ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1978
Seria: GÓRNICTWO z. 93 Nr kol. 590

STANISŁAW ŚCIESZKA
INSTYTUT MECHANIZACJI GÓRNICTWA
POLITECHNIKA ŚLĄSKA
GLIWICE

PRÓBA SYSTEMOWEGO UJĘCIA PROBLEMATYKI TRIBOLOGICZNEJ W URZĄDZENIACH WYCIĄGOWYCH

Przedstawiono próbę systemowego ujęcia problematyki tribologicznej na przykładzie hamulca maszyny wyciągowej. Interdyscyplinarny charakter zagadnienia prowadził do wielopłaszczyznowego ujęcia triboprocesów.

1. System tribologiczny

Złożoność procesów tribologicznych w układach mechanicznych jak również chęć zwrócenia uwagi na wszystkie aspekty towarzyszących im zjawisk, a w szczególności na wzajemne zależności między elementami biorącymi udział w tych procesach, zrodziła potrzebę zastosowania podejścia systemowego w tribologii. Takie wielkości jak współczynnik tarcia i zużycia nie są własnościami wewnętrznymi materiałów pary ciernej ale własnościami całego tribosystemu. W obiektach technicznych takich jak urządzenia wyciągowe UW złożonych z wielu węzłów kinematycznych WK ważne są relacje między tymi węzłami kinematycznymi i w tym przypadku tribosystem i ich najbliższe otoczenie traktujemy jako elementy systemu. Problem sterowania procesami tarcia i zużycia jest jednym z tych, które towarzyszą przez cały czas rozwojowi techniki i nadal pozostaje nierozwiązany. Znaczenie tego problemu we współczesnej technice ciągle narasta, rosną bowiem wymagania co do trwałości i niezawodności nowoczesnych maszyn i urządzeń pracujących w coraz ostrzejszych warunkach obciążeń i wytężenia ich węzłów kinematycznych. Upraszczając zagadnienie można powiedzieć, że trwałość i niezawodność maszyny determinowana jest trwałością i niezawodnością jej WK.

1.1. Model czarnej skrzynki

System tribologiczny np. w hamulcu, łożysku czy sprzęgle tworzą dwie oddziaływujące na siebie tribologicznie warstwy przypowierzchniowe oraz tzw. ciało trzecie /produkty zużycia, smar itd/ i otoczenie. Ogólnie struktura każdego systemu tribologicznego złożona jest z:

a/ elementów

$$E = \{ e_1, e_2 \dots e \}$$ - liczba elementów

b/ własności

$$W = \{ W_1(e_i), W(e_i) \dots W_m(e_i) \}$$ m - liczba własności e_i gdzie $i = 1 \dots n$

c/ relacji

$$R = \{ R_1(e_1 \dots e_k), \dots R_l(e_1 \dots e_k) \}$$ l - liczba relacji między k elementami, $2 \leq k \leq n$.

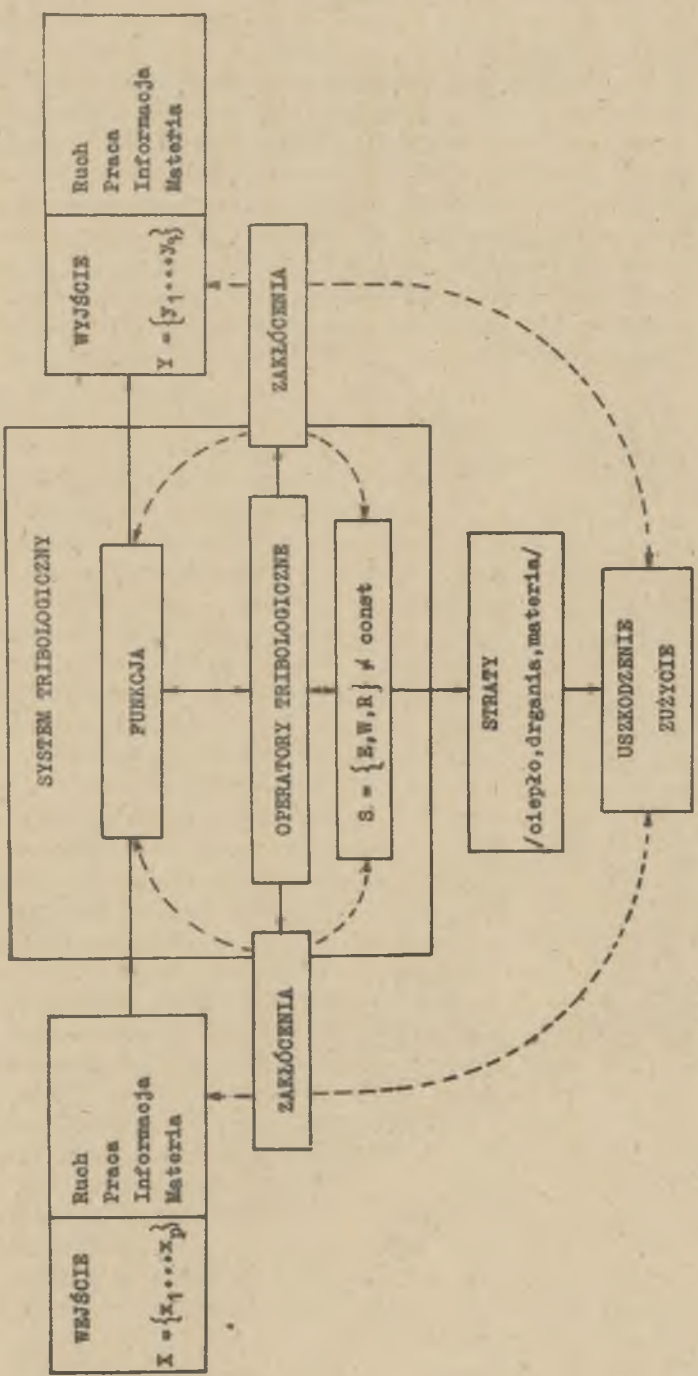
Strukturę tribosystemu można formalnie opisać zbiorem

$$S = \{ E, W, R \}$$

Wejście stanowią zmienne operacyjne transformowane w systemie na wielkości wyjścia roboczego np. o charakterze technologicznym oraz straty. Sposób w jaki wejście transformowane jest na wyjście determinuje techniczna funkcja systemu, czyli techniczna funkcja systemu może być opisana jako transformator wejścia $\{X\}$ na wyjście $\{Y\}$ poprzez odpowiednią funkcję transformacji T, rys.1 :

$$\{X\} \xrightarrow{T} \{Y\}$$

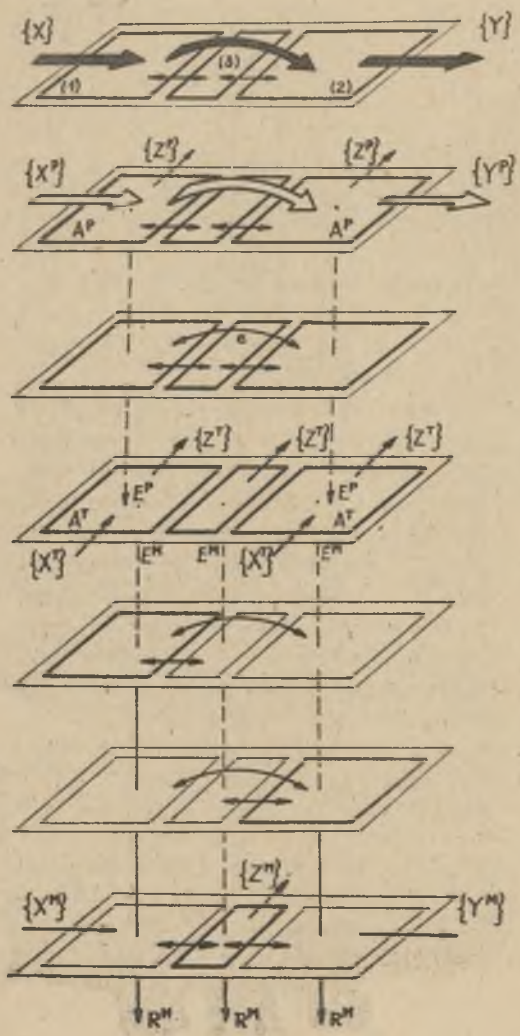
W systemach tribologicznych ST /ogólniej w systemach mechanicznych/ struktura systemów jest zmienna w czasie trwania procesów tribologicznych, a to na skutek działania tarcia i zużycia elementów, czyli zgodnie z rys.1 na skutek działania operatorów tribologicznych. Operatory tribologiczne zmieniają strukturę systemu (tzn. $S = \{E, W, R\} \neq const$) i prowadzą do wystąpienia strat. Ponadto zakłócenia funkcji systemu mogą wprowadzać niepożądane zmiany w układzie wejście - wyjście, co w konsekwencji daje "uszkodzenie" całego systemu. Proces ten jest z punktu widzenia swojej istoty stochastyczny i trudny do prognozowania [2,3,4]. Z rys.1 wynika, że w schemacie systemu tarcie /tak jak również zużycie/ muszą być traktowane jako "operatory tribologiczne" wzajemnie oddziaływujące z wejściem i wyjściem systemu, ze strukturą systemu i funkcją systemu. Wypływa stąd potwierdzenie tezy, że takie wielkości tribologiczne jak współczynnik tarcia i odporności na zużycie są specyficznymi cechami systemu a nie własnościami jego elementów.



Rys.1. Schemat ogólny systemu tribologicznego ST /model "czarnej skrzynki"/

1.2. Struktura systemu tribologicznego

Przez system tribologiczny ST w ujęciu wejściowo - wyjściowym może "przepływać" jedna lub większa ilość wielkości /praca, entropia, materia/- rys.1. "Przepływ" pracy i entropii odbywa się poprzez oddziaływanie jednego elementu ST na drugi, towarzyszy temu zmiana jednej lub większej ilości własności poszczególnych elementów. Czyli "przepływ" jest w naszym przypadku raczej wygodnym umownym założeniem, które pomaga odróżnić różne procesy występujące w ST. W konsekwencji można każdy rodzaj wielkości o określonym sensie fizycznym rozpatrywać na oddzielnej płaszczyźnie połączonej z pozostałymi płaszczyznami złączami transformującymi wielkości. Uzyskuje się w ten sposób trójwymiarowy schemat struktury systemu tribologicznego rys.2, [3].



Rys.2 Schemat wielopłaszczyznowego ujęcia triboprocesów w systemie tribologicznym złożonym z trzech elementów 1, 2, 3, gdzie: $\{X\}$ i $\{Y\}$ - wejście i wyjście na płaszczyźnie funkcji systemu; $\{X^P\}$, $\{Y^P\}$ i $\{Z^P\}$ - wejście, wyjście i straty na płaszczyźnie "przepływu" pracy; A^P - akumulacja pracy w elementach 1 i 2 systemu, E^P - praca tranformowana na energię cieplną, $\{X^T\}$ i $\{Z^T\}$ - wejście i straty energii cieplnej, E^M - energia cieplna uzyskana w wyniku reakcji chemicznych, A^T - energia cieplna zakumulowana w systemie, $\{X^M\}$, $\{Y^M\}$ i $\{Z^M\}$ - wejście, wyjście i straty na płaszczyźnie przepływu materii, R^M - produkty reakcji chemicznych, e - przepływ elektronów i tworzenie elektrostatycznej warstwy podwójnej.

Prawdopodobnie działanie wszystkich elementów systemu tribologicznego można przedstawić na płaszczyznach: funkcji, pracy, procesów termicznych i elektrostatycznych oraz zmian chemicznych i fazowych w materiałach elementów ST. Wielorodzajowe przedstawienie ST pozwala na rozpatrywanie każdej z tych płaszczyzn oddzielnie. Rys.2 prezentuje ogólny przypadek prostego systemu złożonego z dwóch ciał stałych, znajdujących się w kontakcie i we wzajemnym ruchu. Przestrzeń między tymi elementami, obejmująca powietrze lub gaz, produkty zużycia itd. jest "ciałem trzecim". Zbiór możliwych reakcji, przemian w takim systemie, nawet jeżeli jest on prosty, jest bardzo złożony i zależy nie tylko od struktury systemu ale także operatorów tribologicznych, czyli procesy te będą indywidualną własnością systemu i jego stanu. Naszym celem nie jest przedstawienie wszystkich możliwych procesów, gdyż uważamy, że taki ogólny opis byłby nie tylko zbyt obszerny i zawikłany ale także mało twórczy. Tak postawione zadanie należy rozpatrywać dla każdego przypadku zastosowania oddzielnie. Naszym celem jest raczej tylko próba dokonania klasyfikacji i ilustracji różnych rodzajów procesów występujących w węzłach tribologicznych. Na rys.2 linie pionowe ciągłe reprezentują przemiany o charakterze chemicznym, a liniom przerywanym odpowiadają przemiany pracy na entropię. Na każdej płaszczyźnie może wystąpić przechodzenie wielkości /np. masy/ między elementami, które będziemy nazywać przenoszeniem lub nanoszeniem [6]. Zmiany wewnątrz elementów na rys.2 nie zostały pokazane. W szczególnym przypadku obecności czynnika smarnego i wystąpienia smarowania hydrodynamicznego można przyjąć model "zerozużyciowy", czyli brak oddziaływania /przenoszenia/ między elementami 1 i 2 . Czynnik smarny działa natomiast jako element chłodzący na płaszczyznę procesów termicznych zmieniając entropię układu.

Na płaszczyźnie funkcji ST uwagę skupia się na problemie celu technicznego systemu czyli na tych parametrach systemu, które najbardziej bezpośrednio związane są z jego technicznym celem. Ruch elementów systemu decyduje o przekazywaniu, "przepływie": pracy /np. w przekładniach mechanicznych/, materiału /np. w pompie, rurociągu/, informacji /np. w szybowskazie/. W niektórych przypadkach celem systemu jest zmiana intensywności ruchu /np. w hamulcach/, redukcja ilości stopni swobody /np. w łożyskach, prowadnicach/ lub łącznie przepływ materiału z jego równoczesnym odkształceniem i zmianą innych własności /np. w procesie przeciągania drutu, walcowania itd/.

Jedną z funkcji ST jest przekazywanie i transformacja pracy mechanicznej. Jeden element może "przekazywać" pracę mechaniczną na inny, może to być praca mierzona iloczynem siły i drogi /lub iloczynem innych wielkości/ lub praca zakumulowana w przenoszonym materiale /np. w przepływającym medium w maszynach hydrauliki siłowej/. W systemach tribologicznych może się także dokonywać transformacja pracy mechanicznej na drgania mechaniczne, energię cieplną, energię akumulowaną w elementach systemu, energię reakcji chemicznych i przemian fazowych. Jednym z zainteresowań tribologii są badania procesów i działania ST na płaszczyźnie transformacji energii mechanicznej na energię termiczną i na energię drgań /gdzie rozchodzenie się ener-

gii jest z istoty także mechaniczne/. Niestety nie istnieją narazie proste i o ogólnym zastosowaniu analityczne zależności pozwalające na opis transformacji energii w czasie tarcia na inne jej postacie.

Procesy na płaszczyźnie termicznej ST są interesujące dla tribologii w takim stopniu, w jakim zmiany temperatury pociągają za sobą zmiany procesów tribologicznych, zmiany w procesach tarcia i zużycia, tzn. interesujące są relacje między temperaturą strefy tarcia a działaniem systemu tribologicznego. Relacje te są tym bardziej skomplikowane, im bardziej złożona jest struktura materiałowa elementów ST. Szczególnie ważne i trudne do wykrycia są wyżej wymienione relacje w hamulcach, tak że względu na kompozytowy charakter materiałów ciernych jak też występują w hamulcach wysokie temperatury powierzchni tarcia.

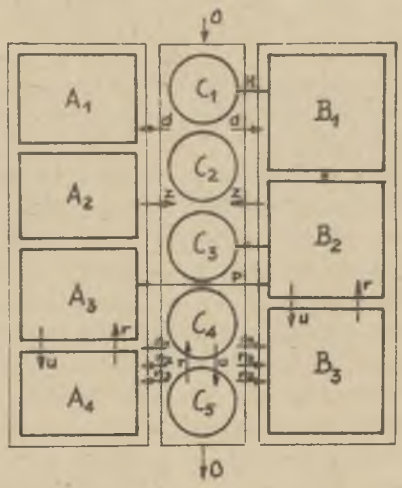
Prawie każdemu wzajemnemu przemieszczeniu dwóch ciał towarzyszy pojawienie się elektryczności statycznej. Elektrycznie naładowane elementy ST 1, 2 rys.2 oddziaływują na siebie oraz na ciało trzecie 3 /przyciągają z otoczenia zanieczyszczenia, produkty zużycia, zjonizowane gazy/. Mimo, że zjawisko elektryzacji tarciowej znane jest od najdawniejszych czasów, to do chwili obecnej nie opracowano teorii objaśniającej całościowo przyczyny wystąpienia tego zjawiska. Jest to wywołane tym, że generowanie ładunków elektrycznych spowodowane jest nie jednym a wieloma różnymi, ze względu na fizyczną istotę, procesami. Elektryzacja statyczna obejmuje wszystkie procesy prowadzące do rozdziału dodatnich i ujemnych ładunków elektrycznych, w rezultacie: mechanicznych deformacji i działania fal naprężeń mechanicznych, czyli efektu akustoelektrycznego, wystąpienia różnicy potencjałów kontaktowych przy styku dwóch ciał. Do procesów tych należą także zjawiska piezoelektryczne i piroelektryczne. Bezpośredni wpływ procesów na płaszczyźnie elektrostatycznej na siłę tarcia i zużycia znalazł potwierdzenie tylko dla dielektryków, natomiast pole elektrostatyczne może dawać dodatkowe efekty np. selektywne przenoszenie między elementami ST.

Podstawowym celem wyodrębnienia płaszczyzn przemian materiałowych jest ilustracja przenoszenia masy między elementami ST, reakcji chemicznych i fazowych zmian, które są częścią procesu zużycia. Przez zużycie rozumiemy usuwanie części materiału z jednego lub większej ilości elementów do tzw. ciała trzeciego - rys.7. Każdy rodzaj reakcji chemicznych można przedstawić na oddzielnych płaszczyznach, tak więc w schemacie rys.6 reakcje chemiczne pokazane są jako transformacje między płaszczyznami.

Jako przykład przemian na płaszczyźnie materiałowej przedstawiono na rys.3 ważniejsze zjawiska w systemie tribologicznym charakterystycznym dla hamulców ciernych, w szczególności hamulców maszyn wyciągowych [6]. Dla ukazania przemian wewnątrz elementów wyodrębniono w nich dodatkowo ważniejsze składniki budowy wewnętrznej:

A - okładzina hamulca (A_1 - lepisze, A_2 - wypełniacze, A_3 - tlenki Fe, A_4 - faza α- Fe), tarcza hamulca (B_1 - cementyt Fe_3C, B_2 - faza α- Fe,

B_3 - tlenki Fe), C - ciało trzecie (C_1-płynne produkty tribo procesów, m.in. wodór, C_2 - stałe produkty zużycia, C_3 - metan CH_4, C_4 - faza α- Fe, C_5 - tlenki Fe). W warunkach tarcia technicznie suchego można w układzie jak na rys.3 wyszczególnić następujące dominujące procesy fizyczne i przemiany: u - utlenianie, r - redukcja, d - dyfuzja /w szczególności dyfuzja wodoru H do cementytu Fe_3C i reakcja $Fe_3C + 4H \rightarrow 3Fe + CH_4$/, z - zużycie , p - przenoszenie masy pomiędzy ciałami w wyniku przerwania sczepień adhezyjnych poza granicami pierwotnego rozdziału, n_1 - nanoszenie fazy α- Fe, n_2 - nanoszenie tlenków Fe, n_3 - nanoszenie organicznych i innych składników tworzyw ciernych, o - relacje systemu z otoczeniem na płaszczyźnie materiałowej.



Rys.3. Schemat płaszczyzny materiałowej systemu tribologicznego w hamulcu, przedstawiający ważniejsze przemiany i reakcje.

Już taka uproszczona analiza potwierdza złożoność i kompleksowość procesów tribologicznych. Wykazuje także jak długa jest droga dla osiągnięcia zadawalającego opisu procesów tribologicznych, który wyraźnie uzależniałby: relacje między elementami, własności elementów ST, wartości zmiennych operacyjnych, wejście i wyjście oraz funkcję systemu.

2. Charakterystyki tribologiczne

Prawidłowe funkcjonowanie systemu tribologicznego zależy między innymi od zmiennych operacyjnych. Przy użyciu tych wielkości można opisać charakterystyki tarcia i zużycia, a przede wszystkich, co jest najważniejsze, można wyznaczyć wartości graniczne tych charakterystyk, na zewnątrz których system nie będzie funkcjonował prawidłowo. Identyfikacja własności krytycznych dla każdego elementu i dla systemu tribologicznego jako całości będzie pomocna przy dokonywaniu analizy na poszczególnych płaszczyznach systemu. Wyznaczenie relacji między własnościami krytycznymi i działaniem systemu oraz sposobu, w jakim działanie systemu wpływa na te własności, jest

z praktycznego punktu widzenia węzłowym problemem badań tribologicznych. Jak wynika z poprzednich rozważań w opisie tribo - systemu można wyróżnić cztery grupy parametrów:

1/ opis funkcji tribosystemu:
transformacja energii, materii, informacji,

2/ opis zmiennych operacyjnych:
rodzaj ruchu,
obciążenie, prędkość, temperatura,
czas i inne,

3/ opis struktury tribosystemu:
elementy,
własności elementów,
relacje między elementami,

4/ opis charakterystyk tribologicznych.

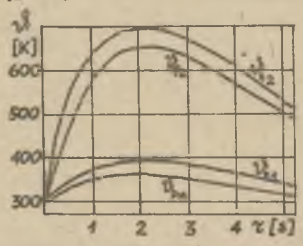
Charakterystyki tribologiczne są to celowo usystematyzowane wyniki z badań tribologicznych, które dotyczą:

- zmian struktury systemu tribologicznego wywołanych tarciem, np. zmiany chemiczne i fazowe materiałów wywołane oddziaływaniami termicznymi, w tym tworzenie nowych elementów tribosystemu, zmiany mikrogeometrii powierzchni elementów, zmiany wiodącego mechanizmu zużycia w funkcji zmiennych operacyjnych i inne,
- straty energii wywołane tarciem, np. zmiany współczynnika tarcia w funkcji zmiennych operacyjnych $\left(\mu = k\, p^{a}\, v^{b}\, k_{w}^{c}\ [4]\right)$,
- straty materiału wywołane tarciem, np. intensywność zużycia w funkcji zmiennych operacyjnych

$$\left(I_g = k\, p^{\alpha}\, v^{\beta}\, k_w^{\gamma}\ [4]\right),$$

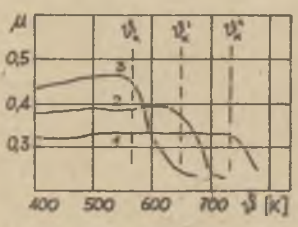
- zmian wielkości pośrednich z punktu widzenia warunków tribologicznych, np. oporność elektryczna styku, różnica potencjałów elektrostatycznych, parametry drgań i inne.

Każdy system tribologiczny cechuje się pewną specyfiką procedury wyznaczania charakterystyk tribologicznych. Np. przy identyfikacji hamulców ciernych jako jedną z najważniejszych danych przyjmuje się obciążenie cieplne elementów, które można wyliczyć lub zmierzyć, jeżeli analizowany obiekt lub jego model fizyczny już istnieje [4]. Przykład zmian temperatury elementów hamulca maszyny wyciągowej w czasie hamowania bezpieczeństwa przedstawia rys.4.

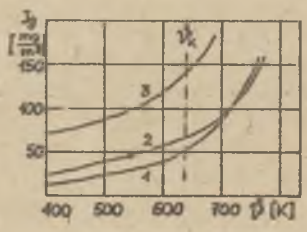


Rys.4. Przebieg zmian temperatury w czasie hamowania bezpieczeństwa dla $v_p = 20\ \frac{m}{s}$; ϑ_t - maksymalna temperatura powierzchni tarcia ϑ_p - średnia temperatura powierzchni tarcia 1,2 - dotyczą odpowiednio bieżni stalowej i tworzywa ciernego.

Krytyczne obciążenie termiczne elementów systemu tribologicznego można wyznaczyć stosunkowo łatwo w oparciu o wyniki badań, np. współczynnika tarcia i zużycia w funkcji temperatury powierzchni tarcia, rys. 5 i 6.

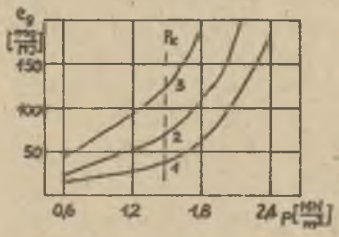


Rys.5. Wpływ temperatury powierzchni tarcia na zmianę współczynnika tarcia trzech wybranych tworzyw ciernych z zaznaczeniem temperatury krytycznej.

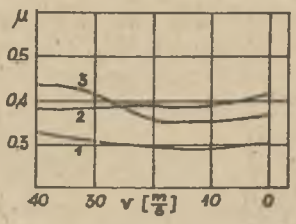


Rys.6. Wpływ temperatury powierzchni tarcia na zmianę intensywności zużycia trzech wybranych tworzyw ciernych z zaznaczeniem temperatury krytycznej.

Z rysunków tych wynika, że temperatura powierzchni tarcia w analizowanym systemie tribologicznym nie powinna przekraczać wartości krytycznej tak ze względu na trwałość elementów jak również jego funkcję /wymagany przebieg hamowania/. Badania modelowe [4] umożliwiają uzyskanie charakterystyk tarcia i zużycia badanych par ciernych i wyznaczenie także innych wielkości krytycznych. Specyfika hamulców maszyn wyciągowych polega na tym, że znana jest maksymalna wartość prędkości oraz wymagana wartość nacisków jednostkowych dla poszczególnych par ciernych i wielkości współczynnika wzajemnego przykrycia a następnie weryfikacja charakterystyk tarcia kinetycznego par ciernych o najkorzystniejszych własnościach w poprzednich etapach badań rys. 7 i 8.

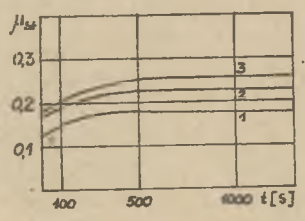


Rys.7. Zmiana efektywnej intensywności zużycia trzech wybranych tworzyw ciernych w funkcji nacisku z zaznaczeniem wartości nacisku krytycznego.



Rys.8. Przebieg wartości współczynnika tarcia kinetycznego dla trzech wybranych tworzyw z zaznaczeniem wartości oczekiwanej współczynnika tarcia.

Specyfika działania hamulca maszyny wyciągowej wymaga także zbadania charakterystyki tarcia statycznego i porównania wyników z wartościami wymaganymi rys. 9.



Rys.9. Zmiana wartości współczynnika tarcia statycznego w funkcji czasu w temperaturze otoczenia.

Charakterystyki tribologiczne obejmują także wyniki badań fizykalnych elementów systemu i opis zmian ich własności fizycznych. Znając charakterystyki tribologiczne można określić graniczne wielkości /np. zmienne operacyjne/ między prawidłowym i nieprawidłowym funkcjonowaniem systemu, między wyjściem użytecznym i stratami.

3. Podsumowanie

3.1. Dla badanego systemu potrzebne są różne poziomy jego opisu: z punktu widzenia jego zewnętrznych całościowych własności /w opisywanym przykładzie był to hamulec maszyny wyciągowej/, z punktu widzenia jego budowy wewnętrznej /system tribologiczny jako podsystem dowolnego węzła kinematycznego/ oraz z punktu widzenia pojmowania danego systemu jako podsystemu systemu ciernego /urządzenia wyciągowego/. W praktyce liczba poziomów jest zwykle większa. Tylko wielorodzajowy i wielopoziomowy opis systemów takich jak maszyny złożone z wielu węzłów kinematycznych może dać rozwiązanie problemów o charakterze interdyscyplinarnym /np. tribologicznych ciernych/ i pozwala dostrzec nawet pośrednie i odległe relacje.

3.2. Wielorodzajowość względnie wielopłaszczyznowość systemów tribologicznych wynika z interdyscyplinarnego zakresu zainteresowań tribologii. Na poszczególnych płaszczyznach analizy dominować będą różne dyscypliny wiedzy. Na płaszczyźnie pracy - mechanika, termicznej - mechanika i termodynamika, elektrostatycznej - fizyka, materiałowej - fizyka, inżynieria materiałowa, chemia. Mając na uwadze tę złożoność procesów tribologicznych wydaje się, że podejście systemowe prowadzi do najlepszej koncepcji metody rozwiązania problemów integrującej zakresy zainteresowań różnych dziedzin naukowych.

3.3. Tribologiczny system może być przedstawiony ogólnie jako operacyjny, otwarty, dysypacyjny i dynamiczny. Charakterystyczne jest, że "tribo-

logiczne operatory - tarcie i zużycie" mogą wpływać na strukturę systemu i zakłócać relacje funkcyjne między wejściem a wyjściem. W związku z tym tarcie i zużycie należy traktować jako "specyficzne cechy systemu".

3.4. Charakterystyki tribologiczne dotyczące: zmian struktury systemu tribologicznego, strat energii i strat materiału wywołanych tarciem są podstawą do określenia granicznych wielkości /np. zmiennych operacyjnych/ między prawidłowym i nieprawidłowym funkcjonowaniem systemu, między wyjściem użytecznym i stratami.

LITERATURA

[1] J.Czaplicki, S.Ziemba: Próba zbudowania modelu systemowo ujętej problematyki naukowo - technicznej górniczych maszyn wyciągowych. ZN Politechniki Śląskiej, Górnictwo, z.80/1977.

[2] H.Czichos: A systems analysis data sheet for friction and wear test and an autline for simulative testing. Wear, 41/1977.

[3] H.Czichos, J.Mölgaard: Towards a general theory of tribological systems. Wear, 44/1977.

[4] S.Ścieszka: Studium ważniejszych zjawisk tribologicznych w parze ciernej tworzywo hamulcowe - stal. ZN Politechniki Śląskiej, Górnictwo, z.75/1976.

ИСПЫТАНИЕ СИСТЕМЫ ПОДХОДА К ПРОБЛЕМАТИКЕ ЗУБЧАТКИ В ПОДЪЕМНЫХ УСТРОЙСТВАХ.

Резюме

В статье представлено испытание системы подхода к проблематике зубчатки на примере тормоза подъёмной машины. Интердисциплинарный характер проблемы привёл к многообразному подходу к процессам зубчатки.

AN ATTEMPT OF SYSTEM APPROACH TO THE PROBLEMS OF TRIBOLOGY IN WINDERS

Summary

An attempt of system approach to the problems of tribology has been presented here through the example of hoist. The complexity of problems has resulted in many - sided approach to processes of tribology.