

Marian GRĄDKOWSKI, Anna MATUSZEWSKA
Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom

OLEJ SMAROWY DO WĘZŁÓW TARCIA Z POWŁOKĄ NISKOTARCIOWĄ WC/C

Słowa kluczowe

Węzeł tarcia, powłoka WC/C, zużywanie, zacieranie, pitting, olej bazowy, dodatki smarne, olej smarowy.

Streszczenie

Przedstawiono prace zmierzające do wytworzenia ekologicznych olejów smarowych, przeznaczonych do smarowania węzłów tarcia, w których elementy trące są pokryte twardymi powłokami niskotarciowymi typu WC/C. Zbadano wpływ rodzaju oleju bazowego na zacieranie, zużywanie i powierzchniową trwałością zmęczeniową elementów pokrytych powłoką WC/C. W badaniach używano mineralnych i syntetycznych olejów bazowych. Stwierdzono, że większość badanych baz olejowych tworzy na elementach pokrytych powłoką WC/C film smarowy o wyższej nośności niż handlowy olej przekładniowy klasy SAE – 80W, API – GL-4. Największą odporność na zacieranie stwierdzono dla bazy olejowej opartej na poliglikolach, zaś najmniejszą dla mineralnej. Stwierdzono także, że bazy olejowe, charakteryzujące się dużą nośnością filmu smarowego, mogą pogarszać powierzchniową trwałością zmęczeniową (pitting) elementów z powłokami WC/C.

W oparciu o poli(α)olefinową bazę olejową, która równolegle z dobrą ochroną przed zacieraniem i zużywaniem zapewnia względnie wysoką trwałością zmęczeniową elementów pokrytych powłoką WC/C, skomponowano olej zawierający jedynie 0,4% dodatków EP. Olej taki charakteryzuje się korzystnymi właściwościami tribologicznymi i ekologicznymi. Zapewnia on wysoką odpor-

ność węzła pokrytego powłokami WC/C na zużycie, zacieranie i, co najważniejsze, znacząco poprawia powierzchnię trwałość zmęczeniową względem wyjściowego oleju bazowego.

Wprowadzenie

Zagadnienie trwałości węzłów tarcia jest jednym z istotniejszych problemów technicznych, determinujących trwałość i niezawodność maszyn i urządzeń [1–3]. Trwałość węzłów tarcia można kształtować dwiema zasadniczymi drogami. Jedną z nich jest rozwój materiałów i technologii wytwarzania węzłów tarcia (np. nakładanie na robocze powierzchnie cienkich, twardych powłok przeciwzużyciowych); drugą – doskonalenie materiałów smarowych. Do pokrywania elementów maszyn narażonych na tarcie najczęściej stosuje się powłoki wytwarzane na bazie amorficznego węgla (typu a-C, a-C:H oraz Me-C:H, gdzie Me to W, Ti, Cr, Si lub B), określane często wspólnym mianem DLC (*Diamond Like Carbon*) [4]. Interesujące właściwości wykazują tzw. powłoki niskotarciowe, w szczególności typu [5]: WC/C, W-C:H, Graphit-iC i Dymon-iC. Małe naprężenia ścinające w warstwie przejściowej, powstającej w strefie kontaktu tarcowego jako konsekwencja procesów grafityzacji i utleniania składników powłoki i środka smarowego, zapewniają dobre właściwości tribologiczne węzłów tarcia z tymi powłokami.

Zastosowanie twardych powłok niskotarciowych na elementy trące wygenerowało nowy problem, jakim jest dobór środków smarowych „kompatybilnych” z materiałem powłoki. Dotychczas dominują w technice stalowe węzły tarcia i dla nich opracowywano materiały smarowe. Takie materiały smarowe okazały się nieprzydatne, a czasami wręcz szkodliwe dla węzłów tarcia z twardymi powłokami niskotarciowymi. Wynika to nie tylko ze struktury materiałowej takich węzłów tarcia, ale także niskiej, w porównaniu ze stalą, energii powierzchniowej powłoki. To powoduje, że na powierzchni tych powłok formowane są filmy smarowe o innych właściwościach niż na powierzchni stali [6–7]. W efekcie właściwości eksploatacyjne węzłów tarcia z twardymi powłokami niskotarciowymi w większym stopniu niż stalowych zależą od właściwości materiału smarowego [6–8]. Zmusza to do szczególnej ostrożności przy dobieraniu środków smarowych przeznaczonych do węzłów tarcia z tymi powłokami.

Celem pracy była selekcja baz olejowych i dodatków smarnych do komponowania oleju przeznaczonego do smarowania węzłów tarcia, w których stosowane są stalowe elementy pokryte twardą powłoką niskotarciową typu WC/C.

1. Metody i obiekty badań

Przeciwzużyciowe działanie kompozycji smarowych badano za pomocą aparatu czterokulowego T-02 (prod. ITeE w Radomiu) przy stałym obciążeniu

węzła tarcia w następujących warunkach: czas biegu – 3600 s, obciążenie węzła P – 392 N, prędkość obrotowa – 1450 obr./min, temperatura otoczenia. Efektywność przeciwzużyciową środka smarowego oceniano na podstawie średnicy skazy d lub wartości granicznego obciążenia zużycia wyliczanego z zależności: $G_{oz} = 0,52 \cdot P/d^2$ [N/mm²]. Za pomocą tego samego testera badano także odporność węzła tarcia na zacieranie. Testy prowadzono przy liniowym przyroście obciążenia w następujących warunkach: obroty wrzeciona 500±20 obr./min, prędkość poślizgu 0,19 m/s, przyrost obciążenia 409 N/s, obciążenie końcowe testu 7400±100 N, temperatura otoczenia. Porównania właściwości przeciwzatarciowych kompozycji smarowych dokonywano na podstawie wartości obciążenia zacierającego P_t (wg PN-76/C-04141), które pośrednio świadczy o nośności filmu smarowego. Jako wyniki testów przyjmowano średnią arytmetyczną z co najmniej trzech biegów, wolnych od błędu grubego. Wyniki wątpliwe wykrywano za pomocą testu Q-Dixona przy 95% poziomie ufności i eliminowano ze zbiorów danych.

Powierzchniową trwałość zmęczeniową badano za pomocą testera T-03 – zmodyfikowanego aparatu czterokulowego [9], którego węzeł testowy pracuje w warunkach tarcia tocznego. Górna kulka w tym węźle została zastąpiona stożkiem, co ułatwia nałożenie powłoki. Badania prowadzono w temperaturze otoczenia w następujących warunkach: obroty wrzeciona 1450±50 obr./min, obciążenie wstępne węzła 981 N, obciążenie badawcze 3924 N. Dla każdej kompozycji przeprowadzono 24 biegi testowe. Test trwał do wystąpienia pittingu. Wyniki opracowywano, korzystając z rozkładu Weibulla. Powierzchniową trwałość zmęczeniową opisywano za pomocą tzw. trwałości L₁₀ – czas, po którym 10% populacji badanych elementów ulega uszkodzeniu w warunkach testu.

Jako elementy testowe węzłów tarcia stosowano kulki ze stali łożyskowej ŁH-15 o średnicy 12,7 mm oraz stożki o kącie wierzchołkowym 94°. Podczas badań obciążenia zacierającego i wielkości zużycia wszystkie kulki były pokryte niskotarciową powłoką WC/C, natomiast podczas badań powierzchniowej trwałości zmęczeniowej, powłoką były pokryte jedynie stożki. Powłoki WC/C osadzono metodą PVD (*Physical Vapour Deposition*) z wykorzystaniem reaktywnego rozpylania magnetronowego. Właściwości powłok przedstawiono w tab. 1. W celach porównawczych przeprowadzano badania, w których elementami testowymi były kulki stalowe i stożki ze stali ŁH-15 nie pokrywane powłoką niskotarciową. Przed badaniami wszystkie elementy testowe oczyszczano w benzynie ekstrakcyjnej w myjce ultradźwiękowej przez 10 minut.

Porównanie energii powierzchniowych powłoki WC/C i stali ŁH-15 wykonanych metodą Fowkesa [10] wykazało, że różnią się one istotnie wartością składowej dyspersyjnej i polarnej – tab. 2. Składowa polarna (o której stanowią, między innymi, oddziaływania dipol-dipol, wiązania wodorowe, wiązania akceptorowo-donorowe) dla stali jest dwukrotnie wyższa niż dla powłoki WC/C. Można zatem spodziewać się, że oddziaływania adsorpcyjne składników oleju

z powłoką WC/C będą słabsze niż z powierzchnią stali. Zwiększenie oddziaływań środka smarowego z powłoką WC/C można osiągnąć, używając do jego komponowania składników o wyższej polarności. W celu zweryfikowania tej tezy, w badaniach zastosowano wybrane oleje niepolarne (poli(α)olefinowy, biały oraz bazę mineralną SAE 30/95) oraz syntetyczne oleje bazowe, zawierające w cząsteczce dużą liczbę grup polarnych (poliestrowy, poliglikolowy). Właściwości badanych baz olejowych porównano z właściwościami oleju przekładniowego o klasie jakościowej API GL-4 i lepkościowej SAE 80/W.

Tabela 1. Właściwości powłoki WC/C naniesionej na elementy testowe

Właściwość	Opis
Materiał powłoki	węgiel wolframu, węgiel
Materiał podłoża	stal ŁH-15
Symbol powłoki	a-C:H:W
Międzywarstwa	Cr, WC
Struktura powłoki	warstwowa
Grubość powłoki	2 μ m
Nanotwardość, HV	~1080
Moduł Younga, GPa	~140
Obciążenie krytyczne, N	106,2 N
Naprężenia własne	-1,0 GPa

Tabela 2. Energia powierzchniowa powłoki WC/C oraz stali ŁH-15 [11]

	Metoda Fowkesa [nM/m]	
	Stal ŁH-15	WC/C
Energia powierzchniowa, γ	39,00	45,50
Składowa dyspersyjna, γ^d	20,30	35,86
Składowa polarna, γ^p	18,70	9,64

W celu wyeliminowania wpływu lepkości na wyniki testów tribologicznych, lepkość wszystkich baz olejowych doprowadzono do poziomu odpowiedniego dla oleju klasy SAE 80/W za pomocą wiskozatora polimetakrylanowego. Oznaczanie lepkości kinematycznej prowadzono zgodnie z metodą opisaną w normie PN-EN ISO 3104:2004, za pomocą lepkościomierza Ubbelohde'a, w temperaturach 40 i 100°C. Lepkość olejów bazowych stosowanych do smarowania testowych węzłów tarcia przedstawiono w tab. 3. W tabeli tej przedstawiono także symbole nadane poszczególnym bazom olejowym i używane w dalszych opisach.

Do wytypowanego w wyniku testów oleju bazowego wprowadzano klasyczne dodatki smarne EP (extreme pressure), których ogólną charakterystykę przedstawiono w tab. 4.

Tabela 3. Charakterystyka lepkościowa i umowne symbole badanych baz olejowych

Środek smarowy	Lepkość w 40°C	Lepkość w 100°C	Wskaźnik lepkości	Umowny symbol
Olej przekładniowy GL-4	77,50	10,14	113	GL-4
Baza mineralna SAE 30/95	78,70	9,97	107	B1
Olej mineralny biały	66,34	9,01	111	B2
Baza poliestrowa	48,05	10,56	219	B3
Baza polialfaolefinowa	47,64	10,43	217	B4
Baza poliglikolowa	77,04	12,00	152	B5
Mieszanka bazy poliestrowej i poliglikolowej (1:1 m/m)	52,35	10,27	190	B6

Tabela 4. Charakterystyka i umowne symbole dodatków EP, użytych w badaniach

Rodzaj dodatku	Zawartość, [% wag.]			Umowny symbol
	siarka	fosfor	azot	
Organiczne siarczki (sulfidy)	40	–	–	EP1
Organiczne pochodne siarki i fosforu	30	1,22	0,76	EP2
Siarkowane estry naturalnych kwasów tłuszczowych	10	–	–	EP3
Siarkowane estry syntetyczne	9,5	–	–	EP4

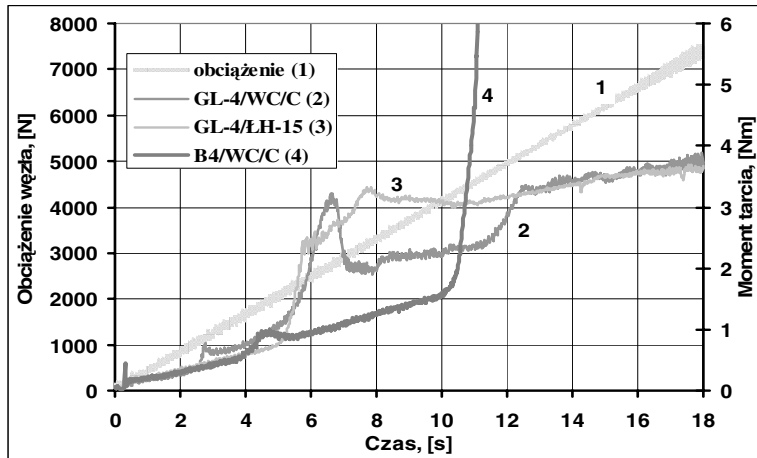
Powierzchnie śladów tarcia po testach zużyciowych badano za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej z mikroanalizą rentgenowską z dyspersją energii (SEM/EDS).

Działanie korozyjne kompozycji smarowych badano zgodnie z normą PN-85/C-04093, prowadząc badanie na płytkach miedzi przez 3 godziny w temperaturze 120°C.

2. Wyniki badań

Na rys. 1 porównano opory ruchu w funkcji obciążenia w stalowym węźle tarcia oraz w węźle pokrytym powłoką WC/C, które smarowano handlowym olejem przekładniowym GL-4 (krzywe 2 i 3) lub bazą B4 (krzywa 4). Stwierdzono, że zmiany momentu tarcia w stalowym węźle tarcia oraz w węźle z powłokami WC/C smarowanym olejem GL-4 mają zbliżony charakter. Przede wszystkim gwałtowny wzrost momentów tarcia następuje przy zbliżonym obciążeniu węzła. Ze względu na to, że grubość powłoki wynosi jedynie 2 μm, wraz z wystąpieniem zacierania następuje jej zniszczenie i przy dalszym wzroście obciążenia węzeł pracuje w układzie stal–stal. Dlatego też bark jest jako-

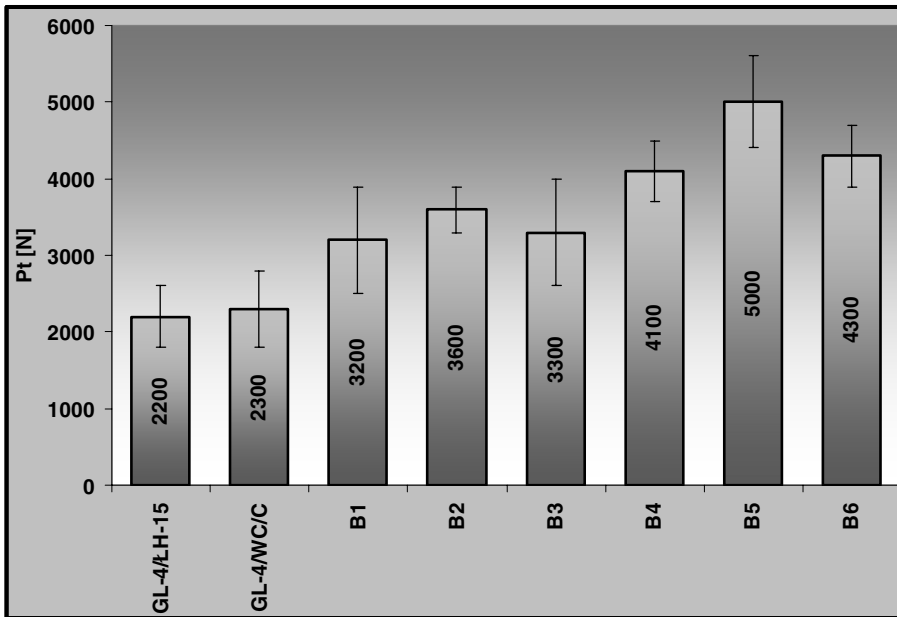
ściowych różnic momentu tarcia także po przerwaniu filmu smarowego: ich maksymalne wartości są identyczne, a przebiegi bardzo zbliżone. Jedyna różnica dotyczy wielkości oporów ruchu pierwszej fazy po przerwaniu filmu smarowego. Można więc stwierdzić, że, naniesienie powłoki WC/C na elementy stalowe nie zwiększyło nośności filmu smarowego, powstającego w obecności oleju przekładniowego GL-4. Umożliwiło jednak pracę wężła przy nieco niższych oporach ruchu w pierwszym okresie po jego przerwaniu.



Rys. 1. Zmiana momentu tarcia w funkcji obciążenia wężła stalowego oraz z powłoką WC/C smarowanego olejem przekładniowym GL-4 lub bazą B4

Porównując wielkości obciążenia zacierającego dla oleju GL-4 i bazy B4 w układzie WC/C-WC/C – krzywe 2 i 4 na rys. 1 – stwierdzono, że wartość momentu tarcia w funkcji obciążenia istotnie zależy od rodzaju środka smarowego. W przypadku wężła smarowanego olejem GL-4 przerwanie filmu następuje przy obciążeniu rzędu 2200 N, natomiast w przypadku wężła smarowanego bazą B4 przerwanie filmu smarowego następuje przy obciążeniu rzędu 4100 N i praktycznie natychmiast dochodzi do jego unieruchomienia. Przy takim obciążeniu wężel stalowy pracuje już w warunkach tarcia suchego (zacieranie), jednak nie następuje jego unieruchomienie – prawdopodobnie wpływ dodatków EP. Wskazuje to na zasadność stosowania w olejach używanych do smarowania wężłów tarcia pokrytych twardymi powłokami niskotarciowymi WC/C dodatków EP.

Wyniki badania wielkości obciążenia zacierającego w układzie materiałowym WC/C-WC/C w obecności badanych olejów bazowych (oraz oleju przekładniowego GL-4) zestawiono na rys. 2.



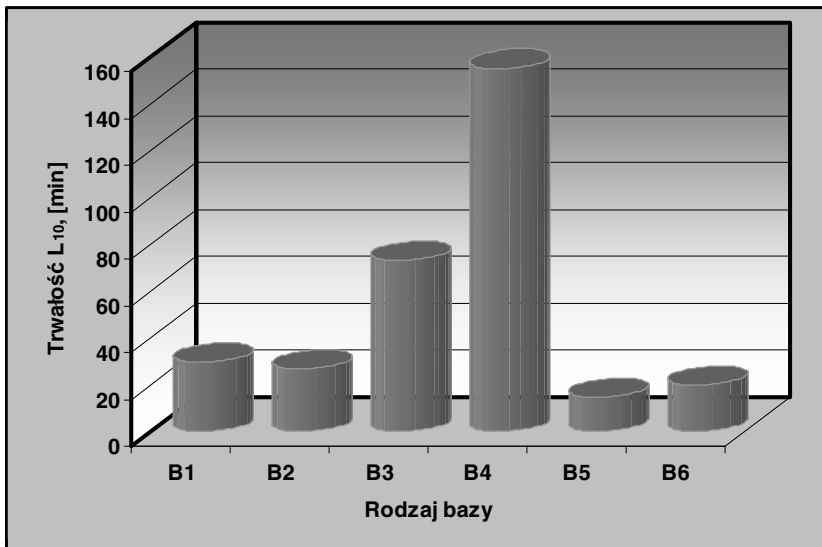
Rys. 2. Wartości obciążenia zacierającego badanych olejów bazowych

Jak wynika z danych rys. 2, wszystkie badane bazy olejowe, w tym także mineralne, tworzą na powierzchni powłoki WC/C trwalszy film smarowy, niż olej GL-4. Wartość obciążenia zacierającego mineralnego oleju bazowego (B1) – najniższa spośród badanych – jest ok. 25% wyższa niż oleju przekładniowego GL-4. Może to wskazywać na niewłaściwy dla powłoki zestaw dodatków uszlachetniających w oleju przekładniowym. Najtrwalszy film smarowy na powłoce WC/C tworzy polarna baza poliglikolowa (B5). Wysoką nośnością filmu smarowego charakteryzuje się także niepolarna baza poli(α)olefinowa (B4) oraz mieszana – poliestrowo-poliglikolowa (B6). Ogólnie, wyniki testów nie zaprzeczają hipotezie o wyższej efektywności przeciwwzartarciu baz polarnych w skojarzeniu materiałowym WC/C-WC/C. Jednak nie dyskwalifikują także baz niepolarnych (mineralna – B2 i poli(α)olefinowa – B4).

Wyniki badań wskazują, że z punktu widzenia trwałości filmu smarowego na powłoce WC/C najkorzystniej jest stosować poliglikolowy olej bazowy (B5). Jednakże badania powierzchniowego zużycia zmęczeniowego – rys. 3 – wykazały, że powierzchniowa trwałość zmęczeniowa węzła tarcia smarowanego bazą B5 jest bardzo niska i wynosi zaledwie 14,4 min (wskaźnik L_{10}). Wyklucza to praktycznie jego zastosowanie w węzłach tarcia pokrytych powłokami WC/C. To samo dotyczy baz B1, B2, i B6. Z porównania danych rys. 2 i 3 wynika, że bazy olejowe charakteryzujące się dużą nośnością filmu smarowego mogą niekorzystnie wpływać na powierzchniową trwałość zmęczeniową elementu z po-

włoką WC/C. Najwyższą powierzchniową trwałość zmęczeniową zapewnia niepolarny, poli(α)olefinowy olej bazowy (B4) – (L_{10} – 155 min). Baza ta charakteryzuje się także dobrymi właściwościami przeciwzatarciowymi w układzie materiałowym WC/C-WC/C – (P_t – ok. 4000 N). Konfrontacja danych rys. 2 i 3 wskazuje na konieczność poszukiwania kompromisu pomiędzy nośnością filmu smarowego a powierzchniową trwałością zmęczeniową przy komponowaniu środków smarowych przeznaczonych do stosowania w systemach tribologicznych, w których występują obciążone elementy trące, pokryte twardymi powłokami niskotarciowymi typu WC/C.

Uwzględniając przedstawione powyżej dane, olej bazowy B4 wytypowano jako bazę do komponowania oleju przeznaczonego do smarowania węzłów tarcia z powłoką WC/C. W tab. 5 przedstawiono wpływ obecności powłoki WC/C na działanie przeciwzużyciowe bazy B4. Jak wynika z tych danych, naniesienie powłoki powoduje blisko dwukrotny wzrost odporności węzła tarcia na zużycie w obecności tej bazy. Należy jednak mieć na względzie fakt, że nawet minimalnemu zużyciu towarzyszy zniszczenie powłoki i odsłonięcie podłoża, co praktycznie niweczy cel i efekty naniesienia powłoki. Należy więc zapewnić takie warunki pracy węzła, przy których nie występuje zużywanie; należy zachować smarowanie płynne przy każdym obciążeniu występującym w węźle. To wskazuje na konieczność stosowania w węzłach tarcia z twardymi powłokami środków smarowych zapewniających wysoką nośność filmu smarowego i dużą stabilność warstwy granicznej.

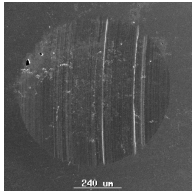
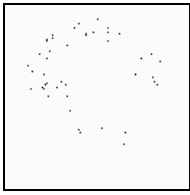
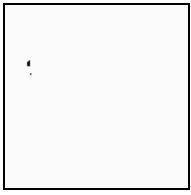
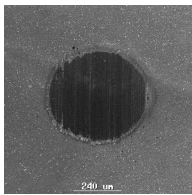
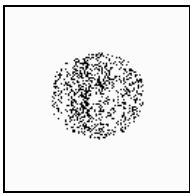
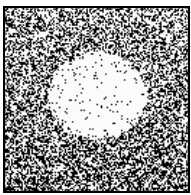


Rys. 3. Powierzchniowa trwałość zmęczeniowa (wskaźnik L_{10}) układu tarcowego WC/C-WC/C w obecności różnych olejów bazowych

Tabela 5. Wpływ obecności powłoki WC/C na zużycie kulek testowych w czterokulowym węźle tarcia smarowanym bazą olejową B4

Materiał węzła tarcia	Wartość G_{oz} , [N/mm ²]
ŁH-15-ŁH-15	372
WC/C-WC/C (2 μ warstwa WC/C na stali)	725

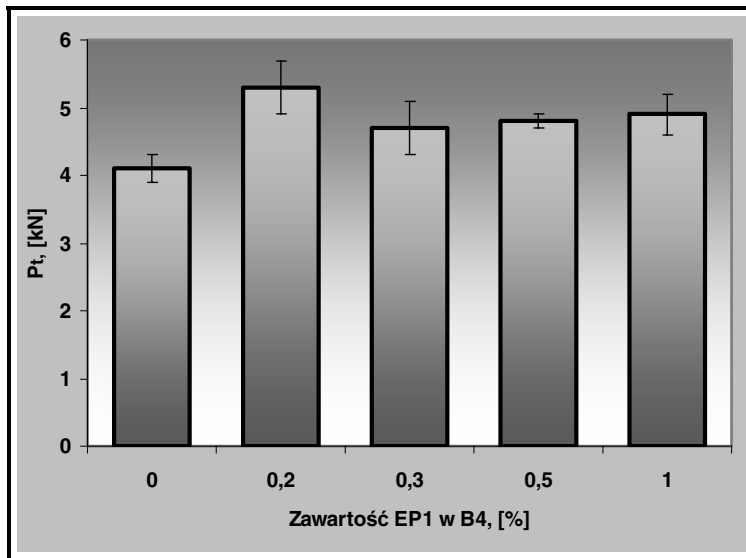
Na rys. 4 przedstawiono obrazy śladów tarcia powstałych podczas testów zużyciowych, których wynik przedstawiono w tab. 5, oraz rozmieszczenie na ich powierzchni wybranych pierwiastków. Zaprezentowane dane wskazują (oprócz istotnej różnicy wielkości śladów zużycia), że zawartość i rozmieszczenie tlenu i węgla na powierzchni śladów tarcia zależy od rodzaju badanego węzła. Na odsłoniętej stalowej powierzchni śladu tarcia, powstałego na kulce pokrytej powłoką WC/C, odkłada się znacząco większa ilość tlenu i węgla niż w śladzie powstałym na kulce bez powłoki. Obserwacje te sugerują, że reakcje chemiczne oleju bazowego na powierzchni kulki stalowej bez powłoki przebiegają mniej intensywnie niż na powierzchni stali odsłoniętej w wyniku zniszczenia powłoki WC/C. Na tym etapie badań można postawić hipotezę, że mniejsza powierzchnia śladu tarcia kulki z powłoką skutkuje wyższą jednostkową mocą tarcia, co powoduje wyższą temperaturę odsłoniętej powierzchni stalowej i bardziej intensywne jej utlenianie. Większy udział węgla na powierzchni śladu tarcia kulki pokrytej powłoką WC/C niż stalowej jest prawdopodobnie wynikiem przeniesienia węgla z powłoki na odsłoniętą powierzchnię stali. Hipotezy te wymagają jednak eksperymentalnej weryfikacji, np. badań metodą XPS i będą przedmiotem odrębnej publikacji.

Skojarzenie	Obraz SEM	O	C
ŁH-15-ŁH-15			
WC/C-WC/C			

Rys. 4. Obrazy SEM i rozmieszczenie wybranych pierwiastków na powierzchni śladów tarcia powstałych na kulkach po testach zużyciowych (środek smarowy – baza B4)

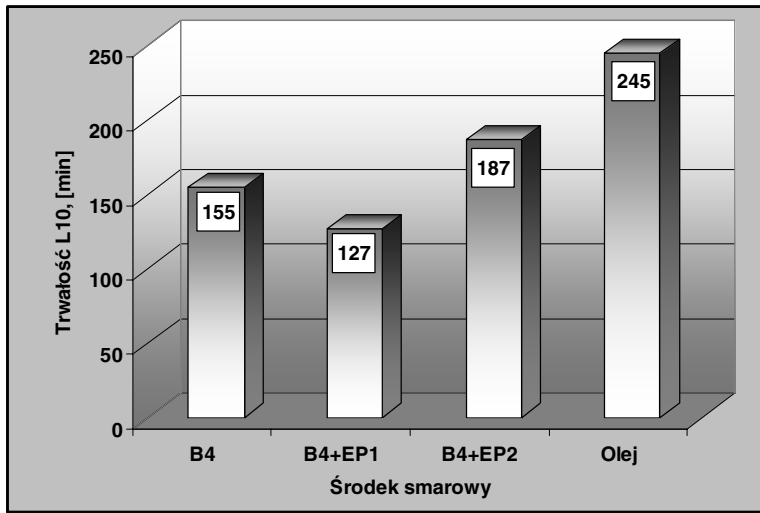
Przy smarowaniu wężła bazą B4 powłoka WC/C ulega zniszczeniu – rys. 4. Podczas testu na zacieranie dochodzi do zesparania odsłoniętych powierzchni stalowych i unieruchomienia wężła – rys. 2. Dlatego zasadnym jest zbadanie możliwości zabezpieczenia wężła tarcia przed zatarciem, np. poprzez wprowadzenie do oleju dodatków EP. Biorąc pod uwagę fakt, że siarka wykazuje wysoką aktywność tribologiczną w stalowych wężłach tarcia zastosowano dodatek EP1 o dużej zawartości siarki. Nośność filmu smarowego tworzonego w wężłach tarcia pokrytych powłokami WC/C przez bazę B4 z dodatkiem EP1 przedstawiono na rys. 5.

Jak wynika z danych rys. 5, za pomocą 0,2% dodatku EP1 można o ok. 20% zwiększyć nośność filmu smarowego tworzonego przez bazę B4 na powłoce WC/C. Jednak przy tej ilości dodatku następuje unieruchomienie wężła tarcia po przekroczeniu obciążenia zacierającego. Zwiększenie zawartości EP1 w bazie B4 do 0,3% zapobiega unieruchomieniu wężła tarcia w całym badanym zakresie obciążeń (do 7400 N), chociaż skutkuje także około 10-procentowym obniżeniem wartości obciążenia zacierającego.



Rys. 5. Obciążenie zacierające kompozycji bazy B4 z dodatkiem EP1 w układzie WC/C-WC/C

Mechanizm działania względem stali dodatków opartych na siarce jest zbliżony do łagodnej korozji [12]. Dlatego też istotnym kryterium kwalifikacji dodatku jest jego działanie korozyjne. Badania wykazały, że olej zawierający dodatek EP1 powoduje silną korozję i wprowadzenie nawet 5% inhibitora korozji nie ogranicza tego zjawiska. Oprócz silnego działania korozyjnego obecność dodatku EP1 pogarsza powierzchniową trwałość zmęczeniową oleju – rys. 6.



Rys. 6. Zależność powierzchniowej trwałości zmęczeniowej charakteryzowana wartością wskaźnika L_{10} od zastosowanego środka smarnego

Ogranicza to możliwość jego stosowania do komponowania materiałów smarowych przeznaczonych do stosowania w węzłach tarcia z powłokami WC/C.

Ze względu na korozyjne i pittingowe działanie dodatku EP1 zbadano możliwość jego zastąpienia dodatkami EP2, EP3 i EP4, które wprowadzono do bazy B4 w takich ilościach, aby zawartość siarki w oleju była identyczna jak w przypadku kompozycji zawierającej 0,3% dodatku EP1. Badania przygotowanych kompozycji smarowych wykazały, że dodatek EP4 nie zapobiega unieruchomieniu węzła tarcia w warunkach testu, natomiast EP3 działa korozyjnie podobnie jak EP1. Jedynie dodatek EP2 nie tylko poprawiał właściwości przeciwzarcicowe oleju przy braku działania korozyjnego, ale także zwiększał powierzchniową trwałość zmęczeniową węzłów z powłoką WC/C – rys. 6.

W oparciu o bazę olejową B4 oraz dodatek EP2 wytworzono kompozycję olejową z pełnym pakietem dodatków funkcjonalnych i poddano ją kompleksowym testom tribologicznym, w tym także tzw. testom FZG w celu zoptymalizowania jej składu. Kluczowe właściwości opracowanego oleju przedstawiono w tab. 6, a powierzchniową trwałość zmęczeniową smarowanego nim węzła z powłokami WC/C także na rys. 6. Wszystkie właściwości opracowanego oleju wykazują wyższe wartości niż oleju stanowiącego odnośnik – olej przekładniowy o klasie lepkościowej SAE 80/W i jakościowej API GL-4 przeznaczony do smarowania stalowych węzłów tarcia. Skład opracowanego oleju został zoptymalizowany z punktu widzenia jego zastosowania do smarowania węzłów tarcia, w których powierzchnie trące zostały pokryte twardymi cienkimi powłokami niskotarciowymi typu WC/C. Opracowany olej w kontakcie z powłoką

WC/C formuje film smarowy o wysokiej nośności – P_t 5000±200 N i zabezpiecza węzeł przed zatarciem, pomimo zawartości jedynie 0,4% dodatku typu EP. Jednocześnie zapewnia względnie wysoki poziom powierzchniowej trwałości zmęczeniowej elementów pokrytych powłoką WC/C i spełnia wszystkie pozostałe kryteria normatywne dla oleju przekładniowego API GL-4.

Tabela 6. Wybrane właściwości opracowanego oleju do smarowania elementów trących pokrytych cienką twardą powłoką niskotarciową WC/C

Parametr	Wartość
Lepkość kinematyczna w temperaturze 100°C, [mm ² /s]	11
Wskaźnik lepkości	216
Zawartość wody, [%]	0,0046
Temperatura zapłonu, [°C]	202
Działanie korodujące (120°C, 3 h, płytki z miedzi)	wytrzymuje
Obciążenie zespawania (P_z – wg PN-76/C-04141), [daN]	392
Wskaźnik zużycia pod obciążeniem (I_n – wg PN-76/C-04141), [daN]	58
Średnia średnica skaz kulek, [mm]	0,52
Obciążenie zacierające (P_t – wg PN-76/C-04141), [N]	5000
Powierzchniowe zużycie zmęczeniowe – L_{10} , [min]	245
Stopień obciążenia niszczącego (test FZG)	>12

Przeprowadzone badania wykazały, że pokrycie stalowych elementów węzłów tarcia powłoką niskotarciową WC/C umożliwia znaczące zredukowanie ilości dodatków typu EP w oleju smarowym, co jest istotne z ekologicznego punktu widzenia. Trzeba jednak mieć na względzie fakt, że rodzaj zastosowanego dodatku EP może mieć istotny wpływ (w tym negatywny) na powierzchniowe zużycie zmęczeniowe tych elementów. Jednak, jak wykazały badania, odpowiednio dobrane dodatki EP umożliwiają istotne zwiększenie, w stosunku do oleju bez tych dodatków, powierzchniowej trwałości zmęczeniowej elementów pokrytych powłoką WC/C.

Podsumowanie

Analiza wyników przeprowadzonych badań wskazuje, że komponowanie materiałów smarowych przeznaczonych do smarowania elementów pokrytych niskotarciowymi powłokami typu WC/C wiąże się z koniecznością jednoczesnego rozwiązania dwóch problemów: wysokiej odporności na zacieranie i powierzchniowej trwałości zmęczeniowej. Wysoka odporność na zacieranie, a dokładniej mówiąc nośność filmu smarowego jest niezbędna ze względu na konieczność niedopuszczenia do zużycia ściernego powłoki WC/C, której grubość wynosi jedynie około 2 μ m. Szczególnym utrudnieniem w technice smarowania elementów z powłoką WC/C jest fakt, że kompozycje zapewniające

wysoką odporność na zacieranie często powodują wręcz dramatyczne obniżenie powierzchniowej trwałości zmęczeniowej tych elementów. Dlatego szczególnej rozważliwym wymaga dobieranie dodatków smarnych do tych kompozycji. Przy odpowiednim składzie kompozycji smarowej obecność powłoki WC/C umożliwia uzyskanie wysokich wartości obciążenia zacierającego przy niezbędnej powierzchniowej trwałości zmęczeniowej. Efekty takie można uzyskać stosując kompozycje smarowe zawierające o 90% mniej dodatków aktywnych tribologicznie niż w kompozycjach używanych do smarowania stalowych węzłów tarcia.

Reasumując: możliwe jest komponowanie efektywnych środków smarnych do węzłów tarcia pokrytych twardymi cienkimi powłokami niskotarcio- wymi typu WC/C o podwyższonych walorach ekologicznych z wykorzystaniem dostępnych na rynku baz olejowych i dodatków uszlachetniających.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wykonana w ramach realizacji Programu Wieloletniego pn. „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008” oraz projektu badawczego nr N504 022 31/1571.

Bibliografia

1. Navinsek B., Panjan P., Milosev I.: Industrial application of CrN (PVD) coatings, deposited at high and low temperatures. *Surface and Coatings Technology*, 1997, 97, 182–191.
2. Krantz L. T., Coper C. V., Townsend D. P., Hansen B. D.: Increased Surface Fatigue Lives of Spur Gears by Application of a Coating, NASA Report NASA/TM-2003-212463, 2003.
3. Gahlin R., Larsson M., Hedenqvist P., Me-C:H coatings in motor vehicles. *Wear*, 2001, 249, 302–309.
4. Czyżniewski A.: Powłoki DLC w zastosowaniu do pokrywania elementów maszyn. *Inż. Mat.*, 2003, 6, 1–4.
5. Stallard J., Teer D.G.: A study of the tribological behaviour of CrN, Graphit-iC and Dymon-iC coatings under oil lubrication. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 188–189, 525–529.
6. Kalin M., Vižintin J., Vercammen K., Barriga J., Arnšek A.: The lubrication of DLC coatings with biodegradable synthetic and vegetable oils. *NORDTRIB. 11th Nordic Symp. on Tribology, Hurtigruten*, 2004, 535–547.
7. Barriga J., Kalin M., Van Acker K., Vercammen K., Ortega A., Leiaristi L.: Tribological characterization and validation of carbon based coatings combined with bio-lubricants. *NORDTRIB. 11th Nordic Symp. on Tribology, Hurtigruten*, 2004, 508–517.

8. Kalin M., Vižintin J.: A comparison of the tribological behaviour of steel/steel, steel/DLC and DLC/DLC contacts when lubricated with mineral and biodegradable oils. *NORDTRIB. 11th Nordic Symp. on Tribology, Hurligtugten, 2004*, 549–564.
9. Michalczewski R., Piekoszewski W., Wulczyński J.: Metoda badania powierzchniowej trwałości zmęczeniowej elementów z powłokami przeciwzyciowymi. *Problemy Eksploatacji* 2003, 4, 91–99.
10. Jańczuk B., Zdziennicka A., Wójcik W.: Swobodna energia międzyfazowa. *Wiadomości Chemiczne*, 1995, 49, 5–6, 301–326.
11. Szczerek M.: Raport końcowy z projektu badawczego 4 T08C 01724 Opracowanie podstaw teoretycznych rozwoju materiałowej inżynierii polimero-metalowych węzłów tarcia.
12. Stachowiak G.W., Batchelor A.W.: *Engineering Tribology – Second Edition*. Butterworth-Heinemann, 2001, 744 p.

Recenzent:

Wiesław ZWIERZYCKI

Lubricant to friction couples with WC/C low friction coating

Key words

Friction couples, WC/C coating, wear, scuffing, pitting, base oil, additives, lubricants.

Summary

This paper describes investigations on the formulation of ecological lubricants designed for friction couples with hard WC/C-type low friction coatings. The investigation was on the influence of base oil type on scuffing, wear and the superficial fatigue life of the WC/C-coated elements. In the experiments, mineral and synthetic base oils were used. It has been discovered that most tested base oils form a more durable lubricating layer than commercial gear oils SAE 80W, API GL-4. The glycol base oil shows the highest resistance to scuffing failure while mineral oils – the lowest one. Moreover, lubricants forming durable layers can make superficial fatigue life (pitting) of WC/C-coated elements worse.

A lubricant based on poly- α -olefins, containing only 0,4% EP additives, was prepared. PAO base assures good protection against the scuffing and wear as well as a relatively high fatigue life. Tribological and ecological characteristics of the formulated lubricant are advantageous. This lubricant guarantees high resistance of WC/C-coated elements to wear and scuffing and significantly improves superficial fatigue life in comparison with the base oil.