

Stanisław F. ŚCIESZKA

TRIBOLOGIA - KIERUNKI ROZWOJU I OCZEKIWANIA

Streszczenie. Wśród wielu aktualnych kierunków badań cztery wymagają najpilniejszej uwagi, są to: 1) modele prognostyczne tarcia, zużycia i zniszczenia, 2) mikroskopowe i chemiczne aspekty smarowania, 3) mechanizmy i zapobieganie zużyciu, 4) materiały i środki smarne dla wysokich temperatur.

TRIBOLOGY - FUTURE DIRECTIONS IN RESEARCH AND EXPECTATIONS

Summary. Among the many research topics four areas need immediate attention. They are: 1) predictive models for friction, wear and failure, 2) microscopic and chemical aspects of lubrication, 3) mechanisms and prevention of wear, 4) materials and lubricants for high temperature applications.

TRIBOLOGIE - ENTWICKLUNGSRICHTUNGEN UND ERWARTUNGEN

Zusammenfassung. Unter vielen aktuellen Forschungsrichtungen sollten folgende besonders berücksichtigt werden: Reibungs-, Verschleis - und Abnutzungs-modelle, mikroskopische und chemische Aspekte der Schmierung, Mechanismen und Verschleissvorbeugungen, Schmiermittel für hohe temperature

1. WPROWADZENIE

Niniejszy artykuł ma mieć charakter artykułu wstępnego do monotematycznego zeszytu naukowego poświęconego dorobkowi Zakładu Podstaw Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Instytutu Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej. Jest to dorobek z roku akademickiego 1992/93 głównie z dziedziny tribologii, związany z organizowaną cyklicznie konferencją naukowo-techniczną pt. "Trwałość elementów i węzłów konstrukcyjnych maszyn górniczych". Celem artykułu jest prezentacja samej dyscypliny tribologia i przedstawienie w zarysie jej głównych problemów badawczych w ujęciu szerszym niż to przedstawiają artykuły zawarte w niniejszym zeszycie, gdyż te ograniczają się głównie do problemów interesujących uczestników konferencji, czyli pracowników inżynieryjno-technicznych kopalń i zaplecza maszynowego przemysłu górnictwa węglowego.

Artykuł bazuje na wynikach dyskusji prowadzonych w Zakładzie Podstaw Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn oraz na ostatnio publikowanych pracach [1,2,3,4,5,6], w których autorzy podjęli się trudnego zadania analizy najkorzystniejszych kierunków rozwoju badań tribologicznych z punktu widzenia konserwacji energii i materiałów oraz ochrony środowiska naturalnego.

2. KIERUNKI BADAŃ W TRIBOLOGII - STAN AKTUALNY I PRZYSZŁOŚĆ

Tribologia jest tą dziedziną, której rozwój na wielu etapach był stymulowany przez problemy technologiczne w dziedzinach spokrewnionych. Na przykład potrzeba ulepszenia smarowania, poprawy trwałości i niezawodności na pewnym etapie rozwoju kolejnictwa i hydroenergetyki przyczyniła się do rozwoju koncepcji hydrodynamicznego smarowania. Potrzeby wynikające z wymagań stawianych silnikom spalinowym doprowadziły do odkrycia roli i rozwoju wielu dodatków olejowych. Specjalne wymagania postawione przez badania kosmiczne doprowadziły do licznych zastosowań nowych smarów stałych. Potrzeba podwyższenia trwałości narzędzi stosowanych w obróbce skrawaniem zaowocowała rozwojem różnych technik nakładania warstw odpornych na zużycie itd.

Podobnie obecnie dla wyznaczenia przyszłych, najkorzystniejszych kierunków badań tribologicznych, musimy odpowiedzieć sobie na pytanie: Jakie systemy technologiczne są blokowane w ich dalszym rozwoju i które z nich mogą być ulepszone dzięki tribologii? Analiza trendów rozwoju najważniejszych konstrukcji wykazuje, że adiabatyczne silniki spalinowe, systemy zapisu i odczytu informacji na dyskach magnetycznych, inżynieria biomedyczna i robotyka to te dziedziny, w których tribologia powinna odgrywać ważną, stymulującą jej dalszy rozwój rolę.

W celu dokonania bardziej dokładnej prezentacji i identyfikacji najważniejszych kierunków badań w tribologii podzielono jej tematykę na bloki pod hasłami: istota tarcia, mechanizmy i procesy zużyciowe, chemia smarowania, modelowanie procesów tribologicznych, modelowanie tribosystemów oraz tribomateriały, środki smarne i diagnostyka.

2.1. Istota tarcia

Tarcie jest centralnym zagadnieniem w tribologii. Choć dotychczasowe badania dostarczyły i zdefiniowały wiele pojęć, takich jak: rzeczywista powierzchnia styku, adhezja i bruzdowanie, to do chwili obecnej nie ma ogólnie akceptowanej teorii tarcia. Główny problem polega na tym, że tarcie zależy od wielu procesów zachodzących

równocześnie w obszarze styku. Najważniejsze problemy, które muszą być podjęte przy rozwiązywaniu zagadnień tarcia, to:

- wyznaczenie rzeczywistej powierzchni styku,
- generowanie ciepła i jego wpływ na tarcie [7],
- rodzaje dyssypacji energii,
- adhezja i tworzenie się połączeń tarciovych,
- względny udział adhezji i bruzdowania w procesie tarcia,
- struktura i orientacja warstw adsorpcyjnych.

Jak z tego niepełnego zestawienia wynika, pojęcie rzeczywistej powierzchni styku, będącej sumą styków elementarnych, jest pierwszoplanowe, gdyż większość oddziaływań międzypowierzchniowych, takich jak: generowanie ciepła tarcia, adhezja, skrawanie, bruzdowanie występuje na powierzchni styku dwóch ciał. Stąd wynika duże zainteresowanie teoretycznymi metodami analizy topografii powierzchni i przewidywanie rzeczywistej powierzchni styku. Jednakże do tej pory nie ma niezawodnej metody eksperymentalnej dla wyznaczenia rzeczywistej powierzchni styku między dwoma ciałami stałymi, czyli istnieje potrzeba stworzenia takiej metody.

Ciała stałe poddawane oddziaływaniom tribologicznym charakteryzują się istnieniem warstw wierzchnich o skomplikowanej strukturze i składzie chemicznym, których zewnętrzne powłoki kształtowane są w wyniku tribotechnicznych reakcji między powierzchnią a otoczeniem oraz wzajemnym przenoszeniem materii między dwoma ciałami stałymi. Ponieważ tarcia i zużyciu towarzyszy tworzenie i usuwanie tych warstw, w kompleksowych badaniach musi być uwzględniony szereg związanych z tym problemów, takich jak:

- tribochemia warstw wierzchnich,
- rola struktury i składu powierzchni,
- fizyczne i chemiczne własności warstw powierzchniowych,
- tworzenie i usuwanie warstw powierzchniowych,
- rola produktów zużycia.

Uważa się, że reakcje tribochemiczne mają znacznie szybszy przebieg w obszarze styku dynamicznego i w chwilach jego występowania niż w sytuacjach statycznych. Mechanizm tego przyspieszenia nie jest do końca poznany, chociaż wykazano wpływ takich czynników, jak: plastyczne odkształcenia, wzrost temperatury, tworzenie nowej powierzchni w wyniku zużycia. Istota tribochemicznych reakcji i kinetyka tworzenia warstw powierzchniowych powinny być poznane szczególnie w tych sytuacjach, w których warstwy te decydują o wartości współczynnika tarcia i intensywności zużycia.

Ponieważ tarcie ma miejsce w obszarze rzeczywistej powierzchni styku, obecność tzw. "ciała trzeciego" [3] w postaci produktów zużycia naniesionych lub luźnych ma

wpływ na wartość współczynnika tarcia. Świadomość tego faktu jest zjawiskiem stosunkowo nowym i jest wynikiem ewolucji od "tribologii objętości", w której zjawiska tarcia i zużycia analizowano w relacji do własności nominalnych (rdzenia) materiałów trących się poprzez "tribologię powierzchni", w której podkreślono znaczenie warstwy wierzchniej (różnej od rdzenia) oraz morfologii powierzchni aż do "tribologii strefy międzypowierzchniowej", która koncentruje się na wpływie tej właśnie strefy, czyli "ciała trzeciego" na procesy tribologiczne. Pojęcie "ciała trzeciego" lub międzypowierzchni przybliża do siebie wydawałoby się odległe zjawiska, takie jak: tarcie płynne i tarcie suche oraz potwierdza różnicę między kinetyką zużycia i kinetyką generowania nowych luźnych produktów zużycia.

2.2. Mechanizmy i procesy zużycia

W ostatnich latach wiele mechanizmów zużycia zostało zidentyfikowanych, takich jak: adhezyjne, ściernie, delaminacyjne, zmęczeniowe i korozyjne. Większość tych procesów została udokumentowana obszernymi wynikami z badań laboratoryjnych. Niestety, zakres występowania każdego z tych mechanizmów nie został do końca określony. Zużycie w większości zastosowań tribologicznych jest rezultatem więcej niż jednego mechanizmu. To komplikuje identyfikację mechanizmów zużycia i wybór środków dla ich zwalczania. Tak więc wskazane jest identyfikowanie i klasyfikowanie mechanizmów zużycia we wszystkich ważnych tribologicznych zastosowaniach.

Specjalną uwagę powinno się zwrócić na stany przejściowe w procesach zużycia, gdyż one poprzez zmianę intensywności procesów decydują niejednokrotnie o trwałości systemu.

Najistotniejsze zagadnienia badawcze dotyczące zużycia to:

- zakresy występowania poszczególnych mechanizmów zużycia,
- mechanizmy zużycia w tribosystemach i ich odniesienie do mechanizmów podstawowych,
- przyczyny i mechanizmy występowania stanów przejściowych zużycia,
- wpływ mikrostruktury i chemicznych własności materiałów na zużycie,
- wpływy cieplne i środowiskowe,
- synergia między korozją i zużyciem ściernym,
- oddziaływanie produktów zużycia na proces zużycia.

Prawdopodobnie najlepszą metodą klasyfikacji mechanizmów zużycia jest tworzenie tzw. "mapy zużycia". Mapy zużycia powinny zawierać zakres warunków

operacyjnych dla każdego mechanizmu zużycia (takich jak: obciążenie, temperatura, prędkość itd.) oraz intensywność zużycia w postaci np. współczynnika zużycia. Mapy zużycia powinny zostać opracowane dla różnych materiałów konstrukcyjnych i wprowadzone do skomputeryzowanej bazy danych. Mapy zużycia powinny być także opracowane dla konkretnych tribologicznych zastosowań, pokazując możliwe mechanizmy zużycia wraz z zakresami ich występowania. Na przykład mapa zużycia dla układu krzywka-popychacz w silniku spalinowym zawierać powinna mechanizmy zużycia, wpływ zmiennych operacyjnych, wpływ środka smarnego, w tym jego składu chemicznego oraz wpływ kombinacji materiałów.

Proces zużycia zależy od wielu czynników, np. od składu chemicznego, struktury i własności fizycznych i chemicznych powierzchni ciał znajdujących się w styku tribologicznym. Dlatego ważne jest dokonanie pełnej charakterystyki powierzchni i stwierdzenie, skąd pochodzą produkty zużycia. Specjalną uwagę należy zwrócić na termiczne i te środowiskowe czynniki, które kształtują warstwę wierzchnią. Ważny jest udział produktów zużycia w procesie zużycia, ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska wzajemnego przenoszenia oraz oddziaływań ściernych luźnych produktów zużycia.

W ostatnim okresie coraz większą uwagę zwraca się na te systemy tribologiczne, w których zużycie jest bardzo małe i zachodzi w mikroskopowej skali, jak np. w węzłach smarowanych hydrodynamicznie lub w układach magnetycznego zapisu informacji. Mikroskopowy poziom ww. zjawisk nie zmniejsza skali problemu, ich ważności i globalnych strat związanych z tymi zjawiskami.

2.3. Chemia smarowania

Oleje składają się z oleju bazowego oraz różnych dodatków kontrolujących odpowiednie charakterystyki użytkowe tych środków smarnych. * Stopień skomplikowania chemicznych oddziaływań w smarowym węzle ciernym dobrze reprezentują problemy badawcze aktualnie opracowywane, jak np.:

- stan fizyczny dodatków w roztworze i na powierzchni,
- wzajemne reakcje między dodatkami w roztworze i na powierzchni,
- rola składników środków smarnych w procesie zużycia,
- mechanizmy wzajemnego oddziaływania między środkiem smarnym i metalami,
- kinetyka utleniania i cieplnej degradacji środków smarnych,
- wpływ utleniania środka smarnego na tarcie i zużycie,

- mechanizm przerwania filmu olejowego,
- mechanizm tarcia granicznego w wysokich temperaturach,
- wpływ temperatury i środowiska,
- wzajemne reakcje między środkiem smarnym i powierzchnią ceramiczną.

Środki smarne są w dalszym ciągu komponowane na podstawie wiedzy o reakcjach między węglowodorami i powierzchniami metali (przeważnie stopów żelaza). Tymczasem ewolucja w technice smarowniczej w kierunku wysokotemperaturowych zastosowań i adaptacji materiałów ceramicznych wymaga położenia większego nacisku na opracowanie nowych wysokotemperaturowych środków smarnych i na rozpoznanie oddziaływania między składnikami smarów i powierzchniami ceramicznymi.

2.4. Modelowanie procesów tribologicznych

Dokonany został bardzo istotny postęp w modelowaniu filmu smarującego hydrodynamicznego, elasto-hydrodynamicznego i filmu gazowego. Natomiast nie udało się stworzyć ogólnego modelu tarcia, zużycia i smarowania granicznego. Główną przyczyną braku modeli prognostycznych jest stopień skomplikowania wzajemnych oddziaływań w obszarze styku trących się ciał, wymagający podejścia interdyscyplinarnego.

Modele, o których mowa, powinny bazować na znanych prawach fizyki i chemii i powinny umożliwiać: optymalizację konstrukcji węzłów tribologicznych, najkorzystniejszy dobór materiałów, prognozowanie współczynnika tarcia, intensywności zużycia oraz czasu życia elementów systemu tribologicznego.

Możliwe są dwa podejścia do problemu budowania modeli. Jedno podejście opiera się na bazie danych empirycznych, czyli na znuдным opisie charakterystyk tribologicznych powierzchni, gromadzenia danych z laboratoryjnych badań tribologicznych, korelowania tych danych z badaniami eksploatacyjnymi i ostatecznie na budowaniu modeli. Drugie podejście polega na generowaniu modeli na podstawie znanych praw fizyki, na ich weryfikacji poprzez gromadzenie danych, a następnie na modyfikacji tak, aby wystąpiła zgodność z eksperymentami.

Sukces osiągnięty w modelowaniu tarcia płynnego wynika z faktu, że można było w tych modelach pominąć molekularne oddziaływania między środkiem smarnym a powierzchniami. W kontraście do tego każdy użyteczny model tarcia suchego, zużycia lub tarcia granicznego musi uwzględniać fizyczne i chemiczne procesy zachodzące w

strefie styku. Dodatkowo włączone muszą być do ww. modeli kinetyka i mechanizm tworzenia i niszczenia warstw powierzchniowych. Taki model można stworzyć tylko przy dobrze zaplanowanych i skoordynowanych badaniach interdyscyplinarnych.

2.5. Modelowanie tribosystemów

Modelowanie zagadnień smarowania płynnego osiągnęło taki poziom, że za pomocą ww. modeli można konstruować elementy i systemy tribologiczne. Tym niemniej ciągle istnieją potrzeby dalszego doskonalenia wypracowanych już modeli. Modele tarcia płynnego powinny zostać rozszerzone o wpływ chropowatości oraz powinny umożliwiać przewidywania sił i naprężeń stycznych w styku skoncentrowanym. Istniejące modele należałoby także rozszerzyć o ciecze nienewtonowskie, ocenę wpływu ciał stałych obcych, zanieczyszczeń oraz produktów zużycia na działanie i trwałość systemów tribologicznych.

2.6. Tribomateriały i środki smarne

Ogólnie oczekuje się dalszego wzrostu sprawności mechanicznej, trwałości i niezawodności systemów mechanicznych. Można to osiągnąć poprzez prowadzenie badań nad nowymi odpornymi na zużycie materiałami oraz nad środkami smarnymi odpornymi na coraz wyższe temperatury itd. Materiały ceramiczne, powłoki kompozytowe, nowe technologie modyfikacji powierzchni wydają się obecnie najbardziej obiecującymi kierunkami rozwoju dla osiągnięcia ww. celu.

Należy się spodziewać wzrostu zastosowań smarów stałych jako wysoko-temperaturowego środka smarnego lub jako dodatku do materiałów łożyskowych wysokotemperaturowych. Do tego celu będą potrzebne nowe smary stałe zdolne do pracy w szerszym zakresie temperatur i zapewniające dłuższy czas życia elementów trących.

2.7. Nowe techniki eksperymentalne i diagnostyczne

Złożoność fizycznych i chemicznych oddziaływań w eksperymentach tribologicznych wymaga wprowadzania nowych technik pomiarowych i diagnostycznych. Wadą większości metod badawczych służących do identyfikacji zjawisk tribologicznych jest to, że dotyczą one sytuacji "post mortem" i nie analizują zjawisk w chwili ich zachodzenia. Należy w związku z tym rozwijać metody "in-situ", pozwalające na analizę istoty zjawisk fizycznych i chemicznych oraz ich następstwo w czasie rzeczywistym.

Metody in-situ o ww. charakterze powinny także być rozwijane dla potrzeb diagnostyki, a w szczególności dla monitoringu on-line systemów tribologicznych w celu osiągnięcia efektywnego i dokładnego prognozowania uszkodzeń.

3. TRIBOLOGIA JAKO SPOSÓB NA OSZCZĘDZANIE ENERGII

Raporty wykonane na zlecenie rządów kilku krajów wykazały, że można zaoszczędzić znaczącą część dochodu narodowego, która obecnie jest bezpowrotnie tracona w wyniku niepożądanego tarcia i zużycia na różnych etapach działalności gospodarczej. Dla USA cytowana kwota wynosi rocznie około 16,25 miliarda USD [1], dla Wielkiej Brytanii około 2,5 miliarda USD, a dla Polski orientacyjnie około 1 miliarda USD.

Wymienione raporty podkreślają, że kwoty te można zaoszczędzić bez dodatkowych badań i nakładów, stosując znaną już wiedzę tribologiczną, poprzez:

- a) obniżenie zapotrzebowania na energię dzięki redukcji tarcia,
- b) obniżenie zapotrzebowania na służby związane z obsługą i konserwacją dzięki lepszemu smarowaniu,
- c) obniżenie konsumpcji środków smarnych,
- d) obniżenie kosztów wymiany części,
- e) obniżenie kosztów w wyniku skrócenia przerw produkcyjnych,
- f) obniżenie kosztów inwestycyjnych dzięki wyższej wydajności,
- g) obniżenie kosztów inwestycyjnych dzięki wyższej trwałości parku maszynowego.

Badania wykazały, że trzy główne sektory gospodarki: transport, elektrownie oraz przemysł przetwórczy zużywa około 80% całkowitej energii. Około połowa tej energii zostaje utracona już na etapie przetwarzania energii, np. w wyniku określonego poziomu sprawności systemów spalania paliw, w wyniku strat tarcia i strat wolumetrycznych i cieplnych na uszczelnieniach.

Możliwości ograniczenia strat w wyniku zmian tribologicznych można podzielić na:

- po pierwsze te, które są wynikiem obniżenia strat na tarcie np. w łożyskach turbiny 500 MW przyjmuje się straty na tarcie rzędu 4-5 MW. Realnie możliwe obniżenie tych strat o 0,5-1 MW może dać pokaźne oszczędności w skali roku,
- po drugie te, które są wynikiem wydłużenia czasu życia elementów i obniżenia częstotliwości ich wymiany. Dotyczy to w szczególności tych elementów, których zadaniem jest utrzymanie wysokiego tarcia, np. opony, hamulce, sprzęgła, paski klinowe itd.,
- po trzecie te, które są wynikiem zaoszczędzenia materiałów niezbędnych do produkcji części zamiennych. W Wielkiej Brytanii np. każdego roku złomowanych jest 0,25 miliona pojazdów drogowych o łącznej masie 250.000 ton.

Istnieją takie obszary zastosowań osiągnięć tribologicznych, w których oprócz zmniejszenia strat uzyskuje się pozytywne efekty ekologiczne. Łożysko gazowe na przykład pozwala na pracę maszyny bez uciążliwej konieczności wymiany oleju i jego biodegradacji, a jednocześnie zwiększa ogólną sprawność układu. To z kolei pozwala na zaoszczędzenie pierwotnego źródła energii i innych surowców mineralnych.

4. PODSUMOWANIE

Tribologia jest ważną dziedziną nauki i technologii, gdyż jest synonimem takich pojęć, jak: niezawodność, trwałość oraz energooszczędność. Pomimo to stosunkowo mało uwagi poświęca się problemom tribologicznym tak w pracach badawczych, jak również w programach nauczania szkół wyższych.

Tribologia jest prawdziwie interdyscyplinarną dziedziną obejmującą takie tradycyjne dyscypliny, jak: mechanika płynów, mechanika ciała stałego, inżynieria materiałowa, chemia, fizyka i matematyka. W związku z tym stopniem skomplikowania problemów badawczych wymagana jest praca zespołowa przy ich rozwiązywaniu w grupach o różnych specjalnościach.

LITERATURA

- [1] Jost H.P., Schofield J.: Energy saving through tribology: A techno-economic study, Proc. Instn. Mech. Engrs. 1981, vol.195, s.151-173
- [2] Jahanmir S.: Future directions in tribology research. Journal of Tribology, ASME, 1987, vol.109, s.207-214
- [3] Godet M.: Third -bodies in tribology, Wear, 1990, vol.136, s.29-45
- [4] Pinkus O., Wilcock D.F.: The role of tribology in energy conservation, Lubrication Engineering, 1978, vol.34, nr 11, s.599-610
- [5] Hays D.F.: Research in mechanical systems: Tribology, Journal of Tribology, ASME, 1984, vol.106, s.14-23
- [6] Halling J.: Tribology in manufacturing engineering, Proc. Instn. Mech. Engrs. 1978, vol.192, s.189-196
- [7] Reich K.: Temperatury chwilowe styku pary cierne w ujęciu probabilistycznym, Prace N-B ZKMPW, Zeszyt Nr 83, „Śląsk”, Katowice 1973

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Karol REICH

Wpłynęło do Redakcji w lipcu 1994 r.

Abstract

Tribology is synonymous with reliability, long life, and energy savings. In spite of its importance, tribology research has not received sufficient stable support in the past. Tribology is truly interdisciplinary and involves such traditional disciplines as fluid mechanics, solid mechanics, materials science, chemistry, physics, and mathematics. Many research issues in tribology are complex and require interdisciplinary team approaches.

The establishment of models for the design and failure prediction of tribological components and systems is current priority in research. There has always been a great need for the technology required for the development of wear resistant materials and coatings. Currently, there is a special need for lubricants and materials for high temperature applications.