ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1992
Seria: GÓRNICTWO z. 209 Nr kol. 1193

INTERNATIONAL SEMINAR ON MODERNIZATION OF HOISTING MACHINES-RELIABILITY AND WORK SAFETY

Jerzy ANTONIAK
Antoni JANKOWSKI

Instytut Mechanizacji Górnictwa
Politechnika Śląska, Gliwice, Polska

HAMULCOWE OKŁADZINY CIERNE - BADANIE WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA STATYCZNEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono wymagania trybologiczne stawiane tworzywom na hamulcowe okładziny cierne z uwzględnieniem zagadnień termicznych towarzyszących intensywnym procesom hamowania. Zwrócono uwagę na ważność poznania tarcia statycznego tego typu tworzyw. Opisano stanowisko do badania tarcia statycznego metodą "stick-slip". Podano wyniki badań współczynnika tarcia statycznego dla pary ciernej: tworzywo cierne - stal St 5.

1. WPROWADZENIE

Podstawową funkcją systemu hamulca mechanicznego w górniczych wyciągach szybowych jest bezpieczne doprowadzenie do zatrzymania naczyń wyciągowych, gdy została zainicjowana krytyczna sytuacja. Oprócz hamowania bezpieczeństwa hamulec spełnia funkcje hamowania manewrowego i utrzymania urządzenia wyciągowego w spoczynku w czasie za- i wyładunku naczyń i przerw w pracy.

Podczas hamowania bezpieczeństwa najistotniejsze jest, aby współczynnik tarcia kinetycznego zachowywał stabilną wartość w miarę wzrostu temperatury powierzchni tarcia, będącej wynikiem wytracania energii, pochłaniania i rozpraszania jej przez hamulec. Na ten temat napisano wiele prac, natomiast nie doceniono roli współczynnika tarcia statycznego, który ma wpływ na moment hamowania podczas postoju maszyny. Istotną rolę odgrywa tu także wpływ wzrostu temperatury na zmianę współczynnika tarcia statycznego.

W czasie za- i wyładunku naczynia dochodzi dodatkowo zmiana zwrotu, wartości oraz czasu trwania obciążenia.

Do czasu wykazania, że współczynnik tarcia statycznego jest mniejszy od współczynnika tarcia kinetycznego właściwego dla prędkości i temperatur charakterystycznych w pracy hamulca maszyny wyciągowej, zagadnienie zmian współczynnika tarcia statycznego nie znajdowało należytego odbicia w pracach badawczych.

Kiedy w niektórych urządzeniach wyciągowych zaobserwowano niespełnianie kryterium statycznej pewności hamowania przy jednoczesnym spełnianiu wymogów dynamicznych, zaczęto doceniać różnicę pomiędzy tarciem statycznym i kinetycznym. Tym samym dostrzeżono brak należytego rozpoznania problemu współczynnika tarcia statycznego w hamulcowych parach ciernych, co przyczyniło się do podjęcia prac badawczych nad tym zagadnieniem.

W górniczych maszynach wyciągowych stosowane są hamulce promieniowe tzw. szczękowe i hamulce osiowe tzw. tarczowe. W tych hamulcach występuje skojarzenie cierne typu tworzywo kompozytowe - stal lub tworzywo kompozytowe - staliwo. Tarcze hamulcowe są wykonywane z płyt stalowych dobrej jakości. Planuje się wykonywać je ze staliwa, a w małych maszynach z żeliwa o lepszych własnościach termicznych niż stal. Cechy konstrukcyjne oraz warunki pracy hamulców maszyn wyciągowych zmuszają do opracowania szerokiego zestawu tworzyw ciernych, głównie pod kątem uzyskania odpowiedniej wartości współczynnika tarcia statycznego i kinetycznego oraz wytrzymałości termicznej.

W ramach modernizacji maszyn wyciągowych dąży się do zastąpienia hamulców szczękowych hamulcami tarczowymi / firmy ABB, GHH, ZUT ZGODA i inne /. Hamulce są tak projektowane, aby tarcza hamulcowa mogła przejąć ciepło pochodzące z dwóch posobnych zahamowań awaryjnych naczyń poruszających się z pełną prędkością / zwiększoną o 15% / w jeździe w dół, aby wytworzona wówczas maksymalna temperatura tarczy hamulcowej była mniejsza od temperatury dopuszczalnej dla okładziny ciernej hamulca i aby zapewniony był stały moment hamowania / lub zmieniający się według założonego programu /i utrzymana stała średnia temperatura objętościowa całej tarczy hamulcowej, np. na poziomie do 50°C.

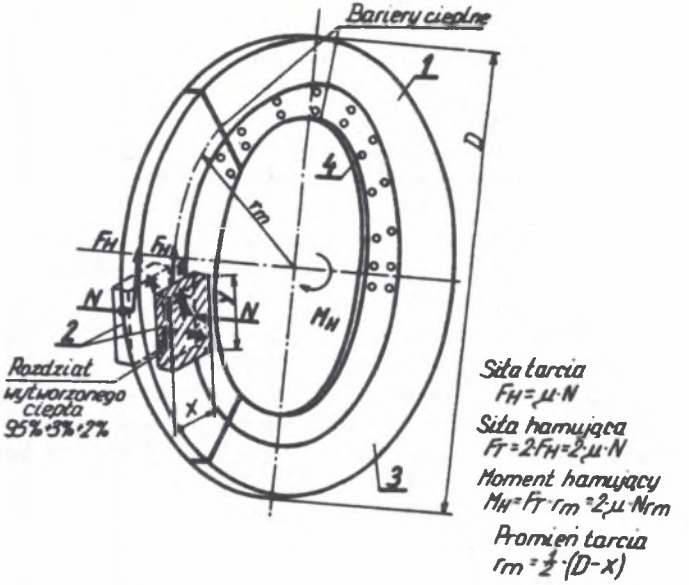
2. HAMULCOWE OKŁADZINY CIERNE

2.1. WYMAGANIA TRYBOLOGICZNE

Na hamulcowe okładziny cierne stosuje się tworzywa, które zapewniają stałą wartość współczynnika tarcia kinetycznego, najlepiej około 0,4 przy różnych temperaturach w przedziale do 250 lub 300°C. Tworzywa te powinny być stosunkowo miękkie w celu zapewnienia równomiernego nacisku okładziny ciernej na tarczę hamulcową i wynikającego stąd równomiernego rozkładu temperatury na powierzchni tarczy.

W czasie hamowania bezpieczeństwa hamulec cierny przetwarza olbrzymią ilość energii kinetycznej i potencjalnej w energię cieplną absorbowaną w około 95% w tarczy hamulcowej. Jest to wynikiem tego, że przewodność cieplna materiałów ciernych wynosi około 2% przewodności cieplnej stali, z której wykonana jest bieżnia hamulcowa. Około 3% energii cieplnej jest pochłaniane przez powietrze i oddawane otoczeniu przez promieniowanie

i konwekcje. Wyrównywanie temperatury bieżni trwa zazwyczaj kilka-kilkanaście minut. Jest ono wolniejsze w przypadku występowania barier cieplnych spowodowanych np. przykręceniem tarczy do bębna i jej podziałem na segmenty /rys.1/. Podział na segmenty zapewnia jednak zmniejszenie naprężeń cieplnych na powierzchni o kilkanaście procent w stosunku do tarczy jednolitej.



Rys. 1. Zależności mechaniczne i schemat hamulca tarczowego : 1-tarcza hamulcowa, 2-prostokątne okładziny cierne, 3-segmenty tarczy /tutaj trzy/, 4-otwory na śruby mocujące tarczę hamulcową z kołnierzem bębna pędnego.

Szybkość przenikania ciepła w głąb tarczy zależy od materiału tarczy, stanu jej powierzchni, geometrii powierzchni styku pary ciernej oraz kąta przykrycia okładzin ciernych. Kombinacja tych parametrów determinuje z kolei temperaturę powierzchni, jaką musi osiągnąć tarcza pochłaniając wytworzone ciepło. Z reguły temperatury szczytowe powierzchni są kilka razy większe od wyrównanej temperatury objętościowej tarczy. Zbyt wysoka temperatura objętościowa /około 100^{0}C/ daje naprężenia termiczne /około 240 MPa/ zbliżone do granicy plastyczności materiału tarczy wykonanej ze stali St 5 lub St 6 /minimum Re dla tych stali wynosi odpowiednio 290

i 330 MPa/. W obliczeniach bębnów żąda się, aby naprężenia pochodzące od obciążeń ruchowych i termicznych nie przewyższały wartości około 120 ÷ 130 MPA, W związku z tym dużo uwagi poświęca się konstrukcji bębna pędnego i usytuowaniu w nim tarczy hamulcowej /rys.2/. Na tym rysunku podano przykłady najnowszych rozwiązań usytuowania tarczy hamulcowej w układzie bębna pędnego wykonanego w konstrukcji spawanej. Grubosc tarcz hamulcowych wynosi najczęściej 35 do 45 mm, wyjątkowo /rys.2 c / 60 mm.

Z punktu widzenia ograniczenia przepływu ciepła do konstrukcji bębna pędnego i wywołania w nim naprężeń cieplnych najlepsza jest konstrukcja firmy ABB /rys.2 a/. Ma ona jeszcze tę zaletę, że promień tarcia jest nieznacznie większy od promienia nawojowego lin nośnych. Szereg firm na tarcze hamulcowe daje stale stopowe konstrukcyjne do ulepszania cieplnego o zwiększonej odporności na zużycie i ścieranie /np.typu 45G2/ i mniejszym współczynniku rozszerzalności liniowej /około 11×10^{-6} na $1^{o}C$ w zakresie temperatury do $100^{o}C$ /.

Ogólnie wartości szczytowe temperatury powierzchni tarczy hamulcowej podczas hamowania bezpieczeństwa rosną początkowo bardzo szybko we fragmentach tarczy przykrytych okładziną, gdyż energia cieplna gromadzi się w warstwach bliskich powierzchni tarczy i gradient temperatury jest bardzo stromy wywołując duże naprężenia powierzchniowe. Zbyt duże natężenie dopływu ciepła może doprowadzić do płynięcia materiału w cienkiej warstewce powierzchniowej i do pęknięć zmęczeniowych.

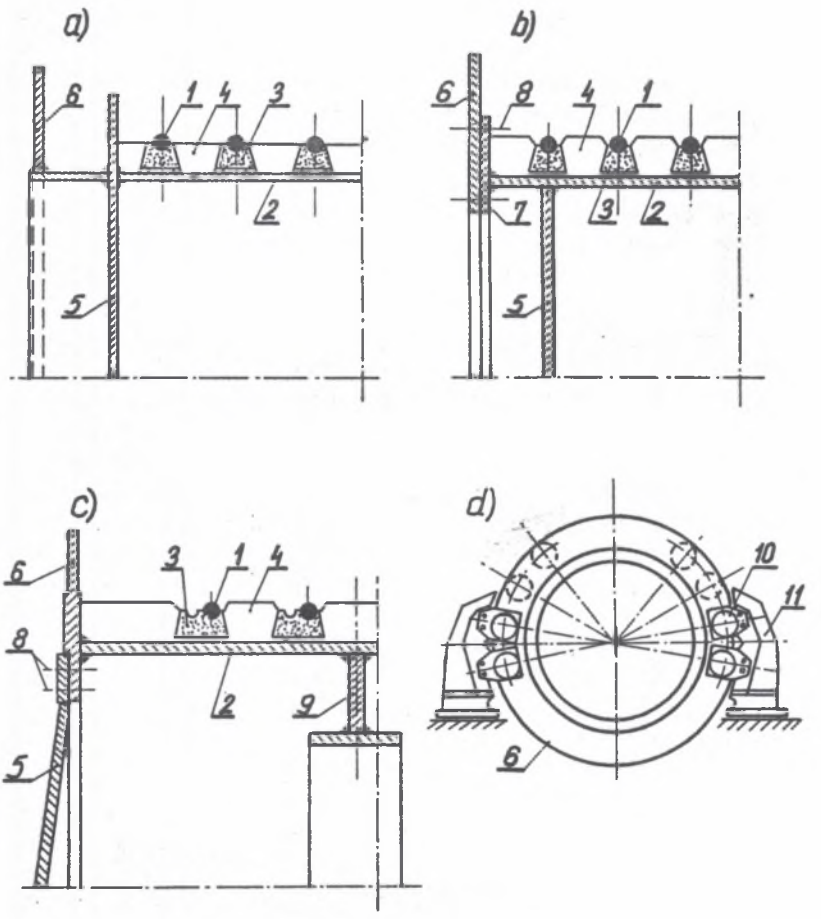
Porcja energii doprowadzona do tarczy przy jej przejściu pod każdą okładziną cierną jest proporcjonalna do iloczynu nacisku jednostkowego i długości okładziny, a prędkość przyrostu temperatury do iloczynu nacisku jednostkowego i prędkości tarczy. Dalszy przebieg zmian temperatury podczas zwolnienia wyciągu zależy już od grubości tarczy /przy czym większe różnice i wyższe temperatury dotyczą wyciągów bębnowych, w tarczach Koepe są one mniejsze/.

Przeprowadzona symulacja komputerowa przez Tileya /Kanada - RPA/ z wykorzystaniem metody elementów skończonych, a dotycząca zagadnień cieplnych w hamulcach wykazała, że szczytowa temperatura powierzchni w funkcji czasu hamowania przy dostatecznej grubości tarczy osiąga wartość maksymalną podczas pierwszego obrotu bębna i pozostaje stała przez dalszy ciąg hamowania.

Dla cienkich tarcz szczytowa temperatura powierzchni rośnie nadal w fazie zwalniania wyciągu.

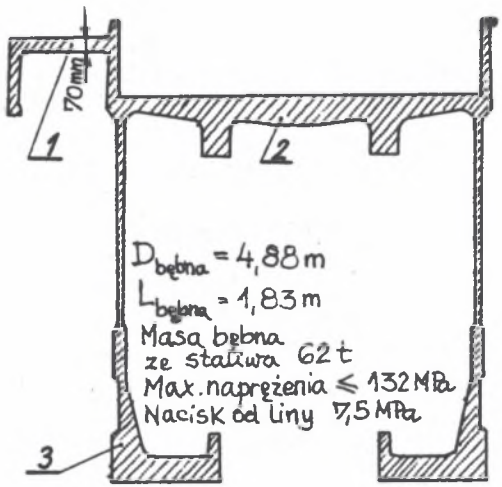
Podział tarczy na 16 segmentów /wg badań Tileya/ zmniejszył naprężenia cieplne na powierzchni o 15% podczas pierwszego hamowania i o 25% podczas drugiego hamowania w stosunku do tarczy jednolitej. Zalecane grubości tarcz wynoszą: do 50 mm /ASEA, Brown Boveri, Dorbyl - RPA, Twiflex - W.Brytania/ i do 65 mm /Tiley/.

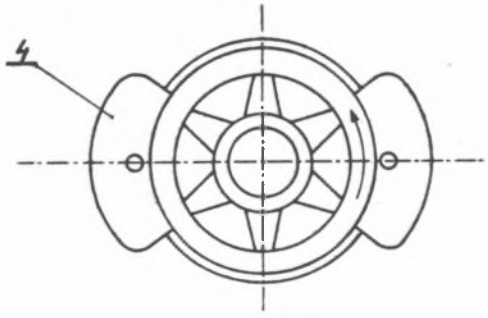
Przykład wykonania układu dwubębnowego typu Blaira dla głębokości ciągnienia 2000 m i prędkości jazdy 16 m/s /RPA/ przedstawia rys.3.



Rys. 2. Przykłady usytuowania tarczy hamulcowej w konstrukcji bębna pędnego: a - firma ASEA /ABB/- maszyna wyciągowa 8-linowa, średnica osi lin - 3,56m, silnik mocy 7 MW,/Filipiny, kopalnia Toledo/, liczba par siłowników 4x4, b - firma GHH, maszyna wyciągowa 6-linowa, średnica osi lin 5,0 m, silniki mocy 2x4600 kW./Niemcy, kopalnia Consolidation 3/, liczba par siłowników 4x6, c - firma GHH i Siemens, maszyna wyciągowa 4-linowa zrębowa, średnica osi lin 6,5m, zintegrowany silnik synchroniczny o mocy około 2 MW,/kopalnia Aden, szyb Romberg 7/, liczba par siłowników 4x4, 1 - lina, 2 - płaszcz bębna, 3 - wykładzina linowa, 4 - zespoły mocujące, 5 - tarcza boczna bębna, 6 - tarcza hamulcowa, 7 - tarcza mocująca, 8 - śruby pasowane, 9 - żebro, 10 - jedna para siłowników w hamulcu tarczowym, 11 - stojak.

Autorzy projektu zdecydowali się zastosować jako materiał bębna - staliwo BS 3100:A4 z uwagi na niższe koszty wykonania bębna, większą sztywność bębna w kierunku promieniowym, łatwość zoptymalizowania kształtu bębna /uzyskanie mniejszej masy bębna/ oraz z uwagi na własności termiczne staliwa dające w efekcie nierozpraszanie energii, równomierne rozprowadzenie energii wnikającej wzdłuż ścieżki o szerokości szczęk hamulca i uzależnienie od czasu funkcji wejścia energii odniesionej do całego obwodu ścieżki hamulca.





Rys. 3. Bęben nawojowy wykonany ze staliwa /RPA/:1 -bęben hamulcowy grubości 70 mm, 2 -płaszcz bębna, 3 -piasta, 4 -szczęki hamulca.

W granicach 250°C okładziny cierne tracą częściowo swoje własności cierne - maleje współczynnik tarcia kinetycznego, co może mieć katastrofalne konsekwencje.W związku z tym niezbędne jest zwiększenie grubości bębna hamulcowego do 70 mm.Grubość ta w pełni zabezpiecza prawidłową dyssypację energii cieplnej. Cieplne sprawdzenie hamulca polega na porównaniu jedno-

stkowej mocy tarcia $p \cdot p \cdot v$ obliczanego hamulca z wartością dopuszczalną ustaloną doświadczalnie. Wartość średnią tej mocy przyjmuje się dla okładziny ciernej w granicach 2,5 MW/m^2, a przy hamowaniu bezpieczeństwa z 1.15 prędkości znamionowej 5,5 MW/m^2 /co odpowiada wartości szczytowej 11 MW/m^2/. Dla tarczy hamulcowej moc ta jest około 10-krotnie mniejsza z uwagi na większą powierzchnię tarczy braną do obliczeń.

Opór tarcia suchego i zużycia występujące w hamulcu są wynikiem jednoczesnego oddziaływania mechanicznego /deformacje/ i molekularnego /adhezja, sczepianie, zrastanie tarciowe/ występującego na powierzchni współpracujących ciernie materiałów. Zjawiska, warunkujące tarcie suche nie przebiegają równocześnie na całej nominalnej powierzchni styku, lecz na wielu elementarnych jednospójnych obszarach rzeczywistego styku. Pierwotną przyczyną powstania elementarnych zjawisk tarcia suchego jest mechaniczne oddziaływanie elementu powierzchniowego jednego z trących się ciał na napotkany na jego drodze element powierzchniowy drugiego ciała. Powoduje ono kolejno odkształcenie sprężyste oraz odkształcenie plastyczne elementów. Każde elementarne zjawisko tarcia ma fazę nawiązania styku, zmian fizykochemicznych i zerwania styku. Mechaniczne nawiązanie styku może mieć postać zahaczenia lub zagłębienia. Zahaczenie następuje przy ruchu w kierunku stycznym, przy zetknięciu się mikrowystępów trących się ciał.

Wgłębienie polega na zagłębieniu się w kierunku normalnym elementu jednego ciała w drugie ciało, wskutek różnicy ich twardości /rys.4./.

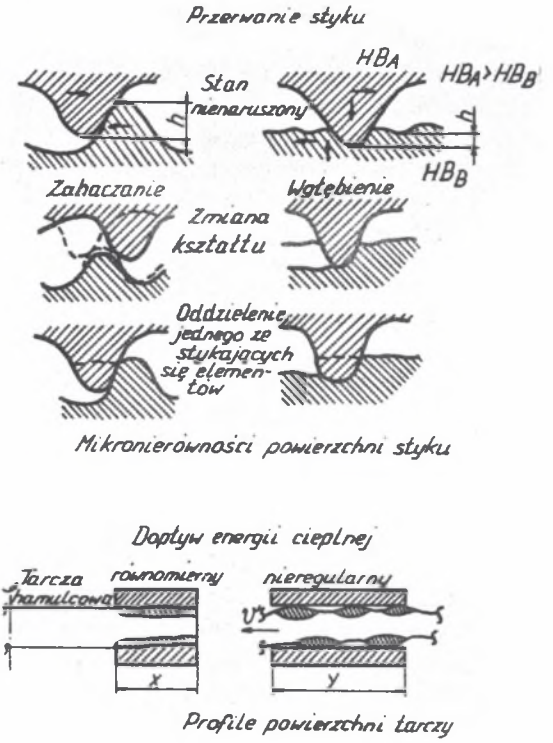
Molekularne nawiązanie styku występuje w przypadku takiego zbliżenia ciał, przy którym ujawniają się siły oddziaływania atomowego, spowodowane niezrównoważonym stanem atomowym na obu powierzchniach. W wyniku mogą powstać trwałe połączenia czystych powierzchni - adhezyjne sczepienia lub dyfuzyjne zrosty. Formy przerwania styku mogą zachodzić przy zachowaniu nienaruszonego stanu stykających się elementów, przy zmianie kształtu oraz przy oddzieleniu jednego ze stykających się elementów.

Występowanie jednej z tych form przerwania styku zależy od geometrii stykających się elementów, wysokości zahaczenia lub wgłębienia oraz pierwotnych własności mechanicznych elementów i zmian tych własności w procesie pokonywania przeszkody ruchu.

Największe znaczenie dla przebiegu tarcia i zużycia mają odkształcenia plastyczne i zjawiska im towarzyszące. Do głównych zjawisk, powodowanych przez odkształcenia plastyczne, należą zmiany stanu nierówności powierzchni, niszczenie błon powierzchniowych i odsłanianie czystych powierzchni, zmiany struktury materiału, umocnienie i zmiany stanu naprężenia, a w granicznym przypadku naruszenie spójności materiału. Na przebieg tych zjawisk mają wpływ własności fizykomechaniczne trących się ciał oraz właściwie wszystkie warunki i parametry tarcia.

Rzeczywista powierzchnia styku tarczy hamulcowej z okładziną cierną zależy od stanu jej powierzchni, która jest głównie wynikiem zastosowanych metod obróbczych. Ważną rolę odgrywa płaskość i równoległość powierzchni

tarczy w kierunku obwodowym /rys.4./, gdyż miejscami styku są tylko wypukłości, w których występują wysokie temperatury miejscowe.



Rys. 4. Schematy przerwania styku pary ciernej w procesie tarcia ślizgowego suchego i profile powierzchni tarczy hamulcowej w kierunku promieniowym /x/ i obwodowym /y/.

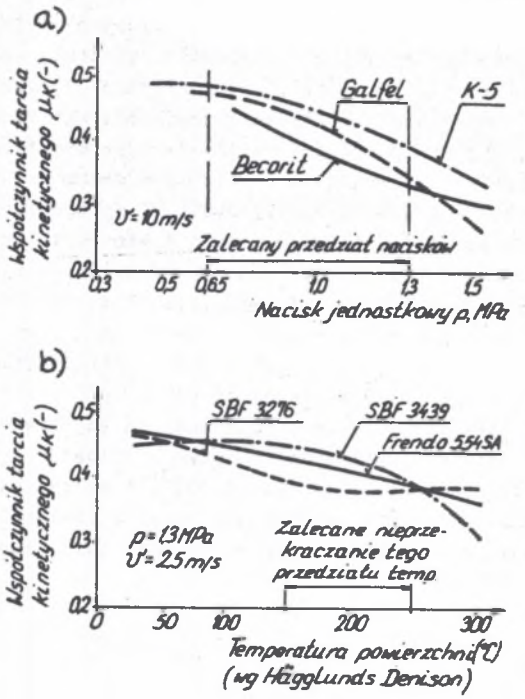
Jakość powierzchni w kierunku promieniowym jest mniej istotna, pod warunkiem, że jej profil w tym kierunku jest zgodny na całym obwodzie. Na tzw. "pagórkach" i "dolinach" występuje zróżnicowanie jednostkowej mocy tarcia od około 130 ÷ 150% wartości średniej na pagórkach do 70 i 50% w dolinach.

Odkształcenia cieplne tutaj powodują pojawienie się dodatniego sprzężenia zwrotnego: pagórki rosną, a doliny pogłębiają się. Falistość tarczy od obciążenia lin i ciepła tarcia wynosi od 1 do 2 mm. Falistość ta jest mniejsza dla tarczy dzielonej, a zwłaszcza w miejscach stykania się segmentów. Rozdział temperatury w poprzek tarczy hamulcowej jest bezpośrednio uzależniony od kształtu okładziny ciernej. Lepsze własności pod tym względem ma okładzina sektorowa w kształcie prostokąta /z uwagi na duży promień tarczy hamulcowej/ w stosunku do okładziny kołowej.

Ważnym parametrem tarcia jest w przypadku okładzin ciernych nacisk

jednostkowy. Dla materiałów stosowanych na okładziny współczynnik tarcia maleje ze wzrostem nacisków /rys.5a./, tak, że zalecany przedział nacisków jednostkowych zawiera się pomiędzy 0,65 a 1,3 MPa. Przy większych prędkościach należy ograniczyć jeszcze bardziej stosowane naciski, aby nadmiernie nie zwiększać jednostkowej mocy tarcia.

W celu zmniejszenia nacisków można stosować duże powierzchnie trące, wiele powierzchni trących oraz materiały o dużym oporze tarcia.



Rys. 5. Współczynnik tarcia kinetycznego dla różnych tworzyw; a-w funkcji nacisków jednostkowych dla prędkości 10m/s, b-w funkcji temperatury powierzchni styku /wg.Hägglunds-Denison/

Z oddziaływań molekularnych dużą rolę odgrywa zrastanie tarciowe towarzyszące tarciu międzymetalicznemu w obszarach nadtopienia powierzchniowego jednego z metali uczestniczących w procesie. Zrastanie polega wtedy na wzajemnej dyfuzji i rozpuszczaniu metalu stałego w ciekłym i przeciwnie. Adhezja /siły Van der Waalsa/ i sczepianie /wiązanie chemiczne/ są utrudnione w hamulcu wskutek wystąpienia rozwiniętych warstw tlenkowych i zanieczyszczeń.

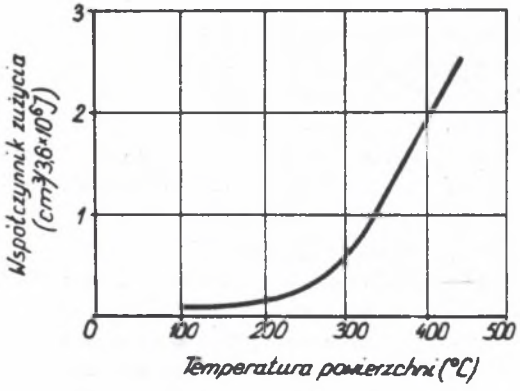
W występujących w hamulcu warunkach tarcia /stosunkowo wysokie temperatury, naciski i prędkość/ mogą mieć miejsce zmiany jakościowe właściwości warstwy wierzchniej /piroliza i metalizacja/ prowadzące do obniżenia współczynnika tarcia. Działanie oporów tarcia /opór odkształcenia sprężystego i plastycznego, opór oddzielania nierówności, opór ścinania

połączeń tarciowych i molekularny opór przemieszczania/ potraktowane łącznie jest wyrażone przez wartość współczynnika tarcia, określającego stosunek rozwiniętej siły tarcia do nacisku. Bardziej szczegółowo, opór tarcia charakteryzujący daną parę cierną jest wyrażony przez zespół charakterystyk w funkcji parametrów tarcia: temperatury, nacisku powierzchniowego, prędkości, czasu tarcia itp.

Celem ustalenia maksymalnej dopuszczalnej temperatury powierzchni styku danej pary ciernej jest zapewnienie takich warunków pracy hamulca, w których mógłby on być użytkowany we właściwym z punktu widzenia współczynnika tarcia i intensywności zużycia zakresie temperatur. Maksymalny zakres temperatury zdeterminowany jest praktycznie przez charakterystykę tworzywa okładziny ciernej, a nie przez dopuszczalną temperaturę tarczy hamulcowej. Na rys.5b krzywe wykreślono na podstawie badań stoiskowych hamulca firmy Hägglunds-Denison wyposażonego w siłowniki BSFG 408 /powierzchnia okładziny 600 cm^2, docisk 78 kN/ i tarczę hamulcową o średnicy 1,5 m.

Większość dostępnych obecnie okładzin ciernych ma podane przez wytwórców graniczne temperatury 150 do 250^{0}C w użytkowaniu ciągłym oraz 350 do 450^{0}C sporadycznie. Podane ograniczenia temperatury zapobiegają poważniejszej degradacji powierzchni okładziny i znacznemu spadkowi współczynnika tarcia. Podobnie zachowują się i inne okładziny wykonane na bazie żywic.

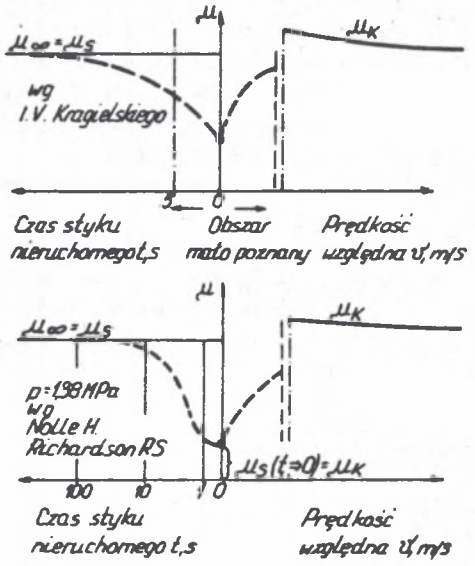
Zwiększeniu temperatury towarzyszy także wzrost zużycia ściernego okładziny /rys.6./. Typowa wartość współczynnika zużycia wynosi 0,5 $cm^3/3{,}6x10^6J$/ dla zakresu temperatur od 100 do 300^{0}C i stałej energii $3{,}6x10^6$J. Powyżej 300^{0}C prędkość zużycia gwałtownie rośnie. Obniżenie temperatury ułatwia zwiększenie pojemności cieplnej elementów trących.



Rys. 6. Współczynnik zużycia ściernego okładziny ciernej w funkcji temperatury powierzchni styku.

Z teorii hamulców tarczowych wynika, że szczytowy przyrost temperatury powierzchni tarczy hamulcowej jest proporcjonalny do sumarycznego kąta przykrycia wszystkich okładzin ciernych i odwrotnie proporcjonalny do liczby obrotów tarczy podczas hamowania /średnio 10 obrotów/. Uważa się, że szczytowy przyrost temperatury powierzchni tarczy nie może przekroczyć 2/3 wartości temperatury, przy której dochodzi do spadku współczynnika tarcia okładziny. W celu zmniejszenia powierzchni przykrycia zaleca się niestosowanie większej niż 4 liczby par siłowników na 1 tarczy.

Tarcie statyczne było tematem wielu prac. Siła tarcia statycznego określona jest jako reakcja styczna przeciwstawiająca się przesunięciu ciał względem siebie. Graniczna wartość siły przesuwającej, nie naruszająca jeszcze przy danym docisku powierzchni stanu względnego spoczynku, nosi nazwę rozwiniętej siły tarcia statycznego. Pierwsze sformułowanie prawa tarcia statycznego jest dziełem Amontonsa. Coulomb wykazał, że siła tarcia statycznego zależy od czasu, który upłynął od chwili zetknięcia się powierzchni. Wyniki badań w tym zakresie Richardsona i Nollego oraz Kragielskiego przedstawia rys.7.



Rys. 7. Zależność współczynnika tarcia statycznego od czasu trwania nieruchomego styku i współczynnika tarcia kinetycznego od prędkości ruchu względnego.

Kragielskij na podstawie modelu ciała lepko-sprężystego twierdzi, iż znaczne naprężenia stykowe powodują płynięcie /pełzanie/ materiału prowadząc do wzrostu zbliżenia względnego warstw wierzchnich obu materiałów i zwiększenia powierzchni ścinanych złącz adhezyjnych w stosunku do powierzchni

ścinanych w czasie ruchu. W wyniku tego zjawiska następuje wzrost wartości współczynnika tarcia statycznego ze wzrostem czasu trwania nieruchomego styku zmierzając asymptotycznie do wartości stałej, charakterystycznej dla danej pary ciernej.

Do dalszych czynników powodujących, że wartość współczynnika tarcia statycznego w temperaturach normalnych jest większa od wartości współczynnika tarcia kinetycznego /zjawisko to jest wykorzystywane w metodzie badania tych współczynników określonej nazwą "stick-slip"/, należy zaliczyć: wzrost wytrzymałości złącz adhezyjnych, ponieważ ze wzrostem czasu kontaktu intensyfikują się procesy dyfuzji między atomami stykających się powierzchni i wytworzony taki stan naprężeń przez siłę styczną mniejszą od siły rozwiniętego tarcia, który będzie sprzyjał zerwaniu warstewki /warstw tlenkowych/ zanieczyszczeń powodując wzrost tarcia.

Z analizy zjawisk towarzyszących tarciu statycznemu wynika, że tarcie statyczne wyrażone przez współczynnik tarcia jest wieloparametrową funkcją zależną od nacisków jednostkowych, czasu trwania oraz prędkości narastania stycznego obciążenia, temperatury, chropowatości oraz własności fizykomechanicznych powierzchni i innych. Znajomośc charakterystyki tarcia statycznego dla hamulcowych tworzyw ciernych w parze ze stalą jest znikoma, a z uwagi na bezpieczeństwo oraz skuteczność hamowania urządzenia wyciągowego powinna być większa. Z tarciem w hamulcu jest ściśle związane zużycie. Mechanizmy zużycia materiałów trących w hamulcu są różnorodne, ograniczenia ich szuka się w doborze właściwego materiału na tarczę hamulcową, np. ZUT "ZGODA" zastosowały stal stopową konstrukcyjną typu 45G2 o zwiększonej odporności na zużycie i ścieranie, jednak gruboziarnistą o twardości 200 ÷ 220 HB.

Ważne jest zabezpieczenie właściwej jednorodności materiału na całym obwodzie tarczy hamulcowej i wykonanie prawidłowej obróbki mechanicznej powierzchni. Najpowszechniejsze są dwa mechanizmy zużycia: zmęczeniowy i ścierny, mniejsze znaczenie posiadają: zużycie adhezyjne, metalizacja, zużycie korozyjne i niszczenie ciśnieniowe.

2.2. TWORZYWA NA OKŁADZINY CIERNE

W obecnie rozwijanych konstrukcjach hamulców tarczowych stosuje się okładziny z termoutwardzalnych tworzyw typu Galfel, K-5, Becorit, TMW-2. Termoutwardzalne tworzywa wysokocierne stanowią anizotropowy układ - mieszaninę organicznych i nieorganicznych wypełniaczy połączonych lepiszczem kauczukowym, żywicznym i żywiczno-kauczukowym.

Podstawowym wypełniaczem tworzyw, ze względu na wymaganą odporność cieplną przy zachowaniu wysokiej wartości współczynnika tarcia, jest azbest /20 ÷ 40% wagowo/. Czynione są próby, aby powszechnie stosowany azbest zastąpić włóknami szklanymi z uwagi na szkodliwy wpływ azbestu na zdrowie ludzi.

Do innych wypełniaczy należą:
- kauczuk lub guma do utrzymania wysokiej wartości współczynnika tarcia;
- baryt do zmniejszenia skłonności na zacieranie;
- wypełniacz metalowy do zwiększenia współczynnika odprowadzenia ciepła przez przewodzenie i pochłanianie;
- nieorganiczne związki krzemu do polepszenia cierności;
- tlenki metali /np.czerwień żelazowa/ do polepszenia warunków sorpcji, a także przewodnictwa ciepła;
- kaolin do polepszenia odporności cieplnej; przeciwdziała sczepianiu adhezyjnemu tworzyw z metalem w trakcie tarcia, a jednocześnie pozwala utrzymać wysoką wartość współczynnika tarcia.

Wysokocierne tworzywa hamulcowe otrzymuje się poprzez prasowanie w formach pod ciśnieniem 40 MPa w temperaturze około 200^{o}C.

Podstawowe wymagania stawiane materiałom ciernym według danych różnych autorów są następujące: stabilna i wysoka wartość współczynnika tarcia statycznego i kinetycznego w szerokim zakresie temperatur i nacisków; duża odporność na zużycie w szerokim zakresie zmian parametrów tarcia; brak skłonności do sczepień adhezyjnych i nadmiernego przenoszenia materiału z jednej powierzchni ślizgowej na drugą;duża stabilność mechaniczna, chemiczna i termochemiczna, a zwłaszcza struktury i innych własności warstwy wierzchniej w procesie eksploatacji;odporność na korozję i działanie wody , oleju i innych substancji;wysoki punkt topnienia;wysoki współczynnik przewodzenia ciepła;niski współczynnik rozszerzalności cieplnej;duża wartość ciepła właściwego;mała ilość wydzielanych pyłów nieszkodliwych dla zdrowia ludzi /nietoksycznych, nierakotwórczych/;dobra technologiczność /np.obrabialność, mała kruchość i inne/;stosunkowo mała twardość /100÷140 HB/ oraz powtarzalność w długim horyzoncie czasowym produkcji podstawowych właściwości fizykomechanicznych tworzyw.

Przedmiotem badań były pary cierne złożone z przeciwpróbki stalowej /stal St 5/ oraz próbek wykonanych z hamulcowych tworzyw ciernych. Własności tych tworzyw zestawione w tabl.1.

Przeciwpróbki ze stali St 5 wykonano w postaci listew, przy zastosowaniu różnych technologii obróbki skrawaniem. W celu określenia wysokości nierówności na powierzchniach ciernych listwy przebadano na profilografie, a wyniki zamieszczono w tablicy 2.

Przeciwpróbki wyposażono dodatkowo w elementy grzejne, umożliwiające prowadzenie badań w podwyższonych temperaturach. Pomiaru temperatury dokonywano w sposób ciągły, za pomocą termistorowego czujnika temperatury, przylegającego do powierzchni ciernej przeciwpróbki.

Tablica 1

Własności fizykomechaniczne badanych tworzyw ciernych

Nazwa własności	Wielkość	Nr normy	Tworzywa wysokocierne		
			Galfel	K-5	Becorit
Gęstość, kg/m^3	$\varrho_t = \frac{m_1 \cdot \varrho_w}{m_1+m_2-m_3}$	PN-80 / C-89035	2470	2140	
Nasiąkliwość wody, %	$n = \frac{m_2 - m_1}{m_1}$	PN-81 / C-89032	0,51	0,50	
Wytrzymałość na zginanie udarowe bez karbu, kJ/m^2	$a_n = \frac{A_n}{b \cdot h}$	PN-81 / C-89029	42	32	
Twardość, MPa	$HB = \frac{P}{F}$	PN-68 / C-89030	101	108	190
Wytrzymałość na ściskanie, MPa	$R_c = \frac{P}{A}$	PN-68 / C-89031	31	12	
Wytrzymałość na zginanie, MPa	$R_g = \frac{3P \cdot l_p}{2c \cdot h^2}$	PN-79 / C-89027	15	10	
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	$R_r = \frac{P}{A}$	PN-81 / C-89034	13	3,8	

Tablica 2

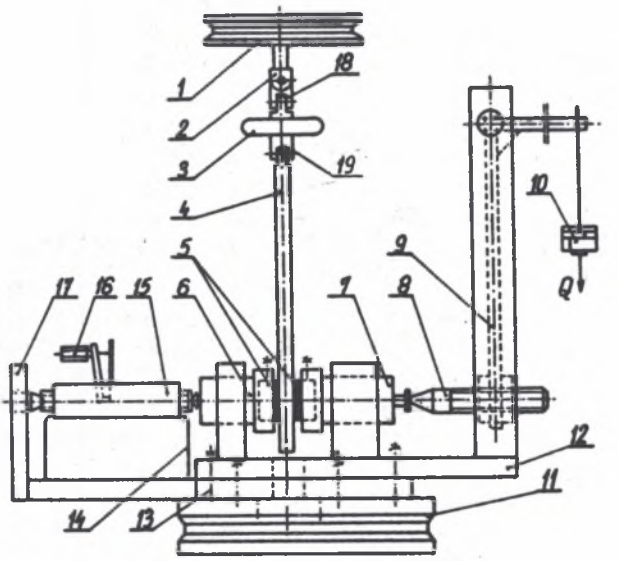
Charakterystyka powierzchni przeciwpróbek

Oznaczenie listwy	R_z^* [μm]	Rodzaj obróbki mechanicznej
L_0	0,90	polerowanie
L_1	4,00	szlifowanie
L_2	10,00	struganie wzdłużne
L_3	19,40	frezowanie
L_4	29,00	szlifowanie zgrubne
L_5	36,00	struganie poprzeczne

*R_z - wysokość nierówności wg dziesięciu punktów profilu - średnia odległość pięciu najwyżej położonych wierzchołków, od pięciu najniżej położonych punktów wgłębień profilu zaobserwowanego na długości odcinka elementarnego, mierzona od linii odniesienia równoległej do linii średniej.

$k = 75 \cdot 10^3$ N/s - współczynnik sprężystości kabłąka,
$V = V_1 \div V_8$ m/s - prędkości posuwu suportu maszyny,
- temperatura powierzchni ciernej: $\vartheta = \vartheta_o = 20 \div 300$ [°C],
- wysokość nierówności powierzchni: $R_z = 0,9 \div 36,4$ [μm],
- czas trwania nieruchomego styku: $t = 3 \div 1250$[s],
- powierzchnia cierna próbki: $F = 2 \cdot 10^{-4}$[m^2].

Szczegółowe warunki badań ustalono w zależności od rodzaju wykonywanego eksperymentu. Wyniki pomiarów zostały ujęte w oscylogramach.



Rys. 8. Schemat stanowiska do badania tarcia statycznego:
1 - głowica pomiarowa, 2 - uchwyt kabłąka, 3 - element sprężysty /kabłąk/, 4 - przeciwpróbka stalowa, 5 - próbki, 6,7 - tłoczki z gniazdami na mocowanie próbek, 8 - bolec dociskowy, 9 - dźwignia, 10 - obciążnik, 11 - poprzeczna belka ruchoma maszyny, 12 - podstawa przyrządu, 13 - śruby mocujące, 14 - podpora kabłąka, 15 - siłomierz kabłąkowy, 16 - czujnik zegarowy, 17 - belka oporowa, 18 - przegub górny, 19 - przegub dolny.

3. STANOWISKO DO BADANIA TARCIA STATYCZNEGO METODĄ "STICK - SLIP"

Pary cierne stosowane w hamulcach maszyn wyciągowych charakteryzują się mniejszym tarciem kinetycznym od tarcia statycznego, zatem w mechanizmach, w których występują te pary cierne, istnieć będzie tendencja do ruchu przerywanego /Stick - Slip/.

Powierzchnie ślizgowe są sczepione ze sobą do chwili, gdy siła wywołująca ruch ślizgowy osiągnie wartość siły tarcia statycznego. Od tej chwili powierzchnie przemieszczają się względem siebie pod działaniem siły tarcia kinetycznego aż do chwili, gdy powtórnie ulegną sczepieniu. Zjawisko to wykorzystano w budowie stanowiska do badania tarcia statycznego /rys.8./. Stanowisko to składa się z :

- przyrządu dwuszczękowego z gniazdami do mocowania próbek,
- przeciwpróbki w kształcie listwy połączonej z elementem sprężystym,
- uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej typu "INSTRON".

Zastosowana w przyrządzie dźwignia 9 pozwala na regulację siły docisku próbek 5 do przeciwpróbki 4 za pomocą obciążnika 10, a tym samym na uzyskanie odpowiedniej wartości nacisku jednostkowego w węźle tarcia. Tłoczki 6 i 7 przyrządu wyposażone są w gniazda do mocowania próbek 5 wykonanych z badanego materiału ciernego. Pomiaru siły dociskającej dokonuje się za pomocą siłomierza kabłąkowego 15. Przeciwpróbka 4 za pośrednictwem kabłąka 3, stanowiącego element sprężysty układu, łącznika 2 oraz przegubów górnego 18 i dolnego 19 , połączona jest z głowicą pomiarową maszyny wytrzymałościowej, służącej do pomiaru siły tarcia. Poprzez zmianę kabłąka 3 można zamodelować dowolną sztywność układu pomiarowego.

Wyposażenie maszyny wytrzymałościowej w urządzenie samopiszące umożliwia ciągłą rejestrację siły tarcia. Dźwigniowy układ dociskania próbek do przeciwpróbki pozwala na wielokrotne powtarzanie pomiarów w tych samych warunkach. Istotą zastosowanej metody badań jest to, że przyjęty prostoliniowy ruch próbek 5 względem przeciwpróbki 4 realizowany jest poprzez wyciąganie metalowej przeciwpróbki /stal St 5/ spomiędzy dwóch próbek umocowanych w gniazdach przyrządu.

Przy wyznaczaniu współczynnika tarcia statycznego wyliczony błąd systematyczny wynosi $\pm$ 2,5% , błąd graniczny 3,5% , a średni błąd kwadratowy - 3%.

W badaniach przedmiotowych tworzyw ciernych stosowano następujące wartości parametrów:

- naciski jednostkowe:

p_1=0,50 MPa; p_2=0,75 MPa; p_3=1,00 MPa; p_4=1,25 MPa; p_5=1,50 MPa; p_6=1,75 MPa; p_7=2,00 MPa;

- prędkości narastania stycznego obciążenia:

$Q_1 = k \cdot V_1 = 75\ 10^{3}\ 0{,}83\ 10^{-6} = 0{,}062$ N/s ; $Q_2 = 2\ Q_1$; $Q_3 = 2\ Q_2$; $Q_4 = 10\ Q_1$; $Q_5 = 10\ Q_2$; $Q_6 = 10\ Q_3$; $Q_7 = 10\ Q_4$; $Q_8 = 10\ Q_5$,

4. OKREŚLENIE WSPÓŁCZYNNIKA TARCIA STATYCZNEGO

Obecny stan wiedzy w dziedzinie tarcia statycznego pozwala na stwierdzenie, że współczynnik tarcia statycznego hamulcowych par ciernych jest wieloparametrową funkcją zależną od : czasu trwania nieruchomego styku, prędkości narastania stycznego obciążenia, sposobu mechanicznej obróbki powierzchni przeciwpróbki, temperatury powierzchni styku oraz nacisków jednostkowych.

Prowadząc badania laboratoryjne współczynnika tarcia statycznego dla tworzyw ciernych o podanych wcześniej własnościach fizykomechanicznych /tworzywo K-5, Galfel, i Becorit/, z wykorzystaniem opisanego w rozdz.3 stanowiska, uzyskano szczegółowe charakterystyki tarcia statycznego w zależności od wymienionych parametrów tarcia. Pozwoli to na wyznaczenie jednoparametrowych funkcji współczynnika tarcia statycznego.

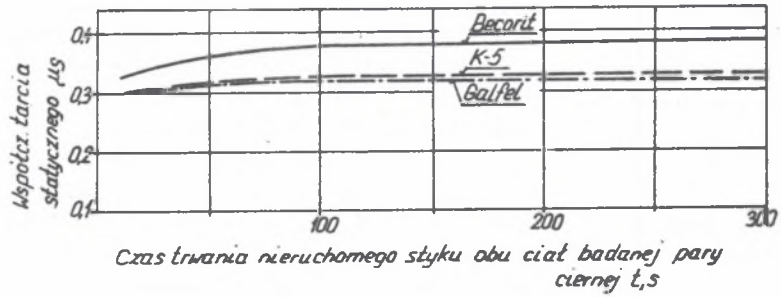
Badania prowadzono według schematu przedstawionego w tablicy 3. Eksperymenty polegały na powtarzaniu pomiarów przy jednym zmiennym parametrze procesu tarcia, przy założonych stałych innych parametrach. Uzyskane wielkości rejestrowano wspólnie na wykresach. Wyniki badań wszystkich par ciernych zestawiono następnie w tablicach, przy czym wartości

Tablica 3

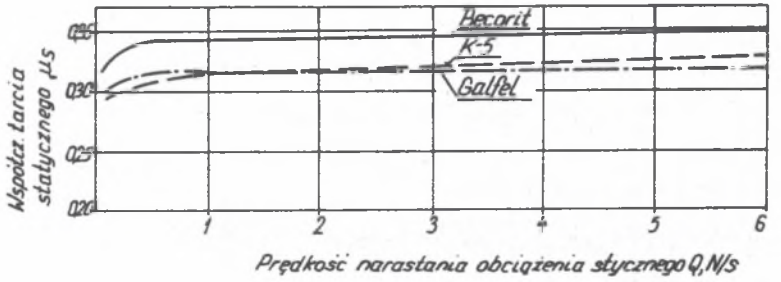
Schemat badań

Wpływ parametrów procesu tarcia na współczynnik tarcia statycznego	Parametry procesu tarcia	
	stałe	zmienne
Wpływ czasu trwania nieruchomego styku t, s	p_3, $R_z(L_o)$, Q_3, ϑ_o,	t
Wpływ prędkości narastania obciążenia stycznego Q, N/s	t=30s, p_3, $R_z(L_o)$, ϑ_o	Q
Wpływ sposobu obróbki mechanicznej powierzchni R_z, µm przeciwpróbki ze stali St5	t=30s, p_3, Q_3, ϑ_o,	R_z
Wpływ temperatury ϑ, °C	p_3, $R_z(L_o)$, Q_3, t=30s,	ϑ
Wpływ nacisków jednostkowych p, MPa	t=30s, $R_z(L_o)$, Q_3, ϑ_o,	p

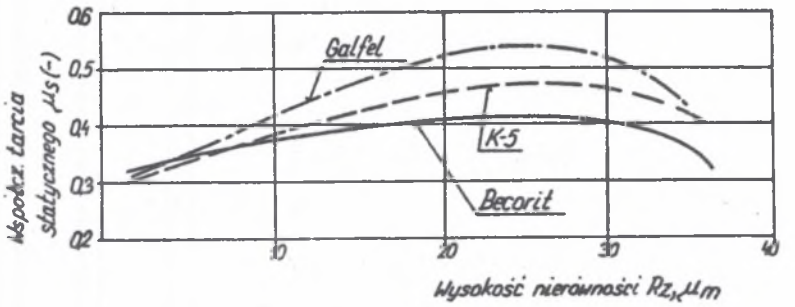
współczynnika tarcia statycznego zestawione w tych tablicach są wartościami średnimi z kilku powtarzanych pomiarów dla tej samej wartości zmiennego parametru procesu tarcia. Aby nie tworzyć nadmiernej ilości tablic, wyniki pomiarów zależności współczynnika tarcia statycznego od zmiennych parametrów tarcia zestawiono na rysunkach.



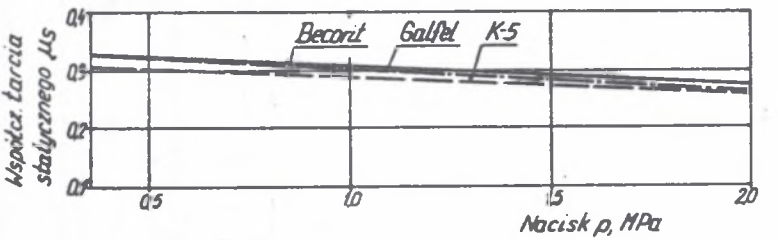
Rys. 9. Wykres zmian współczynnika tarcia statycznego w funkcji czasu trwania nieruchomego styku dla p_3, ϱ_3, L_0, ϑ_0



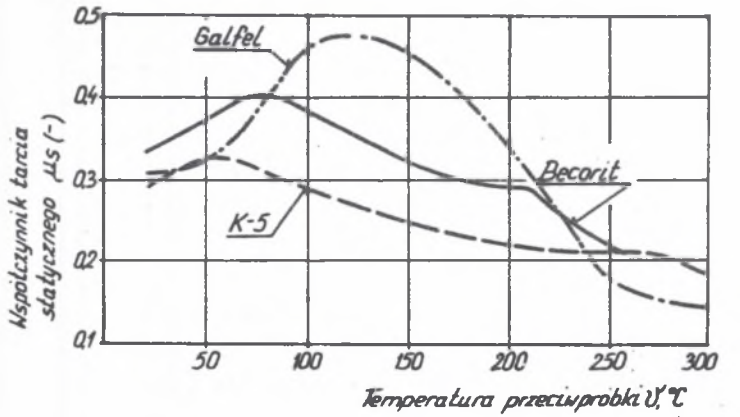
Rys.10. Wykres zmian współczynnika tarcia statycznego w funkcji prędkości narastania obciążenia stycznego dla p_3, ϑ_0, L_0, t=30 s



Rys.11. Wykres zmian współczynnika tarcia statycznego w funkcji wysokości nierówności dla p_3, ϑ_0, Q_3, t=30 s



Rys.12. Wykresy zmian współczynnika tarcia statycznego w funkcji nacisków jednostkowych dla ϑ_0, L_0, Q_3, t=30 s



Rys.13. Wykres zmian współczynnika tarcia statycznego w funkcji temperatury powierzchni przeciwpróbki St5 dla Q_3, p_3, i L_0 oraz określonego czasu nieruchomego styku pary ciernej

Tablica 4

Matematyczny opis współczynnika tarcia statycznego

Postacie jednoparametrowych funkcji współczynnika tarcia statycznego w zależności od	Wartości współczynników dla pary ciernej stal St5 - tworzywo cierne K-5
czasu nieruchomego styku, t, s $\mu_s = \mu_{01} + C_1 \cdot \frac{t}{t + C_2}$	$C_1 = 3,389344 \cdot 10^{-0,2}$ $C_2 = 39,31193$ $\mu_{01} = 0,2922641$
prędkości narastania stycznego obciążenia Q, N/s $\mu_s = \mu_{02} + C_3 \cdot \frac{Q}{Q + C_4}$	$C_3 = 4,161746 \cdot 10^{-2}$ $C_4 = 1,074266$ $\mu_{02} = 0,296454$
sposobu obróbki mechanicznej powierzchni przeciwpróbki R_z, μm, $\mu_s = \mu_{03} \cdot \lvert R_z - r_o \rvert^a$	$a = -0,2499614$ $r_o = 24,67$ $\mu_{03} = 0,7094395$
temperatury ϑ, °C $\mu_s = \mu_{04} \cdot \left[1 - \frac{\vartheta - \vartheta_0}{\vartheta_u - \vartheta_0}\right]^n$	$\vartheta_u = 445$ $\vartheta_0 = 20,00$ $\mu_{04} = 0,3133512$ $n = 0,4798072$
nacisków jednostkowych p, MPa $\mu_s = \mu_{05} \cdot \left[1 - p \cdot \frac{HB_{stali}}{HB_{tw}^2}\right]^d$	$\mu_{05} = 0,3355718$ $d = 0,7094526$ $HB_{stali} = 1660$ MPa $HB_{tw} = 108$ MPa

W celu dokonania najtrafniejszego opisu matematycznego zależności współczynnika tarcia statycznego od czasu trwania nieruchomego styku /rys.9./, dla wszystkich badanych par ciernych wykonano obliczenia wstępne, z których po porównaniu z wynikami pomiarów, okazało się, że najbliższą funkcją opisującą zjawisko wpływu czasu trwania nieruchomego styku na współczynnik tarcia statycznego jest funkcja Derjaguina.

Dla pary ciernej: tworzywo K-5 - stal St 5 obliczono stałe tego równania /patrz tabl.4/. Przy porównaniu wyników eksperymentu z wynikami obliczeń stwierdzono, że błąd względny jest zawarty w przedziale od 0,03 do 1,06%.

Z przebiegu współczynnika tarcia statycznego w zależności od prędkości narastania stycznego obciążenia /rys.10./ wynika , że jest on podobny do przebiegu współczynnika tarcia w funkcji czasu trwania nieruchomego styku, czyli jest rosnący asymptotycznie według zależności Derjaguina /tabl.4/.

Analiza wyników pomiarów /rys.11./ wykazała, że ze wzrostem wysokości nierówności /R_z/ rośnie wartość współczynnika tarcia do pewnego punktu maksymalnego, a następnie dość gwałtownie maleje. Jest to własność charakterystyczna dla wszystkich badanych tworzyw ciernych. Przyjęta funkcja, która nie uwzględnia promienia nierówności powierzchni /tabl.4/, daje w efekcie zwiększone wartości błędu względnego - od 0,83 do 7,11.

Z przeprowadzonej analizy wyników badań /rys.12/ wynika, iż zależność współczynnika tarcia statycznego od nacisków jednostkowych ma charakter malejący ze wzrostem nacisków. Powyższe stwierdzenie dotyczy wszystkich badanych par ciernych. Wpływ nacisków na współczynnik tarcia powiązano w opisie matematycznym z twardością materiałów pary ciernej oraz podkreślono silniejsze oddziaływanie twardości tworzywa ciernego niż stali /tabl.4/.

Przebiegi krzywych zależności współczynnika tarcia statycznego od temperatury powierzchni styku /rys.13./ stwarzają duże trudności w ich opisie matematycznym, wspólnym dla wszystkich par ciernych, uzasadniającym zjawisko fizykalne. Licząc się z większymi błędami względnymi /od 0,2 do 9,5%/ zaproponowano opis matematyczny podany w tabl.4.

Badania wykazały złożoność zjawiska tarcia statycznego oraz istotny wpływ parametrów t, Q, p, a zwłaszcza R_z i ϑ na współczynniki tarcia.

5. UWAGI KOŃCOWE

Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że natura tarcia statycznego badanych skojarzeń ma głęboko lepko-sprężysty charakter. Zachodzący w strefie obciążonego kontaktu proces pełzania prowadzi do zwiększenia rzeczywistej powierzchni styku, kontaktowych deformacji, zmiany przewodności cieplnej i innych parametrów.

Rzeczywista powierzchnia styku po upływie czasu t może być określona własnościami materiału oraz wartością nacisku jednostkowego. Omówione powyżej zmiany rzeczywistej powierzchni styku zachodzą przy jednokierunkowym obciążeniu strefy styku, tzn. siłą normalną.

Zastosowanie stycznego obciążenia do styku już obciążonego siłą normalną również powoduje wzrost rzeczywistej powierzchni kontaktu. W przypadku jednoczesnego obciążenia pary ciernej siłą normalną i styczną mamy do czynienia ze stanem dwukierunkowego pełzania. Kontaktowe pełzanie zachodzi w temperaturze otoczenia, a szczególna intensyfikacja tego procesu widoczna jest w podwyższonych temperaturach. Wskutek długotrwałego oddziaływania nacisków zwiększa się pole rzeczywistej powierzchni styku. Zmienia się następnie geometryczna charakterystyka styku, w czym duży udział ma wzrost wzajemnych wgłębień elementów dociśniętych ciał, zwłaszcza w przypadku nierównomiernej twardości ich podpowierzchniowych warstw. Zmiany te prowadzą do wzrostu współczynnika tarcia statycznego. Długotrwały styk powiększa obszary plastycznych odkształceń, sprzyja wzrostowi adhezji i rozwijaniu się sczepień. Według Derjaguina wzrost połączeń przy długotrwałym styku jest spowodowany ruchliwością powierzchniowych atomów, migrujących wzdłuż powierzchni w kierunku obszarów styku i tworzących tam pomosty między obu ciałami.

Wpływ prędkości narastania stycznego obciążenia bezpośrednio przed zerwaniem styku na wartość rozwiniętej siły tarcia statycznego, związany jest prawdopodobnie z umocnieniem strefy styku w wyniku występującej dynamiki obciążeń stycznych.

Do fizycznej interpretacji zjawiska oraz opracowania kompleksowej charakterystyki tarcia statycznego współpracujących elementów ciernych należy uwzględnić także: stałe materiałowe w różnych temperaturach, charakterystyki reologiczne w stacjonarnych i niestacjonarnych warunkach obciążeń i temperatury oraz charakterystyki dynamiczne materiałów.

W dalszym etapie pracy przewiduje się przeprowadzenie cyklu badań w celu ujęcia współczynnika tarcia statycznego w formie wieloparametrowej funkcji zależnej od : t, $\dot{q}$, R_z, p, ϑ,. Przy czym uważa się, że do celów praktycznych można ograniczyć się do charakterystyki współczynnika tarcia statycznego zależnej od parametrów p, R_z, i ϑ przy założeniu stałych wartości t i $\dot{q}$.

Wnioski z badań są następujące:

1. Zaprojektowane stanowisko badawcze oparte na metodzie stick-slip dobrze nadaje się do badania tarcia statycznego.
2. Współczynnik tarcia statycznego hamulcowych par ciernych jest wieloparametrową funkcją: t, $\dot{q}$, R_z, ϑ, p.
3. Wartość współczynnika tarcia statycznego rośnie ze wzrostem czasu trwania nieruchomego styku oraz prędkości narastania stycznego obciążenia, dążąc asymptotycznie do wartości stałej charakterystycznej dla danej pary ciernej.

Prędkość narastania stycznego obciążenia oraz czas trwania nieruchomego

mego styku są parametrami współzależnymi i tworzą tak zwany "sposób" narastania stycznego obciążenia od chwili nawiązania do momentu zerwania styku.

4. Duży wpływ na zmianę współczynnika tarcia statycznego ma sposób obróbki mechanicznej powierzchni ciernej przeciwpróbki wyrażony przez wysokość i promień nierówności. Istnieje graniczna wartość wysokości nierówności wynosząca około 25 μm na powierzchni przeciwpróbki, po przekroczeniu której następuje spadek wartości współczynnika tarcia statycznego. Odpowiada ona przedziałowi pomiędzy zgrubnym szlifowaniem a frezowaniem. Najniższą wartość współczynnika tarcia wykazują powierzchnie polerowane.
5. Wpływ temperatury na współczynnik tarcia statycznego jest bardzo istotny i zróżnicowany dla badanych par ciernych. Każda para cierna charakteryzuje się temperaturą, przy której współczynnik tarcia osiąga wartość maksymalną, oraz temperaturą, której przekroczenie powoduje całkowitą utratę własności ciernych.
6. Dla wszystkich badanych par ciernych potwierdzono malejący wpływ wzrostu nacisków jednostkowych na wartość współczynnika tarcia statycznego.
7. Otrzymane na podstawie badań wyniki pozwalają na matematyczne sformułowanie jednoparametrowych funkcji ujmujących wpływ poszczególnych parametrów na współczynnik tarcia statycznego.

LITERATURA

[1] Antoniak J., Carbogno A., Jankowski A. : Własności eksploatacyjne, sposób prasowania oraz skład nowych okładzin ciernych typu TMW-2 zastosowanych w hamulcach tarczowych maszyn wyciągowych. Vedecka Konference k 40 Vyroci Založeni Fakulty Strojni a Elektrotechnicke. Ostrava 1990.

[2] Antoniak J., Jankowski A. : Prognozowanie warunków termicznych w hamulcach tarczowych maszyn wyciągowych. Międzynarodowe Seminarium "Technika Transportu Szybowego". Zeszyty Naukowe Pol. Śl. s. Górnictwo w druku.

[3] Coetzee I.C. : Odkształcenie termiczne tarczy hamulcowych dużych wyciągów bębnowych. Int. Conf. on Hoisting. Canada 1988.

[4] Derkaczew A. : Procesy tarcia i zużycia w wysoko obciążonym hamulcu lotniczym. Technika Lotnicza i Astronautyka 1983, nr 9,

[5] Fritzson D. : Friction of elastomer composites influence of surface temperature, sliding speed and pressure. Wear, 139/1990.

[6] Jankowski A., Antoniak J., Ścieszka S., Leszczyńska G., Hudzik M. : Maszyny wyciągowe - okładziny cierne do hamulców tarczowych - BN - 88/1727 - 31.

[7] Jankowski A. : Badanie procesu tarcia statycznego w hamulcach tarczowych górniczych maszyn wyciągowych. Praca doktorska.Politechnika Śląska, Gliwice 1991.
[8] Kragielskij I.V. : Trenie i iznos. Izd.Nauka, Moskwa 1965, .
[9] Miszczyk I., Read C. : Analysis and design of mine winder drums. The South African Mechanical Engineering 1989, october.
[10] Moore D.F. : Principles and Applications of Tribology. Pergamon Press, Oxford 1975.
[11] Newcomb T., Spurr R. : Breaking of Road Vehicles. Chapman and Hall, London 1967.
[12] Rabinowicz E. : The Nature of Static and Kinetic Coefficients of Friction. Journal of Applied Physics, nr 12 vol.222, 1951.
[13] Richardson R.S., Nolle H. : Surface Friction Under Timedependent Loads. Wear, 37/1976.
[14] Ścieszka S. : Problemy hamowania maszyn wyciągowych. Studium ważniejszych zjawisk tribologicznych w parze ciernej tworzywo hamulcowe - stal. Zeszyty Naukowe Pol.Śl., s.Górnictwo, z. 75/484, Gliwice 1976.
[15] Tiley G.L. : Własności termiczne hamulców wyciągów szybowych. Int. Conf. on Hoisting Canada 1988.
[16] Wilson R.A. : Some important aspects in the application of disc brake technology to mine hoists. Int. Conf. on Hoisting, Canada 1988.

Recenzent: Doc.dr inż. Tadeusz Zmysłowski

Wpłynęło do Redakcji w październiku 1991 r.

DISC BREAK FRICTIONAL LINING e INVESTIGATIONS On THE COEFFICIENT OF STATIC FRICTION

Summary. In the work the tribological proprieties of materials of disc break frictional lining with taking under consideration the problems of thermical changes occuring during emergency breaking have been discussed. The importance of statical friction of this type of lining materials as well as the stand for investigations of statical frictinn with the stick - slip method have been studied. The received results of the statical friction coefficient for a pair : disc material steel St 5 - frictional lining K - 5 type have been given.

ТОРМОЗНЫЕ ФРИКЦИОННЫЕ ДИСКИ - ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СТАТИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ.

Р е з ю м е

В работе представлены трибологические требования, которые предъявляются к материалам, предназначенным для фрикционных дисков с учетом термических проблем, сопутствующих интенсивным тормозным процессам. Обращается внимание на то, как важно знать статическое трение этого типа материалов. Описывается стенд для исследования статического трения методом " stick-slip ". Даны результаты исследования коэффициента статического трения для фрикционной пары: фрикционный материал - сталь St 5 .