

Witold PIEKOSZEWSKI* , Waldemar TUSZYŃSKI*

**WŁAŚCIWOŚCI PRZECIWZUŻYCIOWE,
PRZECIWZATARCIOWE I TRWAŁOŚĆ
ZMĘCZENIOWA WĘZŁA TARCIA JAKO EFEKT
RODZAJU I STĘŻENIA DODATKÓW
SMARNOŚCIOWYCH W OLEJU**

**AN EFFECT OF THE TYPE AND CONCENTRATION
OF LUBRICATING ADDITIVES ON AW/EP PROPERTIES
AND ROLLING FATIGUE LIFE OF A TRIBOSYSTEM**

Słowa kluczowe:

Aparat czterokulowy, właściwości przeciwzużyciowe, właściwości przeciwzatarciowe, trwałość zmęczeniowa, dodatki AW, dodatki EP, SEM, EDS

Key-words:

Four-ball tester, AW properties, EP properties, rolling fatigue life, AW additives, EP additives, SEM, EDS

* Instytut Technologii Eksploatacji (ITeE), Zakład Tribologii, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, tel. (0-48) 36-442-41.

STRESZCZENIE

W artykule zamieszczono wyniki tribologicznych badań serii olejów smarowych o zmienianym w sposób modelowy składzie chemicznym. Olejem bazowym był olej mineralny. Olej ten mieszano z handlowymi pakietami dodatków smarnościowych różnego typu. Były to dwa różne pakiety dodatków przeciwzużyciowych (typu AW) i dwa pakiety dodatków przeciwzatarciowych (typu EP). Dodatki przeciwzużyciowe zawierały dialkilditiofosforan cynku – ZDDP, zaś przeciwzatarciowe – organiczne związki siarkowo–fosforowe. Dodatki smarnościowe dodawano do oleju bazowego w różnych stężeniach.

Badania tribologiczne wykonano za pomocą dwóch aparatów czterokulowych, wytworzonych w ITeE. Aparat T–02 posłużył do wyznaczenia właściwości przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych smarowanego badanymi olejami węzła tarcia. Aparat czterokulowy T–03 umożliwił wykonanie badań trwałości zmęczeniowej (pittingu).

Wykazano, że dodatki AW polepszają nie tylko właściwości przeciwzużyciowe smarowanego nimi węzła tarcia, ale dodatkowo – dodane w niewielkiej ilości – wpływają korzystnie na trwałość zmęczeniową. Zwiększenie stężenia dodatków AW w oleju bazowym pozwala znacząco poprawić właściwości przeciwzużyciowe, ma jednak niekorzystny wpływ na trwałość zmęczeniową.

Dodatki EP, dodane nawet w niewielkim stężeniu do oleju bazowego, powodują kilkukrotną poprawę właściwości przeciwzatarciowych oraz w znacznie mniejszym stopniu, przeciwzużyciowych, praktycznie nie wpływając przy tym jednak na trwałość zmęczeniową. Zwiększenie stężenia tych dodatków skutkuje polepszeniem właściwości przeciwzatarciowych, jak też przeciwzużyciowych. Towarzyszy temu jednak znaczny spadek trwałości zmęczeniowej.

Wyniki badań tribologicznych zinterpretowano w oparciu o analizy powierzchni tarcia za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) i mikroanalizatora rentgenowskiego (EDS).

WPROWADZENIE

Smarowanie większości węzłów tarcia, np. szybkoobrotowych przekładni zębatych, nie jest smarowaniem „czysto” hydrodynamicznym (HD) czy elastohydrodynamicznym (EHD). Chociaż większa część

obciążenia przenoszona jest przez film olejowy, nie można w pełni uniknąć kolizji najwyższych wierzchołków nierówności powierzchni [L. 1]. Wówczas, po zniszczeniu warstewek tlenków na powierzchni, może dojść do szczepień adhezyjnych, które na skutek wzajemnego ruchu elementów trących są zrywane. To w konsekwencji powoduje uszkodzenie powierzchni. Jeżeli proces ten nie zostanie zahamowany, następuje zmiana skali uszkodzania z mikro na makroskopową – elementy trące ulegają *zacieraniu* [L. 2]. Na zacieranie narażone są te części maszyn, które podczas wzajemnego ruchu pracują w warunkach dużych poślizgów, np. strefa głowy i stopy zęba w przekładniach.

Jeżeli elementy wykonują ruch toczny lub toczny z niewielkim poślizgiem (dwa zęby przekładni zębatej stykające się w tzw. środku zazębienia czy łożyska toczne), a styk jest smarowany, to może dojść do odmiennej formy zużycia zwanej *pittingiem* [L. 3].

Pitting związany jest ze zmęczeniem materiału warstwy wierzchniej wywołanym cyklicznym obciążeniem styku, w wyniku czego powstają szczeliny. W szczeliny pod wysokim ciśnieniem (smarowanie EHD) wtłaczany jest olej, wskutek czego ulegają one rozklinowaniu. Ostatecznie, na skutek zmiennych naprężeń następuje wykruszenie cząstki materiału [L. 4, 5, 6].

Zarówno zacieranie, jak i zużycie zmęczeniowe (pitting) są uzależnione od wielu różnych czynników. Są to: właściwości materiału, sposób obróbki powierzchni, konstrukcja węzła tarcia, warunki eksploatacji oraz właściwości fizykochemiczne zastosowanego środka smarowego. Dla pierwszych czterech czynników zależność odporności węzła tarcia na zacieranie i zmęczenie jest stosunkowo dobrze rozpoznana. Mniej jednoznacznych informacji dostępnych jest natomiast na temat wpływu środków smarowych, szczególnie w aspekcie ich interakcji z warstwą wierzchnią elementów trących.

Wiadomo, że w celu zapobiegania zużyciu i zacieraniu należy zwiększyć lepkość oleju smarowego [L. 3] i/lub zastosować w oleju pakiet dodatków smarnościowych [L. 7, 8], przy czym mogą to być dodatki przeciwzużyciowe, typu *AW* lub przeciwzatarciowe, typu *EP* [L. 9]. W pracach [L. 10, 11] potwierdzono, że zwiększenie ilości dodatków, szczególnie *EP*, w oleju smarowym znacząco podnosi odporność węzła tarcia na zacieranie.

Jeśli chodzi o wpływ dodatków smarnościowych na trwałość zmęczeniową węzła tarcia, to prezentowane w literaturze informacje są często

sprzeczne. Przyjmuje się najczęściej, że obecność dodatków typu EP w oleju smarowym obniża trwałość zmęczeniową [L. 12]. Tymczasem w pracy [L. 13] podano, że tego typu dodatki pozwalają tę trwałość podwyższyć. Podobne wyniki – w odniesieniu do dodatków typu AW – zaprezentowano w artykule [L. 14], gdzie stwierdzono ich pozytywny wpływ na trwałość zmęczeniową. Różnice te wynikają z różnorodnych stosowanych węzłów tarcia i warunków badań.

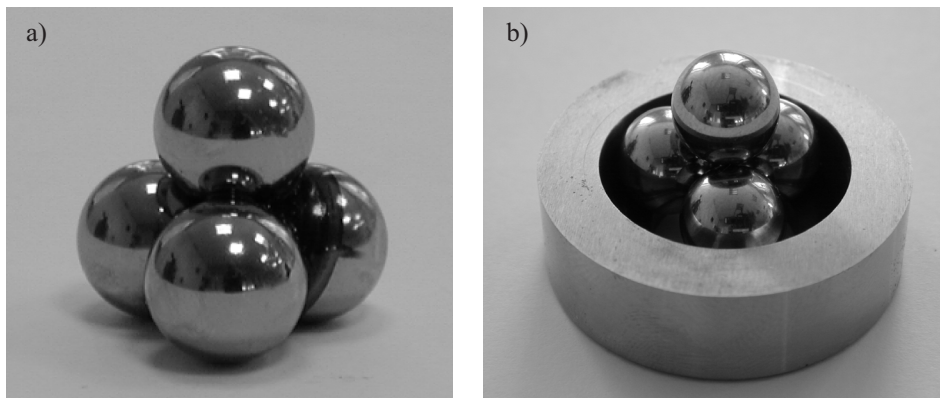
Zaistniała zatem potrzeba wykonania kompleksowych badań zależności właściwości przeciwzużyciowych, przeciwzatarciowych i trwałości zmęczeniowej od rodzaju i stężenia dodatków smarnościowych w oleju, przy zastosowaniu tego samego typu węzła tarcia i w tych samych warunkach.

APARATURA BADAWCZA I ELEMENTY TESTOWE

Badania tribologiczne wykonano za pomocą dwóch aparatów czterokulowych, wytworzonych w ITeE. Aparat T-02 posłużył do wyznaczenia właściwości przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych smarowanego badanymi olejami węzła tarcia, w warunkach ruchu ślizgowego. Zmodyfikowany aparat czterokulowy T-03 umożliwił natomiast wykonanie badań trwałości zmęczeniowej (pittingu), w warunkach ruchu tocznego. Dodać należy, że obecnie aparat czterokulowy jest jednym z najpowszechniej stosowanych urządzeń do tribologicznych badań olejów smarowych [L. 9, 15].

Oba urządzenia zostały wyposażone w skomputeryzowane systemy sterująco-pomiarowe. Aparat T-03 wyposażony był dodatkowo w detektor drgań. W momencie wystąpienia wykruszenia materiału na jednej z kulek poziom drgań gwałtownie wzrastał, a odpowiedni sterownik automatycznie wyłączał urządzenie.

Elementami testowymi w obu przypadkach były kulki łożyskowe o średnicy nominalnej 1/2", wykonywane ze stali łożyskowej ŁH15. Chropowatość powierzchni wynosiła $R_a = 0,032 \mu\text{m}$, a twardość 60–65 HRC. Różnica w węźle tarcia polegała na tym, że w aparacie do badania zużycia i zacierania (T-02) dolne kulki zaciśnięte były w uchwycie tak, aby nie mogły się obracać – **Rys. 1 a**). Obracała się tylko kulka górna. W przypadku aparatu T-03 do badania pittingu dolne kulki swobodnie toczyły się po bieżni – **Rys. 1 b**).



Rys. 1. Węzeł tarcia aparatu czterokulowego: a) T-02, b) T-03

Fig. 1. Four-ball tribosystem: a) T-02 apparatus, b) T-03

Po wykonaniu badań tribologicznych analizowano powierzchnię śladu zużycia za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) i spektrometru z dyspersją energii (EDS).

METODYKA BADAŃ

Do scharakteryzowania właściwości przeciwzużyciowych wykorzystano tzw. *graniczne obciążenie zużycia* (G_{oz40}), oznaczane według p. 2.3 normy PN-76/C-04147 [16]. Zmieniono tylko obciążenie węzła i czas trwania biegu. Przyjęto obciążenie 40 kG (392 N) i czas 3600 s – zgodnie z WTWT – 94/MPS-025 [L. 17]. Indeks „40” w G_{oz40} oznacza obciążenie wyrażone w kG. Prędkość obrotowa wrzeciona wynosiła 500 obr/min (prędkość poślizgu 0,19 m/s).

Właściwości przeciwzatarciowe scharakteryzowano za pomocą tzw. *granicznego nacisku zatarcia* (p_{oz}), wyznaczanego w warunkach liniowo rosnącego obciążenia. Badania wykonano według metody własnej, prezentowanej wielokrotnie, np. [L. 10, 11, 18, 19]. Na podstawie dotychczasowych badań stwierdzono, że opracowana nowa metoda charakteryzuje się dobrą rozdzielczością oraz bardzo niską czasochłonnością i kosztem, przy precyzji porównywalnej do osiaganej w najczęściej stosowanych badaniach tribologicznych.

Oznaczenie wskaźnika p_{oz} prowadzono w następujących warunkach: prędkość narastania obciążenia 409 N/s, obciążenie początkowe 0, obciążenie maksymalne ok. 7200 N, prędkość obrotowa wrzeciona 500 obr/min (prędkość poślizgu 0,19 m/s).

Zarówno graniczne obciążenie zużycia (G_{oz40}), jak i graniczny nacisk zatarcia (p_{oz}) odpowiadają nominalnemu naciskowi na powierzchni śladu zużycia pod koniec biegu. Oblicza się je ze wzoru (1):

$$G_{oz40}(p_{oz}) = 0,52 \frac{P}{d^2} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1)$$

gdzie: P – w przypadku oznaczania G_{oz40} jest to wartość obciążenia w czasie biegu [N]; dla p_{oz} jest to obciążenie powodujące zatarcie lub obciążenie maksymalne (gdy brak jest zatarcia), d – średnia średnica śladu zużycia [mm].

Im wartości wskaźników G_{oz40} i p_{oz} są wyższe, tym lepsze są odpowiednio przeciwzużyciowe i przeciwzatarciowe właściwości węzła tarcia smarowanego badanym środkiem smarowym.

W celu oznaczenia G_{oz40} i p_{oz} wykonano dla każdego oleju minimum 3 biegi badawcze, których wyniki uśredniono. W przypadku G_{oz40} sposób obróbki statystycznej podano w normie [16], zaś dla p_{oz} – w pracy [L. 11].

Trwałość zmęczeniową scharakteryzowano według normy IP 300/82 [L. 20] za pomocą tzw. *trwałości 10%*, oznaczonej L_{10} . Jest to taki czas eksploatacji tocznych węzłów tarcia (smarowanych badanym olejem), w którym 10% ich populacji ulega uszkodzeniu. Badanie polegało na przeprowadzeniu przy stałym obciążeniu (5886 N) i stałej prędkości obrotowej (1450 obr/min; 0,56 m/s) 24 biegów badawczych czterech stalowych kulek współpracujących tocznie w obecności środka smarowego, sporządzeniu rozkładu Weibulla i na jego podstawie określeniu trwałości węzła tarcia L_{10} . Badania wykonywano do osiągnięcia dla danego środka smarowego 24 takich biegów, które zakończone zostały wystąpieniem wykruszenia na kulce górnej.

BADANE OLEJE

Zbadano serię olejów smarowych o zmienianym składzie chemicznym. Olejem bazowym był olej mineralny (oznaczony B1) o lepkości kinematycznej ok. 11 mm²/s (100°C). Mieszano go z handlowymi pakietami dodatków smarnościowych różnego typu. Były to dwa różne pakiety dodatków przeciwzużyciowych (typu AW), uważanych czasem za częściowo przeciwzatarciowe [L. 21], i dwa pakiety dodatków przeciwzatarciowych (typu EP). Oznaczono je odpowiednio AW1, AW2 oraz EP1 i EP2. Dodatki przeciwzużyciowe zawierały dialkilditiofosforan cynku – ZDDP, zaś przeciwzatarciowe – organiczne związki siarkowo-fosforowe. Dodatki smarnościowe dodawano do oleju bazowego w różnych stężeniach: 0,2

i 3% wag. dla dodatków AW, oraz 1 i 10% wag. dla EP. Wybrane dodatki stosowane są we współczesnych samochodowych olejach przekładniowych.

WYNIKI BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Pierwszym krokiem było oszacowanie wymuszeń panujących w węźle tarcia w czasie oznaczania poszczególnych wskaźników. Niektórzy autorzy proponują w tym celu wyznaczać tzw. jednostkową moc tarcia (JMT), obliczaną ze wzoru (2) [L. 22, 23]:

$$JMT = \mu p v \quad [\text{MW} / \text{m}^2] \quad (2)$$

gdzie: μ – współczynnik tarcia, p – nacisk [MN/m^2], v – prędkość poślizgu (toczenia) [m/s].

Wyniki obliczeń zebrano w **Tab. 1**. Współczynnik tarcia został wyznaczony na drodze eksperymentalnej, z wyjątkiem sytuacji dla L_{10} , gdzie jego wartość przyjęto z pracy [L. 24] dla łożyska kulkowego. Nacisk p jest równy wartości maksymalnych naprężeń stykowych, obliczanych ze wzorów Hertza. Więcej informacji na temat sposobu wyznaczenia JMT podano w pracy [L. 25].

Tabela 1. Wymuszenia w czterokulowym węźle tarcia, mierzone jednostkową mocą tarcia, dla poszczególnych wskaźników (opis w tekście)

Wskaźnik	Ruch	μ	p [MN/m^2]	v [m/s]	JMT [MW/m^2]
G_{oz40}	ślizgowy	0,100	3447	0,19	65
p_{oz}	ślizgowy	0,260	7218	0,19	357
L_{10}	toczny	0,002	8503	0,56	10

W przypadku ruchu ślizgowego najmniejsze wymuszenia występują przy oznaczaniu granicznego obciążenia zużycia G_{oz40} . Są to tzw. *warunki przeciwwzużyciowe (AW)*, a G_{oz40} jest wskaźnikiem charakteryzującym tzw. *właściwości przeciwwzużyciowe* węzła tarcia. Największe wymuszenia w węźle tarcia występują przy oznaczaniu granicznego nacisku zatarcia p_{oz} . Są to tzw. *warunki przeciwwzatarciowe (EP)*, a p_{oz} jest wskaźnikiem charakteryzującym tzw. *właściwości przeciwwzatarciowe*. Zdecydowanie najmniejsza JMT występuje w przypadku oznaczania trwałości L_{10} dla ruchu tocznego.

Na **Rys. 2** przedstawiono wartości granicznego obciążenia zużycia (G_{oz40}), granicznego nacisku zatarcia (p_{oz}) i trwałości 10% (L_{10}) uzyskane dla badanych olejów. Słupki błędów charakteryzują powtarzalność; dla dwóch pierwszych wskaźników jej wartości są podane odpowiednio w normie PN-76/C-04147 [16] i pracy [11]. Dla trwałości zmęczeniowej brak jest danych na temat powtarzalności.

Uzyskane wyniki badań tribologicznych pozwalają stwierdzić, że dodatki AW są skuteczniejsze w warunkach niskich wymuszeń niż dodatki EP. Oznacza to nie tylko, że dodatki AW polepszają właściwości przeciwzużyciowe smarowanego nimi węzła tarcia (G_{oz40}), ale dodatkowo – dodane w niewielkiej ilości (0,2%) – wpływają korzystnie na trwałość zmęczeniową (L_{10}). Zwiększenie stężenia dodatków AW w oleju bazowym pozwala znacząco poprawić właściwości przeciwzużyciowe, ma jednak niekorzystny wpływ na trwałość zmęczeniową, co jest szczególnie widoczne dla pakietu AW1.

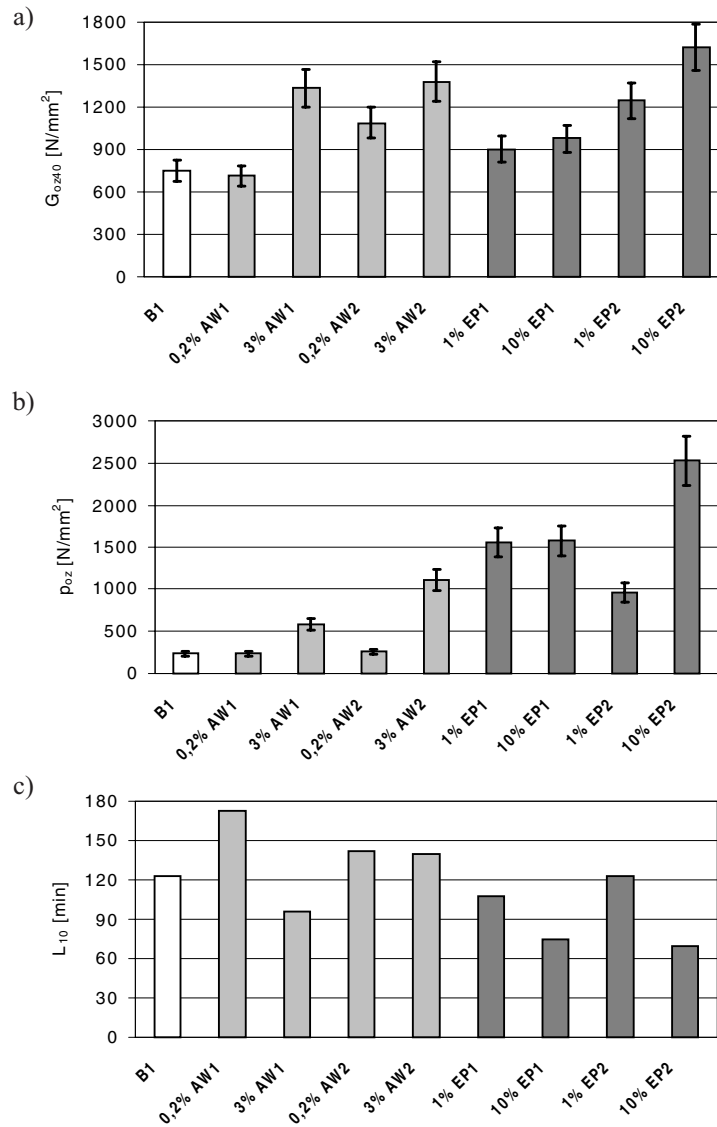
Dodatki EP, przy wysokich wymuszeniach, wykazują znacznie większą efektywność działania niż AW. Dodanie nawet w niewielkim stężeniu (1%) dodatków EP do oleju bazowego powoduje kilkukrotną poprawę właściwości przeciwzatarciowych (p_{oz}) oraz, w znacznie mniejszym stopniu, przeciwzużyciowych, praktycznie nie wpływając przy tym jednak na trwałość zmęczeniową. Zwiększenie stężenia tych dodatków skutkuje polepszeniem właściwości przeciwzatarciowych, jak też przeciwzużyciowych. Jest to szczególnie widoczne dla pakietu EP2. Towarzyszy temu jednak znaczny spadek trwałości zmęczeniowej.

DYSKUSJA WYNIKÓW

Dla interpretacji otrzymanych wyników badań tribologicznych wykonano ilościową mikroanalizę rentgenowską za pomocą spektrometru EDS zintegrowanego ze skaningowym mikroskopem elektronowym (SEM). Przed badaniami elementy testowe myto w 95% n-heksanie w myjce ultradźwiękowej.

Na **Rys. 3** do **5** zaprezentowano zawartość siarki, fosforu i cynku w warstwie wierzchniej śladu zużycia po badaniu w różnych warunkach. **Rys. 3** i **4** dotyczą analizy śladu zużycia na jednej z kul dolnych po badaniach w warunkach odpowiednio przeciwzużyciowych (oznaczanie G_{oz40}) i przeciwzatarciowych (oznaczanie p_{oz}). **Rys. 5** dotyczy analizy ścieżki zużycia na kulce górnej w pobliżu miejsca wykruszenia materiału, po badaniach zmęczeniowych (oznaczanie L_{10}). Dodatki EP nie zawierały w swoim składzie cynku, dlatego na **Rys. 3 c** do **5 c**) prawe strony wykresów są puste.

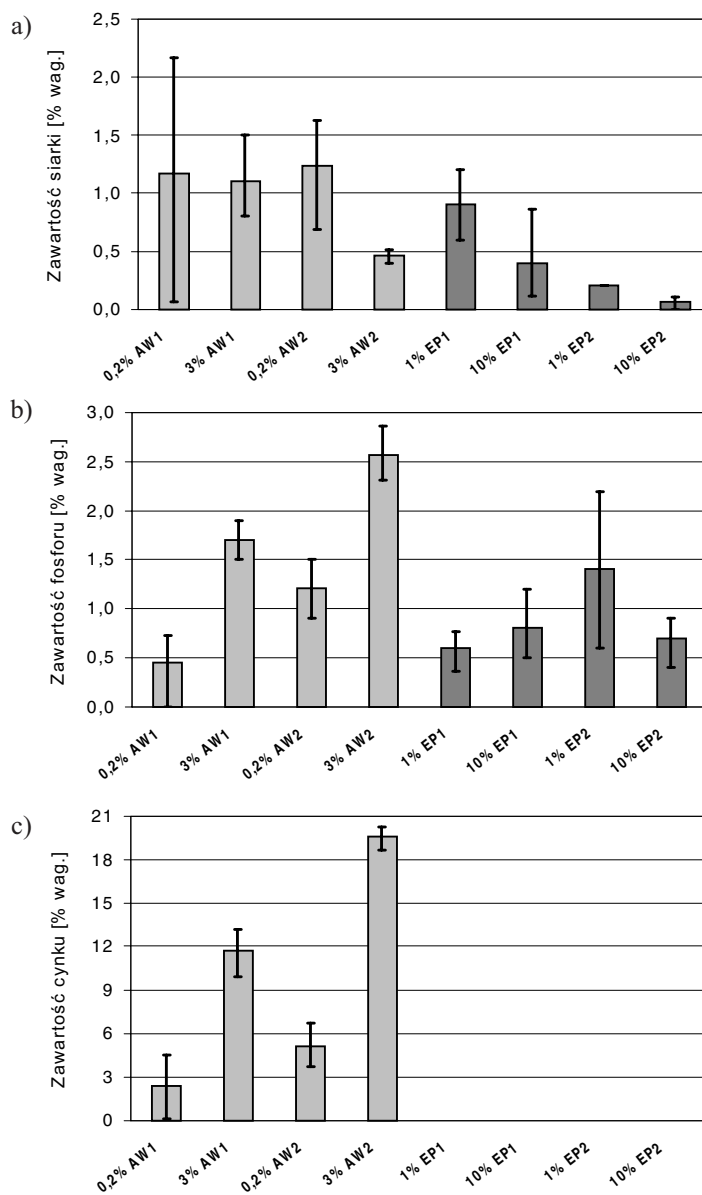
Analizy wykonywano 3 razy – za każdym razem w innym miejscu śladu zużycia. Na wykresach podano wartości średnie oraz różnice pomiędzy zaobserwowaną minimalną i maksymalną zawartością poszczególnych



Rys. 2. Właściwości tribologiczne, otrzymane dla poszczególnych olejów, charakteryzowane za pomocą: a) granicznego obciążenia zużycia G_{oz40} , b) granicznego nacisku zatarcia p_{oz} , c) trwałości 10% L_{10}

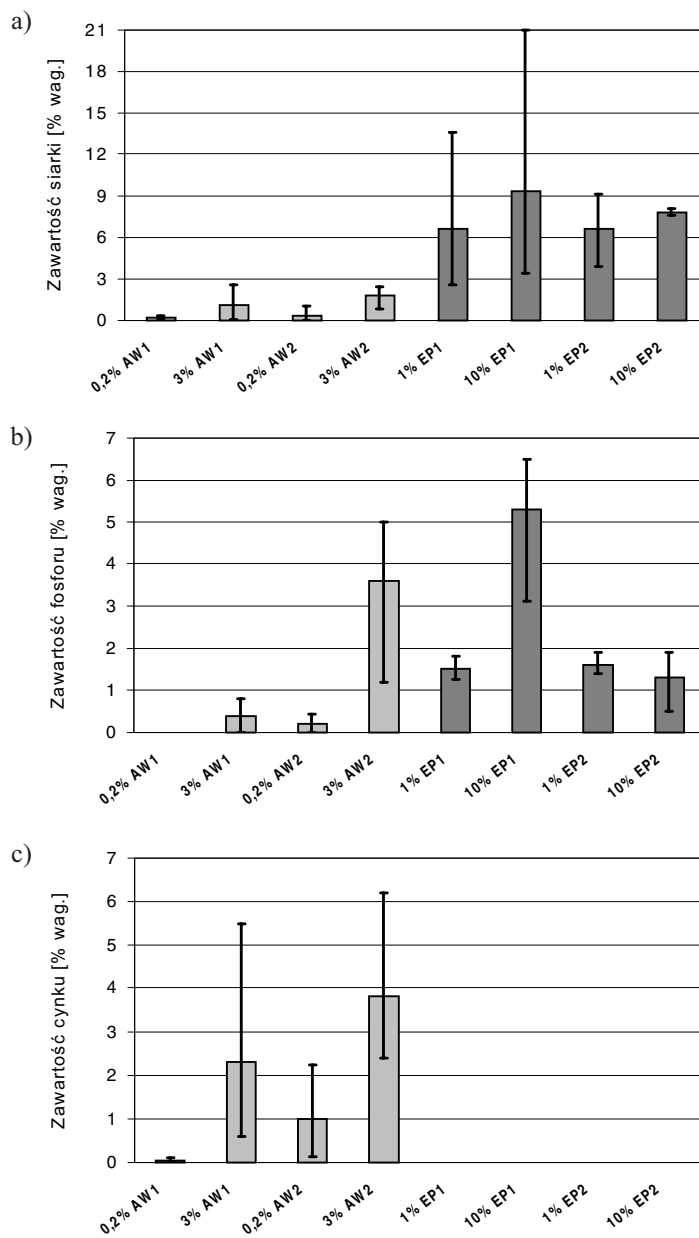
Fig. 2. Tribological properties obtained for the tested oils, measured by: a) limiting pressure of wear G_{oz40} , b) limiting pressure of seizure p_{oz} , c) fatigue life L_{10}

pierwiastków w różnych miejscach. Rozrzuty te świadczą zatem nie o błędzie pomiaru, ale o stopniu niejednorodności składu pierwiastkowego powierzchni śladu zużycia.



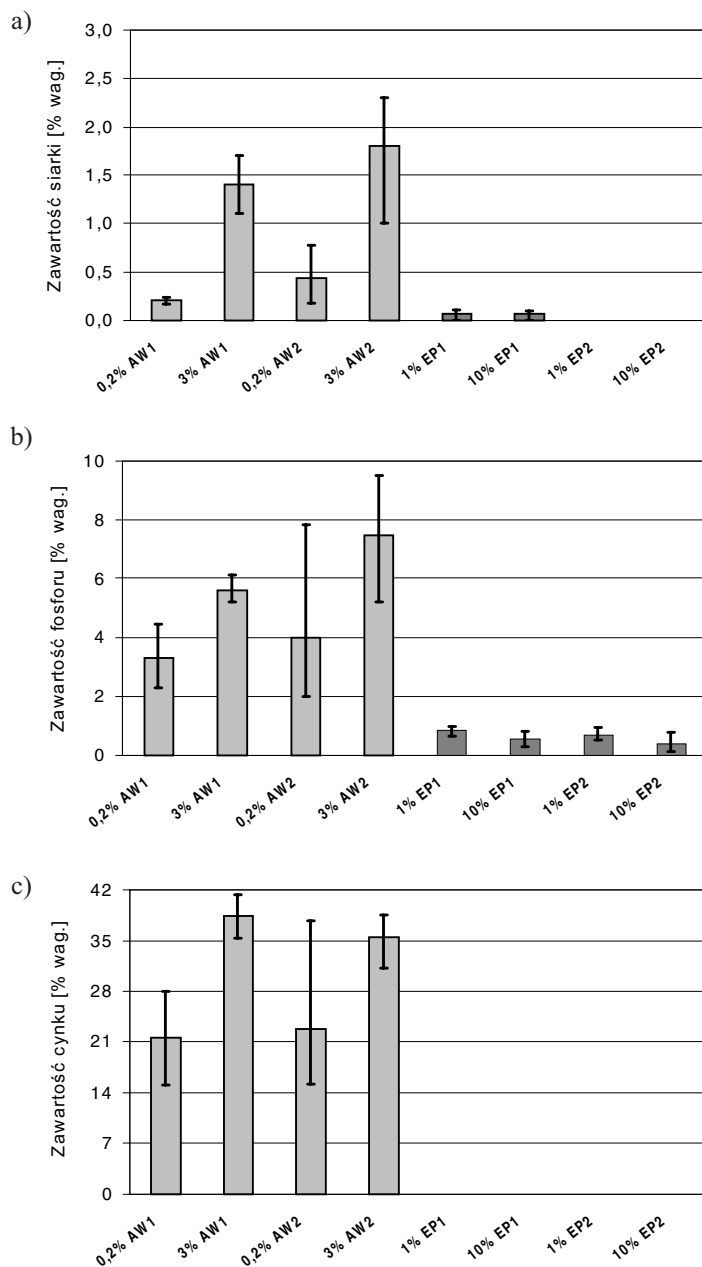
Rys. 3. Zawartość poszczególnych pierwiastków w warstwie wierzchniej śladu zużycia po badaniu w warunkach przeciwwżyciowych: a) siarka, b) fosfor, c) cynk

Fig. 3. The concentration of particular elements in the surface layer of the wear scar after testing in the AW regime: a) sulfur, b) phosphorus, c) zinc



Rys. 4. Zawartość poszczególnych pierwiastków w warstwie wierzchniej śladu zużycia po badaniu w warunkach przeciwwzartarciowych: a) siarka, b) fosfor, c) cynk

Fig. 4. The concentration of particular elements in the surface layer of the wear scar after testing in the EP regime: a) sulfur, b) phosphorus, c) zinc



Rys. 5. Zawartość poszczególnych pierwiastków w warstwie wierzchniej ścieżki zużycia po badaniu pitingu: a) siarka, b) fosfor, c) cynk

Fig. 5. The concentration of particular elements in the surface layer of the wear track after testing the fatigue life: a) sulfur, b) phosphorus, c) zinc

Duża skuteczność działania dodatków AW w warunkach przeciwzużyciowych, objawiająca się wysokimi wartościami wskaźnika G_{oz40} , wynika ze stosunkowo niskiej temperatury rozkładu termicznego dialkyloditiofosforanu cynku (ZDDP), wynoszącej 200–300°C [L. 26]. Wymuszenia w węzle tarcia są w warunkach przeciwzużyciowych wystarczające do tego, żeby cząsteczka ZDDP uległa częściowej destrukcji (zrywane są wewnętrzne wiązania), co umożliwi wbudowanie się atomów np. S, P czy Zn w strukturę warstwy wierzchniej. Skutkuje to znaczną modyfikacją składu pierwiastkowego powierzchni śladu zużycia dla dodatków AW (Rys. 3), znacznie większą niż w przypadku dodatków EP, dla których temperatura rozkładu termicznego jest znacznie wyższa i sięga 400–500°C [L. 27].

Dodatki EP, mając wysoką temperaturę rozkładu termicznego, ujawniają swoją skuteczność dopiero w warunkach przeciwzatarciowych – wskaźnik p_{oz} jest dla nich znacznie wyższy niż dla dodatków AW. W tych warunkach, gdzie wymuszenia są bardzo wysokie (najwyższa JMT – Tab. 1), dodatki EP w znacznie większym stopniu modyfikują powierzchnię śladu tarcia (Rys. 4) niż AW. Szczególnie istotna jest modyfikacja powierzchni siarką, bez porównania większa dla dodatków EP niż AW. Co prawda uwagę zwraca wysoki wskaźnik p_{oz} dla pakietu 3% AW2, wyższy niż dla 1% EP2 (Rys. 2 b), choć jest on znacznie mniejszy niż dla pozostałych olejów z dodatkami EP. Wynika to prawdopodobnie ze znaczącej modyfikacji powierzchni śladu zużycia fosforem, w postaci fosforanów [L. 28], bez porównania większej niż dla pozostałych olejów z dodatkami AW (Rys. 4). I odwrotnie – dla 10% EP1, pomimo znacznej obecności P w powierzchni śladu zużycia, p_{oz} jest znacznie mniejszy niż dla 10% EP2 (Rys. 2 b). Toteż obecność siarki w warstwie wierzchniej, w postaci FeS [L. 29], wydaje się być najważniejsza dla zapewnienia dobrych właściwości przeciwzatarciowych węzła tarcia, na co wskazują także liczne doniesienia literaturowe [L. 1, 29, 30].

Oprócz modyfikacji powierzchni śladu zużycia siarką bardzo istotną dla zachowania dobrych właściwości przeciwzatarciowych jest równomierność jej rozkładu powierzchniowego. Przykładem jest tu olej z 10% zawartością EP1 i olej z 10% EP2. Średnia zawartość siarki w warstwie wierzchniej jest dla nich podobna (Rys. 4 a). Jednak jej rozkład powierzchniowy jest nieporównanie bardziej równomierny dla 10% EP2 niż 10% EP1, o czym świadczy rozrzut wyników. Stąd wskaźnik p_{oz} jest dla pierwszego oleju znacznie wyższy (Rys. 2 b).

Znaczenie modyfikacji powierzchni związkami siarki czy fosforu dla przeciwdziałania zużyciu i zacieraniu w czasie tarcia ślizgowego jest powszechnie znane. Wynika ona z adsorpcji fizycznej, chemicznej, a następnie reakcji chemicznych aktywnych dodatków smarowościowych z powierzchnią tarcia. Można w skrócie powiedzieć, że związki S i P przeciwdziałają powstawaniu szperein adhezyjnych, bądź ułatwiają ich zrywanie. Wiele danych na ten temat można znaleźć w literaturze, np. [L. 1, 31, 32]. Mniej poznana jest natomiast rola Zn. Przypuszczalnie pierwiastek ten, wbudowany – na skutek dyfuzji [L. 33] – w dużej ilości w powierzchnię stali, pozwala na elektrochemiczne przeciwdziałanie procesom korozyjnym [L. 34].

Warto tu odnotować, że podobne wyniki odnośnie działania dodatków AW i EP odnotowano w eksploatacyjnych badaniach samochodu osobowego [L. 35]. Olej przekładniowy klasy jakościowej API GL-3, w którego składzie znajduje się pakiet dodatków AW, pozwalał w umiarkowanych warunkach eksploatacji uzyskać mniejsze zużycie przekładni zębatych skrzyni biegów niż olej wysokiej klasy API GL-5 z dodatkami EP.

W najbardziej łagodnych warunkach tarcia (badanie pittingu w ruchu tocznym) wymuszenia są znacznie niższe niż dla warunków przeciwzuzyciowych (JMT 6-krotnie niższa – Tab. 1) i warunków przeciwtarciovych (JMT 35-krotnie niższa). Dodatki AW przy niskich wymuszeniach bez porównania lepiej modyfikują warstwę wierzchnią śladu zużycia niż EP (Rys. 5). Szczególnie wysoka jest tu zawartość P i Zn. Decyduje o tym znacznie łatwiejszy rozkład termiczny cząsteczki ZDDP niż związków S-P. Dlatego dodatki AW, szczególnie gdy są dodane w niewielkich ilościach (np. 0,2%) znacząco polepszają trwałość zmęczeniową (L_{10}), w przeciwieństwie do dodatków EP (Rys. 2 c), które dodane w małych ilościach (1%) nie mają wpływu na L_{10} . Dodać tu należy, że podobne wyniki uzyskali autorzy pracy [L. 36] w badaniach zmęczeniowych za pomocą stanowiska przekładniowego.

W literaturze najczęściej wymienianym mechanizmem zwiększania trwałości zmęczeniowej jest uplastycznienie powierzchni poprzez jej modyfikację siarką, fosforem i cynkiem, w wyniku oddziaływania dodatków AW. W ten sposób następuje znaczna redukcja naprężeń (smarowanie EHD) wynikająca z oddziaływania „spłaszczonych” nierówności powierzchni i w efekcie wzrost trwałości zmęczeniowej [L. 14]. Z drugiej jednak strony dodatki AW redukują zużycie, co z kolei utrzymuje naciski

na wysokim poziomie i może przyczynić się do spadku trwałości zmęczeniowej [L. 12, 37]. Wydaje się, że można tym wytłumaczyć spadek trwałości zmęczeniowej przy zwiększaniu zawartości dodatków AW w oleju, widoczny szczególnie dla dodatku AW1 (Rys. 2 c).

O ile dodatki AW mają raczej pozytywny wpływ na trwałość zmęczeniową, o tyle dodatki EP wywierają wpływ negatywny, szczególnie gdy dodane są do oleju w większych ilościach (np. 10%) – Rys. 2 c). W przypadku tych ostatnich najczęściej obecnie wymienianym mechanizmem redukcji trwałości zmęczeniowej jest ich agresywność korozyjna. Powoduje ona powstanie na smarowanej powierzchni mikrowgłębień, będących potencjalnymi „załążkami” wykruszeń zmęczeniowych, co z kolei zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia pittingu [L. 12]. Innym mechanizmem odpowiedzialnym za redukcję trwałości zmęczeniowej jest sorpcja aktywnych dodatków smarnościowych w mikropęknięciach, co powoduje zmniejszenie ich energii powierzchniowej i spójności materiału, a to z kolei ułatwia propagację pęknięć zmęczeniowych [L. 24].

Pozostając przy dodatkach EP, podkreślić trzeba, że mogą one mieć także pozytywny wpływ na trwałość zmęczeniową [L. 13]. Według niektórych autorów dzieje się tak wtedy, gdy stosunek zastępczej chropowatości powierzchni współpracujących ciał do grubości filmu smarowego jest wyższy niż 1,5 [L. 38]. Niebagatelną rolę przy porównywaniu wyników badań zmęczeniowych odgrywają zatem warunki badań.

WNIOSKI

Dodatki AW polepszają nie tylko właściwości przeciwzużyciowe smarowanego nimi wężła tarcia, ale dodatkowo – dodane w niewielkiej ilości (np. 0,2%) – wpływają korzystnie na trwałość zmęczeniową. Zwiększenie stężenia tych dodatków w oleju bazowym pozwala znacząco poprawić właściwości przeciwzużyciowe, ma jednak niekorzystny wpływ na trwałość zmęczeniową.

Dodatki EP, dodane nawet w niewielkim stężeniu (np. 1%) do oleju bazowego, powodują kilkukrotną poprawę właściwości przeciwzatarciowych oraz, w znacznie mniejszym stopniu, przeciwzużyciowych, praktycznie nie wpływając przy tym jednak na trwałość zmęczeniową. Zwiększenie stężenia tych dodatków skutkuje polepszeniem właściwości przeciwzatarciowych, jak też przeciwzużyciowych. Towarzyszy temu jednak znaczny spadek trwałości zmęczeniowej.

Uzyskane wyniki są efektem modyfikacji warstwy wierzchniej śladu zużycia pierwiastkami pochodzącymi z dodatków smarowościowych, np. siarką, fosforem i cynkiem.

LITERATURA

1. Stachowiak G.W., Batchelor A.W.: Engineering tribology. Elsevier. 1993, Amsterdam.
2. Nosal S.: Tribologiczne aspekty zacierania się węzłów ślizgowych. Wyd. Politechniki Poznańskiej. 1998, Poznań.
3. Praca zbiorowa (red. Neale M.J.): Tribology handbook. Newness–Butterworths. 1973, Londyn.
4. Pytko S.: Badania mechanizmu niszczenia powierzchni tocznych elementów maszynowych. Zeszyty Naukowe AGH – Elektryfikacja i Mechanizacja Górnictwa i Hutnictwa, z. 25, 1967.
5. Pytko S., Szczerek M.: Pitting – forma niszczenia elementów tocznych. Tribologia, nr 4/5, 1993, s. 317–334.
6. Lawrowski Z.: Tribologia. Tarcie, zużywanie i smarowanie. PWN. 1993, Warszawa.
7. Kajdas C.: Podstawy zasilania paliwem i smarowania samochodów. WKŁ. 1983, Warszawa.
8. Zwierzycki W.: Oleje smarowe. RN Glimar – ITeE. 1996, Gorlice–Radom.
9. Pytko S.: Podstawy tribologii i techniki smarowniczej. Wyd. AGH. 1989, Kraków.
10. Tuszyński W.: Badanie przeciwzużyciowych oddziaływań środków smarowych (rozprawa doktorska). Wojskowy Instytut Techniki Panczernej i Samochodowej. 1999, Sulejówek.
11. Szczerek M., Tuszyński W.: Badania tribologiczne. Zacieranie. Wyd. ITeE. 2000, Radom.
12. Torrance A.A., Morgan J.E., Wan G.T.Y.: An additive's influence on the pitting and wear of ball bearing steel. Wear, t. 192, 1996, s. 66–73.
13. Kolář D., Libera M., Waligóra W.: Ocena wpływu dodatku smarowościowego (EP) do oleju przekładniowego na powierzchniową trwałość zmęczeniową elementów maszyn. Tribologia, nr 3, 2000, s. 391–398.
14. Wang Y., Fernandez J.E., Cuervo D.G.: Rolling–contact fatigue lives of steel AISI 52100 balls with eight mineral and synthetic lubricants. Wear, t. 196, 1996, s. 110–119.
15. Szczerek M.: Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Wyd. ITeE. 1997, Radom.
16. PN–76/C–04147. Badanie własności smarnych olejów i smarów.
17. WTWT–94/MPS–025. Olej przekładniowo–hydrauliczny OPH.

18. Piekoszewski W., Szczerek M., Tuszyński W.: The action of lubricants under extreme pressure conditions in a modified four-ball tester. *Wear*, t. 249, 2001, s. 188–193.
19. Szczerek M., Tuszyński W.: A method for testing lubricants under conditions of scuffing. Part I. Presentation of the method. *Tribotest*, t. 8, nr 4, 2002, s. 273–284.
20. IP 300/82. Rolling contact fatigue tests for fluids in a modified four-ball machine.
21. Cann P., Spikes H.A., Cameron A.: Thick film formation by zinc dialkyldithiophosphates. *ASLE Trans*, t. 26, 1983, s. 48–52.
22. Boruta J., Wachal A.: Analiza warunków pracy olejów przy tarciu ślizgowym. *Technika smarownicza – Trybologia*, nr 3, 1978, s. 77–82.
23. Alliston–Greiner A.F.: Test methods in tribology. *Materiały 1 Światowego Kongresu Tribologicznego w Londynie*, 1997, s. 85–93.
24. Hebda M., Wachal A.: *Trybologia*. WNT. 1980, Warszawa.
25. Pytko S., Szczerek M., Tuszyński W.: Ocena metod badań wykonywanych za pomocą aparatu czterokulowego. *Trybologia*, nr 4, 2001, s. 711–724.
26. Kawamura M.: The correlation of antiwear properties with the chemical reactivity of zinc dialkyldithiophosphates. *Wear*, t. 77, 1982, s. 287–294.
27. Wachal A., Kulczycki A.: Derywatograficzne badania sorpcji dodatków siarkowych na powierzchni żelaza. *Trybologia*, nr 1, 1988, s. 15–18.
28. Johansson E., Hogmark S., Redelius P.: Surface analysis of lubricated sliding metal contacts. Part II. *Tribologia (periodyk fiński)*, t. 16, 1997, s. 26–38.
29. Forbes E.S.: The load carrying action of organo-sulphur compounds – a review. *Wear*, t. 15, 1970, s. 87–96.
30. Senatorski J., Wachal A.: Wpływ dodatków siarkowych i fosforowo-siarkowych w oleju smarowym na zużycie stali w styku niekonforemnym. *Tribologia*, nr 1, 1991, s. 7–11.
31. Godfrey D.: Boundary Lubrication. *Materiały sympozjum „Interdisciplinarny approach to friction and wear” w San Antonio*, 1967, s. 335–384.
32. Coy R.C., Quinn T.F.J.: The use of physical methods of analysis to identify surface layers formed by organosulphur compounds in wear tests. *ASLE Trans.*, t. 18, 1975, s. 163–174.
33. Meyer K., Kajdas C.: Bedeutung des Metallaustausches für Grenzflächenreaktionen von Metalldithiophosphaten. *Trib.+Schm*, t. 2, 1989, s. 71–76.
34. Tuszyński W., Molenda J., Makowska M.: Tribochemical conversions of zinc dialkyldithiophosphate (ZDDP) under extremely different pressure conditions. *Tribology Letters*, t. 13, nr 2, 2002, s. 103–109.
35. Kulczycki A.: Ocena działania dodatków smarnościowych w olejach przekładniowych. *Wyd. Politechniki Poznańskiej*. 1997, Poznań.
36. Townsend D.P., Zaretsky E.V., Scibbe H.W.: Lubricant and additive effects on spur gear fatigue life. *Journal of Synth. Lubr.*, t. 6, nr 2, 1989, s. 83–106.

37. Rowe C.N., Armstrong E.L.: Lubricant effects in rolling–contact fatigue. *Lubrication Engineering*, t. 38, 1989, s. 23–30 i 39–40.
38. Philips M.R, Quinn T.F.J.: The effect of surface roughness and lubricant film thickness on the contact fatigue life of steel surfaces lubricated with a sulfur–phosphorus type of extreme pressure additive. *Wear*, t. 51, 1978, s. 11–24.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

The authors present results of testing of lubricating oils of various chemical composition. A mineral base oil was blended with commercial lubricating additives of different type and concentration. Two different AW (antiwear) additives and EP (extreme–pressure) ones were used. The AW additives contained ZDDP, and EP ones – organic S–P compounds. The additives are typical of automotive gear oils.

The tribological tests were performed in two different four–ball testers. The first one (denoted T–02) was used to determine AW/EP properties at sliding friction. The second instrument (T–03) was used to assess the fatigue (pitting) life at rolling movement. Both the testers were designed and are manufactured by ITeE.

The results indicate that AW additives not only improve AW properties (as expected) but are also beneficial for the fatigue life, particularly at small concentrations. An increase of the concentration of such additives leads to an improvement of AW properties but has a disadvantageous effect on the fatigue life.

EP additives – even at a small concentration – significantly improve EP properties, and slightly AW properties, but without any influence on the fatigue life. An increase of the concentration of such additives leads to a further improvement of EP and AW properties. However, this is accompanied by a much decrease of the fatigue life. By using SEM and EDS for analysis of the worn surface, the authors were enabled to identify mechanisms of action of various lubricating additives under different friction conditions.