

Marek WIŚNIEWSKI*, **Michał CICHOMSKI****

IDENTYFIKACJA OPORÓW RUCHU I ZUŻYCIA POWŁOK NISKOTARCIOWYCH

IDENTIFICATION OF FRICTION AND WEAR OF ANTI-WEAR COATINGS

Słowa kluczowe:

kompozyt, powłoka niskotarciowa, matryca fenolowo-formaldehydowa, grafit, disulfid molibdenu

Key words:

composite, AF coating, phenol-formaldehyde matrix, graphite, molybdenum disulphide

Streszczenie

Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych materiału kompozytowy z matrycą z żywicy fenolowo-formaldehydowej z dodatkiem smarów stałych do nanoszenia na powierzchnie tarcia węzłów kinematycznych maszyn i urządzeń.

* Instytut Technologii Eksploatacji, 26-600 Radom, ul. K. Pułaskiego.

** Uniwersytet Łódzki, Katedra Technologii Chemicznej i Ochrony Środowiska, 90-236 Łódź, ul. Pomorska 163.

W badaniach wstępnych zidentyfikowano zachowania tarciove i zużyciowe dla różnych składów powłok kompozytowych. Na bazie uzyskanych wyników doświadczalnych określono optymalny skład kompozycji stałych środków smarowych: 20% grafitu i 5% disulfidu molibdenu.

Opracowany kompozyt niskotarciowy poddano cyklowi badań tribologicznych. Dla porównania zbadano także kompozyt wytwarzany przez jednego z wiodących producentów. Stwierdzono, że własny kompozyt nie ustępuje porównywanemu zarówno pod względem redukcji oporów ruchu jak i zmniejszenia zużycia tribologicznego.

WPROWADZENIE

Podstawową metodą przeciwdziałania zużyciu węzłów tarcia – głównego czynnika decydującego o trwałości i niezawodności maszyn i urządzeń – jest ich smarowanie, obecnie coraz częściej – z uwagi na wymagania ekologii – realizowane w minimalnych ilościach, przy czym występują tutaj dwa zasadnicze przypadki: środek smarowy jest jednorazowo (bez następujących uzupełnień) wprowadzany do węzła tarcia (nanoszony na powierzchnie ślizgowe) lub też jest on składnikiem warstwy wierzchniej elementu lub obu elementów skojarzenia tarciovego.

Pierwsza spośród wymienionych metod smarowania minimalnymi ilościami środka smarowego – tworzącego na powierzchniach tarcia tzw. powłoki niskotarciowe lub powłoki AF (ang. *antifriction coatings*) ma szczególne zalety z punktu widzenia ekologii: po pierwsze brak uzupełniania oleju lub smaru w węźle tarcia zmniejsza zanieczyszczenie środowiska naturalnego produktami naftowymi, po drugie warstwy AF mogą z powodzeniem zastąpić konwencjonalne powłoki zawierające elementy szkodliwe, np. chrom, kadm, ołów i wreszcie radykalne obniżenie oporów ruchu i intensywności zużywania węzłów tarcia z powłokami przeciwtarciowymi przyczynia się do obniżenia konsumpcji energii.

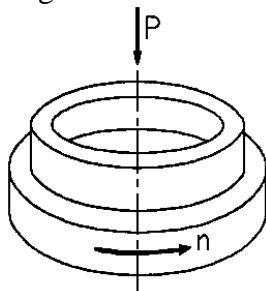
Literatura na temat powłok przeciwtarciowych obejmuje niewiele pozycji, a i te dostępne (np. [L. 1–2]) koncentrują się na dokumentowaniu ich korzystnych właściwości – bez jakichkolwiek informacji o składzie tych środków smarowych. Wyraźny jest w ostatnich latach wzrost zainteresowania mechanizmami tworzenia trwałych warstw powierzchniowych środka smarowego w styku pracującym w ciężkich warunkach, gdy siły oddziaływań hydrodynamicznych lub elastohydrodynamicznych są niewystarczające do rozdzielenia kontaktujących się ciał stałych [L. 3].

W prognozach rozwoju tribologii [L. 4] rozpoznanie tych mechanizmów jest wymienione jako jeden z pięciu głównych kierunków działań w przyszłości.

Podjęcie badań nad powłokami przeciwtarciovymi uzasadnia potrzeba pozyskania wiedzy o warstwach smaru o wysokiej trwałości. Dlatego w prezentowanej pracy [L. 5] zidentyfikowano i zoptymalizowano właściwości tribologiczne warstw AF.

WARUNKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Badania stanowiskowe powłok kompozytowych przeprowadzono na kilku maszynach badawczych ITeE; najszerszej wykorzystano tester T-15 ze skojarzeniem typu pierścień-tarcza – **Rys. 1**. Wyniki pomiarów rejestrowane były za pomocą komputerowego systemu akwizycji danych, co dotyczyło wszystkich wartości mierzonych: siły tarcia, temperatury masowej próbek, przemieszczenia normalnego elementów węzła tarcia, prędkości poślizgu oraz drogi tarcia. Badania towarzyszące po testach tribologicznych obejmowały wizualizację i określenie zużycia (mikroskopia optyczna i elektronowa, profilografowanie i metoda wagowa).



Rys. 1. Węzeł tarcia typu trzpień-tarcza maszyny testowej T-15

Fig. 1. Friction couple of the T-15 Thrust-Washer Testing Machine

W czasie testów utrzymywano stałe wartości parametrów otoczenia węzła tarcia (temperatura $20 \div 22^\circ\text{C}$, wilgotność względna $45 \div 55\%$). Elementy testowe wykonane były ze stali ŁH15 ulepszonej do twardości 55 ± 2 HRC. Chropowatość powierzchni próbek wynosiła $R_a = 0,2 \div 2 \mu\text{m}$. Na powierzchni próbek nanoszone były badane powłoki kompozytowe na bazie żywic fenolowo-formaldehydowych w dwóch wariantach – z dwoma rozpuszczalnikami – urotropiną i formaliną. Drugim zmiennym parametrem materiałowym była zawartość smaru stałego, przy czym ba-

daniom poddano powłoki z grafitem, disulfidem molibdenu i fluorkiem ceru – oraz ich kombinacjami o zawartości do 60% wagowo.

Wymuszenia przyłożone do węzła tarcia wynosiły:

- prędkość poślizgu 0,1 do 0,8 m/s,
- naciski normalne 0,2 do 1,2 Mpa.

WYNIKI WSTĘPNYCH BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH POWŁOK AF

Wstępne badania stanowiskowe realizowano dla ograniczonej (z uwagi na pożądane skrócenie czas trwania tych eksperymentów) do 1 km drogi tarcia. Oprócz składu materiałowego badanych w tych testach powłok zmiennymi wejściowymi były też wartości parametru R_a chropowatości powierzchni próbek. Podczas testów rejestrowano wartości siły tarcia, przemieszczenia normalnego elementów skojarzonych w styku oraz temperatury masowej próbki.

Wstępne badania tribologiczne pozwoliły na optymalnego składu materiału na powłokę niskotarciową:

- matryca kompozytu – żywica fenolowo-formaldehydowa z formaliną jako utwardzaczem,
- smar stały – kompozycja grafitu (20% wagowo) i disulfidu molibdenu (5%).

Stwierdzono również, że najlepsze wyniki uzyskuje się przy chropowatości powierzchni $R_a = 0,3$ oraz $0,6 \mu\text{m}$. Z racji skróconej w badaniach wstępnych drogi tarcia niemożliwe było wyznaczenie pełnych charakterystyk tribologicznych powłok niskotarciowych. Te dane empiryczne uzyskano w następnym etapie badań – podczas pełnych badań tribologicznych powłok AF z dodatkiem 20% grafitu i 5% MoS_2 .

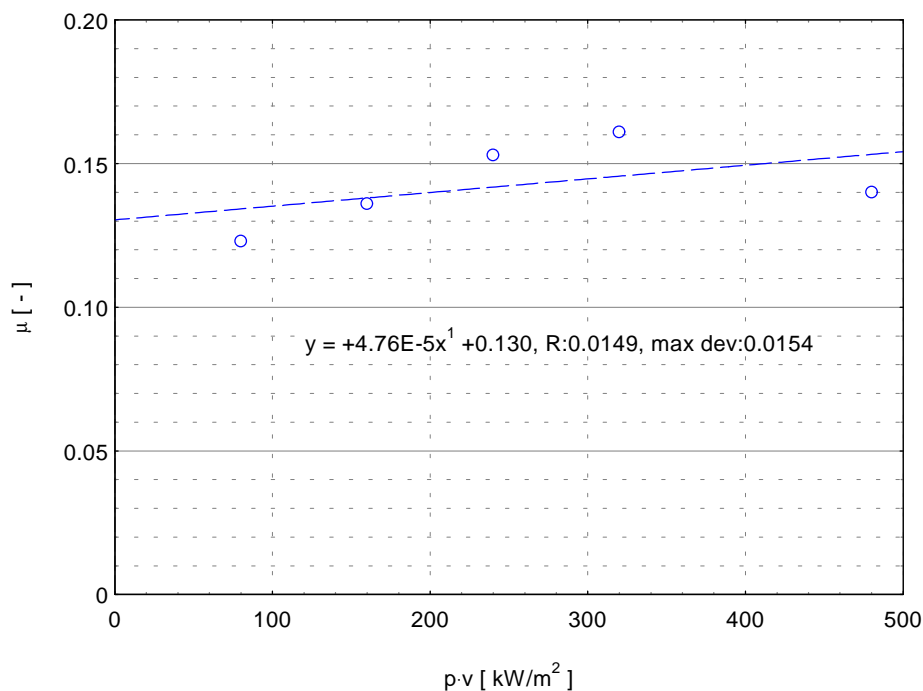
CHARAKTERYSTYKI TARCIOWE POWŁOK NISKOTARCIOWYCH

Pełne badania tribologiczne powłoki kompozytowej o składzie określonym w badaniach wstępnych zrealizowano dla wymuszeń zastosowanych w badaniach wstępnych i wydłużonej do 10 km drogi tarcia. Dla wyznaczenia powtarzalności wyników każdy bieg badawczy był wykonywany 6 razy. Zarejestrowane wyniki pomiarów siły i temperatury posłużyły do wyznaczenia ich wartości średnich. Stwierdzono dobrą powtarzalność –

współczynnik zmienności był dla każdego przypadku wymuszenia poniżej 0,1.

Podsumowanie przeprowadzonych badań eksperymentalnych współczynnika tarcia dla własnego kompozytu AF przedstawiono na **Rys. 2** wraz z zależnością regresyjną. przedstawia średnią z sześciu biegów badawczych. Jak widać na tym rysunku współczynnik tarcia rośnie wraz ze wzrostem parametru p-v, z tym, że nachylenie linii regresji nie jest duże.

Maksymalna masowa temperatura średnia z pomiarów wynosiła ok. 54°C, co należy uznać za wartość bezpieczną; zakładając, że temperatura powierzchni jest nawet o 100°C wyższa, to i tak nie przekroczy ona wartości dopuszczalnej dla zastosowanej żywicy fenolowo-formaldehydowej.

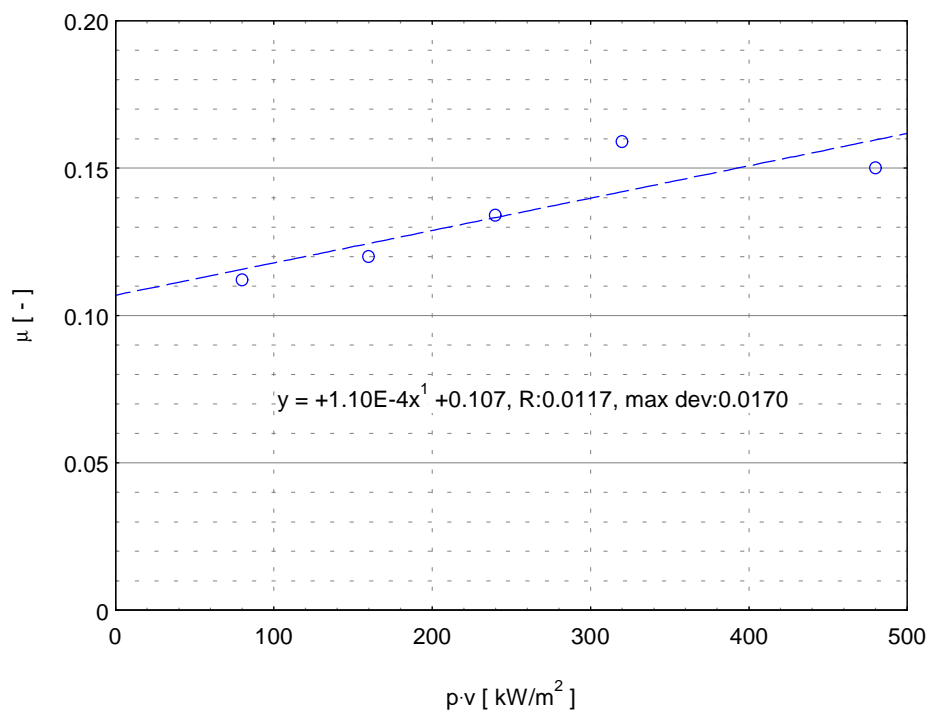


Rys. 2. Wartości współczynnika tarcia w funkcji parametru p-v dla własnej powłoki AF

Fig. 2. Values of the friction coefficient as a function of the p-v parameter for own AF coating

Dla porównania charakterystyk tribologicznych własnego kompozytu niskotarciowego z wynikami osiąganymi przez światowych producentów przeprowadzono dodatkowo badania komercyjnych powłok AF. Zbiorcze wyniki badań oporów ruchu dla kompozytu komercyjnego przedstawiono na **Rys. 3**, przy czym każdy punkt na tym wykresie odpowiada tutaj średniej z 5 biegów badawczych.

Komercyjny materiał kompozytowy dla niewielkich gęstości mocy tarcia daje niższe wartości współczynnika tarcia własna powłoka, jednak dla wyższych wartości parametru p-v materiał własny charakteryzuje się niższymi oporami ruchu. W sumie, zachowanie przeciwtarciowe powłoki ma większe znaczenie przy wysokich gęstościach mocy tarcia niż przy niskich. Dlatego należy uznać, że własny kompozyt AF daje korzystniejszą – z punktu widzenia oporów ruchu – odpowiedź na wymuszenia przyłożone do węzła tarcia.



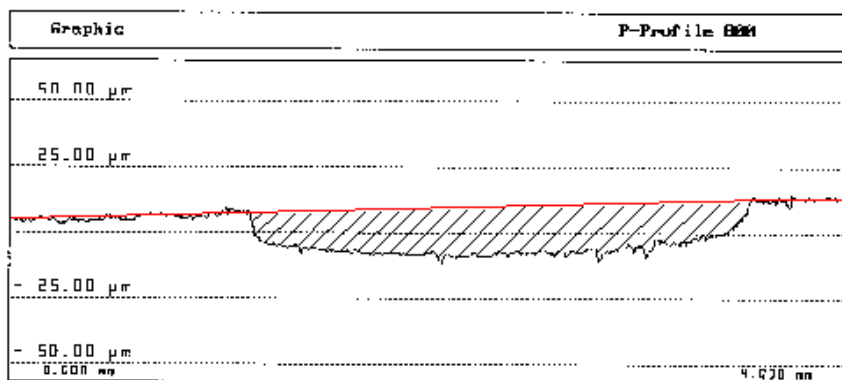
Rys. 3. Wartości współczynnika tarcia w funkcji parametru p-v dla komercyjnej powłoki AF

Fig. 3. Values of the friction coefficient as a function of the p-v parameter for the commercial AF coating

Wyznaczone eksperymentalnie dla styku z powłoką komercyjną temperatury masowe były generalnie wyższe (do 67°C) niż w przypadku zastosowania własnego materiału kompozytowego z grafitem i MoS₂. Wynika to z większych oporów ruchu, a więc większej pracy tarcia dla tej powłoki, szczególnie dla dużych wartości parametru p·v.

CHARAKTERYSTYKI ZUŻYCIOWE POWŁOK NISKOTARCIOWYCH

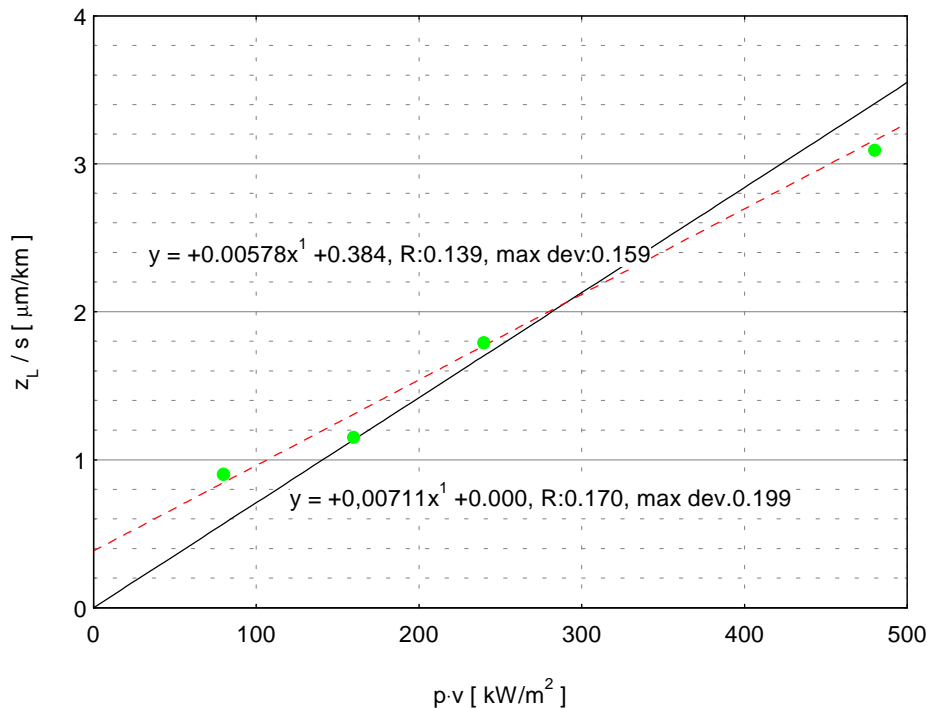
Podczas badań stanowiskowych rejestrowane były wzajemne przemieszczenia elementów testowanego styku, tj. mające przeciwne znaki dylatacja cieplna oraz zużycie liniowe. Z powodu występowania w kontakcie powłoki o znacznie wyższej rozszerzalności cieplnej niż dla stali niemożliwe było precyzyjne wyznaczenie poprawki dylatacyjnej, tak że wyliczone z zarejestrowanych w czasie biegów badawczych przemieszczeń wartości zużycia liniowego wykazywały duże rozrzuty – ze współczynnikami zmienności od 50 do 80%. Dlatego zużycie powłok AF wyznaczano po testach tribologicznych – metodą profilografowania. Przykład profilogramu śladu zużycia pokazuje **Rys. 4**. Dla każdego profilu zużycia wyznaczano metodą integrowania jego pole i następnie jego średnią głębokość; dla przypadku z tego rysunku otrzymano $z_L = 13,2 \mu\text{m}$.



Rys. 4. Profil śladu zużycia powłoki AF (prędkość poślizgu $v = 0,2 \text{ m/s}$, nacisk jednostkowy w styku $p = 1,2 \text{ MPa}$, droga tarcia $s = 4 \text{ km}$)

Fig. 4. Wear profile of the AF coating (sliding velocity $v = 0.2 \text{ m/s}$, specific contact load $p = 1.2 \text{ MPa}$, rubbing distance $s = 4 \text{ km}$)

Podsumowanie pomiarów zużycia własnego kompozytu AF dla całego zakresu zmienności wymuszeń przedstawiono na **Rys. 5**.

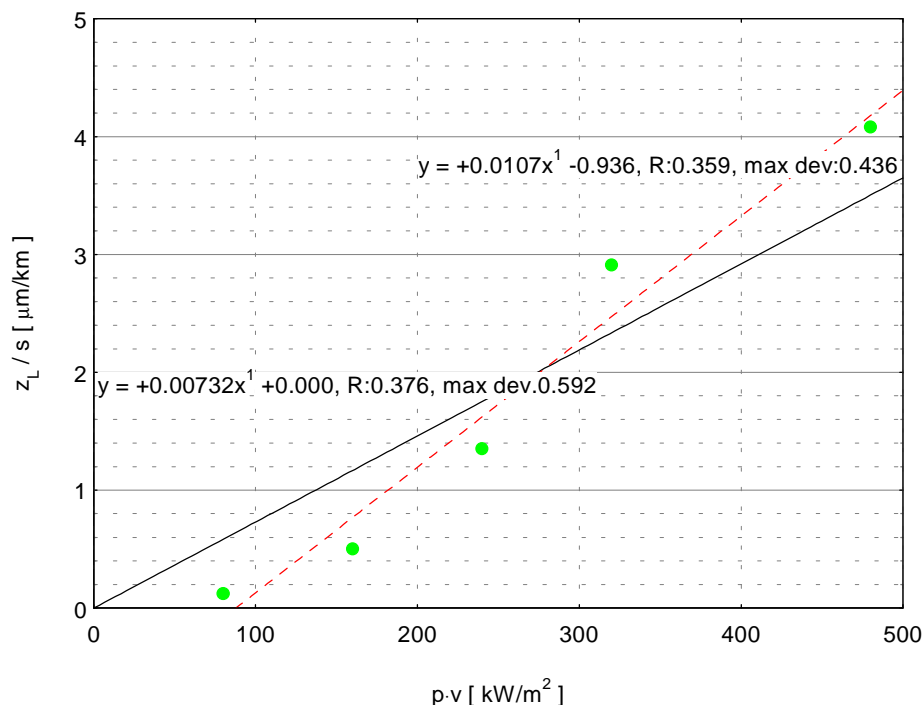


Rys. 5. Wartości jednostkowego zużycia liniowego odniesionego do drogi tarcia dla własnej powłoki AF

Fig. 5. Values of the specific linear wear related to the rubbing distance for own AF coating

Na rysunku tym pokazano dwie linie regresji: zwykłą oraz przechodzącą przez zadany punkt (początek układu współrzędnych). Oczywiście ta druga linia spełnia wymagania fizyczne (zerowe zużycie przy zerowej pracy tarcia), ale jej dopasowanie jest wyraźnie gorsze.

Dla porównania wyznaczono również wartości zużycia dla powłoki komercyjnej. Zbiornicze zestawienie tych wyników z dwoma wariantami regresji liniowej zaprezentowano na **Rys. 5**. Powłoka własna wykazuje ok. 25% przewagę nad komercyjną przy wysokich gęstościach mocy tarcia; zachowanie zużyciowe obu zbadanych kompozytów jest więc podobne jak ich właściwości przeciwtarciowe – przy niskich wartościach iloczynu p·v powłoka komercyjna wykazuje korzystniejsze cechy tribologiczne, a powłoka własna przeważa dla dużych gęstości mocy tarcia – co przemawia wyraźnie na jej korzyść.



Rys. 6. Wartości jednostkowego zużycia liniowego odniesionego do drogi tarcia dla komercyjnej powłoki AF

Fig. 6. Values of the specific linear wear related to the rubbing distance for the commercial AF coating

PODSUMOWANIE

Badania eksperymentalne wykazały skuteczną redukcję oporów ruchu dla powłoki kompozytowej z 20% grafitu i 5% disulfidu molibdenu. Parametr $p \cdot v$ nie przekraczał w czasie testów wartości ok. $0,5 \text{ MW/m}^2$, co jest oczywiście jego górnym limitem przy zastosowaniu powłok kompozytowych w węzłach tarcia maszyn. Wyznaczone w badaniach stanowiskowych wartości współczynnika tarcia zawierały się w granicach $\mu = 0,12 \div 0,16$. Na podstawie uzyskanych wyników eksperymentalnych otrzymano zależność regresyjną na współczynnik tarcia:

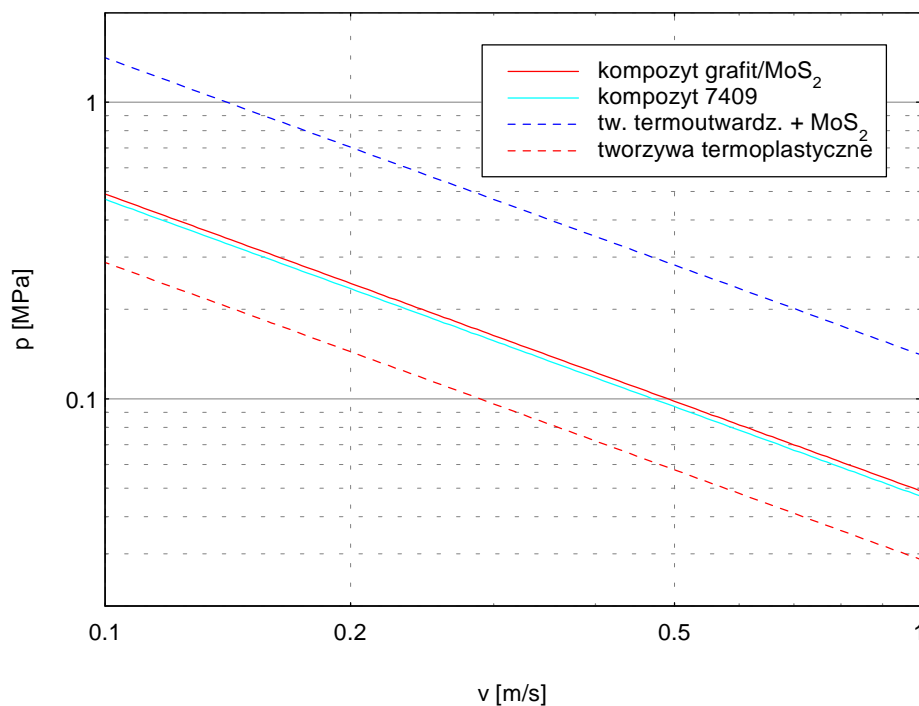
$$\mu = 4,76 \cdot 10^{-5} \cdot (p \cdot v) + 0,130 \quad (p \cdot v = 80 \div 480 \text{ kW/m}^2)$$

Ponieważ nachylenie linii regresji dla współczynnika tarcia jest niewielkie można przyjmować jako jego średnią wartość $\mu \approx 0,14$.

Stwierdzone eksperymentalnie wartości zużycia liniowego odniesionego do drogi tarcia wynosiły $z_L/s = (0,9 \div 3,1) \mu\text{m}/\text{km}$. Uzyskana zależność regresyjna dla zużycia liniowego ma postać

$$z_L/s = 0,00711 \cdot (p \cdot v) \quad (p \cdot v = 80 \div 480 \text{ kW}/\text{m}^2)$$

Dogodniejsze od równania regresji jest podanie zakresu pracy na diagramie p-v ze stosowanymi w krajach anglosaskich liniami granicznymi dla zużyci $25 \mu\text{m}$ ($1 \text{ thou} = 0,001''$) podczas 100 godzin pracy. Wyznaczone eksperymentalnie wartości zużycia zbadanych kompozytów na powłoki niskotarciowe zostały przeliczone dla uzyskania analogicznych linii granicznych. Wyniki obliczeń pokazuje **Rys. 7**. Dla porównania przedstawiono także linie graniczne dla polimerów litych. Jak widać powłoki kompozytowe mieszczą się pomiędzy tworzywami termoutwardzalnymi a termoplastycznymi.



Rys. 7. Graniczne wartości nacisków i prędkości poślizgu kompozytów i materiałów polimerowych

Fig. 7. Threshold values of pressures and sliding velocities for composites polymer materials

Korzystając z opracowanego diagramu można przy zadanym zużyciu dopuszczalnym wyznaczyć czas pracy węzła tarcia z elementem pokrytym powłoką kompozytową lub podać wielkość zużycia dla określonego czasu pracy.

Przedstawiona praca została wykonana w ramach projektu badawczego nr 8 T07B 058 20 sfinansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

LITERATURA

- 1 Zechel R., Lonsky P., Trautmann H., Eberslander H., Holinski R., Läßle W., Meixner R: Molykote. Munich: Dow Corning 1991.
- 2 Läßle W.: Anwendungen von festschmierstoffhaltigen Beschichtungen. Verschleißschutz- und Reparaturbeschichtungen als tribotechnische Problemlösung. Wehrtechnisches Symposium der Bundesakademie für Wehrverwaltung, 1987.
- 3 Grossiord C., Varlot K., Martin J.M., Le Mogue T., Esnouf C., Inoue K.: MoS_2 Single Sheet Lubrication by Molybdenum Dithiocarbamate. Tribology Int., vol. 31 (1998), s.737-743.
- 4 Spikes H.: Tribology Research in the Twenty - First Century. Proc. 9th Nordic Symp. on Tribology, Espoo 2000, s.11-30.
- 5 Wiśniewski M. (kier.): Smarowanie styku skoncentrowanego i rozłożonego warstwami quasikompozytowymi. Projekt badawczy nr 8 T07B 058 20, ITeE, Radom 2002.

Recenzent:
Witold PIEKOSZEWSKI

Summary

Results of experimental investigations of the composite materials with the phenol-formaldehyde resin matrix containing solid lubricant particles, that are to be applied as coatings on rubbing surfaces of machine elements, have been presented.

In the first stage of experiments the friction and wear behaviour of composite coating has been identified. On the base of these results the optimal composition of solid lubricants has been determined.

The developed antifriction composite has been tribologically examined in vaste cyklus of wear and friction experiments. For comparison the commercial composite of one of the leading producers has been also tested. It has been shown that own composite has the similar antifriction and antiwear properties to the commercial one.