

STANISŁAW SCIESZKA

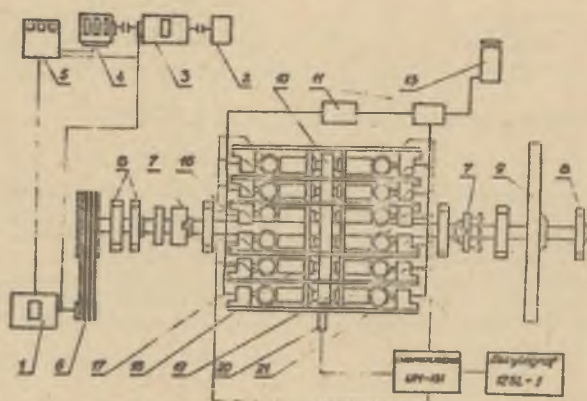
PROBLEMY TRIBOLOGICZNE W HAMULCACH MASZYN WYCIĄGOWYCH

W pracy dokonano identyfikacji słabo rozpoznanych dotychczas zjawisk na powierzchniach tarcia elementów ciernych oraz opracowano modele fizyczne i matematyczne niektórych zjawisk tribologicznych w hamulcach a w szczególności opracowano mechanizm nametalizowania się hamulcowych tworzyw ciernych przy współpracy ze stalą i zdefiniowano warunki, w których to zjawisko zachodzi.

Rozwój szybowych urządzeń wyciągowych pociąga za sobą coraz większe obciążenie elementów hamulców tych maszyn i w elementach tych występują nowe jakościowo, technicznie niekorzystne zjawiska tribologiczne. Specyfika procesu hamowania we współczesnych maszynach wyciągowych polega między innymi na programowanym przebiegu siły dociskającej elementy cierne w czasie hamowania, której wartość nie zależy od efektu jej działania. Rodzi się stąd duże znaczenie stabilności tribologicznych własności tworzyw ciernych przez cały okres eksploatacji hamulca. Wzrost lub spadek intensywności hamowania w stosunku do jej wartości spodziewanej może wywołać skutki awaryjne. Z drugiej strony współczesny stan wiedzy o zjawiskach tribologicznych zachodzących w parze ciernej tworzywo niemetalowe - stal, które dominują w hamulcach maszyn wyciągowych, wykazuje szereg braków i niedociągnięć. Złożoność procesów tarcia i zużycia stanowi główną trudność zbudowania ogólnego modelu fizycznego oraz jego matematycznego zapisu. Przedstawione obecnie w literaturze zależności mają charakter hipotez będących funkcją kilku czynników uznanych za dominujące. Hipotezy tarcia np. nie uwzględniają związku między wszystkimi parametrami tarcia oraz procesami tarcia i zużycia. Szczególnie słabo wyjaśniają proces tarcia tworzyw sztucznych w skojarzeniu z metalami.

W ostatnich kilku latach wykonano szereg prac, które pozwalają prognozować własności cierno-zużyciowe materiałów przy zawężonych wartościach parametrów / np. prace Pavelescu, Orlacza, Rhee, Scieszki i innych/.

Rozwiązanie problemów technicznych o charakterze konstrukcyjnym i eksploatacyjnym związanych z dalszym rozwojem hamulców maszyn wyciągowych kreowało szereg zagadnień naukowych - tribologicznych, których rozwiązanie było możliwe tylko w systemowym ujęciu problemu. Eksperymentalna część pracy składała się z dwóch etapów. Pierwszy etap to badania cierne zakończone analizą statyczną wyników i etap drugi to badania fizykalne - uzupełniające powiązane następnie ze sobą analizą merytoryczną. Badania cierne wykonano na specjalnie do tego celu skonstruowanym stanowisku / rys. 1/, a warunki badań zapewniały, że fizyczny model eksperymentów odwzorowywał pracę hamulców tarczowych maszyn wyciągowych.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego.

Przedmiotem badań były próbki wykonane z hamulcowych tworzyw ciernych reprezentujących grupy tworzyw niemetalowych i metalowo-żywicznych. Badania przeprowadzono w warunkach stabilnej prędkości oraz dynamicznie zmiennej prędkości, co odpowiadało symulacji ikonicznej pracy hamulca tarczowego maszyny wyciągowej oraz w warunkach ruchu stick-slip. Otrzymane wyniki pomiarów współczynnika tarcia i intensywności zużycia w funkcji nacisków jednostkowych, prędkości poślizgu i współczynnika wzajemnego przykrycia wskazują na zróżnicowany wpływ ww. czynników. Każdy z czynników ma skomplikowany wpływ na zjawiska fizykochemiczne i mechaniczne w obszarze styku, na fizyczne własności warstwy wierzchniej elementów ciernych oraz na temperaturę powierzchni tarcia.

I tak np. wzrost nacisku poprzez wzrost temperatury powoduje zmianę mechanicznych własności materiałów, zwiększenie rzeczywistej powierzchni styku, zwiększenie się wydzielania produktów destrukcji tworzywa. Powoduje on także intensyfikację procesu metalizacji oraz zmianę aktywności chemicznej elementów / adsorpcji, dyfuzji/.

W zakresie zmian objętych pracą jest najistotniejszy a zarazem powtarzalny dla wszystkich tworzyw, wpływ nacisków jednostkowych na intensywność zużycia. Duży okazał się także wpływ współczynnika k_w . Stosunkowo mniejszy wpływ prędkości świadczy o występowaniu w badaniach zużycia cieplnego tworzyw / destrukcji lepiszcząca/, które zależy od czasu procesu, a nie od drogi tarcia / w badaniach przyjęto stałą drogę tarcia/.

Z analizy statystycznej wyników ilościowych z badań ciernych otrzymano funkcje korelacyjne np:

$$I_g = 285 \mu / \frac{HK}{U} /^{0,3} p^{1,4} v^{0,24} k_w^{0,7}$$

$$\mu = 0,257 / \frac{HK}{U} /^{-0,05} p^{-0,1} v^{-0,03} k_w^{-0,15}$$

gdzie:

- I_g - intensywność zużycia, $\frac{mg}{m^3}$
 μ - współczynnik tarcia,
 p - nacisk jednostkowy, $\frac{MN}{m^2}$
 v - prędkość, $\frac{m}{s}$
 k_w - współczynnik przykrycia,
 HK - twardość
 U - udarność.

Zależności te reprezentują modele matematyczne zjawisk tribologicznych w hamulcach, pozwalają one na ogólne poznanie związków między głównymi wielkościami opisującymi hamulec jako węzeł tarcia. Niektórzy autorzy / np. Tanaka/ nie stwierdzili korelacji między własnościami mechanicznymi i frykcyjnymi dla tworzyw ciernych lub też nie zalecają stosowania twardości i udarności jako wskaźników własności mechanicznych. Jednak ze względu na specyfikę mechanizmu tarcia i charakter dominujących zjawisk elementarnych w czasie zużycia ściernego takie ujęcie tej zależności jest słuszne. Proporcjonalność nieliniowa intensywności zużycia do twardości jest sprzeczna z wynikami np. Archarda, Hirsta.

Ten paradoks związany z twardością / jaki otrzymano z badań/ można wytłumaczyć tym, że duża twardość tworzywa kompozytowego, opartego na lepiszczu żywicznym, związana jest z obecnością twardych wypełniaczy, które stają się po wyjściu na powierzchnię elementami ściernymi / rys. 2/.



Rys. 2. Schematyczny model ściernego oddziaływania elementów pary tworzywo cierne - stal.

Prace z zakresu identyfikacji zjawisk tribologicznych w hamulcach maszyn wyciągowych są nieliczne. Ponieważ zachodzi jednak duże podobieństwo charakteru pracy między hamulcami ciemnymi różnych maszyn roboczych, pomimo ich oczywistej specyfiki, uwzględniono w drugim etapie badań - badań fizykalnych wyniki z wielu innych opracowań.

Nowe badania / badaczy radzieckich Georgiewskiego, Germanczuka, Ignatiowa oraz polskich Janeckiego i Brosia/ dowodzą, że na powierzchniach tarcia elementów z materiałów kompozytowych występują złożone procesy utleniania, redukcji, topnienia, odparowania, sublimacji oraz pirolizy. Wielu autorów badało także przenoszenie / namazywanie, nalepianie/ materiału bieżni metalowej na powierzchnię tworzyw ciemnych np. Wise i Lewis, Georgiewskij i Olina, Nowicki, Scieszka.

Dotychczasowe prace dały dużą ilość informacji o zjawisku przenoszenia w warunkach tarcia technicznie suchego oraz liczne próby przedstawienia jego fizycznego sensu, raczej o ograniczonym zakresie zastosowania, nie stworzyły jednak fizycznego modelu mechanizmu przenoszenia metali na hamulcowe tworzywa cierne.

Obecność cząstek materiału przeciwpróbki / najczęściej stopu żelaza/ na powierzchni tworzyw ciemnych jest zawsze niekorzystna z punktu widzenia trwałości i efektywności hamulca. Tworzeniu się jednoimiennej pary, np. stal - stal, towarzyszą: duży miejscowy wzrost temperatury, intensywne niszczenie stalowego przeciwpartnera, obniżenie współczynnika tarcia oraz iskrzenie.

Rozwiązanie istoty fizycznej tego zjawiska ma także znaczenie czysto teoretyczne, gdyż związane jest z interpretacją elementarnych procesów tribologicznych takich jak: zużycie ściernie i adhezyjne, tworzenie produktów zużycia. Jeżeli np. przyjmiemy za prawdziwy model zużycia adhezyjnego proponowany przez Bowdena, Rabinowicza, Archarda polegający na ścienianiu szczytów symetrycznych między dwoma ciałami stałymi, to objętościowy ubytek powinien być obserwowany tylko na słabym - miększym materiale, wszystkie produkty zużycia powinny być z miększego materiału, a ich wymiary powinny być rzędu wielkości pojedynczego styku. Tymczasem większość badań fizykalnych, które prowadzono na powierzchniach, tarcia, próbek oraz produktów zużycia zaprzecza powyższym przewidywaniom. Identyfikacja ujawniła szereg charakterystycznych zjawisk jak:

Po pierwsze wzajemne przenoszenie - rentgenowska analiza fazowa powierzchni przeciwpróbki stalowej ujawniła obecność na tej powierzchni razem z fazą α -Fe i Fe_3C faz FeO , Fe_3O_4 i Fe_2O_3 także ślady Cu, przeniesione z tworzywa ciernego oraz stwierdzono linie dyfrakcyjne, pochodzące od mineralno-organicznych składników tworzyw. Badania wykonane na mikroanalizatorze rentgenowskim wykazały obecność cząstek azbestu i Cu.

Na powierzchniach tworzyw ciemnych natomiast po tarcu występował wzrost ilości faz FeO , Fe_3O_4 i Fe_2O_3 oraz stwierdzono obecność fazy α -Fe. Były to selektywnie przeniesione z tarczy płytki ferrytu tworzące w niektórych przypadkach narosty zajmujące dużą część nominalnej powierzchni tarcia

próbki, w miejscach tych koncentracja pierwiastka Fe wynosiła około 99 %. Narosty te utworzone były w wyniku wielokrotnego nanoszenia, akumulowania cząstek α -Fe.

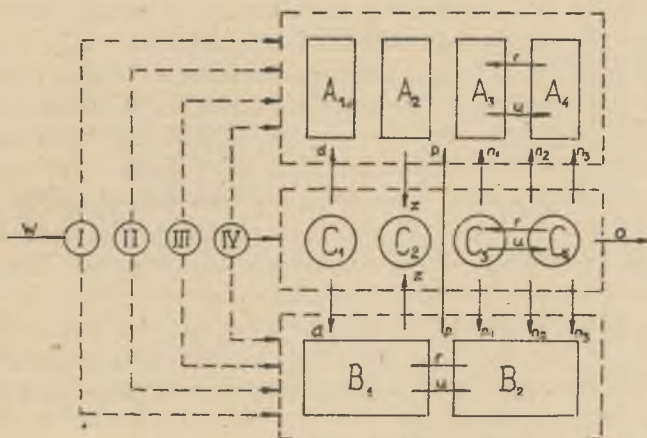
Po drugie wielkość i budowa produktów zużycia - produkty zużycia z poszczególnych prób tarcia miały bardzo zróżnicowaną wielkość i kształt. Jeżeli przyjmiemy, że wymiar liniowy pojedynczego rzeczywistego styku wynosił od 1 - 10 μm , co odpowiada szerokości pojedynczych rys i bruzd na próbkach i przeciwpróbkach, to wielkość produktów zużycia powinna być tego samego rzędu.

Rzeczywisty wymiar produktów zużycia był jednak zawarty w szerszych granicach od 0,1 μm do kilku mm o charakterystycznym kształcie płaskim lub zrolowanym. W części produktów widoczne było zmieszanie składników tworzywa ciernego i tarczy stalowej.

Fakty te są wyraźnie niezgodne z dotychczas przedstawianymi elementarnymi modelami zużycia ściernego i adhezyjnego.

Wszystkie obserwacje mikroskopowe narostów metalicznych na powierzchniach tworzyw wykazały ich warstwową budowę. Nie są to jednolite objętości metalu przeniesione z przeciwpróbki na tworzywo, lecz narosty utworzone w wyniku wielokrotnego nanoszenia, akumulowania cząsteczek α -Fe i tlenków Fe jest to przenoszenie z akumulacją selektywną cząstek α -Fe.

W oparciu o analizę wyników WWC badań fizykalnych elementów ciernych i stan literatury dotyczącej analizowanego zagadnienia, kompleks zjawisk tribologicznych charakterystycznych dla pary: hamulcowe tworzywo cierne - stal można przedstawić przy pomocy schematu systemu tribologicznego jak na rys. 3.



Rys. 3. Schemat systemu tribologicznego dla pary tworzywo cierne - stal charakterystycznej dla hamulców maszyn wyciągowych.

Układ trący składa się z trzech ciał:

- A - okładziny 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 tworzyw,
 C_3 - cząsteczki fazy α -Fe, C_4 - cząsteczki
 tlenków Fe/

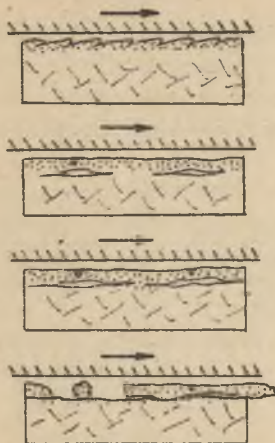
Układ trący poddany jest zewnętrznemu wymuszeniu kinematycznemu i dynamicznemu /W/, co wywołuje w układzie odpowiedni stan obciążeń mechanicznych /I/, pole temperatur / II/ oraz pole elektrostatyczne / III/. Układ działa w określonym otoczeniu /IV/.

W warunkach tarcia technicznie suchego można w układzie wyszczególnić następujące dominujące procesy fizyczne i przemiany: u - utlenianie, r - redukcja, d - dyfuzja / O_2 , H_2 , CO, CH_4 /, z - zużycie / przejście masy ciała do produktów zużycia/, p - przenoszenie masy pomiędzy ciałami w wyniku przerywania szepień 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 - opyszczanie przez produkty zużycia układu. W wyniku zachodzących w układzie procesów i przemian w ciałach stanowiących parę cierną konstituuje się warstwa wierzchnia. Skład chemiczny strefy przypowierzchniowej w momencie przerywania tarcia jest wypadkową tych przemian i procesów. Czyli doświadczenia wykazały dużą złożoność zjawisk występujących w parze cierniej: tworzywo cierne hamulcowe - stal.

W przypadku temperatur tarcia niższych od temperatury destrukcji lepiszcza tworzyw ciernych i innych jego składników lub płynięcia metalu, następuje mniej lub bardziej intensywne wzajemne mechaniczne deformowanie się warstw powierzchniowych, zależnie od mikrogeometrii i własności mechanicznych tych warstw oraz produktów zużycia. Na powierzchni obu elementów pary następuje rysowanie, bruzdowanie, skrawanie, niszczenie wierzchołków mikronierówności itd. Obecność twardych wypełniaczy w postaci proszków metali i pyłów ciernych / np. korundu/ jest czynnikiem intensyfikującym zużycie cierne tworzyw / rys. 2/ oraz przeciwpróbek stalowych.

Jeżeli np. w tworzywie ciernym konstituuje się warstwa umocniona w wyniku mechanicznych i termicznych oddziaływań oraz wnikania w nią, np. metalowych produktów zużycia, następuje okresowe jej zrywanie / głębokie wyrywanie/, / rys. 4/. W procesie tym oprócz sił stycznych może brać udział ciśnienie zamkniętych w mikroobszarach gazowych produktów rozpadu składników organicznych tworzywa.

Występujące przy wysokich parametrach współpracy metalizowanie się próbek z tworzyw ciernych ma złożony charakter. Koniecznym warunkiem powstania tego zjawiska na dużej powierzchni tarcia są:



Rys. 4. Schematyczny model tworzenia i niszczenia umocnionych warstw powierzchniowych w warstwie wierzchniej tworzywa ciernych.

- 1 - temperatura powierzchni tarcia wyższa od temperatury destrukcji organicznych składników tworzywa ciernych, w szczególności kauczuku i wydzielanie gazów H_2 , CO , CO_2 ,
- 2 - Obniżenie własności mechanicznych warstwy wierzchniej tarczy stalowej poprzez:
 - silne plastyczną przedformowanie,
 - odwęglenie stali wodorem w temperaturze powyżej 580 K,
 - zmęczenie i złefektowanie,
 - utlenianie i wykruszanie błon tlenkowych,
 - wzmocnienie i wzrost twardości wgniatających się w pierwszym etapie w tworzywo cząstek metalu α -Fe/,

3 - takie ukształtowanie struktury wieloskładnikowego tworzywa ciernego, aby było możliwe łatwe wgniatanie warstwy metalicznej w tworzywo w kierunku normalnym do powierzchni tarcia i jej trudne wyciskanie w kierunku stycznym do tej powierzchni. Wyciskanie warstwy nie występuje jeżeli opór wyciskania tworzywa P_w jest większy od siły stycznej $\mu \cdot N$ działającej na warstwę.

Utworzone ognisko Fe izolowane termicznie przez przylegające tworzywo jest w czasie tarcia o stalową tarczę źródłem wysokiej temperatury, a dalsze powiększanie twardych narostów żelaza na tworzywie można tłumaczyć:

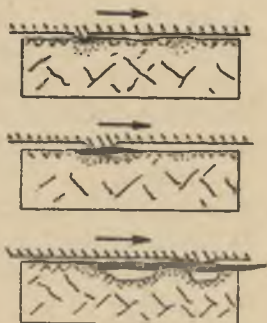
- a/ adhezyjnym oddziaływaniem między narostem a odwęgloną warstwą stali, tworzeniem i ścinaniem szczerzeń / powierzchnia narostu jest ciągle przykryta, charakteryzuje się dużą fizyczną czystością " in statu nascendi " i wysoką temperaturą, co sprzyja etapom współdziałania molekularnego/,
- b/ mechanicznym nanoszeniem, nalepianiem, mechanicznym wgniataniem drobnych luźnych cząstek żelaza i tlenków jedna na drugą, a następnie ich spiekaniem. Proces nanoszenia jest dwukierunkowy, ale ponieważ powierzchnia przeciwpróbki jest częściowo odkryta, tworzą warstewki adsorpcyjne obniża swoją energię powierzchniową. Natomiast powierzchnia narostu na próbce charakteryzuje się dużą fizyczną czystością " in statu nascendi " łatwiej tworzy wiązania metaliczne z produktami zużycia z tarczy stalowej. Czyli nanoszenie jest procesem dynamicznie niesymetrycznym dając w efekcie akumulację cząstek α -Fe i wzrost warstwy metalicznej.

Obydwa mechanizmy o wyraźnie dyskretnym charakterze tłumaczą warstwowo-płytkową budowę narostu.

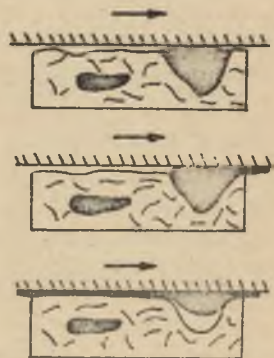
W warunkach rzeczywistych mechanizmy te występują prawdopodobnie nierozdzielnie.

W sąsiedztwie warstwy metalicznej tworzywo ulega destrukcji, co umożliwia warstwie rozrost w głąb tworzywa, a jednocześnie osłabia wiązania między warstwą a tworzywem / rys. 5/.

Metalizowaniu towarzyszy zawsze iskrzenie. Wypełniacze metalowe materiałów ciernych w wyniku mechanicznego i adhezyjnego oddziaływania ślizgających się powierzchni tworzą na stalowej przeciwpróbcie nalepienia, np. miedzi lub jej stopów / rys. 6./.



Rys. 5. Schematyczny model inicjacji i rozwoju warstw metalicznych na powierzchni tarcia tworzyw ciernych.



Rys. 6. Schematyczny model nanoszenia warstw miedzi na powierzchnię stali.

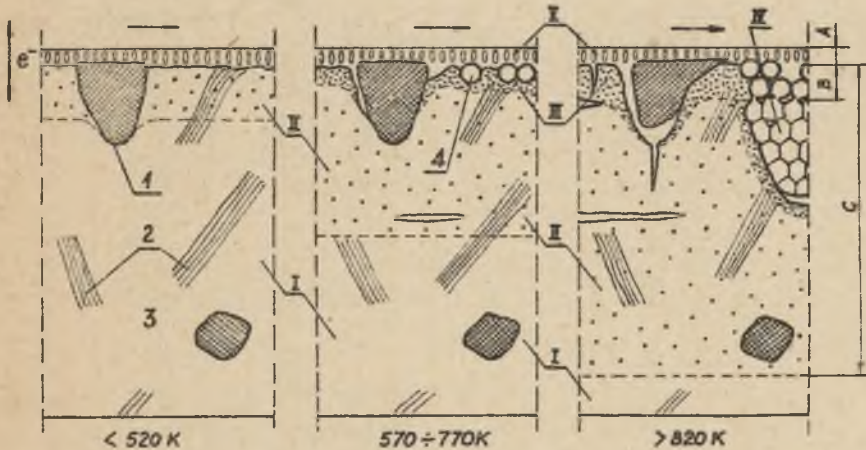
Dla pary Fe-Cu występują połączenia adhezyjne, a ich zerwanie zachodzi wewnątrz warstwy wierzchniej miedzi, gdyż wytrzymałość tych połączeń jest większa od wytrzymałości miedzi. W przypadku wystarczającej ilości wypełniacza nalepiona warstewka pokrywa dużą część powierzchni przeciwpróbki i wykazuje własności ochronne dla przeciwpróbki stalowej, zmniejsza jej zużycie i przenoszenie na powierzchnię tworzyw ciernych. Jak z tego wynika, pozytywna rola wypełniacza metalowego nie polega tylko na zmianie niektórych własności tworzywa, np. współczynnika przewodzenia ciepła, ale przede wszystkim na zmianie procesu tarcia.

Model budowy warstwy wierzchniej hamulcowych tworzyw ciernych uwzględniający różne termiczne warunki pracy okładziny cierniej przedstawia rys. 7.

- I - strefa materiału wyjściowego, nie zmienionego chemicznie,
- II - strefa umocniona tworzywa ciernego. Zagadnienie umocnienia się tworzyw ciernych w wyniku zgniotu i procesów cieplnych / wygrzewania/ opracował Janecki,
- III - strefa zniszczonego tworzywa ciernego. Działanie temperatury o wartości powyżej 520 K, szczególnie w atmosferze powietrza, powoduje degradację żywicy oraz zmiany strukturalne, wyrażające się zmniejszeniem ciężaru cząsteczkowego, co z kolei prowadzi do spadku

wytrzymałości mechanicznej oraz powstawania na powierzchni pracującej tworzywa ciernego pęknięć i rozwarstwień,

- IV - strefa metaliczna / warstwa nażelazowana/,
V - strefa adsorbowana.



Rys. 7. Model budowy warstwy wierzchniej tworzywa ciernych,
1 - wypełniacz - wiór metalu, 2 - wypełniacz - włókna azbestu,
3 - lepiszcze - żywica, kauczuk, 4 - cząsteczki żelaza i tlenków żelaza.

Wnioski ogólne

1. Identyfikacja zjawisk tribologicznych wykazała dużą złożoność zjawisk towarzyszących tarcia elementów hamulca.
Tribologiczny system dla takich wężów ciernych złożony jest z trzech ciał / okładzina, bieżnia hamulca oraz ciało trzecie / i otoczenia, które wzajemnie na siebie oddziałują mechanicznie, energetycznie, elektrostatycznie i chemicznie.
2. W hamulcach maszyn wyciągowych, w pełnym zakresie zmian parametrów tarcia, wiodące rodzaje zużycia tworzyw to zużycie ścierne, adhezyjne i ciepłne, których udział w ogólnym bilansie procesu zużycia zmienia się w funkcji temperatury i stanu warstwy wierzchniej.
Badania przeprowadzone zgodnie z metodą i przyjętymi w pracy [1] zakresami zmian wielkości operacyjnych wykazały, że:
3. najlepsze własności na okładziny hamulców maszyn wyciągowych mają tworzywa charakteryzujące się między innymi:
 - dużą stabilnością chemiczną,
 - małą różnicą twardości mikroskładników,
 - dużą udarnością,
 - wypełniaczem metalowym / stopy Cu / w postaci wiórów,
 - małą ilością tlenków Fe w składzie tworzywa.

LITERATURA

- [1] S. Scieszka : Problemy hamowania maszyn wyciągowych. Studium ważniejszych zjawisk tribologicznych w parze ciernej: tworzywo hamulcowe - stal. ZN Politechniki Śląskiej Nr 484, Gliwice 1976.

Трибологические проблемы в тормозах подъемных машин

В работе даны - идентификация плохо рассмотренных, до сих пор, явлений на поверхности истирания фрикционных элементов, и разработаны физические и математические модели некоторых трибологических явлений в тормозах, а особенно металлизирование тормозных фрикционных материалов при совместной работе со сталью. Были определены условия в которых это явление происходит.

TRIBOLOGICAL PROBLEMS IN THE HOISTING MACHINE BREAKS

The paper deals with the hitherto little known phenomena of the friction surfaces of frictional elements and the developed physical and mathematical models of some tribological phenomena in brakes, especially the mechanism of metalizing of the brakes frictional material in cooperation with steel, and the condition in which this phenomenon occurs have defined.