ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Seria: GÓRNICTWO z. 54 Nr kol. 355

Dr inż. Bronisław Folwarczny
Mgr inż. Jacek Spałek

BADANIA TARCIA POWIERZCHNI SMAROWANYCH SMARAMI PLASTYCZNYMI Z DODATKIEM DWUSIARCZKU MOLIBDENU

Streszczenie. Przeprowadzono badania zjawiska tarcia powierzchni smarowanych plastycznymi smarami molibdenowymi produkcji krajowej i zagranicznej. Wyznaczono współczynniki tarcia w funkcji obciążenia, określono odporność termiczną smarów oraz ich działanie korozyjne na elementy stalowe. Otrzymane wyniki wykorzystano dla określenia przydatności eksploatacyjnej badanych smarów.

Wstęp

Zwiększenie żywotności elementów maszyn, a przede wszystkim zmniejszenie ich zużycia wskutek tarcia skłania do poszukiwań nowych materiałów konstrukcyjnych, a w tym i nowych smarów. Poszukiwania idą w kierunku znalezienia niskotarciowych smarów o wysokiej odporności na naciski powierzchniowe oraz wysokie temperatury pracy elementów smarowanych. Równocześnie smary te powinny posiadać dobre własności antykorozyjne. Z analizy dostępnej literatury wynika, że stosunkowo mało prac poświęconych jest zagadnieniu tarcia i zużycia powierzchni smarowanych smarami plastycznymi. Przy małych prędkościach ruchu i dużych obciążeniach elementów maszyn nie ma warunków tarcia płynnego pomiędzy powierzchniami smarowanymi olejami. Zastosowanie w tym przypadku smaru plastycznego z dodatkiem substancji o budowie płytkowej jak: grafit, dwusiarczek molibdenu, dwusiarczek wolframu może zabezpieczyć bezzużyciowe warunki pracy części maszynowych. Smary z wymienionymi dodatkami charakteryzują się wysoką odpornością na naciski i wysokie temperatury. Ważną zaletą tych smarów jest również zabezpieczenie węzłów tarcia przed wpływem środowiska, tj. wilgoci i zapylenia oraz korozją elementów stalowych. Zagadnienie to nabiera szczególnej wagi przy smarowaniu maszyn i urządzeń górniczych pracujących w warunkach dołowych oraz w zakładach przeróbczych.

Autorzy przeprowadzili badania nad zjawiskami tarcia przy smarowaniu smarami molibdenowymi krajowymi i zagranicznymi. Celem tych badań było wyznaczenie współczynnika tarcia w funkcji obciążenia, przy różnej geometrii współpracy, a mianowicie: w warunkach tarcia ślizgowego i tarcia potoczy-

stego z poślizgiem. Dodatkowo określono stabilność termiczną tych smarów i działanie na stal w podwyższonej temperaturze. Uzyskane wyniki badań pozwoliły określić przydatność eksploatacyjną smarów do smarowania elementów pracujących w trudnych warunkach.

Własności fizykochemiczne dwusiarczku molibdenu stosowanego jako dodatek do smarów plastycznych.

Dwusiarczek molibdenu (MoS_2) jest ciałem stałym o budowie krystalicznej, płytkowej, otrzymanym ze źródeł mineralnych lub drogą syntezy chemicznej. Wyniki analizy chemicznej MoS_2 wykazują zwykle od 57,1 do 60,5% molibdenu i 39,7 do 42,0 siarki. W tablicy 1 zestawiono najważniejsze własności fizyczne i chemiczne MoS_2 [L.1].

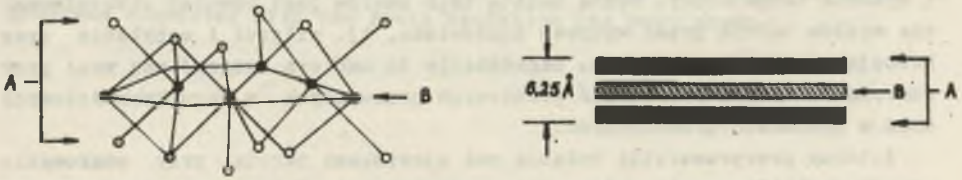
Tablica 1

Własności fizyczne i chemiczne dwusiarczku molibdenu

barwa	niebiesko-szara
budowa	krystaliczna
gęstość	4,9 g/cm^3
twardość	1 - 1,5 w skali Mohsa
odporność termiczna	+400°C w powietrzu +850°C w próżni +1300°C w gazach obojętnych
temperatura topnienia	1185°C
wytrzymałość na obciążenie normalne	70000 N/cm^2
współczynnik tarcia	0,05 - 0,09
odporność chemiczna	jest odporny na działanie: wody, rozczynników chemicznych z wyjątkiem stężonego gorącego kwasu solnego, fluoru i chloru
utlenialność	w atmosferze czystego tlenu utlenia się w temperaturze pokojowej
starzenie, zmęczenie	nie ulega
właściwości magnetyczne	nie posiada

Ponadto MoS_2 nie reaguje z olejami mineralnymi, syntetycznymi i smarami plastycznymi.

Mechanizm smarowania dwusiarczkiem molibdenu wynika z jego budowy płytkowej (rys. 1).



Rys. 1. Schemat budowy strukturalnej dwusiarczku molibdenu
A - atomy siarki, B - atomy molibdenu

Atomy siarki wiążą się siłami walencyjnymi z atomami metalu tworząc niskotarciową warstwę powierzchniową. Ponadto kryształy MoS_2 wypełniają mechanicznie nierówności powierzchni zwiększając rzeczywistą powierzchnię styku. Istota niskiego oporu tarcia może być wytłumaczona na podstawie wzoru [L.2]:

$$\mu = \frac{\alpha \cdot \tau_m}{Q_m} + \frac{(1-\alpha)\tau_w}{Q_w} \qquad (1)$$

gdzie

μ - współczynnik tarcia powierzchni smarowanych MoS_2,

α - stosunek powierzchni styku metalicznego do całkowitej powierzchni tarcia,

τ_m - wytrzymałość metalu na ścinanie

Q_m - granica plastyczności dla metalu

τ_w - wytrzymałość warstwy MoS_2 ma ścinanie

Q_w - granica plastyczności dla warstwy MoS_2.

Ze względu na to, że dwusiarczek molibdenu łączy się z powierzchnią tarcia przez chemisorpcję oraz mechanicznie zapełnia nierówności powierzchni wartość współczynnika udziału styku metalicznego α jest mała i bliska zeru. Stąd współczynnik tarcia może być określony wzorem:

$$\mu = \frac{\tau_w}{Q_w}. \qquad (2)$$

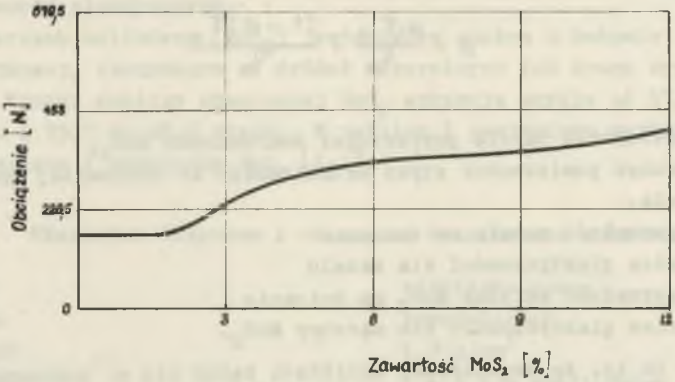
Tak więc opór tarcia powierzchni pokrytej ciągłą warstewką MoS_2 jest określony stosunkiem wytrzymałości tej warstwy na ścinanie do wytrzymałości na naciski. Stosunek ten w tym przypadku jest bardzo mały i wynosi 0,05-0,09.

Wpływ rodzaju nośnika na własności smaru molibdenowego

Dwusiarczek molibdenu jest najczęściej stosowany w technice w postaci smarów molibdenowych, a więc olejów względnie smarów plastycznych o określonym stężeniu MoS_2. Olej względnie smar plastyczny pełni w tym przypadku rolę nośnika kryształów MoS_2. W badaniach potwierdza się, że budowa chemiczna nośnika w znacznej mierze wpływa na efektywność smarowego działania kryształów MoS_2. Obecność w nośniku substancji powierzchniowo-czynnych stosowanych jako tzw. dodatki graniczne uniemożliwia właściwe wiązanie się kryształów MoS_2 z powierzchnią tarcia. Efektywność smarowania smarami molibdenowymi jest w związku z tym niższa niż przy smarowaniu samym MoS_2.

Dobór odpowiedniego stężenia MoS_2 w smarze gwarantuje właściwe wykorzystanie korzystnych własności MoS_2. Ze względów ekonomicznych i praktycznych stosowanie jako smaru czystego MoS_2 jest ograniczone z uwagi na konieczność stosowania zabiegów specjalnych w celu naniesienia na powierzchnię tarcia wymaganej warstwy smarowej.

Badania nad stężeniem MoS_2 w oleju i jego wpływem na opory tarcia wykazują, że w tym przypadku nie istnieje stężenie optymalne. Ze wzrostem procentowej zawartości MoS_2 obniża się stale współczynnik tarcia. Natomiast w przypadku stosowania MoS_2, jako dodatku do smarów plastycznych (rys. 2) istnieje, stężenie optymalne MoS_2 w smarze około 9% zawartości [L. 3].



Rys. 2. Zależność wytrzymałości warstwy plastycznego smaru molibdenowego od stężenia MoS_2

Charakterystyka badanych smarów

Badaniu podlegały następujące smary molibdenowe:

Pasta molibdenowa 60 z dodatkiem MoS_2 produkcji NRD.
Pasta molibdenowa 60 z dodatkiem MoS_2 produkcji krajowej.
Smar molibdenowy Bentomos 23 produkcji krajowej.
Smar molibdenowy Molyslip firmy SISS (Francja).
Smar silikonowy z dodatkiem MoS_2 NP-52 produkcji NRD.

Badania wstępne przeprowadzone przy dużych prędkościach poślizgu (1 m/s) wykazały, że smar Bentomos 23 oraz smar NP-52 cechuje stosunkowo największa trwałość warstwy smaru i większa odporność na zatarcie. Stąd też w dalszych badaniach szczególną uwagę poświęcano tym smarom. Najważniejsze własności fizykochemiczne smarów Bentomos 23 i NP-52 zestawiono w tablicy 2.

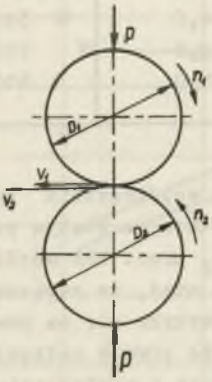
Tablica 2

Własności smarów Bentomos 23 i NP-52

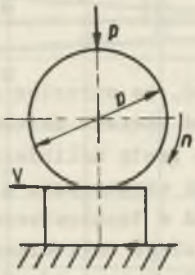
	BENTOMOS 23	NP - 52
Olej bazowy nośnik MoS_2	olej mineralny z zagęszczaczem bentonitowym	olej silikonowy ze specjalnym zagęszczaczem
penetracja mm^{-1}	240 ± 20	260 - 300
stabilność strukturalna po 50 godz. w temperaturze 175°C	8%	4%
straty przez odparowanie po 50 godz. w temperaturze 175°C	3%	1%
zawartość MoS_2	3%	-

Metoda i wyniki badań

Badania współczynnika tarcia przeprowadzono na maszynach tarciowych o geometrii współpracy: dwie próbki walcowe toczące się po sobie ze stałym poślizgiem (rys. 3) oraz próbka walcowa z nieruchomą przeciwpróbką płaską (rys. 4).



Rys. 3. Geometria współpracy na maszynie typu "Amsler"



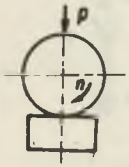
Rys. 4. Geometria współpracy na maszynie tarciowej typu "Timken"

Badania przeprowadzono więc w przypadku tarcia tocznego z poślizgiem i tarcia ślizgowego przy różnych obciążeniach i małym opoślizgu, stałym dla danej geometrii współpracy (tablica 3).

Zachowując parametry jak w tablicy 3 wyznaczono współczynniki tarcia w funkcji obciążenia. Wyniki badań przedstawiono na rys. 5 i 6.

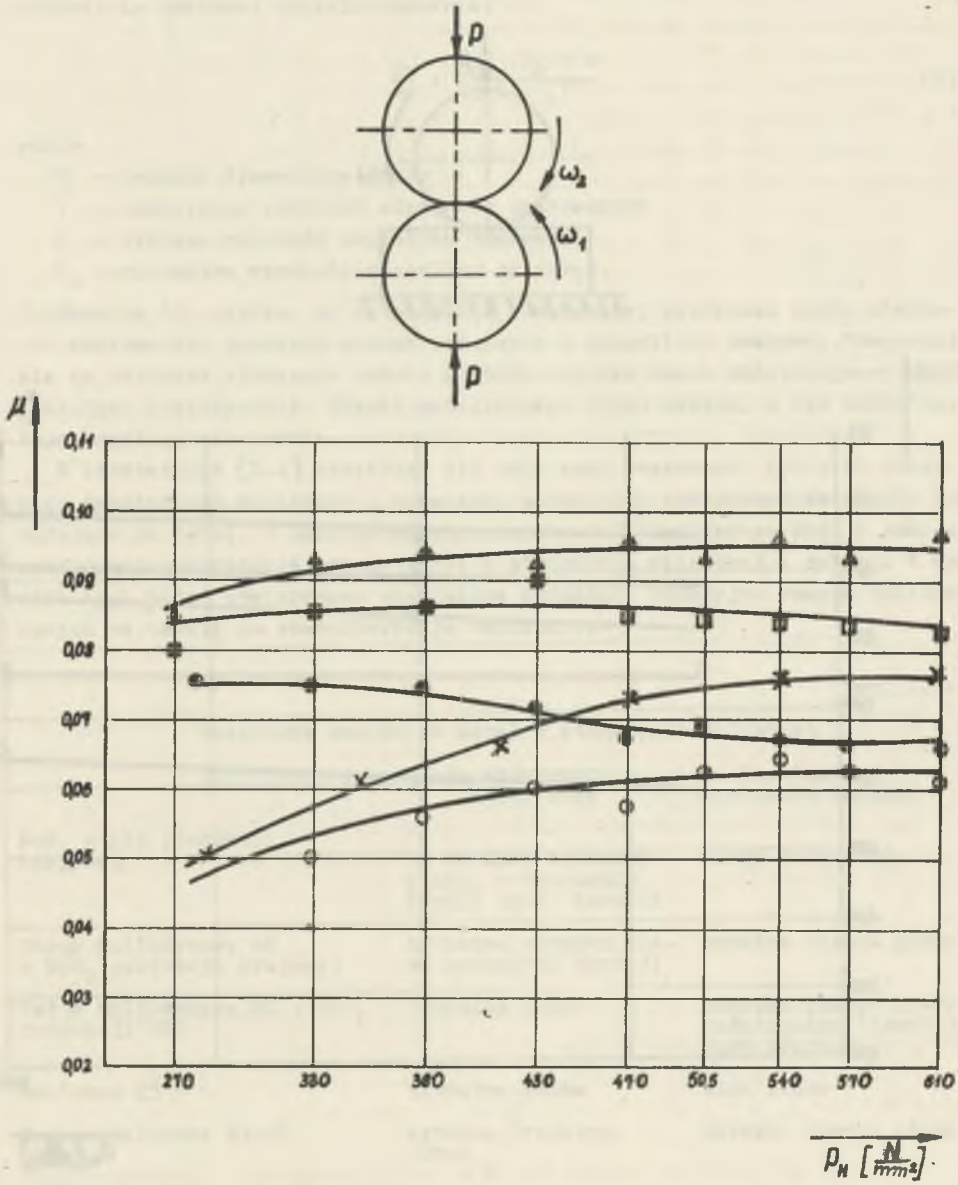
Tablica 3

Parametry badań

Geometria współpracy	Prędkość obrotowa $n\ (\frac{obr}{min})$	Prędkość poślizgu $V_p\ (\frac{m}{s})$	Obciążenie $P\ (N)$	Wskaźnik obciążenia Stribecka $K(\frac{N}{mm^2})$	Maksymalne naprężenie stykowe wg Hertza $p_H(\frac{N}{mm^2})$
	10	0,026	500	1,16	270
			600	1,20	295
			800	1,60	340
	n_1 = 360	0,084	200	1,0	270
			300	1,5	330
			400	2,0	380
			500	2,5	430
			600	3,0	470
	n_2 = 400		700	3,5	505
			800	4,0	540
			900	4,5	570
			1000	5,0	610

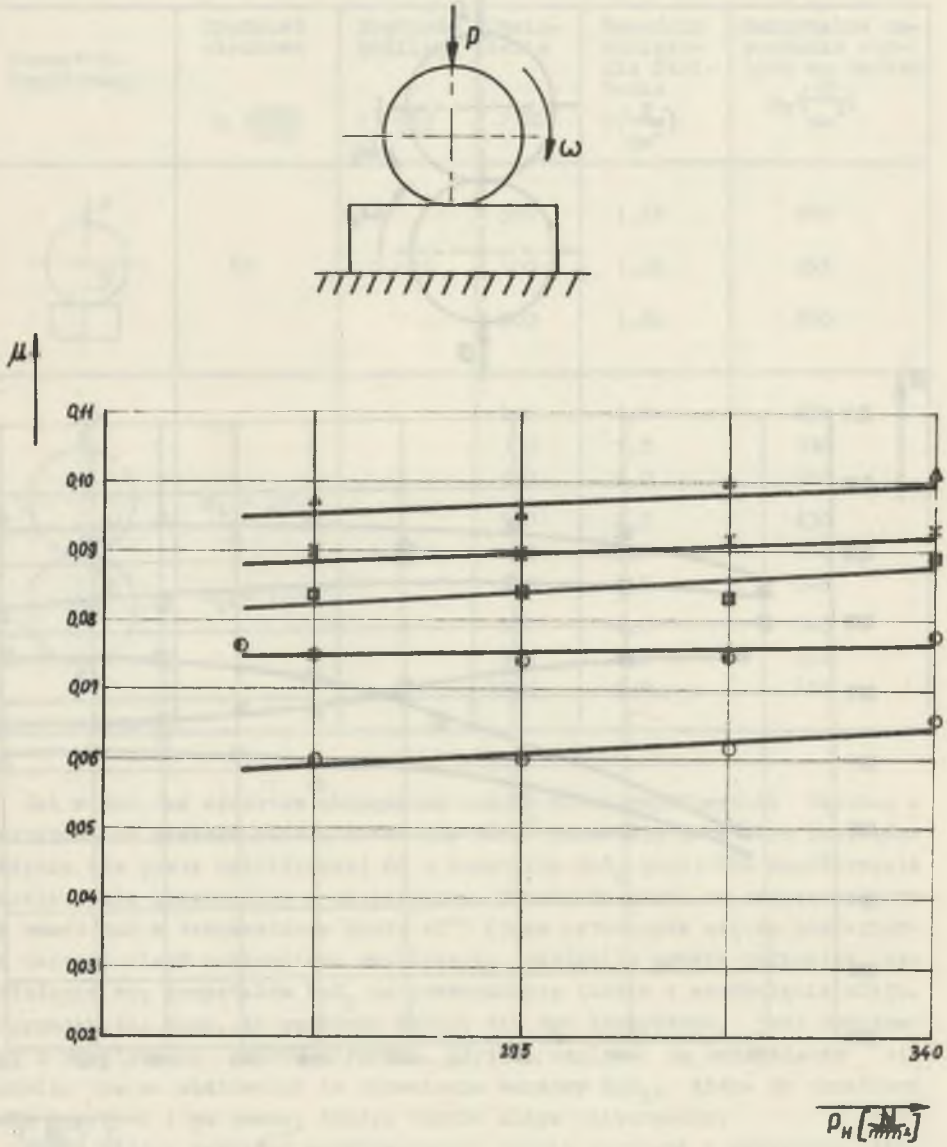
Jak widać, ze wzrostem obciążenia rośnie nieco współczynnik tarcia, a następnie od nacisku Hertza około 470 N/mm^2 pozostaje na stałym poziomie. Jedynie dla pasty molibdenowej 60 z dodatkiem MoS_2 prod. NRD współczynnik tarcia spada nieznacznie z obciążeniem. Wynika to stąd, że zagęszczacz tego smaru już w temperaturze około 40°C (jaka wytworzyła się na powierzchni tarcia) uległ całkowitemu zmięknieniu, nastąpiło prawie całkowite wydzielenie się krzyształów MoS_2 na powierzchnię tarcia i wypłynięcie oleju. Przypadek ten mimo, że pozornie wydaje się być korzystnym, jest negatywnym z praktycznego punktu widzenia, gdyż ze względu na oddzielenie się nośnika nie ma możliwości do odnawiania warstwy MoS_2, która ma określoną małą trwałość i po pewnej drodze tarcia ulega zniszczeniu.

Nieco niższe wartości współczynników tarcia uzyskane w przypadku tarcia tocznego z poślizgiem wynikają z korzystniejszej geometrii współpracy, niż w przypadku kontaktu próbki walcowej z przeciwpróbką płaską. Ponadto mimo poślizgów tego samego rzędu dla obu przypadków suma prędkości obwodowych w przypadku tarcia tocznego z poślizgiem jest większa. Suma ta zgodnie z teorią hydrodynamicznego smarowania stwarza lepsze warunki do po-



Rys. 5. Zależność współczynnika tarcia od obciążenia dla powierzchni smarowanych smarami plastycznymi z dodatkiem MoS_2 przy tarciu potoczystym z poślizgiem

x smar Bentomos 23, ⊙ smar NP-52, □ smar Molyslip, Δ pasta molibdenowa z MoS_2 produkcji krajowej, ● pasta molibdenowa z MoS_2 produkcji NRD



Rys. 6. Zależność współczynnika tarcia od obciążenia dla powierzchni smarowanych smarami plastycznymi z dodatkiem MoS_2 przy tarciu ślizgowym

x smar Bentomos 23, o smar NP-52, □ smar Molyslip, ^ pasta molibdenowa z MoS_2 produkcji krajowej, • pasta molibdenowa z MoS_2 produkcji NRD

wstawania mikroklinów smarowych. Zgodnie z tą teorią rozkład ciśnienia w szczelinie smarowej określa równanie:

$$\frac{dp}{dx} = 6\eta v \frac{h_o - h}{h^3} \qquad (3)$$

gdzie

η - lepkość dynamiczna oleju

v - sumaryczna prędkość elementów smarowanych

h - bieżąca wysokość szczeliny smarowej

h_o - minimalna wysokość szczeliny smarowej.

Z równania (3) wynika, że zwiększenie sumarycznej prędkości ruchu elementów smarowanych powoduje wzrost ciśnienia w szczelinie smarowej. Równocześnie ze wzrostem ciśnienia rośnie grubość warstwy smaru oddzielającej współpracujące powierzchnie. Udział metalicznego styku maleje, a tym samym maleje współczynnik tarcia.

W literaturze [L.4] stwierdza się zbyt dużą kwasowość (pH > 2) krajowego dwusiarczku molibdenu i w związku z tym dość intensywne działanie korodujące na metal. W celu określenia działania korodującego MoS_2 w smarze przeprowadzono badania korozyjności w atmosferze wilgotnej i suchej. W wyniku tych badań stwierdzono nieznaczne działanie korozyjne smarów molibdenowych na metal, co charakteryzuje tablica 4.

Tablica 4

Działanie smarów na metal w atmosferze wilgotnej

	Po wysuszeniu kropli wody	Po starciu produktów korozji
MoS_2 stały produkcji krajowej	b. wyraźna brunatna plama, w otoczeniu kropli prod. korozji	ślady minimalne
Pasta molibdenowy 60 + MoS_2 produkcji krajowej	brunatna wyraźna plama produktów korozji	wyraźna ciemna plama
Pasta molibdenowa 60 + MoS_2 produkcji NRD	brunatna plama	otoczka plamy z wyraźniejszym ciemniejszym miejscem
Bentomos 23	brunatna plama	ślad plamy
Smar silikonowy NP-52	wyraźna brunatna plama	wyraźna ciemna plama

Uzyskane wyniki wskazują, że smar produkcji krajowej Bentomos 23 nie powoduje silnej korozji elementów metalowych i pod tym względem nie różni się od smarów produkcji zagranicznej.

Na podstawie przeprowadzonych badań w atmosferze suchej w podwyższonej temperaturze (200°C) stwierdzono, że zarówno smar Bentomos 23, jak i za-

graniczne smary nie powodują korozji elementów stalowych. Wynika stąd, że smary plastyczne z dodatkiem dwusiarczku molibdenu w podwyższonej temperaturze skutecznie chronią powierzchnie metalowe przed korozją. Jednocześnie dla wymienionych smarów przeprowadzono badania odporności termicznej i stwierdzono, że w wysokiej temperaturze nie zachodzą wyraźne zmiany własności smarnych. Przeprowadzone badania współczynników tarcia, po uprzednim pozostawieniu tych smarów przez okres 36 godz. w temperaturze 200°C nie wykazały różnic w stosunku do wyników uzyskanych dla smarów świeżych (rysunki 5 i 6).

Wnioski z badań

1. Współczynnik tarcia powierzchni smarowanych smarami plastycznymi z dodatkiem dwusiarczku molibdenu jest funkcją obciążenia.
2. Smar Bentomos 23 z dodatkiem MoS_2 produkcji krajowej nie różni się swoimi własnościami mechanicznymi od podobnych produkcji zagranicznej.
3. W podwyższonych temperaturach smary molibdenowe skutecznie chronią elementy metalowe przed korozją.
4. Smar Bentomos 23 może być w pełni przydatny do smarowania węzłów tarcia, szczególnie w podwyższonych temperaturach.

LITERATURA

1. Petrys T., Kijkowska R.: Smary molibdenowe w technice. WNT Warszawa 1967.
2. Bowden F.P., Tabor D.: Tarcie i smarowanie. PWN Warszawa 1962.
3. Jost H.P.: Some Notes on the Application of Molybdenum Disulphhide to Anti - frinction Bearings. Scient. Lubric 1958, November t. 10.
4. Czapski W.: Krajowe materiały smarowe z dwusiarczkiem molibdenu Technika smarownicza nr 4, 1971.

ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СМАЗЫВАННЫХ ПЛАСТИЧЕСКИМИ СМАЗКАМИ С ДОБАВКОЙ ДИСУЛЬФИТА МОЛИБДЕНА

Р е з ю м е

Проведено исследования трения поверхностей смазыванных пластическими молибденами смазками отечественного и зарубежного производства. Вызначено коэффициенты трения в зависимости от нагрузки, определено термическую стойкость смазок как и коррозионное действие на стальные детали.Полученные результаты использовано для определения эксплуатационной пригодности исследуемых смазок.

INVESTIGATIONS ON SURFACE FRICTION LUBRICATED BY MEANS OF PLASTIC LUBRICANTS WITH AN ADDITION OF MOLIBDEN BI-SULPFIDT

S u m m a r y

Some investigations have been carried our on surfaces friction lubricated with plastic molibden lubricants of home and foreign production. The coefficients of friction within the load function have been determined and the thermic resistance of the lubricants as well as their corrosive acrivity on the steel elements have been discussed. The received results have been used for determining the adaptability of investigated lubricants.