

BADANIE EFEKTYWNOŚCI SMAROWANIA LITOWEGO SMARU PLASTYCZNEGO NAPEŁNIONEGO AZOTKIEM BORU

RESEARCH OF THE LUBRICATION EFFICIENCY OF THE LITHIUM GREASE FILLED BORON NITRIDE

Michał Krawiec, Tadeusz Leśniewski - Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska

W artykule przedstawiono wyniki badań tribologicznych efektywności smarowania kompozycją smaru plastycznego i azotku boru. Kompozycje zawierające 1, 3, 6 i 9% azotku boru zbadano przy stałych wartościach obciążenia i prędkości poślizgu. Eksperyment prowadzono na aparacie czterokulowym zgodnie z wytycznymi normy PN-76/C-04147 „Badania własności smarnych olejów i smarów”. Ocenę efektywności najlepszej kompozycji, tj. zawierającej 1% azotku boru, przeprowadzono na podstawie testów zrealizowanych przy zmiennych wartościach nacisku i prędkości poślizgu metodą planowanego eksperymentu. Opracowano funkcję regresji, która uzależniała zużycie od prędkości poślizgu i obciążenia nadanego. Skuteczność badanej kompozycji oceniano według kryterium wartości funkcji objętości zużycia. Podano stosowne wnioski.

Słowa kluczowe: smary plastyczne, efektywność smarowania, azotek boru

In the paper, the results of tribological researches of lubricating efficiency of composition grease and boron nitride were presented. The analyzed compositions contained 1, 3, 6 or 9% of boron nitride and tests were carried out at constant values of load and sliding velocity. At this stage the tribological testing was carried out using a four-ball apparatus according to the standard PN-76/C-04147 “The tests of properties of oils and greases”. Then, the efficiency of the best composition (with 1% of boron nitride) was determined on the basis of tests carried out at variable values of load and sliding velocity. In this stage in the investigations the experiment design method was applied. Basis on the results regression function was derived. Obtained regression equation correlating wear, sliding velocity and pressure. The effectiveness of the tested composition was evaluated according to the criteria of the volume of consumption function. Proper conclusion were given.

Key words: greases, lubrication efficiency, boron nitride

Wprowadzenie

Duża liczba węzłów ślizgowych, szczególnie łożysk, działa przy tarcu mieszanym, częstokroć z dużym udziałem tarcia suchego. Dla tych węzłów poszukuje się takich środków smarnych, które przeciwdziałałyby bezpośredniemu stykowi trących się elementów, tj. zastępowałyby tarcie suche tarcie granicznym. Tarcie graniczne cechuje się współdziałaniem warstw granicznych tworzących barierę dla tarcia suchego. Jakkolwiek tarcie graniczne charakteryzuje się stosunkowo dużymi oporami ruchu to ten proces stanowi istotne zabezpieczenie przed awaryjnym zużywaniem trących się elementów w postaci szepienia lub zrastania tarcowego, prowadzącego do zatarcia węzła.

Dlatego, dla węzłów narażonych na występowanie przeciążeń lub przerw w smarowaniu zaleca się stosować specjalne środki smarne, tworzące mocne warstwy graniczne, zdolne rozdzielić trące się powierzchnie. Jedną z metod tworzenia takich środków jest wprowadzenie w skład konwencjonalnych olejów lub smarów plastycznych tzw. napełniaczy, tj. substancji o zróżnicowanym stężeniu, nierozpuszczalnych w plastycznej osnowie i nie zaburzających struktury koloidalnej smaru [11, 12]. Napełniaczami smarów plastycznych z reguły są smary stałe. Smary te z uwagi na bardzo dobre charakterystyki tribologiczne

były w początkowym okresie ich odkrycia stosowane głównie jako zamienniki smarów plastycznych w miejscach ich nie możliwości zastosowania, tj. w wysokiej temperaturze i naciskach, w próżni oraz agresywnym chemicznie i radiacyjnym środowisku. Doświadczenie pokazało, że smary te w pełni uwidaczniają swoje korzystne własności smarne gdy pełnią funkcję napełniaczy smarów plastycznych. W literaturze tribologicznej są dokładnie opisywane badania nad modyfikacją smaru plastycznego pojedynczym smarem stałym, tj. grafitem, dwusiarczkiem molibdenu, dwusiarczkiem wolframu, policzterofluoroetylenem (PTFE) i innymi smarami stałymi. Na ich podstawie można jednoznacznie stwierdzić, że napełnianie smaru plastycznego smarem stałym powoduje prawie zawsze polepszenie charakterystyk tribologicznych utworzonych kompozycji. Bardzo nieliczne przypadki pogarszania się tych charakterystyk są spowodowane bądź złe dobraną bazą kompozycji lub nieodpowiednim stężeniem czy granulacją napełniacza [2].

Azotek boru (BN) – nieorganiczny związek chemiczny boru i azotu, który został po raz pierwszy zsyntezowany w 1842 r. występuje w trzech odmianach krystalograficznych:

- α - BN o strukturze heksagonalnej, analogicznej do struktury grafitu,
- β - BN o strukturze regularnej, analogicznej do struktury diamentu,

γ - BN o strukturze heksagonalnej ściśle upakowanej (romboedrycznej) analogicznej do struktury β - grafitu [9].

Odmiana β - BN charakteryzuje się bardzo dużą twardością ocenianą na 90-95% twardości diamentu oraz wykazuje znacznie wyższą od niego odporność termiczną – wytrzymuje temperatury do 1600 °C. Stąd prowadzone są szerokie badania pod kątem wykorzystywania go w tej postaci do zwiększenia trwałości narzędzi do obróbki ścierniej. Azotek boru γ - BN nie znalazł dotychczas żadnego zastosowania.

Najszerze zastosowanie ma azotek boru α - BN o strukturze heksagonalnej. W elektronice służy on głównie jako materiał z którego wytwarzane są stałe płytkowe źródła boru dla procesów dyfuzji oraz jako izolator o dobrym przewodnictwie cieplnym. Jego zaletą jako źródła dyfuzji boru jest nietoksyczność i obojętność chemiczna. Również jest on stosowany jako katalizator w petrochemii, nośnik katalizatora w katalizie wysokotemperaturowej, materiał na ceramikę wysokotemperaturową, składnik kompozytów oraz jako surowiec do produkcji borazonu, który jest azotkiem boru o strukturze β - BN. Heksagonalna struktura azotku boru α - BN analogiczna do struktury grafitu predysponuje go do stosowania jako środka smarnego - jest on często nazywany białym grafitem. Publikacje w literaturze tribologicznej odnośnie do azotku boru α - BN dotyczą z reguły stosowania go jako składnika przeciwciernych powłok jedno lub wielowarstwowych, np. [5]. Publikacje z tematyki wykorzystania azotku boru α - BN jako napełniacza smarów plastycznych są bardzo nieliczne i zawarte w nich informacje nie pozwalają jednoznacznie ocenić przydatności azotku boru do pełnienia funkcji napełniacza smaru plastycznego. Przykładowo w [10] opisano badania nad wpływem kompozycji smaru litowego z 4% azotku boru na opory ruchu sworzni drążka kierowniczego. Autorzy stwierdzili, że analizowana kompozycja spowodowała zmniejszenie oporów tarcia w sworznii od 27 do 50 % w stosunku do czystego smaru. Autorka [1] analizowała wpływ dodatku azotku boru do smaru plastycznego na charakterystyki tribologiczne utworzonej kompozycji. Podsumowując badania stwierdziła, że azotek boru zastosowany w stężeniu 2, 4 i 8% pogorszył właściwości przeciwzużyciowe analizowanego smaru i nie wpłynął na poprawę jego właściwości przeciwwzrostowych.

Nieznaczna liczba publikacji oraz występujące rozbieżności w ocenie przydatności azotku boru do pełnienia funkcji napełniacza smaru plastycznego były dla autorów impulsem do zajęcia się tą problematyką. Przeprowadzono badania, których celem było:

1. Ocena wpływu zawartości azotku boru w smarze plastycznym (litowym) 1S na efektywność smarowania stalowych węzłów ślizgowych oraz wybór kompozycji najefektywniejszej w świetle przyjętych kryteriów.
2. Ocena wpływu nacisku i prędkości poślizgu na efektywność najlepszej kompozycji smaru plastycznego i azotku boru.

Metoda i warunki badań

Testy prowadzono na standardowym aparacie czterokulowym, produkcji Instytutu Technologii Eksploatacji w Radomiu. Przyjęty model badawczy: styk punktowy w aparacie czterokulowym dawał możliwość oceny badanych kompozycji w ekstremalnych warunkach pracy węzła ślizgowego. Realizując

cel pierwszy badań, tj. ocenę wpływu zawartości azotku boru w smarze plastycznym (litowym) 1S na efektywność smarowania stalowych węzłów ślizgowych oraz wybór kompozycji najefektywniejszej w świetle przyjętych kryteriów, analizowano kompozycje zawierające 1, 3, 6 i 9% masowych proszku azotku boru. Efektywność badanych smarów oceniano według trzech kryteriów: obciążenia zespawania F_s , granicznego obciążenia zużycia G_{oz} oraz wskaźnika zużycia I_h .

Badania dotyczące drugiego celu, tj. ocena wpływu nacisku i prędkości poślizgu na efektywność najlepszej kompozycji smaru plastycznego i azotku boru, zostały przeprowadzone metodą planowanego eksperymentu z zastosowaniem planu rotalnego na pięciu poziomach. W testach tych zmiennymi niezależnymi (wielkościami wejściowymi) było obciążenie nadane F oraz prędkość poślizgu v . Wielkością wyjściową (kryterialną) – zużycie d , mierzone średnicą śladu wytarcia nieruchomych kulek. Zużycie to mierzono po drodze tarcia $s = 33,5$ m. Przyjęta wartość drogi tarcia odpowiada drodze ruchomej kulki podczas wykonywania na aparacie czterokulowym znormalizowanego (wg PN-76/C-04147) oznaczenia wskaźnika granicznego obciążenia zużycia G_{oz} . Teoria doświadczeń, a szczególnie kryterium realizowalności wymaga, aby obiekt badań funkcjonował prawidłowo we wszystkich przyjętych układach wielkości wejściowych [7,8]. Metodą kolejnych prób, biorąc pod uwagę możliwości techniczne aparatu czterokulowego i równocześnie zachowując wyżej wymienione kryterium, ustalono dla pozostałych zmiennych następujące przedziały zmienności:

- obciążenie nadane $F = 32$ do 128 daN, obciążeniu temu odpowiada średni nacisk Hertza p_H – od 2165 do 3437 MPa;
- prędkość poślizgu v – od $0,04$ do $0,68$ m/s (prędkość obrotowa kulki n od 104 do 1772 obr./min).

Z uwagi na przyjęcie w obiekcie badań dwóch wielkości wejściowych ($S=2$), podstawowe dane dla przyjętego planu to:

- wartość ramienia gwiazdowego $\alpha = 1,414$
- liczba doświadczeń w punkcie centralnym $N_o = 5$
- ogólna liczba doświadczeń $N = 13$.

Do matematycznego opisu zależności pomiędzy wielkościami wejściowymi i wyjściowymi, zmierzonymi podczas eksperymentu zastosowano analizę regresji. Jako funkcji aproksymującej wyniki badań, przyjęto wielomian drugiego stopnia ze współdziałaniem pierwszego rzędu, który dla trzech zmiennych wejściowych ma następującą postać:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2 \quad (1)$$

gdzie:

$b_0, b_1, \dots, b_{22}$ - współczynniki funkcji regresji,
 x_1, x_2 - wielkości wejściowe, odpowiednio F, v ,
 $\hat{y}$ - wielkość wyjściowa modelu – zużycie d

Aproksymacji wyników pomiarów przy użyciu wyżej wymienionego wielomianu dokonano metodą najmniejszych sumy kwadratów błędów. W celu określenia natężenia związku między wielkościami wyjściowymi obiektu y i wyjściowymi modelu $\hat{y}$ obliczano współczynnik korelacji wielowymiarowej R według [6]. Intensywność otrzymanego współczynnika oraz funkcji regresji oceniano testem F Snedecora, opartym na analizie wariancji w równaniu regresji.

Na podstawie równań regresji zużycia kulek uzyskanych w obecności analizowanych smarów dokonano ilościowej oceny skuteczności działania badanych smarów według kryterium

ich zużycia. Tę ocenę skuteczności przeprowadzono metodą minimalnej objętości funkcji zużycia opisaną w [4].

Dla celów porównawczych wyznaczono również funkcję regresji jak i odpowiadające objętości funkcji zużycia dla smaru bazowego 1S oraz smaru grafitowanego (produktu handlowego).

Próby powtarzano zawsze pięciokrotnie. Wyniki opracowano statystycznie przy współczynniku ufności 0,95 stosując test t-Studenta. Na wykresach przedstawiających wyniki badań zużycia w funkcji obciążenia nadanego ($d=f(F)$) nie naniesiono przedziałów ufności ze względów na przejrzystość wykresów. W badaniach realizowanych według planowanego eksperymentu, każde doświadczenie z planu było powtórzone co najmniej trzykrotnie.

Wykaz materiałów i ich krótka charakterystyka

Do badań zastosowano następujące materiały:

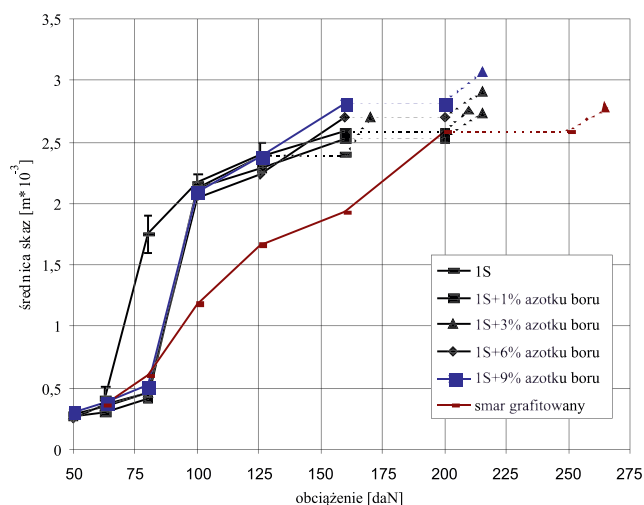
1. Kulki łożyskowe ze stali 100Cr6 (ŁH15) o średnicy 12,7 mm wykonane w 16 klasie dokładności i grupie wymiarowej $S=0 \mu m$. Pozostałe cechy kulek były zgodne z PN-83/M-86452.
2. Azotek boru α -BN – proszek o ziarnach wielkości ok. 1 μm .
3. Smar samochodowy 1S, przeznaczony do smarowania przegubów i innych węzłów ślizgowych w samochodach.
4. Smar grafitowany - smar wapniowy z dodatkiem kilku procent grafitu. Zalecany do smarowania piór resorów, gwintów srub, otwartych przekładni zębatych, łańcuchów i innych silnie obciążonych powierzchni tarcia z wyjątkiem łożysk tocznych. Jest on jedynym reprezentantem kompozycji grafitowych ogólnie dostępnych na rynku krajowym.

Wyniki badań

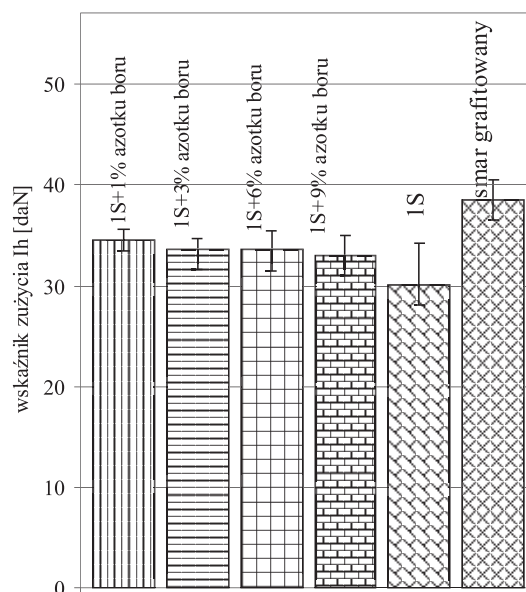
Zestawienie wyników badań w funkcji obciążenia nadanego oraz obciążenia zespawania dla analizowanych kompozycji przedstawiono na rysunku 1. Dodatkowo, zamieszczono dla celów porównawczych charakterystyki tribologiczne przy smarowaniu smarem 1S, który był bazą dla analizowanych kompozycji oraz dla smaru grafitowanego jako produktu handlowego zawierającego grafit.

Obliczone wartości granicznego zużycia G_{oz} i wskaźnika zużycia I_h dla tych smarów zilustrowano na rysunkach 2 i 3.

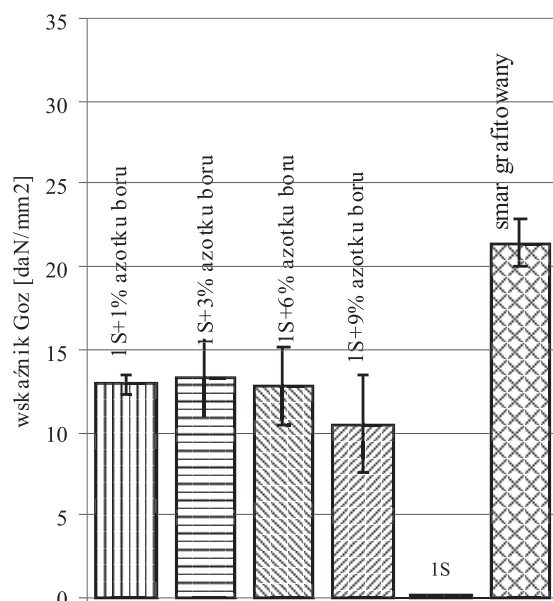
Porównując otrzymane wyniki widać, że napełnienie smaru 1S azotkiem boru w ilości od 1 do 9% wagowych powoduje ogólnie polepszenie jego właściwości smarnych, ocenianych trzema kryteriami, tj. obciążeniem zespawania F_s , wskaźnikiem zużycia I_h i wskaźnikiem granicznego obciążenia zużycia G_{oz} . Dla smaru 1S, $F_s = 160$ daN, $I_h = 31,1$ daN i $G_{oz} = 0$ ponieważ większość prób podczas testów kończyło się zatarciem. Te same wielkości kryterialne dla kompozycji 1S+ 1% azotku boru mają wartości większe, tj. $F_s = 200$ daN, $I_h = 34,5$ daN i $G_{oz} = 12,9$ daN/mm². Eksperyment pokazał również, że zwiększanie stężenia azotku boru ponad 1% w zakresie do 9% wagowych jest bezcelowe, gdyż nie zwiększa efektywności smarowania tymi kompozycjami. Dla smarowania kompozycją zawierającą 9% azotku boru wystąpiło nawet obniżenie niektórych wielkości kryterialnych, np. wskaźnik $G_{oz} = 10,5$ daN/mm² i był ok. 18%



Rys. 1. Zależność zużycia kulek od obciążenia dla kompozycji z azotkiem boru
Fig. 1. Wear (scar diameter) versus load for compositions with boron nitride



Rys. 2. Wskaźnik zużycia I_h dla badanych smarów
Fig. 2. Wear index I_h for investigated greases



Rys. 3. Wskaźnik granicznego obciążenia zużycia G_{oz} dla badanych smarów
Fig. 3. Limit wear load index G_{oz} for investigated greases

mniej niż przy użyciu kompozycji z 1% azotku boru. Stąd też uznano, że kompozycja smaru 1S z 1% azotkiem boru jest najefektywniejszą w świetle przyjętych kryteriów i dla jej stosowania zbadano wpływ nacisku i prędkości poślizgu na efektywność smarowania.

Równania regresji, opracowane na podstawie wyników prób przeprowadzonych z zastosowaniem planowanego eksperymentu mają następującą postać:

– smar 1S napełniony 1% azotku boru

$$d = 2,36212 - 0,045793 F - 7,044118 v + 0,000258 F^2 + 6,35321 v^2 + 0,060463 Fv,$$

– smar samochodowy 1S

$$d = 2,076241 - 0,041076 F - 5,971706 v + 0,000273 F^2 + 6,434437 v^2 + 0,042169 Fv,$$

– smar grafitowany

$$d = 2,140288 - 0,038716 F - 5,472023 v + 0,000225 F^2 + 5,315593 v^2 + 0,04326 Fv,$$

W tabeli 1 przedstawiono wartości współczynnika korelacji wielowymiarowej R obliczone dla tych funkcji. Duże wartości R świadczą o silnym związku pomiędzy wartościami zużycia zmierzonego w czasie eksperymentu, a wartościami otrzymanymi z powyższych równań. Istotność obliczonych współczynników korelacji R oraz równań regresji zbadano testem F-Snedecora, a potrzebne wartości zamieszczono w tabeli 1. Jak widać, otrzymane wartości współczynnika F znacznie przekraczają wartość krytyczną testu.

Tab. 1. Wartości współczynników korelacji R i testu F-Snedecora

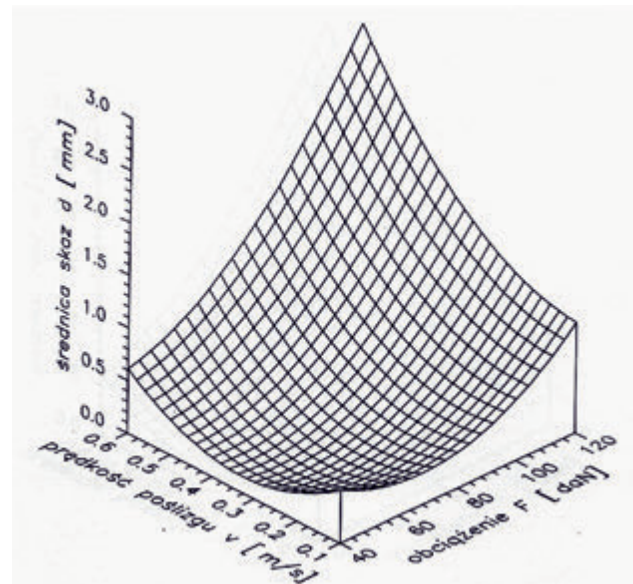
Tab. 1. The value of the coefficients of correlation R and F-Snedecor's test

Równanie regresji dla:	Współ. korelacji	Współ. testu F-Snedecora	
	R	F	F _{kr}
smar 1S napełniony 1% azotku boru	0,97946	23,59	4,28
smar samochodowy 1S	0,97539	19,56	4,28
smar grafitowany	0,98258	27,95	4,28

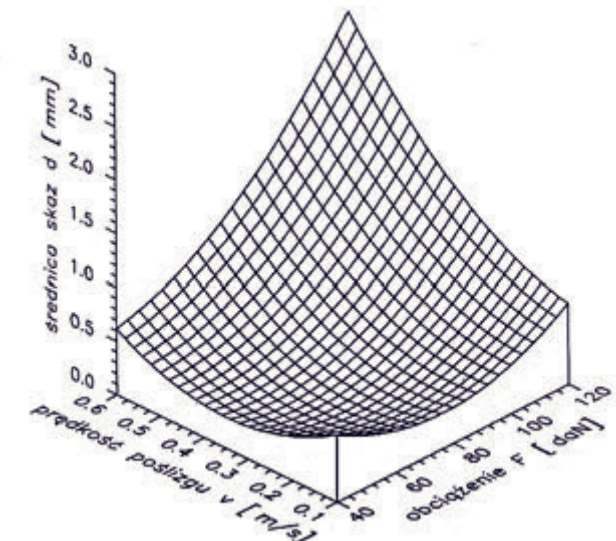
Na rysunkach 4, 5, 6 pokazano przykładowo graficzny obraz tych funkcji w układzie przestrzennym. Jak widać, charakterystyki zużycia dla wszystkich trzech smarów są bardzo podobne pod względem charakteru zmian. Istnieją zawsze obszary p i v, w których zużycie jest najmniejsze. Różnice występują tylko w wartościach pomiędzy maksymalnym, a minimalnym zużyciem. W obszarze analizowanych nacisków i prędkości poślizgu, przy smarowaniu smarem 1S minimalne zużycie wynosi 0,123 mm, a największe 2,83 mm. Przy stosowaniu kompozycji 1S+1% azotku boru analogiczne wartości to 0,099 mm i 2,53 mm. Przy smarowaniu smarem handlowym grafitowanym zużycie minimalne było 0,089 mm, a maksymalne – 2,42 mm. Aby można było ocenić efektywność badanych kompozycji w aspekcie zastosowania do węzłów ślizgowych pracujących w szerokim przedziale nacisków i prędkości poślizgu, zostały obliczone według [4] objętości opracowanych funkcji regresji, które przedstawiono graficznie na rysunku 7.

Podsumowanie i wnioski końcowe

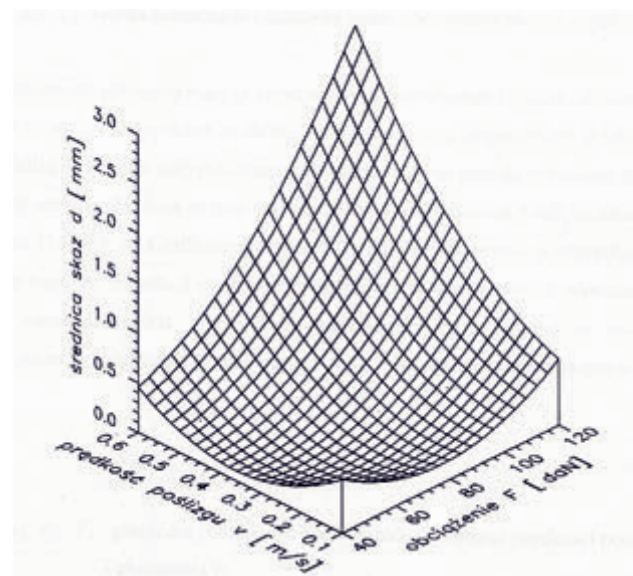
Podsumowując uzyskane wyniki przeprowadzonych badań można stwierdzić, że:



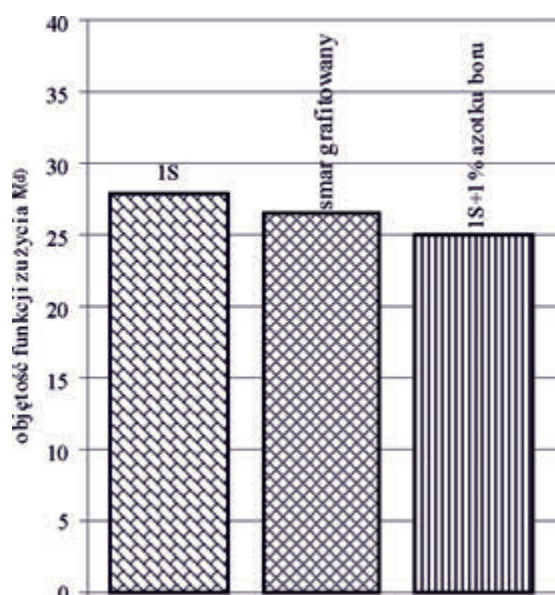
Rys. 4. Zależność $d=f(F,v)$ dla smaru samochodowego 1S
Fig. 4. Relationship $d = f(F, v)$ for 1S grease



Rys. 5. Zależność $d=f(F,v)$ dla smru grafitowanego
Fig. 5. Relationship $d = f(F, v)$ for graphite grease



Rys. 6. Zależność $d=f(F,v)$ dla smaru 1S napełnionego 1% azotku boru
Fig. 6. Relationship $d = f(F, v)$ for 1S grease filled 1% boron nitride



Rys.7. Objętości funkcji zużycia dla badanych smarów plastycznych
Fig. 7. Volume of wear function for investigated greases

1. Azotek boru zastosowany jako napelniacz smaru plastycznego zwiększa efektywność smarowania stalowych węzłów ślizgowych. Optymalnym jego stężeniem w smarze 1S ze względu na kryterium obciążenia zespawania F_s , wskaźnika zużycia I_h i granicznego obciążenia zużycia G_{oz} jest 1% wagowo.
2. Charakterystyki zużycia w funkcji nacisku i prędkości poślizgu $d=f(p,v)$ dla analizowanych smarów, tj. smaru plastycznego 1S, kompozycji 1S+1% azotku boru jak i smaru grafitowanego (handlowego) mają bardzo wyraźne ekstrema (minima) przy określonych wartościach p i v . Oznacza to, że spektrum efektywnego stosowania tych smarów jest ograniczone do ściśle określonych parametrów wymuszeń (p, v), tj. powinny mieścić się one w obszarze minimum zużycia.
3. Zakładając, że skuteczność działania smaru plastycznego jest odwrotnie proporcjonalna do obliczonej objętości funkcji zużycia $V_{F(d)}$ oraz przyjmując ją dla smaru 1S jako bazy za 100%, to kompozycja z 1% azotku boru jest od niego o 10% efektywniejsza i o 5% lepsza od handlowego smaru grafitowanego.

Literatura

- [1] BAJER J.: Wpływ dodatku smarnego na charakterystyki tribologiczne niskotemperaturowego smaru plastycznego. *Tribologia* - 2006, str. 67 – 80
- [2] ČERSKIJ I. N.: O kriterijach rabotosposobnosti i prognozirovannii dolgovečnosti metallopolimernych uzlov trenija, *Trenie i iznos*, 1980, T. I, No 6, s. 1021-1028
- [3] KRAWIEC S.: Wpływ synergizmu wybranych napelniaczy w smarze na zwiększenie trwałości ślizgowych węzłów maszyn. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1998, Wrocław
- [4] KRAWIEC S., *Zastosowanie metody minimalnej objętości funkcji zużycia do optymalizacji stężenia napelniacza w smarze*, materiały IV Konferencji Naukowej nt. „Metody doświadczalne w budowie i eksploatacji maszyn”, Wrocław, Szklarska Poręba 1999, t. 2, s. 101–108
- [5] KOŁDUŃSKI T., *Tribologiczne zastosowania azotku boru*. WAT, W-wa, 2013
- [6] MAŃCZAK K.: *Technika planowania eksperymentu*, Warszawa, WNT, 1976
- [7] POLAŃSKI Z.: *Planowanie doświadczeń w technice*. PWN, Warszawa 1984
- [8] POLAŃSKI Z.: *Współczesne metody badań doświadczalnych*, Warszawa, Wiedza Powszechna, 1978. s. 129-136
- [9] RADOMSKI J., REČKO M., KETLING-SZEMLEY M.: Własności azotku boru i metody jego otrzymywania. *Materiały elektroniczne* 1999, nr 1(25)
- [10] SICZEK K., JÓŹWIAK P.: Badania wpływu obecności azotku boru w smarze na opory ruchu sworznia drążka kierowniczego, *The Archives of Automotive Engineering*, Nr.04-2012/127
- [11] SINICYN V. V., *Plastičnyje smazki w SSSR*, Moskwa, 1984
- [12] WACHALA., KULCZYCKI A., *Trybologiczne własności smarów plastycznych zawierających polimery niskotarciowe*, *Trybologia*, 1986, Nr 4–5, s. 21–23