

Mgr inż. Marek Kalbarczyk

Zakład Tribologii,
Instytut Technologii Eksploatacji-PIB,
Ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom
marek.kalbarczyk@itee.radom.pl

Dr hab. inż. Remigiusz Michalczewski - prof. nzw.

Zakład Tribologii,
Instytut Technologii Eksploatacji-PIB,
Ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom
remigiusz.michalczewski@itee.radom.pl

Dr hab. inż. Witold Piekoszewski - prof. nzw.

Zakład Tribologii,
Instytut Technologii Eksploatacji-PIB,
Ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom
witold.piekoszewski@itee.radom.pl

Prof. dr hab. inż. Marian Szczerek

Zakład Tribologii,
Instytut Technologii Eksploatacji-PIB,
Ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom.
Wydział Mechaniczny,
Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny,
Ul. Krasickiego 54, 26-600 Radom.
marian.szczerek@itee.radom.pl

Wpływ olejów na zacieranie elementów z powłokami niskotarciowymi skojarzonymi w styku skoncentrowanym

Słowa kluczowe: *zacieranie, zatarcie, oleje, powłoki, aparat czterokulowy*

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań zacierania modelowego, czterokulowego węzła tarcia, smarowanego olejami bez dodatków smarnościowych: mineralnym olejem wzorcowym (RL 219), syntetycznym (PAO 8), rafinowanym olejem rzepakowym (RzR), oraz dwoma olejami handlowymi z dodatkami klasy GL5 na bazie mineralnej i syntetycznej. Przebadano trzy skojarzenia materiałowe, w których zmienną stanowił materiał kulki górnej. Zastosowano kulki ze stali łożyskowej (100Cr6) bez powłoki oraz z niskotarciowymi powłokami: a-C:H:W (WC/C) oraz MoS₂/Ti, osadzonymi metodą PVD. Rezultaty badań porównano z wynikami otrzymanymi dla mineralnego oleju wzorcowego (RL 219). Dokonano oceny wpływu oleju na zacieranie węzła tarcia, wykorzystując wskaźniki obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego nacisku zatarcia p_{oz} , otrzymane przy zastosowaniu metody z narastającym obciążeniem. Stwierdzono, że wpływ rodzaju oleju na zatarcie elementów stalowych pokrytych powłokami PVD jest zależny od rodzaju powłoki. Ważnym efektem praktycznym jest też wskazanie, że powłoki PVD nanoszone na elementy stalowych systemów tribologicznych, przejmują funkcje klasycznych, nieekologicznych na ogół, dodatków smarnościowych (EP), pozwalając na redukcję ich zawartości w środkach smarowych.

1. Wprowadzenie

Wysokoobciążone węzły tarcia, takie jak: koła zębate, łożyska toczne, mechanizmy krzywka-popychacz, są newralgicznymi zespołami w silnikach i przekładniach produkowanych w milionach egzemplarzy rocznie. W ostatnich latach nastąpił znaczny postęp w konstrukcji tychże mechanizmów. Są one mniejsze i bardziej energooszczędne. W obecnie stosowanych częściach maszyn stosuje się znacznie większe naciski kontaktowe, co zwiększa ryzyko wystąpienia zacierania a tym samym awarii urządzenia.

Wprowadzenie nowych rozwiązań technologicznych jest nieuniknione, gdyż producenci wysokoobciążonych elementów maszyn oceniają, że dalsze zwiększanie ich trwałości za pomocą technologii konwencjonalnych, związanych np. z kształtowaniem właściwości wytrzymałościowych materiału bazowego kół zębatach (głównie stali), staje się praktycznie niemożliwe [6]. To samo dotyczy zwiększenia trwałości drogą modyfikacji olejów smarowych – próby zwiększenia odporności na zacieranie poprzez zwiększenie stężenia aktywnych dodatków przeciwzatarciowych prowadzą nieuchronnie do przyspieszenia wystąpienia pittingu [27]. Jak wykazały badania przeprowadzone przez autorów [17, 29], całkowicie nowe możliwości w tym zakresie stwarzają cienkie powłoki przeciwzużyciowe osadzone w próżni metodami PVD/CVD. W ciągu ostatnich kilkunastu lat powłoki przeciwzużyciowe nanoszone metodami PVD/CVD zrewolucjonizowały rynek narzędzi skrawających i formujących. Obecnie szacuje się, że ok. 80% narzędzi warto pokryć powłokami celem zwiększenia ich trwałości.

Typowe powłoki stosowane na narzędzia nie nadają się jednak do zwiększania trwałości elementów kinematycznych węzłów tarcia, między innymi dlatego, że elementy nimi pokryte nie mają wystarczającej odporności na zużycie zmęczeniowe (pitting) [23]. Jedynie w przypadku powłok niskotarciowych (np. WC/C i MoS₂/Ti) trwałość zmęczeniowa węzłów tarcia może być zbliżona do trwałości węzłów bez powłoki i to nawet w przypadku smarowania styku czystym olejem bez dodatków.

W wieloskładnikowym systemie tribologicznym, jaki stanowi strefa styku elementów z warstwami przeciwzużyciowymi, pokrycie elementów trących powłoką (zmiana materiału i właściwości warstwy wierzchniej) powoduje zmianę charakteru oddziaływań pomiędzy wszystkimi elementami systemu, a zwłaszcza pomiędzy środkiem smarowym a materiałem elementów trących. Wynikiem tego jest odmienny przebieg zjawisk, skutkujący innymi charakterystykami tribologicznymi.

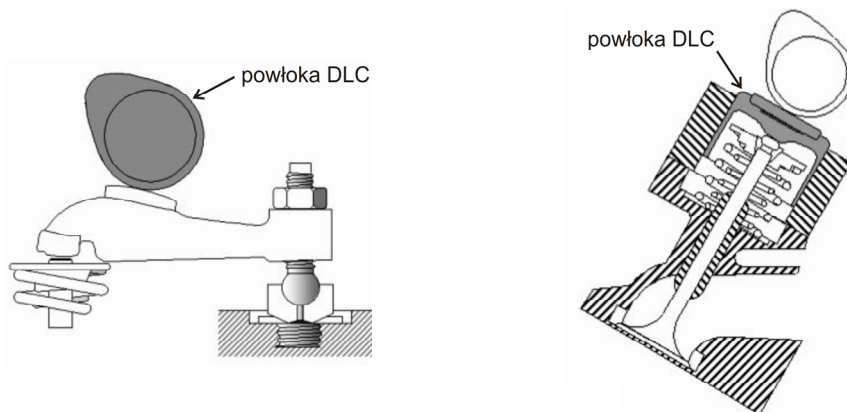
Barierą w rozszerzaniu obszaru zastosowań powłok PVD/CVD na elementy maszyn jest brak wiedzy na temat ich oddziaływania ze składnikami środków smarowych. Niestety większość prac nad mechanizmami zużycia powłok prowadzonych jest w warunkach tarcia suchego [2, 11, 12, 15, 26]. Wyników tych nie można uogólniać na wysokoobciążone smarowane węzły tarcia.

Dostępne w literaturze informacje dot. wyników badań fizykochemicznych interakcji materiałów elementów węzłów tarcia, w tym szczególnie oddziaływań komponentów środków smarowych z elementami trącymi, są niepełne i niejednoznaczne. Ponieważ jest to stosunkowo nowe zagadnienie, bardzo słabo rozpoznane są zjawiska zachodzące w styku pomiędzy powłoką a środkiem smarowym [16, 22]. Dany środek smarowy może w odmienny sposób oddziaływać na różne powłoki i tym samym różnicować ich zużywanie, zwłaszcza w ekstremalnych warunkach [3, 8, 16, 28]. Oddziaływania te można kształtować przez odpowiedni dobór dodatków smarnościowych. Niestety, reguły dotyczące oddziaływań dodatków stwierdzone dla stali konstrukcyjnej nie obowiązują w systemach, w których przynajmniej jeden z elementów pokryty jest powłoką.

Zastosowanie powłok na elementach trących maszyn znajduje się w centrum uwagi wielu liczących się ośrodków badawczych na świecie, ze względu na ogromny potencjał aplikacyjny [10, 20, 21]. Prace nad zwiększeniem odporności na zacieranie przekładni

poprzez pokrycie powierzchni roboczych kół zębatych realizowane były w Europie m. in. w ramach inicjatywy COST Akcji 532 [13], projektów Programów Ramowych Unii Europejskiej [1] oraz w Stanach Zjednoczonych w ramach projektów NASA [7].

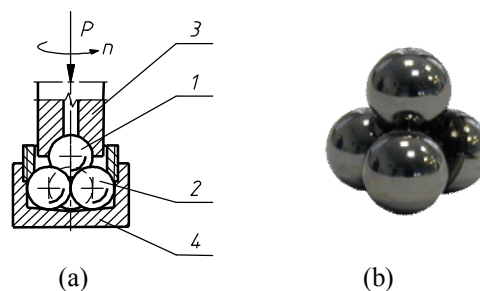
W literaturze dostępne są informacje o stosowaniu powłok DLC (Diamond Like Carbon) na koła zębate [6], mechanizmy rozrządu zaworowego, popychacze zaworów, sworznie stopy korbowodu i pierścienie tłokowe silników spalinowych [5, 9] i elementy mechanizmu krzywka-popychacz (Rys.1) [4]. Pokryciu podlegają zwykle elementy narażone na zacieranie współpracujące z niepokrytym elementem stalowym.



Rys. 1. Rysunki mechanizmów ze wskazanymi elementami pokrytymi powłoką DLC

2. Metoda badawcza

Badanie zacierania w ruchu ślizgowym przeprowadzono z wykorzystaniem aparatu czterokulowego T-02 [19, 24, 25]. Do testów zastosowano kulki o średnicy 12.7 mm (0.5 in.), o chropowatości powierzchni, wyrażonej parametrem Ra, równej 0,032 μm , oraz twardości 62 \pm 2 HRC. Czterokulowy węzeł tarcia przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Modelowy, czterokulowy węzeł tarcia do testów zacierania: a) schemat: 1- kulka górna, 2- kulki dolne, 3- uchwyt kulki górnej, 4- uchwyt kulek dolnych, b) zdjęcie węzła

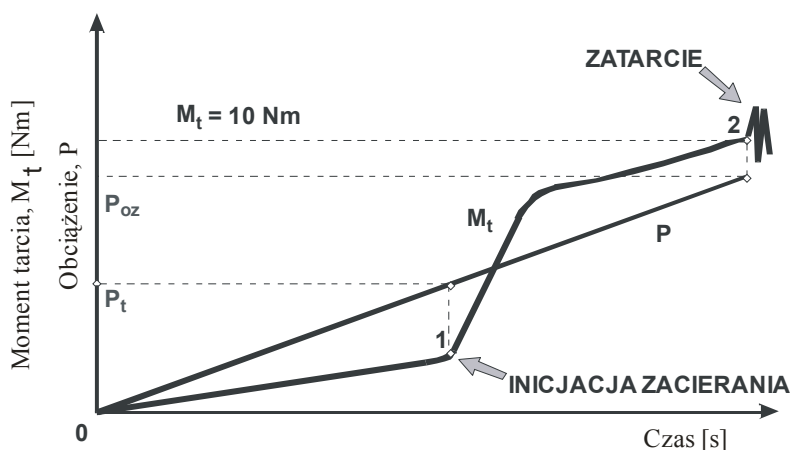
Trzy unieruchomione w uchwycie (4) kulki dolne (2) są dociskane do kulki górnej (1), obracającej się z prędkością n . Obciążenie węzła tarcia narasta liniowo. Elementy trące zanurzone są w badanym oleju. Podczas testu rejestrowany jest zmiana momentu tarcia aż do chwili stwierdzenia zatarcia węzła (unieruchomienia wrzeciona aparatu), bądź osiągnięcia obciążenia węzła tarcia wynoszącego 7200 N.

Badania prowadzono przy następujących warunkach:

- prędkość kulki górnej [obr/min]: 500,
- prędkość poślizgu [m/s]: 0,19,

- szybkość narastania obciążenia [N/s]: 409,
- obciążenie maksymalne [N]: 7200±100
- obciążenie początkowe [N]: 0,
- temperatura początkowa [°C]: około 20,
- minimalna liczba testów: 3 dla każdego badanego skojarzenia.

Przykładowy przebieg zmian momentu tarcia (M_t) otrzymany przy liniowo narastającym obciążeniu (P), przedstawiony jest na Rys. 3.



Rys. 3. Przykładowy przebieg zmian momentu tarcia (M_t) otrzymany przy liniowo narastającym obciążeniu (P): 1- inicjacja zacierania, 1-2- propagacja zacierania, 2- zatarcie

Punkt oznaczony cyfrą 1, charakteryzuje przerwanie filmu smarowego i gwałtowny wzrost oporów ruchu, stanowiący początek zacierania. Obciążenie (P_1) odpowiadające punktowi 1 nazwano obciążeniem zacierającym (zgodnie z normą [18]). Test prowadzi się do chwili, w której następuje zatarcie elementów węzła (osiągnięcie momentu tarcia wynoszącego 10 Nm), opisane cyfrą 2. Wartość obciążenia, odpowiadająca punktowi 2 nazwano obciążeniem zatarcia (P_{oz}) [17]. W przypadku kiedy zatarcie nie nastąpi, przyjmuje się wartość P_{oz} wynoszącą 7200 N [2, 24].

Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} obliczano ze wzoru (1):

$$p_{oz} = 0,52 \frac{P_{oz}}{d^2} \quad (1)$$

Gdzie:

P_{oz} - obciążenie P , przy którym nastąpiło zatarcie węzła (obciążenie zatarcia),

d - średnia średnica śladów wytarcia na kulkach dolnych [17].

3. Cel i obiekty badań

Celem pracy było zbadanie wpływu olejów na charakterystyki zacierania stalowych węzłów tarcia oraz skojarzeń z elementami stalowymi pokrytymi niskotarciowymi powłokami. Testowe węzły tarcia smarowano następującymi olejami: mineralnym olejem wzorcowym (RL 219), syntetycznym olejem polialfaolefinowym (PAO 8), olejem rzepakowym (RzR) oraz dwoma komercyjnymi olejami klasy GL 5: mineralnym (GL5m) i syntetycznym (GL5s). Wybrane właściwości fizyko-chemiczne wyżej wymienionych olejów przedstawiono w tab. 1.

W przypadku badań węzłów tarcia z elementami pokrytymi powłokami przebadane zostały dwie powłoki PVD: WC/C oraz MoST. Powłoka WC/C jest powłoką typu DLC reprezentującą grupę powłok a-C:H:Me. Składa się ona z warstwy Cr związanej adhezyjnie ze

stalowym podłożem, naprzemiennie ułożonych lamelli Cr i WC oraz zewnętrznej warstwy W zawierającej wodór i węgiel (a-C:H:W). Warstwa zewnętrzna a-C:H:W zawiera w przybliżeniu: 12% W, 70% C, 15% H oraz 3% Ni. Powłoka WC/C została naniesiona w procesie PVD (Physical Vapour Deposition) z wykorzystaniem reaktywnego rozpylania.

Tabela 1. Charakterystyka badanych olejów

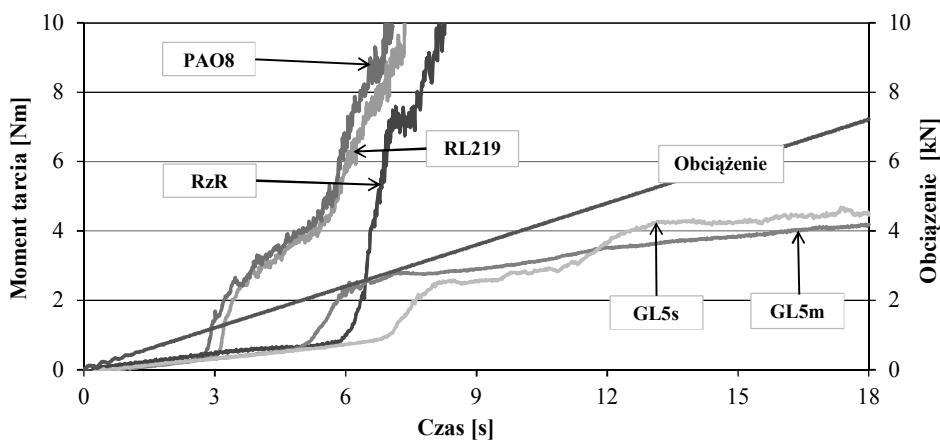
Właściwość	Jednostka	Wartość				
		RL 219	PAO 8	RzR	GL5m	GL5s
Lepkość w 40 °C	mm ² /s	49,31	47,04	25,68	40	81
Wskaźnik lepkości	-	99,3	140	213	106	194
Gęstość w 15 °C	g/ml	0,874	0,832	0,921	0,880	0,879
Temperatura zapłonu	°C	225	260	332	220	205

MoST to komercyjna nazwa niskotarciowej, kompozytowej powłoki MoS₂/Ti. Powłoka ta została naniesiona za pomocą rozpylania w polu magnetycznym (DC Magnetron Sputtering) z wykorzystaniem procesu CFUBMSIP (Closed Field Unbalanced Magnetron Sputter Ion Plating). Proces osadzania powłoki poprzedzony jest jonowym czyszczeniem elementu węzła tarcia, po którym zostaje na jego powierzchni naniesiona warstwa Ti o grubości 70 nm, na nią nanoszone są warstwy MoS₂/Ti, początkowo naprzemiennie, a następnie wielofazowo. Ostatnią warstwę stanowi 50 nm MoS₂ nadająca powłoce charakterystyczny kolor.

4. Wyniki badań zacierania

Odporność na zacieranie została wyznaczona w oparciu o wskaźnik obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego nacisku zatarcia p_{oz} . Graniczny nacisk zatarcia, w sposób pośredni, opisuje również odporność na zużycie badanego węzła pracującego w ruchu ślizgowym. Im wyższe wartości P_t i p_{oz} osiąga badane skojarzenie, tym wyższa jest jego odporność na inicjację zacierania i zużycie.

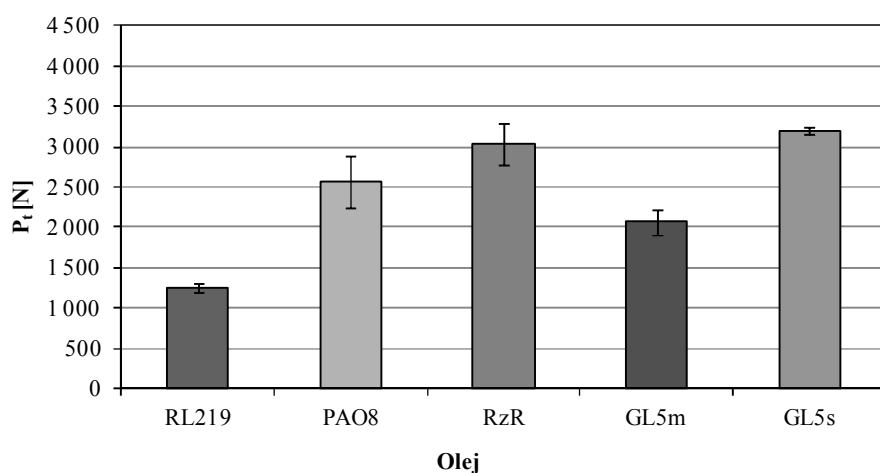
Przedstawiane na wykresach wskaźniki P_t i p_{oz} zostały wyznaczone w oparciu o wyniki co najmniej trzech biegów badawczych dla każdego z badanych skojarzeń materiałowych. Na wykresach przedstawiających zmiany oporów ruchu przedstawiono jeden z wybranych przebiegów momentu tarcia.



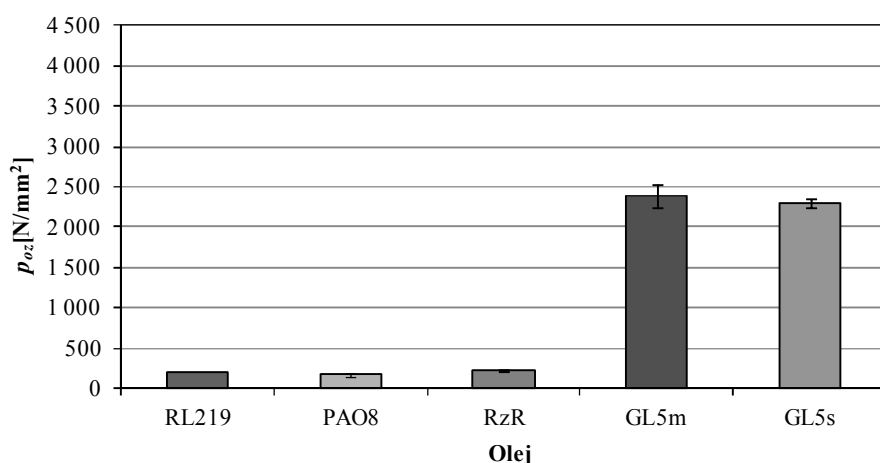
Rys. 4. Przebiegi momentów tarcia skojarzenia stalowego (100Cr6-100Cr6) smarowanego badanymi olejami

Przebiegi momentów tarcia skojarzenia stalowego, smarowanego badanymi olejami przedstawiono na Rys. 4. Z wykresów tych wynika, że w przypadku skojarzenia stal-stal jedynie komercyjne oleje klasy GL5 zapewniają ochronę wężła przed zatarciem. Spowodowane to jest obecnością w tych olejach, dodatków przeciwwzartarciowych typu EP (Extreme Pressure). Spośród pozostałych olejów (mineralny wzorcowy, syntetyczny i roślinny), żaden nie zapewnia pełnej ochrony przeciwwzartarciowej. Interesujące jest to, że smarowane olejem roślinnym skojarzenie stalowe było bardziej odporne na inicjację zacierania w odniesieniu do tego samego skojarzenia smarowanego komercyjnym olejem mineralnym. Należy przy tym podkreślić, że olej rzepakowy posiadał najniższą lepkość w 40°C spośród wszystkich badanych środków smarowych.

Średnie wartości obciążenia zacierającego P_t , charakteryzujące przerwanie filmu smarowego i rozpoczęcie procesu zacierania, otrzymane dla skojarzenia stal-stal, smarowanego badanymi olejami, przedstawiono na Rys. 5. Należy jednak zaznaczyć, że wyższa wartość P_t oleju rzepakowego RzR, w odniesieniu do komercyjnego oleju mineralnego GL5m, nie zapewnia pełnej ochrony stalowego wężła przed zatarciem, jak to ma miejsce w przypadku olejów komercyjnych.



Rys. 5. Obciążenie zacierające P_t dla skojarzenia stal-stal smarowanego badanymi olejami

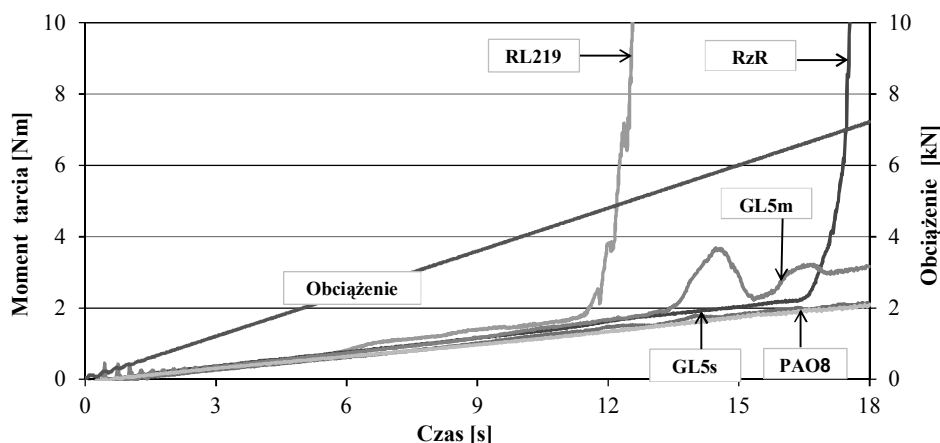


Rys. 6. Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} dla skojarzenia stal-stal smarowanego badanymi olejami

Średnie wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} , otrzymane dla skojarzenia stal-stal smarowanego badanymi olejami, przedstawiono na Rys. 6. Wartości te są niemal identyczne

dla czystych olejów bez dodatków. Ze względu na brak zatarcia w przypadku olejów z dodatkami EP, dla wyznaczenia wskaźnika p_{oz} zastosowano maksymalną wartość obciążenia zatarcia P_{oz} . Z otrzymanego z obliczeń granicznego nacisku zatarcia p_{oz} wynika, że handlowy olej mineralny GL5m zapewnia nieco lepszą ochronę przed zużyciem niż olej syntetyczny GL5s.

Oprócz skojarzeń stalowych zbadano również odporność na zacieranie węzłów z górną kulką pokrytą cienką niskotarciową powłoką WC/C. Przebiegi momentów tarcia skojarzenia WC/C-stal, smarowanego badanymi olejami, przedstawiono na Rys. 7.

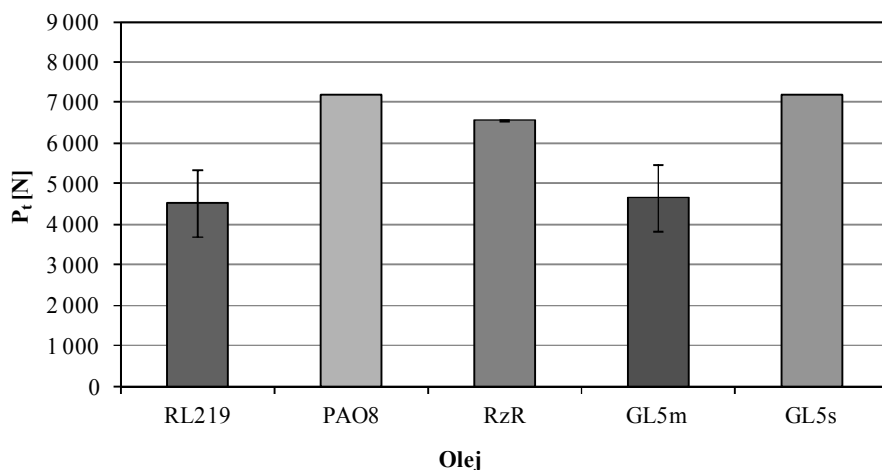


Rys. 7. Przebiegi momentów tarcia skojarzenia WC/C-stal smarowanego badanymi olejami

Wprowadzenie do badanego tribosystemu górnej kulki pokrytej powłoką WC/C spowodowało zasadniczy wzrost odporności na zacieranie w węzłach tarcia smarowanych wszystkimi badanymi olejami. Przebiegi zmian oporów ruchu uzyskane dla skojarzeń smarowanych olejami syntetycznymi niemalże nakładają się na siebie, co można wytłumaczyć przejściem przez powłokę WC/C roli dodatków przeciwzatarciowych, i co znalazło potwierdzenie we wcześniejszych pracach dotyczących powłok [14, 29].

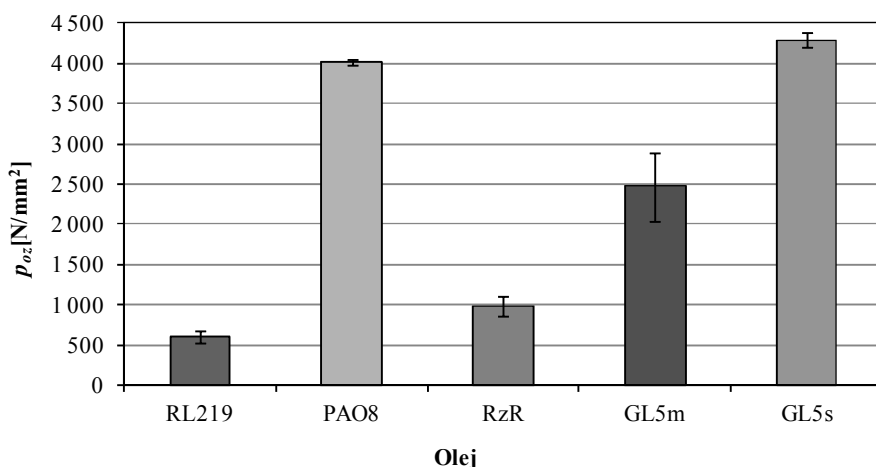
Średnie wartości obciążenia zacierającego P_t , otrzymane dla skojarzenia WC/C-stal smarowanego badanymi olejami, przedstawione są na Rys. 8.

Obciążenie zacierające P_t , otrzymane dla węzła WC/C-stal smarowanego olejem mineralnym, jest czterokrotnie wyższe w odniesieniu do skojarzenia stal-stal. W przypadku oleju rzepakowego wzrost P_t jest dwukrotny. Najwyższe wartości P_t uzyskano dla węzłów smarowanych olejami syntetycznymi. Analizując wartości obciążenia zacierającego P_t skojarzenia WC/C-stal (Rys. 8), smarowanego olejami mineralnymi bez dodatków (RL 144) i z dodatkami (GL5m) daje się zaobserwować znaczny rozrzut wyników badań w stosunku do pozostałych olejów. Podkreślić jednak należy, że w przypadku czystego oleju mineralnego następuje zatarcie węzła tarcia, natomiast w przypadku oleju handlowego z dodatkami EP, pomimo wzrostu oporów ruchu, zatarcie nie następuje. W przeciwieństwie do olejów syntetycznych, w przypadku olejów mineralnych wpływ dodatków przeciwzatarciowych na zacieranie jest wyraźny. Interesujące jest również oddziaływanie oleju roślinnego na badane skojarzenie, gdyż zwiększa on wartość obciążenia zacierającego P_t ok. 1,5 raza w odniesieniu do czystego oleju mineralnego, pomimo że lepkość kinematyczna oleju roślinnego jest zdecydowanie niższa.



Rys. 8. Obciążenie zacierające P_1 dla skojarzenia WC/C-stal smarowanego badanymi olejami

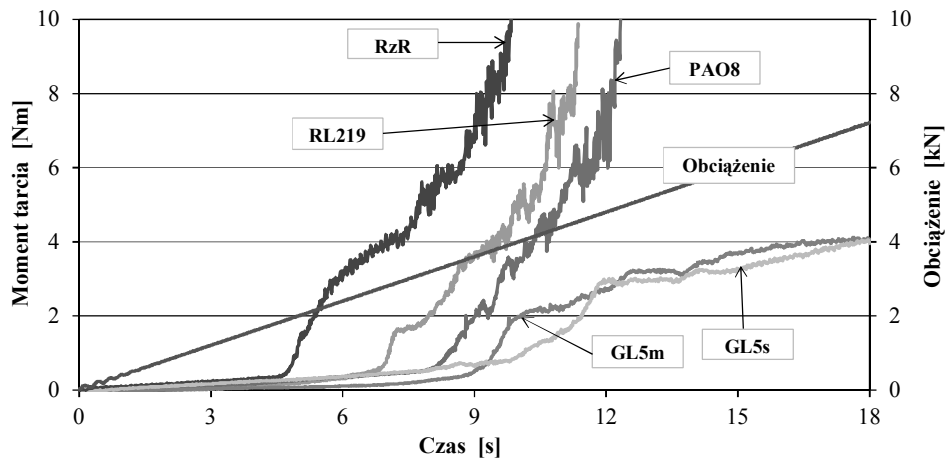
Średnie wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} , otrzymane dla skojarzenia WC/C-stal smarowanego badanymi olejami przedstawiono na Rys. 9. Z wykresu tego wynika, że skojarzenie to jest najbardziej odporne na zużycie w przypadku smarowania komercyjnym olejem syntetycznym, a nieco niższe w przypadku smarowania czystym olejem syntetycznym bez dodatków.



Rys. 9. Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} dla skojarzenia WC/C-stal smarowanego badanymi olejami

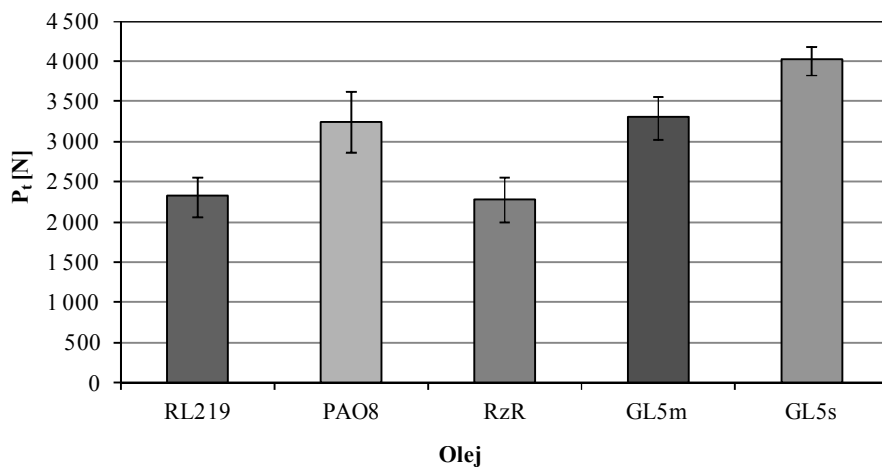
Obok skojarzeń stalowych oraz WC/C-stal, przeprowadzono również badania odporności na zacieranie węzłów z górną kulką pokrytą powłoką MoS₂/Ti. Przebiegi momentów tarcia skojarzenia MoS₂/Ti-stal, smarowanego badanymi olejami przedstawiono na Rys. 10.

Przebiegi te dla skojarzenia MoS₂/Ti-stal pokazują, że w odniesieniu do stalowego węzła tarcia nastąpił wzrost odporności na zacieranie niemal we wszystkich przebadanych przypadkach. Wyjątek stanowi węzeł tarcia smarowany olejem rzepakowym.



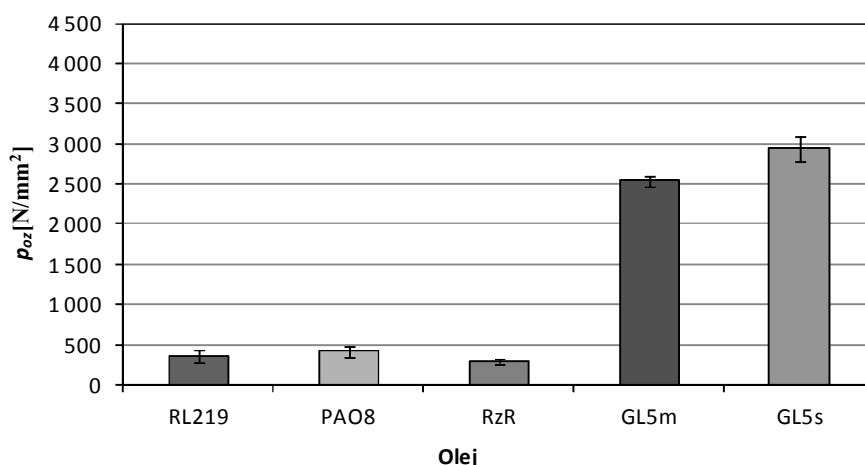
Rys. 10. Przebiegi momentów tarcia skojarzenia MoS₂/Ti-stal smarowanego badanymi olejami

Średnie wartości obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego nacisku zatarcia p_{oz} , otrzymane dla skojarzenia MoS₂/Ti-stal smarowanego badanymi olejami, przedstawione są na Rys. 11 i Rys. 12. Dla wszystkich przebadanych olejów, różnice w wartości P_t są w granicach 50%. Dla tego skojarzenia zauważono również zwiększenie ochrony przed zatarciem w odniesieniu do skojarzenia stalowego (Rys. 4), aczkolwiek niższe niż dla węzłów z elementami pokrytymi powłoką WC/C. Dla skojarzenia MoS₂/Ti-stal, najlepszą ochronę przed zatarciem, zapewnia handlowy olej syntetyczny



Rys. 11. Obciążenie zacierające P_t dla skojarzenia MoS₂/Ti -stal smarowanego badanymi olejami

Z zestawienia wartości p_{oz} przedstawionych na Rys. 12 wynika, że w przypadku skojarzenia MoS₂/Ti-stal najlepszą ochronę przed zużyciem z przebadanych olejów zapewniają oleje komercyjne, które o rząd przewyższają czyste oleje bez dodatków.



Rys. 12. Graniczny nacisk zatarcia p_{oz} dla skojarzenia MoS_2/Ti -stal smarowanego badanymi olejami

5. Podsumowanie

Otrzymane rezultaty wskazują na kluczową rolę zastosowanego środka smarowego w procesie zacierania badanych skojarzeń. Stwierdzono również, że wpływ rodzaju oleju na zatarcie elementów stalowych pokrytych powłokami PVD jest zależny od rodzaju powłoki.

Wprowadzenie elementu węzła tarcia z powłoką niskotarciową powoduje zmianę charakterystyk zacierania badanych skojarzeń na bardziej korzystne, o czym świadczą następujące spostrzeżenia:

1. W przypadku skojarzenia materiałowego stal-stal, spośród badanych środków smarowych tylko oleje handlowe skutecznie zabezpieczają węzeł tarcia przed zatarciem. Olej roślinny zapewnia dłuższy okres pracy węzła przed inicjacją zacierania niż handlowy olej mineralny, przy czym brak dodatków przeciwzatarciowych powoduje, że zatarcie węzła smarowanego olejem rzepakowym następuje przy nieco wyższym obciążeniu niż w przypadku mineralnego oleju wzorcowego RL 144 oraz syntetycznego PAO 8. Przebiegi procesu zacierania tego węzła, smarowanego olejem syntetycznym PAO 8 oraz mineralnym olejem wzorcowym RL 144, charakteryzowane przez momenty tarcia prawie się pokrywają, świadcząc równocześnie o najniższej ochronie przed inicjacją zacierania spośród badanej grupy środków smarowych.
2. Zastosowanie powłoki a-C:H:W wpływa na poprawę przebiegu zacierania węzłów smarowanych wszystkimi badanymi olejami. W przypadku olejów: roślinnego oraz handlowego mineralnego obciążenie zacierające jest niemal dwukrotnie wyższe, przy czym ochrona przed zatarciem nie została zapewniona. Najbardziej wyraźna zmiana dotyczy węzła smarowanego olejem PAO 8, którego charakterystyka zacierania pokrywa się z charakterystyką handlowego oleju syntetycznego zawierającego dodatki przeciwzatarciowe. **Wynika stąd, że powłoka przejęła rolę dodatków smarnościowych**, potwierdzając wyniki uzyskane w poprzednich pracach autorów.
3. Zastosowanie powłoki MoS_2/Ti daje negatywny skutek w postaci przyspieszenia inicjacji zacierania dla węzła smarowanego olejem roślinnym, natomiast dla oleju syntetycznego PAO 8 zaobserwowano około dwukrotne zwiększenie zarówno obciążenia zacierającego, jak również granicznego nacisku zatarcia, w odniesieniu do skojarzenia stal-stal. Powłoka MoS_2/Ti podnosi również poziom ochrony przeciwzatarciowej węzłów smarowanych olejami handlowymi.

Bardzo ważnym efektem praktycznym przeprowadzonych badań jest wykazanie, że powłoki PVD nanoszone na elementy stalowych systemów tribologicznych, przejmują

funkcje klasycznych, nieekologicznych na ogół, dodatków smarnościowych (EP), pozwalając na ich redukcję w środkach smarowych

**Praca realizowana w ramach Programu Strategicznego „Innowacyjne systemy
wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki”
nr POIG.01.01.02-14-034/09-00.**

Literatura

1. Vercammen K, Van Acker K, Meneve J. Current trends in tribology. Belgia: Wydawnictwo VITO, 2004.
2. Totten GE, Liang H. Mechanical Tribology. Materials, characterization, and applications. Nowy Jork-Bazylea: Wyd. Marcel Dekker, Inc., 2004.
3. Equey S, Roos S, Mueller U, Hauert R, Spencer ND, Crockett R. Reactions of zinc-free anti-wear additives in DLC/DLC and steel/steel contacts. Tribology International 2008; 41: 1090-1096.
4. Gåhlin R, Larsson M, Hedenqvist P. ME-C:H coatings in motor vehicles. Wear 2001; 249: 302-309.
5. Hauert R. An overview on the tribological behavior of diamond-like carbon in technical and medical applications. Tribology International 2004; 37: 991-1003.
6. Joachim F. Influence of coatings and surface improvements on the lifetime of gears. Proc. COST 532 “Triboscience and Tribotechnology”. Gent, Belgia 2004: 138-147.
7. Krantz TL, Cooper CV, Townsend DP, Hansen BD. Increased Surface Fatigue Lives of Spur Gears by Application of a Coating. 2003; Raport NASA/TM-2003-212463.
8. Łuksa A red. Ekologia płynów eksploatacyjnych. Radom: Wydawnictwo MCNEMT, 1990.
9. Makoto Kano. DLC Coating Technology Applied to Sliding Parts of Automotive Engine. New Diamond and Frontier Carbon Technology 2006; 16: 201-210.
10. Martins R, Amaro R, Seabra J. Influence of low friction coatings on the scuffing load capacity and efficiency of gears. Tribology International 2008; 41: 234-242.
11. Michalczewski R. Charakterystyki tribologiczne cienkich powłok niskotarciowych typu DLC i MoS₂ w warunkach tarcia suchego. ZEM 2006;146: 117-131.
12. Michalczewski R, Piekoszewski W. Wear and friction of low friction coatings in dry conditions. Tribologia, Finish Journal of Tribology 2007; 26: 9-21.
13. Michalczewski R, Piekoszewski W, Szczerek M, Tuszyński W. Chemomechanical synergy of PVD/CVD coatings and environmentally friendly lubricants in rolling and

- sliding contacts. Proc. COST 532 "Triboscience and Tribotechnology". Gent, Belgium 2004: 181-190.
14. Michalczewski R, Piekoszewski W, Szczerek M, Tuszyński W. The lubricant-coating interaction in rolling and sliding contacts. *Tribology International* 2009; 42: 554-560.
 15. Michalczewski R, Piekoszewski W, Szczerek M, Tuszyński W. A method for tribological testing of thin hard coatings. *Tribotest Journal* 2002; 9: 117-130.
 16. Neville A, Morina A, Haque T, Voong M. Compatibility between tribological surfaces and lubricant additives. How friction and wear reduction can be controlled by surface/lube synergies. *Tribology International* 2007; 40: 1680-1695.
 17. Patent Nr 179123 - B1 – G01N 33/30 Sposób oceny przeciwzatarciowych właściwości środków smarowych na aparacie 4-kulowym.
 18. PN-76/C04147 Przetwory naftowe. Badanie właściwości smarnych olejów i smarów.
 19. Piekoszewski W, Szczerek M, Tuszyński W. A method for testing lubricants under conditions of scuffing. Part II. The anti-seizure action of lubricating oils. *Tribotest Journal* 2002; 9: 35-48.
 20. Podgornik B, Jacobson S, Hogmark S. Influence of EP and AW additives on the tribological behaviour of hard low friction coatings. *Surface and Coatings Technology* 2003; 165: 168-175.
 21. Shimizu S. Fatigue Limit Concept and Life Prediction Model for Rolling Contact Machine Elements. *Tribology Transaction* 2002; 45: 39-46.
 22. Stallard J, Teer D G. A study of tribological behaviour of CrN, Graphit-iC and Dymon-iC coatings under oil lubrication. *Surface and Coatings Technology* 2004; 188-189: 525-529.
 23. Szczerek M, Michalczewski R, Piekoszewski W. The problems of application of PVD/CVD thin hard coatings for heavy-loaded machine components. San Diego: Proceedings of the ASME/STLE International Joint Tribology Conference 2007; ASME Part A: 35-37.
 24. Szczerek M, Tuszyński W. A method for testing lubricants under conditions of scuffing. Part I. Presentation of the method. *Tribotest Journal* 2002; 8/4: 273-284.
 25. Szczerek M, Tuszyński W. A method for assessing performance of automotive gear oils. New horizons for tribology and lubricants. *Handbuch der Tribologie und Schmierungstechnik* 2002; 10: 108-115.
 26. Tuszyński W, Szczerek M, Michalczewski R. Investigation of antiwear coatings deposited by the PVD process. *Tribotest Journal* 2003; 10: 3-18.

27. Tuszyński W, Piekoszewski W. Effect of the type and concentration of lubricating additives on the antiwear and extreme pressure properties and rolling fatigue life of a four-ball tribosystem. *Lubrication Science* 2006; 18/4: 309-328.
28. Vercammen K, Van Acker KA, Vanhulsel A, Barriga J, Arnsek A, Kalin M, Meneve J. Tribological behaviour of DLC coatings in combination with biodegradable lubricants. *Tribology International* 2004; 37: 983-989.
29. Vlad M, Szczerek M, Michalczewski R, Kajdas C, Tomastik C, Osuch-Słomka E. The influence of antiwear additive concentration on the tribological behaviour of a-C:H/W/steel tribosystem. *Proc. IMechE Part J: Journal Engineering Tribology* 2010; 224/10: 1079-1089.