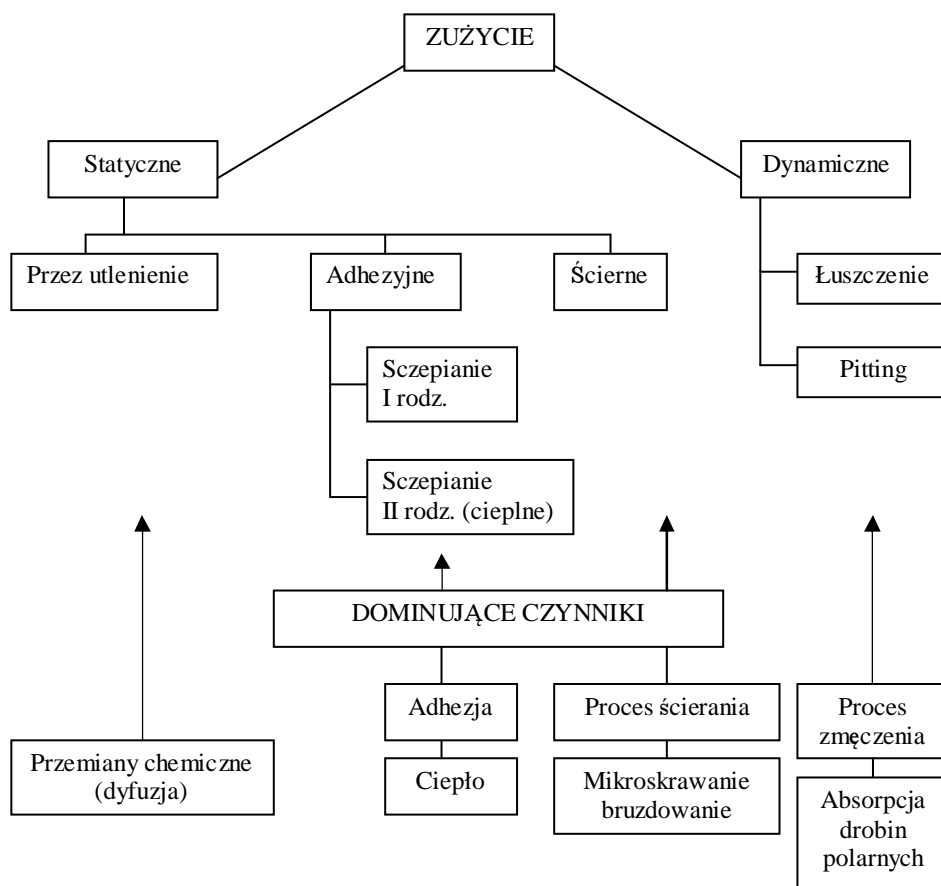
Rys. 3. Krzywa Lorenca charakteryzująca przebieg zużywania typowych par roboczych: ślizgowych (I) i tocznych (II); t_1 i t_2 – okres docierania i zużywania normalnego przy tarcii ślizgowym, t_3 – okres zużywania przy tarcii tocznym do czasu pojawienia się pierwszych produktów zużycia w wyniku procesu zmęczenia warstwy wierzchniej (Spałek 2003)

Fig. 3. The Lorenz curve is characterized by wear process of typical working pairs: sliding (I) and rolling (II); t_1 and t_2 – running-in and consumption period normal for sliding friction, t_3 – consumption period of the rolling friction till the appearance of the first consumption products as a result of the surface layer fatigue process (Spałek 2003)

Przy tarcii ślizgowym klasyczny proces zużywania opisuje tzw. krzywa Lorenca, którą można podzielić na okres docierania (t_1), zużycie ustabilizowane o charakterze zależności liniowej (t_2) oraz zużycie przyspieszone, zwane awaryjnym czy patologicznym ($t_3 > t_1 + t_2$).

W przypadku tarcia tocznego dominuje proces zmęczeniowy warstwy wierzchniej, a więc po dostatecznie długim czasie wewnętrznej kumulacji uszkodzeń (zarodkowania i rozwoju mikroszczelin) następuje nagłe pojawianie się pierwszych objawów wykruszeń powierzchniowych, rozwijających się następnie gwałtownie (lawinowo). Te wykruszenia stanowią silne koncentraty naprężeń, mogące prowadzić do złomu zmęczeniowego, kruchego.

Dla potrzeb praktycznych podstawowe rodzaje zużycia trybologicznego można przyjąć jak na rysunku 4 (Spałek 2003).



Rys. 4. Klasyfikacja rodzajów zużycia oraz dominujące czynniki, wpływające na powstawanie danego rodzaju zużycia (Spalek 2003)

Fig. 4. Classification of consumption types and the dominant factors influencing emergence of a particular consumption kind (Spalek 2003)

3. WPŁYW SMAROWANIA NA ZUŻYCIE TRYBOLOGICZNE

Zasadniczym celem smarowania jest: zmniejszenie współczynnika tarcia dla zmniejszenia strat energii na jego pokonanie oraz zapobieżenie zbyt wczesnemu i zbyt intensywnemu zużyciu. Smarowanie – ogólnie biorąc: wprowadzanie między trące powierzchnie ciała trzeciego, w którym tarcie wewnętrzne jest nieznaczne; realizuje się przez odpowiedni dobór warunków konstrukcyjnych trących części oraz dobór odpowiedniego smaru.

Smarami w gospodarce smarowniczej nazywa się wszystkie substancje zarówno płynne, jak i maziste oraz stałe, a niekiedy i gazowe, które wprowadzone między powierzchnie trących elementów zmniejszają wydatnie wartość współczynnika tarcia przez:

- wypełnienie nierówności między wierzchołkami trących powierzchni i zwiększenie w ten sposób rzeczywistej powierzchni styku, a więc zmniejszenie rzeczywistego nacisku jednostkowego,
- utworzenie między wierzchołkami nierówności obu trących powierzchni warstewki smaru niedopuszczającej do bezpośredniego metalicznego styku trących części i zastąpienia tarcia zewnętrznego części maszyn tarcie wewnątrz warstw smaru.

Smar wprowadza się między trące powierzchnie części maszyn także w celu:

- zapobieżenia procesowi korozji lub przynajmniej spowolnienia postępu tego procesu, szczególnie w okresach długotrwałego postoju maszyny, narażonej na korozyjne oddziaływanie agresywnego środowiska atmosferycznego,
- chłodzenia części trących, szczególnie odprowadzania ciepła wydzielanego w wyniku tarcia, a także odprowadzania ciepła wydzielanego wskutek procesów spalania (np. w silnikach spalinowych),
- umożliwienia skutecznego wprowadzania substancji stałych, przyspieszających proces docierania trących części, tzn. przyspieszających przede wszystkim ściernie najwyższych wierzchołków nierówności powierzchni i ułatwiających mikrodopasowanie powierzchni, a także przyspieszających proces zmian zachodzących w warstwie wierzchniej,
- umożliwienia wprowadzania substancji smarnych, płynnych i stałych, zapewniających powstawanie tarcia granicznego, szczególnie w okresach, w których warstwa smaru zostanie przerwana,
- zamortyzowania obciążeń dynamicznych, szczególnie przypadkowych, przez tzw. buforowane działanie warstewek smaru,
- skutecznego odprowadzania od trących i zużywających się części maszyn produktów ich zużycia, na ogół w postaci opiłków metalicznych, i odseparowania w urządzeniach filtrujących (Hebda, Janecki 1969).

Wpływ smarowania na zużycie trybologiczne można przedstawić na przykładzie ząbów i łożysk kół zębatach. Do ogólnych warunków oceny, którym jest podporządkowany cały proces projektowania przekładni, a którego integralnym elementem jest optymalizacja doboru oleju, zalicza się: niezawodność, trwałość i sprawność, a ostatnio coraz częściej stan termiczny i wibroakustyczny przekładni. Na podstawie kryteriów szczegółowych, stanowiących rozwinięcie warunków ogólnych, opracowane są metody i wskaźniki oceny przekładni, a także algorytmy doboru oleju smarującego. Kryteria szczegółowe umożliwiają również rodzajowe wyodrębnienie i opis trybologicznych procesów występujących w poszczególnych węzłach kinematycznych przekładni. Jedno z głównych kryteriów oceny przekładni zębatych stanowi trwałość, która w znacznym stopniu wpływa na niezawodność układów napędowych maszyn przemysłowych.

Z przeprowadzonych badań eksploatacyjnych najczęściej stosowanych przekładni klasycznych największa liczba uszkodzeń przypada na koła zębata (zazębienia), podczas gdy w przypadku przekładni planetarnych dużą liczbą uszkodzeń charakteryzują

się również łożyskowanie kół planetarnych. Z uwagi na mechanizm niszczenia utrata trwałości przekładni może być wynikiem:

- niszczących procesów objętościowych, głównie zmęczeniowych (wałów, zębów kół zębatych), rzadziej statycznych i o charakterze kruchego pęknięcia (wałów, kadłubów, kół zębatych),
- niszczących procesów trybologicznych (zazębień, łożysk, uszczelnień), a rzadziej procesów cierno-korozyjnych (*fretting process*), dotyczących połączeń czopów wałów z piastami czy posadowienia łożysk.

W wielu szczególnie trudnych warunkach eksploatacji trwałość mogą determinować procesy korozyjne, mające złożony charakter chemiczno-fizyczny. Trwałość przekładni (w rozumieniu statycznym danego jej typu) zależy od wielu czynników eksploatacyjnych, określanych ogólnie warunkami eksploatacyjnymi.

Wyniki badań niezawodności przekładni w napędach przenośników i kombajnów stosowanych w kopalniach węgla wykazują, że około 30–40% awaryjnych uszkodzeń stanowią zniszczenia trybologiczne, a w tej grupie około 1/3 zniszczeń wynika bezpośrednio ze złej jakości smarowania.

Przyjmując kryterium trwałości zazębień, w celu dobrania oleju powinna być dokonana szczegółowa analiza niszcząca procesów trybologicznych: zmęczeniowego wykruszenia warstwy wierzchniej zębów (pitting i mikropitting), zużycia adhezyjno-ściernego oraz adhezyjno-termicznego (zatarcie). W przypadku poprawnie skonstruowanej przekładni, zniszczenia o charakterze trybologicznym decydują o trwałości zazębień, co oznacza, że bardzo istotny jest optymalny wybór lepkości oleju smarującego. Należy bowiem podkreślić, że położenie obszarów determinujących nośność przekładni, określoną przez moment obciążenia, może się znacznie zmieniać w zależności od jakości smarowania. I tak na przykład można całkowicie wyeliminować wystąpienie zatarcia przez wprowadzenie do oleju dodatków przeciwzatarciowych oraz można znacznie zwiększyć nośność kół zębatych z uwagi na pitting i zużycie adhezyjne, stosując olej o dostatecznie dużej lepkości. Wzrost stopnia zanieczyszczeń bądź degradacji oleju natomiast może spowodować, że w całym zakresie prędkości o nośności przekładni będzie decydować zużycie ściernie. Wybór optymalnej lepkości oleju gwarantuje osiągnięcie pożądanego stanu tarcia w czasie ustalonej pracy przekładni. Ten pożądaný stan tarcia można zdefiniować małymi stratami energii rozproszonej oraz małą intensywnością zużycia (Spatek 2003).

PODSUMOWANIE

Omówiono zagadnienia związane ze stosowaniem środków smarnych w górnictwie w odniesieniu do określonych maszyn czy danych węzłów rozpatrywanych jako ogólny wyodrębniony system trybologiczny.

Pomimo bardzo dużej liczby badań dotychczas wykonanych na świecie oraz publikacji dotyczących jakościowego rozpoznania zużycia tarcowego, jak też jego ilościowego ujęcia, nie sformułowano jednoznacznego opisu w postaci ogólnego modelu tego niszczącego procesu trybologicznego.

Literatura

1. Hebda M., Janecki J. (1969): Tarcie, smarowanie i zużycie części maszyn. Warszawa, WNT.
2. Hellwig R. (1981): Einfluss der Oberflächenfeinstruktur auf die elasto-hydrodynamische Schmierfilmbildung in Axialzylinderrollenlagern. Universität Hannover.
3. Lawrowski Z. (1987): Technika smarowania. Warszawa, PWN, s. 12–16.
4. Miller R.W. (1993): Lubricants and their applications. New York, McGraw-Hill, Inc.
5. Skoć A., Spałek J., Markusik S. (2008): Podstawy konstrukcji maszyn, T. 2. Warszawa, WNT.
6. Spałek J. (2003): Problemy inżynierii smarowania maszyn w górnictwie. Gliwice, Wydaw. Politechniki Śląskiej, s. 42–51.
7. Szurgacz D. (2009): Smarowanie lin wyciągowych podczas ich produkcji i eksploatacji w aspekcie sprzężenia ciernego. Gliwice, Instytut Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej (niepublikowana).

Recenzent: prof. dr hab. inż. Kazimierz Stoiński