

Stanisław F. ŚCIESZKA

## TRIBOTECHNIKA-WSPÓLCZESNE MOŻLIWOŚCI POPRAWY SPRAWNOŚCI I TRWAŁOŚCI MASZYN

**Streszczenie.** Dokonano przeglądu strat energii w wyniku tarcia i zużycia. Przedstawiono uznawany współcześnie model systemu tribologicznego oraz najistotniejsze kierunki dalszego rozwoju tribotechniki. Przeanalizowano najważniejsze wymagania tribotechniczne dla nieorganicznych i organicznych materiałów konstrukcyjnych.

## TRIBOTECHNOLOGY - RECENT TRENDS IN MACHINERY DURABILITY AND EFFICIENCY IMPROVEMENTS

**Summary.** Energy losses by friction and wear of tribological contacts were reviewed. The state of the art in the field of tribology including a model of tribological system and future tendencies of the development were demonstrated using some selected examples. For anorganic and organic materials the requirements for tribotechnology application are analyzed.

## ТРИБОТЕХНИКА-СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ КПД И ПРОЧНОСТИ МАШИН

**Резюме.** Представлен обзор потерь энергии в результате трения и износа. Представлена актуальная модель трибологической системы и наиболее серьезные направления дальнейшего развития триботехники. Выполнен анализ наиболее важных триботехнических требований для неорганических и органических конструкционных материалов.

### 1. WPROWADZENIE

Straty energii na skutek tarcia i zużycia w węzłach tribologicznych są w skali całego kraju ogromne i można je oszacować na 2,2÷4,5% ogólnych strat energii. W skali całej gospodarki tylko 43,9% dostarczanej do odbiorców energii jest przetwarzana na pracę użyteczną (tabl.1), przy czym największe straty są w sektorze transportu, równe 84,5% .

Tablica 1

Struktura i dystrybucja energii pomiędzy jej największymi konsumentami [1]

Ogólna konsumpcja energii	
Część użyteczna	= 43,9%
Straty	56,1%
A. Sektor transportu	= 22,3%
Część użyteczna	= 15,5%
Straty	= 84,5%
B. Przemysł	= 34,5%
Część użyteczna	= 54,8%
Straty	= 45,2%
C. Gospodarstwa domowe	= 26,4%
Część użyteczna	= 53,8%
Straty	= 46,2%
D. Reszta	= 16,9%
Część użyteczna	= 40,6%
Straty	= 59,4%

Tablica 1 zawiera przegląd strat typowych dla kraju uprzemysłowionego na przykładzie RFN [1], w którym straty tylko w smarowanych węzłach kinematycznych na skutek tarcia i zużycia wynoszą od 32 do 40 miliardów DM, z czego 16÷20% strat może być zaoszczędzone przez właściwe zastosowanie istniejącej obecnie technologii bazującej na wiedzy o zjawiskach tribologicznych.

## 2. PODSTAWY TRIBOLOGII

Podstawowym celem tribologii jest optymalizacja procesów tribologicznych. Główne funkcje tribotechnicznych systemów przedstawia tablica 2.

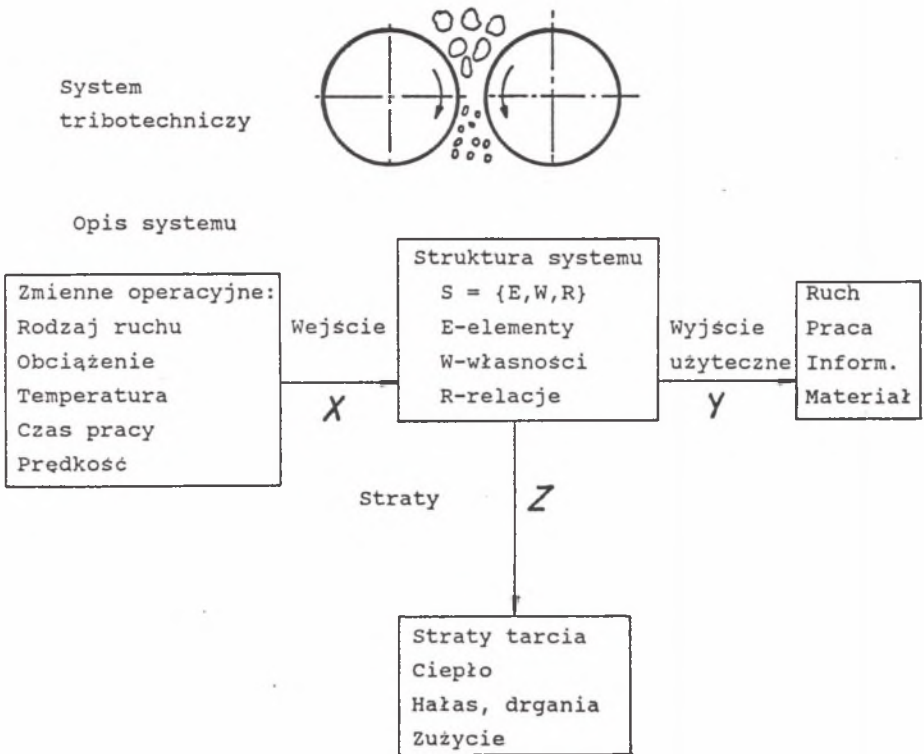
Tablica 2

Podział głównych systemów tribotechnicznych i przypadające im funkcje

Tribotechniczne funkcje	Tribotechniczne systemy
1. Ograniczenie stopni swobody	Łożyska, prowadnice, wrzeciona
2. Kontrola ruchu	Hamulce, amortyzatory
3. Przekazywanie energii mechanicznej	Przekładnie mechaniczne
4. Transport materii	Rurociągi, przenośniki, zsypanie
5. Uszczelnienia	Pierścienie uszczelniające, uszczelki
6. Obróbka i przeróbka materiałów	Szlifierki, młyny, kruszarki, strugi węglowe

Prawidłowa praca i trwałość systemu tribologicznego (styku tribologicznego) zależy z jednej strony od własności elementów systemu (np. materiałów, środka smarnego, środowiska) a z drugiej strony od warunków pracy systemu (rys.1).

Straty ( $Z$ ) w danym systemie tribologicznym (rys.1) można uważać za wynik działania czynników wejścia opisanych przez zmienne operacyjne ( $X$ ) na strukturę systemu  $S = (E, W, R)$ . Tę zależność można zapisać:  $Z = f(X, S)$ .



Rys. 1. Opis tribotechnicznego systemu  
Fig. 1. Tribotechnological system

Z tego wynika, że rozwiązanie praktycznych problemów musi być oparte na:

- a) analizie parametrów operacyjnych (X)
- rodzaj ruchu względnego (ślizgowy, toczny, udarowy itd.),
  - charakter ruchu (ciągły, przerywany, posuwisto-zwrotny, itd.),
  - obciążenie strefy styku  $F$ ,
  - prędkość względna  $v$ ,
  - temperatura  $T$ ,
  - czas trwania procesu  $t$ ,
  - droga  $s$ ,
  - zakłócenia (np. drgania itp.)

b) analizie struktury systemu  $S = (E, W, R)$ 

E - Elementy systemu to najczęściej dwa ciała współpracujące, tzw. ciało trzecie w postaci środka smarnego, zanieczyszczeń i produktów zużycia oraz jako element czwarty - środowisko, np. powietrze, para wodna itp., jeżeli system jest otwarty.

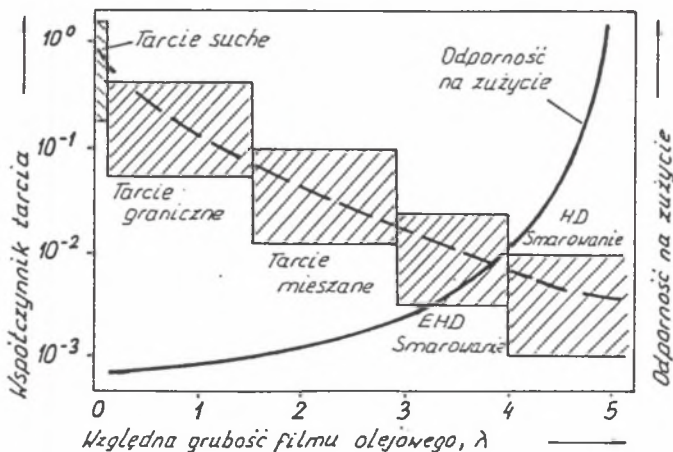
W - Własności elementów systemu obejmują:

- rodzaj materiału,
- geometrię i objętość,
- własności objętościowe materiałów, np. skład chemiczny strukturę, moduł, lepkość, gęstość itd.
- własności powierzchniowe, np. chropowatość, strukturę powierzchni, strukturę warstwy wierzchniej.

R - Relacje między elementami charakteryzuje między innymi:

- rodzaj styku, np. styk hertzowski,
- mechanizm tarcia,
- rodzaj smarowania,
- mechanizm zużycia, np. ścierny, adhezyjny, zmęczeniowy powierzchniowy.

Przykładem zależności typu  $Z = f(X, S)$  jest graficzna ilustracja (rys.2) tego jak wraz ze względną grubością filmu olejowego  $\lambda$  zmieniają się warunki tarcia i zużycia.



Rys. 2. Współczynnik tarcia i odporność na zużycie dla styku toczno-ślizgowego w funkcji względnej grubości filmu olejowego,  $\lambda$

Fig. 2. Coefficient of friction and wear resistance in rolling-sliding contact as function of the specific thickness of a lubricant film,  $\lambda$

Grubość filmu olejowego uzależniona jest od czynników opisujących strukturę systemu,  $S$ , np. lepkość oleju, rodzaj styku oraz od parametrów operacyjnych,  $X$ , np. rodzaj ruchu, prędkość względna, obciążenie styku itd.

Optymalizacja procesów tribologicznych może iść w trzech kierunkach:

1. Całkowita eliminacja styku (systemu) tribologicznego. To niemożliwe w wielu praktycznych sytuacjach rozwiązanie udało się zrealizować zamieniając zegarki mechaniczne zegarkami elektronicznymi z ciekło-krystalicznymi tarczami.
2. Zmiana rozkładu naprężeń w styku tribologicznym bez zmiany realizowanej funkcji, jak np. zamiana tarcia ślizgowego na tarcie toczne.
3. Zmiana struktury systemu tribotechnicznego poprzez konstrukcyjne zmiany elementów, uwzględniające własności środka smarnego lub poprzez zmianę środka smarnego wg kryterium optymalnego tarcia i zużycia albo poprzez optymalizację materiałów na warstwy wierzchnie elementów systemu.

W przypadku tarcia granicznego i mieszanego optymalizacji muszą łącznie podlegać materiały elementów trących oraz środek smary.

### 3. GŁÓWNE KIERUNKI BADAŃ I ROZWOJU W TRIBOTECHNICE

Wyznaczone cele technologiczne, związane z optymalizacją procesów tarcia, zużycia i smarowania oraz istniejąca już wiedza o przedmiocie badań wyznaczają dalsze jego kierunki, które można pogrupować według następujących haseł:

#### A Tarcie:

1. Eksperymentalne wyznaczenie rzeczywistej powierzchni styku,
2. Generowanie ciepła i jego wpływ na tarcie,
3. Sposoby dyssypacji ciepła,
4. Międzypowierzchniowe siły adhezyjne i wzrost połączeń typu adhezyjnego,
5. Względny udział adhezji i bruzdowania,
6. Rola adsorpcji w tarcu granicznym,
7. Struktura i orientacja warstw adsorbowanych.

#### B Warstwy powierzchniowe tribologiczne:

1. Tribochemia,
2. Formowanie warstw powierzchniowych i ich niszczenie,
3. Rola struktury powierzchni i jej kompozycji,

4. Fizyczne i chemiczne własności warstw powierzchniowych,
  5. Rola produktów zużycia,
  6. Chemiczna i strukturalna charakterystyka powierzchni,
  7. Modele symulacyjne tarcia, zużycia i smarowania, obejmujące: analizę molekularną, reakcje chemiczne i mechanikę ośrodków ciągłych,
  8. Modele formowania się i niszczenia warstw powierzchniowych,
  9. Diagnostyka niszczenia warstw smarów stałych.
- C Mechanizmy i procesy zużycia:
1. Zakresy zastosowań mechanizmów zużycia,
  2. Mechanizmy zużycia w tribosystemach i ich relacja do mechanizmów podstawowych,
  3. Mechanizmy i powody zmian intensywności zużycia,
  4. Wpływ mikrostruktury materiałów i ich chemicznych własności,
  5. Wpływ środowiska i temperatury,
  6. Łączne zużycie ściernie i korozyjne (synergizm),
  7. Wpływ produktów zużycia na procesy zużycia.
- D Chemia środków smarnych:
1. Stan fizyczny dodatków w roztworze i na powierzchni,
  2. Wzajemne oddziaływanie dodatków w roztworze i na powierzchni,
  3. Rola środków smarnych w procesach zużycia,
  4. Mechanizmy oddziaływań smar - metal,
  5. Kinetyka utleniania i cieplnej degradacji,
  6. Wpływ utleniania smaru na tarcie i zużycie,
  7. Kinetyka formowania się filmu,
  8. Mechanizm przerwania i zniszczenia filmu,
  9. Mechanizm smarowania granicznego w wysokich temperaturach,
  10. Oddziaływanie cząsteczek smaru z powierzchnią ceramiczną.
- E Modelowanie tribosystemów:
1. Zależność smarowanie mieszane - chropowatość powierzchni,
  2. Wielkość oporów trakcyjnych przy smarowaniu EHD,
  3. Modele smarów nienewtonowskich,
  4. Modele przepływu ciepła dla smarowania płynami,
  5. Przerwanie filmu olejowego i dynamika przepływu,
  6. Transport cząsteczek ze strumieniem smaru,
  7. Teoria spiralnie bruzdowanych łożysk,
  8. Charakterystyka dynamiczna bezstykowych uszczelnień mechanicznych,
  9. Diagnoza uszkodzenia, awarii w tribosystemach,

10. Kryteria konstrukcyjne oparte na informacjach tribologicznych.

F Tribomateriały i środki smarne:

1. Nowe metody podniesienia odporności na zużycie,
2. Materiały odporne na zużycie,
3. Technologia modyfikacji powierzchni,
4. Kompozytowe pokrycia dla polepszenia własności użytkowych,
5. Poprawa adhezji filmów smarów stałych,
6. Reologiczne modele dla charakterystyk działania smarów stałych,
7. Mechanizm zużycia pokryć i smarów stałych,
8. Wpływ par gazów i środowiska na działanie smarów stałych,
9. Nowe dodatki smarowe,
10. Środki smarne wysokotemperaturowe.

G Badania tribologiczne:

1. Nowe metody oceny powierzchni,
2. Chemiczna analiza in-situ reakcji powierzchniowych,
3. Techniki diagnostyczne in-situ,
4. Standaryzacja metodologii i procedury badań,
5. Wymiana wyników badań między laboratoriami,
6. Korelacja wyników badań laboratoryjnych z badaniami przemysłowymi,
7. Systematyczna dokumentacja wyników badań,
8. Komputerowa baza danych tribologicznych.

#### 4. TRIBOMATERIAŁY - TENDENCJE ROZWOJU

Rola materiałów w systemach mechanicznych, w tym w tribosystemach, jest kluczowa w procesie dalszego rozwoju tych systemów w kierunku lepszego spełniania przez te systemy nowych technologicznych, społecznych i środowiskowych wymagań, jak np.:

- zwiększone osiągi i niezawodność systemów,
- zwiększona trwałość elementów,
- zwiększona sprawność i energooszczędność,
- zmniejszona masa i zwiększona sztywność,
- miniaturyzacja elementów,
- recykulacja, kompatybilność ze środowiskiem.



Zgodnie ze strukturą tribosystemów materiały można podzielić na materiały przeznaczone na elementy konstrukcyjne smarowanych i niesmarowanych węzłów tarcia oraz na środki smarne.

#### 4.1. Środki smarne

Tendencję rozwoju środków smarnych można rozpatrywać oddzielnie w czterech kategoriach: oleju bazowego, dodatków, syntetycznych środków smarnych oraz smarów stałych.

Mineralne oleje bazowe są otrzymywane z ropy naftowej w wyniku procesu rafinacji, którego dwa główne zadania to: usunięcie wszystkich składników, które nie są węglowodorami oraz separacja węglowodorów według kryterium lepkości. Proces rafinacji składa się z rafinacji rozpuszczalnika, uszlachetnienia węglowodorów, klarowania adsorbentów, odasfaltowania, odwoskowania i klarowania. W wyniku tych procesów otrzymuje się stabilny na utlenianie mineralny olej bazowy. Mimo dużych nakładów na rozwój olejów mineralnych w niektórych zastosowaniach lepsze okazały się oleje syntetyczne (tabl.3) i aktualnie około 2 do 3% rynku na środki smarne pokrywają oleje syntetyczne. Prognozy na najbliższe 10 lat przewidują wzrost udziału olejów syntetycznych do 5%.

Rozwój dodatków, niezwykle intensywny w ostatnich latach umożliwił komponowanie wysoko wyspecjalizowanych środków smarnych na bazie olejów mineralnych.

Dalsze prace badawczo-rozwojowe idą między innymi w następujących kierunkach:

- kontynuacja rozwoju dodatków typu detergent - dyspergator dla olejów silnikowych w celu osiągnięcia:
  - \* redukcji osadów,
  - \* adaptacji do wymagań stawianych przez katalizatory,
  - \* adaptacji do wymagań stawianych przez paliwa alternatywne,
- kontynuacja polepszania inhibitorów korozji i dodatków przeciwzużyciowych (EP),
- zastąpienie dodatków zawierających chlor innymi z uwagi na wymagania ochrony środowiska,
- zaostrenie wymagań związanych z ochroną zdrowia i środowiska,

- doskonalenie związków zawierających siarkę i fosfor jako przeciwzużyciowych (EP) dodatków,
- doskonalenie dodatków typu ZDTP jako dodatków wielofunkcyjnych,
- obniżenie lepkości olejów silnikowych jako element systemowego planu zwiększenia sprawności silników spalinowych.

Tablica 3

## Główne syntetyczne oleje i ich zastosowanie

Rodzaj	Zastosowanie
Syntetyczne węglowodory	
- Polialfaolefinowe	Oleje silnikowe
- Poliizobutenowe	Oleje do silników dwusuwowych
Organiczne estry	
- Diestry	Oleje turbinowe
- Poliestry	Oleje turbinowe, sprężarkowe
Poliglikole	
- Rozpuszczalne w wodzie	Płyny hamulcowe
- Nierozpuszczalne w wodzie	Oleje do przekładni ślimakowych
Inne	
- Olej silnikowy	Wysokotemperaturowe płyny hydrauliczne
- Płyn chlorowcowane	Oleje wysokotemperaturowe

Ogólnie można stwierdzić, że dodatki pozostały głównym elementem procesu formułowania nowych olejów o podwyższonych osiągnięciach eksploatacyjnych.

Rola smarów stałych jako dodatków do środków smarnych będzie się systematycznie zmniejszać. I tylko w smarach plastycznych będą używane jako czynniki polepszające własności przeciwzużyciowe. Smary stałe takie jak  $\text{MoS}_2$  i grafit będą coraz częściej używane jako powłoki smarujące nanoszone na powierzchnię.

## 4.2. Materiały na elementy niesmarowanych węzłów tarcia

Materiały, dla których współczynnik zużycia  $k$ ,  
gdzie:

$$k = \frac{\text{zużycie objętościowe}}{\text{obciążenie} \cdot \text{droga}}$$

jest niższy od  $10^{-6}$  [ $\text{mm}^3/\text{Nm}$ ] i nie zmienia się wraz ze zmianą warunków ruchowych (prędkość, temperatura), są zalecane na elementy tribosystemów. Analiza marketingowa zapotrzebowania na nowe materiały we Francji (tabl.4) wskazuje, że największy wskaźnik wzrostu będą miały następujące materiały konstrukcyjne:

- ceramiki,
- polimery (termoplastyczne, termoutwardzalne),
- kompozyty.

Tablica 4

Nowe materiały na rynku we Francji w roku 1988

Nowe materiały	Wartość mld. FF	Roczny wzrost w latach 1988-1995. [%]
Stale	365	+ 2,8
Tworzywa termoutwardzalne	123	+ 4,9
Materiały dla elektroniki	119	+ 12,0
Metale nieżelazne	107	+ 2,8
Kompozyty	99	+ 8,9
Termoplasty	90	+ 8,7
Ceramiki	60	+ 11,9
Szkła	39	+ 9,6
Ogólnie	1002	+ 6.5

Materiały stosowane w tribosystemach należą do wszystkich klasycznych grup materiałów, czyli: metali, ceramików, polimerów i kompozytów. Materiały te różnią się istotnie między sobą własnościami fizycznymi (tabl.5).

Tablica 5

## Własności metali, polimerów oraz materiałów ceramicznych

Materiał	$\delta$ kg/dm <sup>3</sup>	E GPa	R <sub>m</sub> N/mm	K <sub>c</sub> MNm <sup>-3/2</sup>	HV	$\lambda$ W/mK
Stal	7,8-7,9	210	440-930	50-214	100-900	30-60
Zeliwo	7,1-7,4	64-181	140-490	6-20	100-850	30-60
Stop Al	2,6-2,9	60-80	300-700	23-45	25-140	121-237
Tlenek Al (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3,9	210-380		3-5	1400-1900	25-35
Tlenek cyrkonowy (ZrO <sub>2</sub> )	5,6	140-210		8-10	1200	8
Azotek krzemu (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )	3,2	170		4-7	1600-1800	10-25
Węgiel krzemu (SiC)	3,2	450		4,5	2500	90-125
Poliamid (PA)	1,01-1,14	2-4	40-80	3	80-100	0,25-0,35
Poliamid (PI)	1,3	3-5	100-300			0,37-0,52
Policzterofluoro- etylen (PTFE)	2,1-2,3	0,4	15-25		12	0,25
Polietylen (PE-HD)	0,92	0,2	14-18	1-2	13	0,33-0,57

Metale charakteryzuje wysoka wytrzymałość na rozciąganie R<sub>m</sub> odporność na kruche pękanie K<sub>c</sub> oraz przewodność cieplna  $\lambda$ . Wyróżniającą się własnością materiałów ceramicznych jest wysoki moduł sprężystości E oraz twardość HV, które maleją tylko nieznacznie ze wzrostem temperatury. Negatywną cechą materiałów ceramicznych jest ich bardzo niska odporność na kruche pękanie K<sub>c</sub>. Pozytywna cecha polimerów to niska gęstość  $\delta$ , negatywną cechą jest natomiast niska odporność termiczna.

Chociaż tarcie i zużycie nie jest bezpośrednio zależne od własności objętościowych materiałów, to jak ilustruje tablica 6, własności te mogą istotnie wpłynąć na zjawiska tribologiczne.

Przewaga materiałów ceramicznych nad metalami ujawnia się w niższych siłach masowych i wyższej odporności na działania tribotechniczne. Niekorzystne cechy ceramików to wysokie naciski w styku jako rezultat wysokiego modułu sprężystości oraz wysokie temperatury na powierzchniach rzeczywistych tarcia z powodu niskiego współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$ . Niska odporność na kruche pękanie może

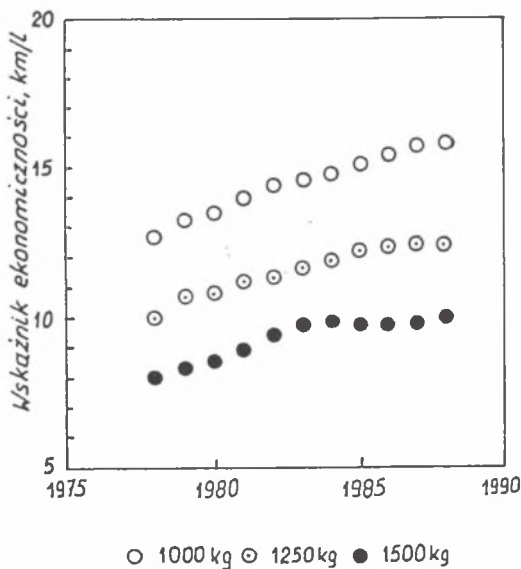
wywołać intensywne generowanie produktów zużycia w przypadku obciążenia uderowego.

Tablica 6

## Charakterystyki tribologiczne dla trzech grup materiałów

Siły masowe	$F \text{ polimer} < F \text{ ceramiki} < F \text{ metal}$
Naciski hertzowskie	$P \text{ polimer} < P \text{ metal} < P \text{ ceramiki}$
Temperatura wywołana przez tarcie	$T \text{ metal} < T \text{ polimer} < T \text{ ceramiki}$
Adhezja	$Ad \text{ polimer} < Ad \text{ metal} < Ad \text{ ceramiki}$
Zużycie ściernie	$Ab \text{ ceramiki} < Ab \text{ metal} < Ab \text{ polimer}$
Reaktywność tribochemiczna	$R \text{ polimer} < R \text{ ceramiki} < R \text{ metal}$

Materiały polimerowe mają przewagę nad metalami, gdyż charakteryzują się niską międzypowierzchniową adhezją, a co za tym idzie - niskim współczynnikiem tarcia. Jako przykład korzystnej użycia tribomateriałów mogą posłużyć osiągnięcia w dziedzinie poprawy wskaźnika ekonomiczności samochodów osobowych (rys.3).



Rys. 3. Wzrost wskaźnika ekonomiczności samochodów produkowanych w Japonii w trzech kategoriach masy samochodu

Fig. 3. Improvement of fuel economy of Japanese automobiles for three classes of gross vehicle weight

Wzrost wskaźnika osiągnięto głównie przez: zastosowanie niskolepkościowych olejów dla redukcji oporów w miejscach, gdzie występuje smarowanie hydrodynamiczne, oraz przez wprowadzenie dodatkowych modyfikatorów tarcia dla kompensacji tarcia wynikającego ze wzrostu obszarów, w których wystąpiło tarcie graniczne w rezultacie obniżenia lepkości oleju. Drugi obszar zastosowania tribotechniki to lekkie stopy na bloki cylindrowe (10% Si stop aluminium) z kompozytową częścią wzmocnioną włóknami węglowymi oraz włóknami z tlenku aluminium zamiast żeliwnych tulei cylindrowych.

Szersze zastosowanie materiałów ceramicznych (np.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , azotek krzemu) w budowie silników spalinowych umożliwi konstrukcję silników adiatatycznych, czyli eliminację układów chłodzenia a przez to obniżenie masy silnika i poprawę sprawności spalania.

## 5. WNIOSKI

Można osiągnąć istotne oszczędności w zakresie kosztów wytwarzania i eksploatacji maszyn poprzez prawidłowe zastosowanie już istniejącej wiedzy tribotechnicznej.

Wytworzenie pełnej świadomości i umiejętności myślenia kategoriami optymalnego wykorzystania tribotechniki wśród inżynierów pracujących w przemyśle wymaga stworzenia systemu kursów i seminariów podyplomowych propagujących i uzupełniających tę wiedzę.

## LITERATURA

- [1] Bartz W.J.: Tribological Relationship as Basis for the Solution of Friction and Wear Problems. Proceedings Eurotrib'93, Budapeszt 1993
- [2] Czichos H.: Tribology, Elsevier Publ. Co., Amsterdam 1978
- [3] Czichos H.: Tribology and New Materials, Proceedings Eurotrib'93, Budapeszt 1993

- [4] Kimura Y.: Recent trends of tribotechnology in Japan, Proceedings Eurotrib'93, Budapeszt 1993

Recenzent: Prof.dr hab.inż. Jan BROŚ

Wpłynęło do Redakcji w lutym 1994 r.

### **Abstract**

Energy losses by friction and wear of tribological contacts were reviewed. The target of reducing energy losses caused by friction and wear can only be realized in applying the known tribological knowledge that takes into account the relationship between friction, wear and lubrication. The state of the art in the field of tribology including a model of tribological system and future tendencies of the development were demonstrated using some selected examples. The tendencies of future development in the field of lubrications were shown for mineral base oils, synthetic oils, additives, and solid lubricants. The effective application of tribological knowledge demands relevant basic education and continuing education. The application of advanced materials in various areas of contemporary technology can lead to improvements of the function, quality and performance of engineering components and systems. An overview on newer developments of high performance materials on an anorganic and organic base is given. For these types of materials the requirements for tribo-engineering applications are analyzed. Research results on ceramics and ceramic composites as well as on polymers and polymer composites illustrate the friction and wear behaviour of these materials and their potential for tribo-engineering application.