

Stanisław KRAWIEC*, Michał KRAWIEC**, Tadeusz LEŚNIEWSKI*

ANALIZA WPLYWU RODZAJU STYKU W WĘZLE ŚLIZGOWYM NA OCENĘ EFEKTYWNOŚCI SMAROWANIA

AN ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE TYPE OF CONTACT IN A SLIDING NODE RELATED TO THE ESTIMATION OF LUBRICATION EFFICIENCY

Słowa kluczowe:

smary plastyczne, efektywność smarowania, rodzaj styku

Key words:

gease, lubrication efficiency, type of contact

Streszczenie

Przedstawiono badania wpływu rodzaju styku w węźle ślizgowym na ocenę efektywności smarowania smarami plastycznymi stalowych węzłów ślizgowych pracujących przy tarcu mieszanym. Badania tribologiczne prowadzono na dwóch tribometrach: aparacie czterokulowym (styk punktowy) oraz na maszynie wahadłowej z łożyskiem ślizgowym (styk rozłożony). Badane skojarzenia smarowano czterema rodzajami smaru: smarem Litomos EP-25, samochodo-

* Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

** Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu, Wydział Inżynierjno-Ekonomiczny, Instytut Chemii i Technologii Żywności, ul. Komandorska 118/120, 53-345 Wrocław.

wym 1S oraz dwiema kompozycjami sporządzonymi na bazie smaru 1S, tj. zawierającymi 6% proszku miedzi lub 6% proszku PTFE. W testach realizowanych na aparacie czterokulowym, efektywność smarowania oceniano według dwóch kryteriów – zużycia kulek d i obciążenia granicznego F_g . W badaniach przy styku rozłożonym (maszyna wahadłowa) kryteriami oceny efektywności smarowania było obciążenie graniczne F_g oraz sumaryczne zużycie (liniowe) czopa i panwi. Wyniki eksperymentu zostały opracowane statystycznie dla poziomu ufności 95%, stosując test t-Studenta.

WPROWADZENIE

Niezawodność działania, trwałość i sprawność maszyn w dużym stopniu zależą od funkcjonowania zespołów ślizgowych takich jak łożyska, prowadnice, przeguby itp. W pojazdach i maszynach roboczych zespoły te z powodu ruchu wahadłowego lub posuwisto-zwrotnego pracują ciągle przy tarcia mieszanym. Udział tarcia granicznego i suchego w procesie tarcia mieszanego powoduje, że w węzłach działających w tym obszarze tarcia występuje wzrost strat energetycznych oraz zużycia współpracujących elementów. Może także występować zawodność zespołów spowodowana możliwością zatarcia. Brak przy obecnym stanie wiedzy tribologicznej ogólnego matematycznego modelu tarcia mieszanego powoduje, że nie można teoretycznie przewidzieć zespołu oddziaływań pomiędzy elementami systemu tribomechanicznego. Znalezienie wzajemnych relacji w tym systemie jest możliwe tylko na drodze eksperymentalnej. W dziesiątkach laboratoriów tribologicznych na świecie wyposażonych w bardzo nowoczesną aparaturę do identyfikowania zjawisk zachodzących na powierzchni styku współpracujących materiałów prowadzi się badania nad minimalizacją skutków tarcia, głównie oporów i zużycia. Jak wiadomo, minimalizację tych skutków tarcia można realizować dwiema metodami, tj. przez:

1. Stosowanie smaru, który będzie tworzył w procesie tarcia wtórne struktury zapewniające istnienie metastabilnego stanu w szerokim zakresie parametrów wymuszeń (nacisku i prędkości poślizgu), przy równoczesnym spełnieniu warunku istnienia minimum tarcia i zużycia;
2. Modyfikację powierzchni skojarzonych materiałów takimi sposobami, że w procesie tarcia będą powstawały wtórne struktury o właściwościach zapewniających minimalne tarcie i minimalne zużycie.

Metoda druga, tj. modyfikacji warstwy wierzchniej współpracujących powierzchni, jest na ogół mało efektywna, gdyż nie ma możliwości jej regenerowania w czasie eksploatacji węzła ślizgowego. Również spełnienie tego warunku poprzez dobór optymalnej struktury współpracujących powierzchni jest na poziomie obecnego rozwoju nauki mało efektywne. Przykładowo zwiększenie twardości współpracujących powierzchni powyżej 70 HRC jest barierą trudną do pokonania. Problemu tego nie ma przy stosowaniu smaru. Dlatego też metoda stosowania odpowiedniego smaru jest powszechnie stosowana przy

sterowaniu procesami tarcia i zużycia w ślizgowych węzłach mechanizmów i maszyn. Skuteczność działania tej metody jest w literaturze określana jako efektywność smarowania [L. 1]. Aktualnie podstawowym tribometrem stosowanym do oceny efektywności smarów przeznaczonych do smarowania węzłów ślizgowych działających przy tarcii mieszanej jest aparat czterokulowy. Jego użycie jest całkowicie uzasadnione, gdyż styk punktowy, jaki ma miejsce w tym testerze, sprawia, że smar jest testowany w ekstremalnych warunkach. Ponadto nieduży stosunkowo koszt próbek (kulek), duża powtarzalność wyników, krótki czas trwania prób oraz standaryzacja metod badawczych to dodatkowe atuty realizacji badań na tym tribometrze. Brak w literaturze tribologicznej informacji na temat, w jakim stopniu dokonana ocena efektywności smarowania na podstawie wyników testów z aparatu czterokulowego może być uogólniona na rzeczywiste węzły ślizgowe był inspiracją do przeprowadzenia stosownych badań. Wyniki zrealizowanych eksperymentów pozwoliły poszerzyć wiedzę na temat zaistniałego problemu.

METODA I WARUNKI BADAŃ

Badania wykonano na dwóch tribometrach, tj. aparacie czterokulowym oraz na maszynie łożyskowej o ruchu wahadłowym [L. 3]. Ruch wahadłowy stwarza najmniej korzystne warunki smarowania węzłowi ślizgowemu (w punktach zmiany kierunku ruchu prędkość poślizgu wynosi zero) i zapewnia pracę w obszarze tarcia mieszane. Można zatem uznać, że próby te, podobnie jak na aparacie czterokulowym, były realizowane w ekstremalnych warunkach pracy zespołu ślizgowego. Łożyskiem była tulejka o średnicy 40 mm i takiej samej długości. Pozostałe cechy geometryczne badanego skojarzenia przedstawiono na **Rys. 1**.

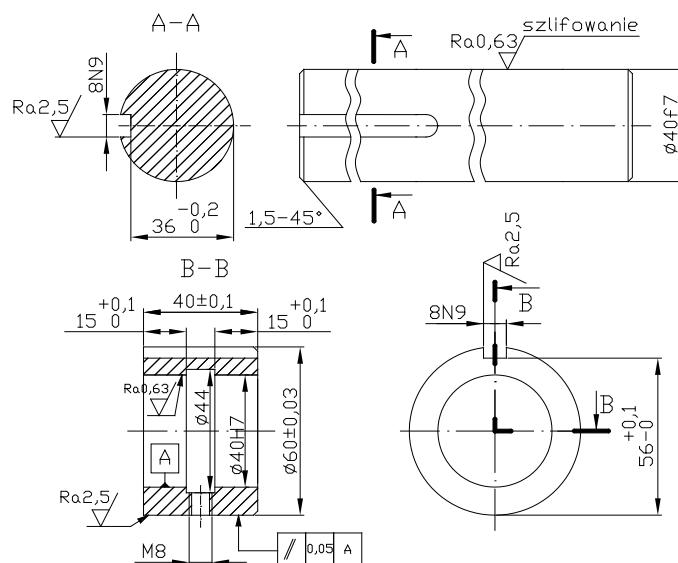
Stosowano luz łożyskowy $L = 0,006$ mm. Badania ruchowe wykonano przy stałej średniej prędkości poślizgu $v_{sr} = 18$ mm/s oraz całkowitym kącie wychylenia czopa względem panwi $\beta = 150^\circ$. Ponadto wielkościami stałymi w czasie badań były: mikrogeometria czopa i panwi, materiał czopa oraz cechy konstrukcyjne badanego łożyska, tj. średnica, długość, luz łożyskowy. Parametrem zmiennym był smar.

Próby prowadzono na dwóch etapach, tj. docieranie łożyska i badania właściwe.

Warunki dotarcia ustalono eksperymentalnie według przyjętego kryterium dotarcia. Tym kryterium była zmiana chropowatości powierzchni czopa i panwi oraz stopień ich przylegania. Założono, że badane łożyska są dotarte, jeżeli wystąpi całkowite przyleganie współpracujących powierzchni oraz ich chropowatość w dalszym ruchu ulega już tylko nieznacznej zmianie. Przyleganie oceniano na podstawie wyglądu powierzchni roboczych łożyska, a zmianę chropowatości za pomocą parametru Rz określanego z profilogramów. Wielkością pomocniczą podczas badań wstępnych nad docieraniem był moment tarcia. Jego stabilizacja

była sygnałem kończenia się procesu docierania w danych warunkach. Docieranie prowadzono przy stałej średniej prędkości poślizgu ($v = 18 \text{ mm/s}$) i zmiennym obciążeniu. W wyniku wielokrotnych prób ustalono następujący program docierania: po 2 godziny kolejno przy obciążeniu 2, 4, 6 i 8 MPa. W tym ośmiogodzinnym okresie docierania współpracujące powierzchnie obficie smarowano w odstępach co 30 minut. Po okresie dotarcia łożysko jednokrotnie smarowano odpowiednim smarem i prowadzono test aż do chwili pojawienia się oznak tarcia patologicznego, tj. do chwili wystąpienia niestabilnego przebiegu momentu tarcia, połączonego z gwałtownym wzrostem jego wartości. W czasie wyznaczenia charakterystyki $\mu = f(p)$ zwiększano skokowo nacisk jednostkowy każdorazowo o 4 MPa co 60 minut. Badane smary doprowadzano na powierzchnie ślizgowe za pomocą ręcznej pompy smarowniczej, poprzez smarowniczkę zaworową wkręconą w otwór wykonany promieniowo w środku szerokości badanej panewki. Wewnątrz łożyska smar był rozprowadzany rowkiem obwodowym o szerokości 10 mm i głębokości 2 mm. W czasie badań mierzono i rejestrowano moment tarcia oraz temperaturę warstwy wierzchniej panwi. Moment tarcia mierzono za pomocą momentomierza z tulejką skrętną. Układ pomiarowy stanowiły:

- cztery czujniki tensometryczne naklejone na tulejkę w układzie pełnego mostka,
- mostek tensometryczny,
- urządzenie pomiarowe i rejestrujące.



Rys. 1. Kształt i wymiary badanego łożyska
Fig. 1. Shape and dimensions of tested bearing

Do pomiaru temperatury panwi zastosowano termoelement żelazo-konstantan, który był umieszczony w odległości około 0,2 mm od powierzchni styku. Wartość temperatury odczytywano z rejestratora. Ponieważ, w pierwszych seriach badań okazało się, że temperatura w badanych skojarzeniach jest niewysoka – maksymalnie osiągała 608°C – w następnych seriach zrezygnowano z ciągłego pomiaru, dokonując tylko wrywkowej kontroli za pomocą termometru termistorowego przykładanego do czoła panwi w strefie maksymalnych nacisków. Współczynnik tarcia obliczano z wartości momentu tarcia mierzonego w czasie zmiany kierunku obrotu czopa. To tłumaczy stosunkowo duże wartości tarcia zmierzone podczas badań. Zużycie czopa i panwi określano liniowo, odpowiednio jako ubytek lub przyrost ich średnicy po zakończeniu badań. Średnice te mierzono na długościomierzu Abbego (poziomym lub pionowym) z dokładnością do 0,0005 mm. Próby zużycia trwały 50 h i były prowadzone przy obciążeniu 26 MPa. W czasie prób zużyciowych łożyska były dosmarowywane po 20 i 40 h pracy.

Badania przy styku skoncentrowanym (w układzie kulka–kulka) były prowadzone na standardowym aparacie czterokulowym, produkcji Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu, z zastosowaniem wytycznych normy PN-76/C-04147 „Badanie własności smarnych olejów i smarów”. Do oceny efektywności badanych smarów przyjęto dwa kryteria: zużycie i odporność na zatarcie, mierzone wartością największego nacisku nie powodującego jeszcze zatarcia łożyska, nazywanym obciążeniem granicznym F_g [L. 1]. Na wykresach przedstawiających zależność zużycia kulek od obciążenia nadanego $d = f(F)$ lub współczynnika tarcia w funkcji nacisku obliczeniowego $\mu = f(p)$, wartość obciążenia F_g ilustruje ostatni punkt linii ciągłej wykresu funkcji. Pomiaru zużycia kulek (średnicy skaz) dokonywano w kierunku równoległym i prostopadłym do śladu zużycia.

Z uwagi na to, że realizacja badań na maszynie wahadłowej wymagała bardzo dużego nakładu zarówno środków, jak i czasu, dlatego przeprowadzono je z użyciem tylko czterech gatunków smarów, tj.: smaru samochodowego 1S, Litomосу EP-25, kompozycji smaru 1S z 6% proszku PTFE oraz kompozycji smaru 1S z 6% proszku miedzi.

Wszystkie próby powtarzano zawsze pięciokrotnie. Wyniki eksperymentu opracowano statystycznie dla poziomu ufności 95%, stosując test t-Studenta.

MATERIAŁY I ICH KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA

Do badań zastosowano następujące materiały:

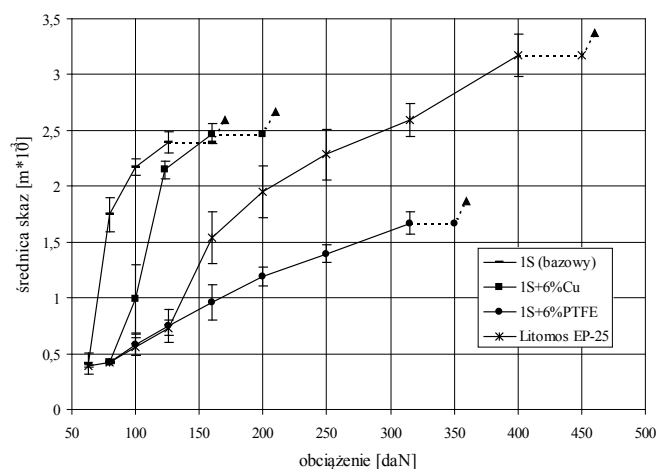
1. Stal 45 normalizowana do twardości $HV_{30} \sim 200$. Przyjęcie tej stali wynikało stąd, że jest ona używana zarówno w praktyce konstruktorskiej, jak i w badaniach tribologicznych jako materiał na węzły ślizgowe. Według [L. 2] jest to stal o średniej odporności na zatarcie.

2. Kulki łożyskowe ze stali LH15 o średnicy 12,7 mm wykonane w 16 klasie dokładności i grupie wymiarowej S = 0 μm . Pozostałe cechy kulek były zgodne z normą PN-83/M-86452.
3. Smar samochodowy 1S – wysokiej jakości smar litowy na bazie hydroksystearynianu litu oraz oleju mineralnego o lepkości rzędu 60–79 mm^2/s przy 40°C. Zawiera on w swoim składzie hydroksystearynian litu jako zagęszczacz oraz trzy dodatki uszlachetniające – inhibitory utleniania i korozji oraz dodatek adhezyjny. Przeznaczony jest do smarowania przegubów głównego wału napędowego oraz innych samochodowych węzłów ślizgowych.
4. Kompozycja smaru 1S+6% proszku miedzi o granulacji do 40 μm . Proszek miedzi jest często stosowany w badaniach tribologicznych jako metaliczny napełniacz smarów plastycznych. Według [L. 4] stężenie 6% miedzi jest optymalnym ze względu na efektywność smarowania stalowych łożysk ślizgowych.
5. Kompozycja smaru 1S+6% proszku PTFE o granulacji 20 do 40 μm . Kompozycja ta w badaniach realizowanych na aparacie czterokulowym wykazuje największą efektywność smarowania wśród kompozycji z jednym napełniaczem [L. 5].
6. Litomos EP-25 jest smarem do wysokoobciążonych węzłów tarcia. Jest on wytwarzany na bazie oleju mineralnego, zawiera dodatki o działaniu przeciwtleniającym i przeciwkorozyjnym, dodatek EP oraz 4–5% dwusiarczku molibdenu. Przeznaczony jest do smarowania przegubów homokinetycznych i kulowych, cięgieł, sworzni, złącz, łożysk ślizgowych i tocznych. Według [L. 9] jest on jednym z najlepszych krajowych produktów smarowych do smarowania węzłów ślizgowych pracujących w warunkach tarcia mieszanego.

WYNIKI BADAŃ

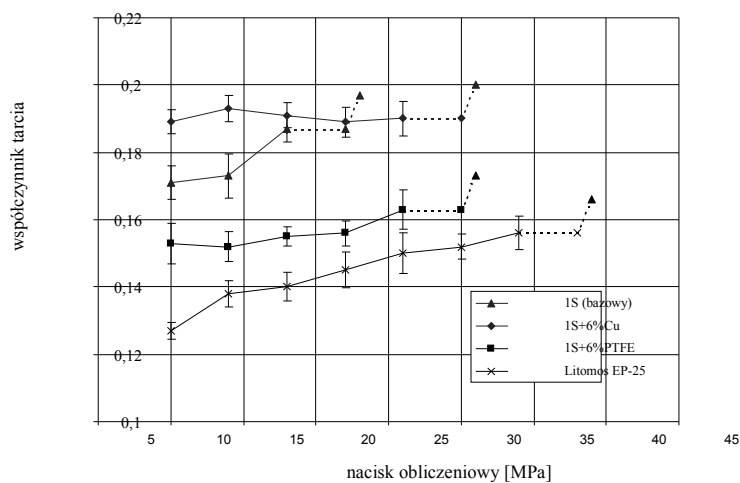
Zestawienie uzyskanych na aparacie czterokulowym wyników badań w postaci zależności zużycia kulek od obciążenia dla analizowanych smarów plastycznych przedstawiono na **Rys. 2**. Zaś wyniki (zależność współczynnika tarcia od obliczeniowego nacisku średniego oraz wartość obciążenia zatarcia) z badania tych samych smarów na łożysku (maszyna wahadłowa) zilustrowano na **Rys. 3**. Początki wektorów narysowane linią kreskową skośną wskazują nacisk, przy którym łożysko ulegało zatarciu (**Rys. 3**) lub obciążenie, przy którym następowało zespawanie kulek (**Rys. 2**). Wartości sumarycznego zużycia czopa i panwi badanych łożysk przedstawiono na **Rys. 4**. Pokazane na tym rysunku zużycie łożysk smarowanych smarem 1S zostało określone przy nacisku 14 MPa, gdyż nie wytrzymały one nacisku 26 MPa, przy którym badano pozostałe smary. Obniżenie nacisku do 14 MPa dla wszystkich czterech smarów wymagało znacznego wydłużenia czasu prób, aby uzyskać mierzalne wartości zużycia przy

smarowaniu najlepszym smarem. To zaś, z uwagi na konieczność pięciokrotnego powtórzenia każdej próby, było nie do wykonania.



Rys. 2. Wyniki badania smarów na aparacie czterokulowym

Fig. 2. Results of tests of greases carried out using four-ball tester



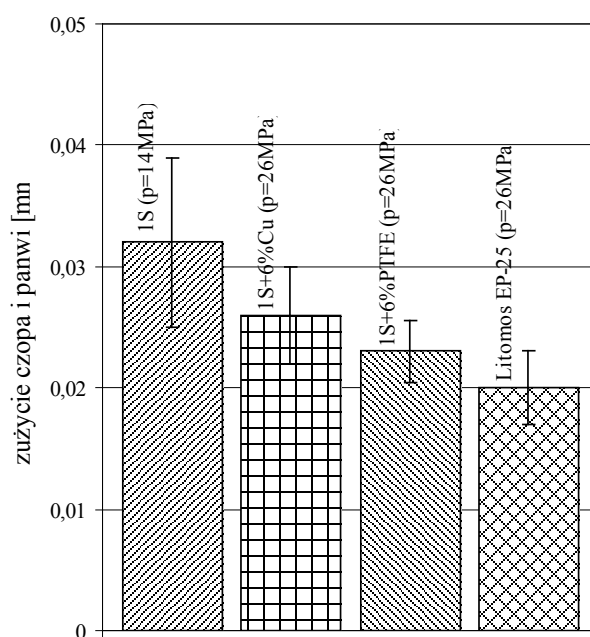
Rys. 3. Wyniki badania smarów na maszynie wahadłowej (na łożysku)

Fig. 3. Results of tests of greases carried out using oscillatory machine (sliding bearing)

Analizując uzyskane charakterystyki tribologiczne widać, że pozwalają one podobnie oceniać efektywność smarowania analizowanych smarów niezależnie od tego, czy były otrzymane w testach na węźle ślizgowym ze stykiem skoncentrowanym czy ze stykiem rozłożonym. Porównanie otrzymanych przy styku skoncentrowanym wartości obciążenia granicznego i zużycia kulek przy obciążeniu

zeniu 126 daN pozwala uszeregować badane smary według rosnącej efektywności smarowania następująco: smar 1S, kompozycja smaru 1S + 6% miedzi, kompozycja 1S+6% PTFE oraz smar Litomos EP-25. Zmierzone wartości wielkości kryterialnych odpowiadające przedstawionej kolejności rosnącego wzrostu efektywności smarowania tymi smarami wynoszą:

- obciążenie graniczne F_g : 126; 160; 315; 400 daN,
- zużycie przy obciążeniu 126 daN: 2,4; 2,1; 0,75; 0,72 mm.



Rys. 4. Zużycie badanych łożysk na maszynie wahadłowej

Fig. 4. Wear of tested sliding bearings on oscillatory machine

Podobną kolejność wzrostu efektywności smarowania badanymi smarami uzyskuje się na podstawie wyników uzyskanych przy styku rozłożonym. W tym wypadku wielkości kryterialne dla wymienionego szeregu mają wartość:

- sumaryczne zużycie czopa i panwi: 0,032; 0,026; 0,023; 0,02 mm,
- obciążenie graniczne F_g : 18; 26; 26; 34 MPa.

PODSUMOWANIE

Podsumowując wyniki badań w styku rozłożonym (na łożysku ślizgowym), można twierdzić, że wyniki badań w styku skoncentrowanym (na aparacie czterokulowym) w zasadzie mogą służyć do oceny jakościowej smarów ze względu na skuteczność ich działania według kryterium obciążenia zatarcia i wielkości zużycia. Smar 1S, wykazujący na aparacie czterokulowym największe zużycie

kulek, potwierdził to w łożysku, pomimo że pracowało ono przy nacisku prawie o połowę mniejszym (14 MPa) w stosunku do pozostałych smarów (26 MPa). Podobnie Litomos EP-25 niezależnie od rodzaju styku wykazał największe obciążenie zatarcia. Należy podkreślić, że uogólnienie tego poglądu wymaga potwierdzenia go w eksperymentach przeprowadzonych w możliwie szerokim obszarze wartości obu parametrów wymuszeń, tj. nacisku i prędkości poślizgu.

LITERATURA

1. Krawiec S.: Kompozycje smarów plastycznych i stałych w procesie tarcia stalowych węzłów maszyn, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2011.
2. Krawiec S., Lawrowski Z.: Polepszenie właściwości smarnych smarów plastycznych za pomocą smarów stałych, Prace Naukowe IKiEM Politechniki Wrocławskiej nr 78, Seria konferencje nr 24, Projektowanie i badanie maszyn – kierunki rozwoju, Wrocław 1995, s. 106–110.
3. Krawiec S., Lawrowski Z.: Efektywność smarowania wysokoobciążonych łożysk ślizgowych kompozycjami grafitowymi. Technika Smarownicza, Tribologia, Nr 1, 1979, s. 9–14.
4. Krawiec S.: Analiza wpływu stężenia proszku miedzi w litowym smarze plastycznym na efektywność smarowania skojarzeń stalowych. Tribologia nr 3/2008 (219), s. 47–56.
5. Krawiec S.: Wpływ rodzaju napelnacza w smarze plastycznym na efektywność smarowania w stalowych skojarzeniach ślizgowych. Tribologia nr 2/2009 (224), s. 53–61.
6. Lawrowski Z., Krawiec S., Capanidis D.: Podstawy optymalnego doboru materiałów i smarów na węzły ślizgowe pracujące w warunkach tarcia mieszanego. Raport serii Sprawozdania nr S-92/98, Wrocław 1998.

Summary

The paper presents experimental work on the influence of the type of contact in a sliding node related to the estimation of lubrication efficiency using greases working in a mixed lubrication area. Investigations were carried out using two testers: a standard four-ball extreme pressure tester (point contact) and an oscillatory machine with sliding bearing (splitting contact). Investigated nodes were lubricated with four kinds of greases: Litomos EP-25 grease, automobile grease 1S, and two compositions based on grease 1S containing 6 wt% powder of cooper or 6 wt% powder of PTFE. In tests carried out on four-ball tester, the effectiveness of the lubrication was evaluated according to two criteria: the ball wear, d , and the limiting load, F_g . In tests carried out on splitting contact (oscillatory machine), criterion of lubrication efficiency were the limiting load, F_g , and the total wear (linear) of pin and pan. The experimental results were statistically processed at a confidence level of 95% using Student's t-test.

