Waldemar TUSZYŃSKI[*], Elżbieta ROGOŚ[*], Edyta OSUCH-SŁOMKA[*], Andrzej URBAŃSKI[*], Anita MAŃKOWSKA[*]

KOMPLEKSOWE PORÓWNANIE MODELOWYCH KOMPOZYCJI OLEJOWYCH NA BAZIE OLEJU MINERALNEGO, SYNTETYCZNEGO, BIAŁEGO I NATURALNEGO

A THOROUGH COMPARISON OF MODEL OILS WITH A MINERAL, SYNTHETIC, WHITE AND NATURAL BASE

Słowa kluczowe:

olej przekładniowy, biodegradowalność, nietoksyczność, olej biały, olej naturalny, właściwości tribologiczne, aparat czterokulowy, stanowisko przekładniowe, poziom drgań, starzenie

Key words:

gear oil, biodegradability, non-toxicity, white oil, natural oil, tribological properties, four-ball tester, gear tester, level of vibrations, ageing

[*] Instytut Technologii Eksploatacji – PIB (ITeE – PIB), ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, e-mail (osoba kontaktowa): waldemar.tuszynski@itee.radom.pl, tel. 48-3644241, w. 209.

Streszczenie

Celem prac było sprawdzenie możliwości zastosowania oleju naturalnego i białego jako bazy olejów przekładniowych. Testom poddano cztery modelowe oleje przekładniowe – z bazą mineralną, syntetyczną węglowodorową (PAO), białą i naturalną (olej rzepakowy). Zastosowane oleje bazowe miały zbliżoną lepkość kinematyczną. Do olejów bazowych dodano pakiety dodatków charakterystyczne dla olejów przekładniowych, tj. dodatki smarnościowe typu EP (przeciwzatarciowe), dodatek przeciwpienny oraz inhibitor utleniania.

Wykonano testy tribologiczne z użyciem aparatów czterokulowych (pracujących w styku ślizgowym i tocznym) oraz stanowiska przekładniowego. Oznaczono także właściwości fizykochemiczne olejów po procesach starzenia.

Stwierdzono, że w porównaniu z olejami „klasycznymi" (mineralny, PAO) olej z bazą białą pozwala polepszyć odporność kół zębatych na mikropitting, wykazuje wyższą odporność na starzenie w czasie długotrwałego magazynowania, daje podobny współczynnik tarcia, zbliżoną odporność kół zębatych na zacieranie w warunkach ekstremalnych nacisków, zbliżoną odporność kół zębatych na pitting, podobny poziom drgań przekładni oraz wykazuje zbliżoną stabilność termooksydacyjną w testach przekładniowych. Ma jednak wadę – znacznie przyspiesza pojawianie się pittingu elementów łożysk tocznych.

W porównaniu z olejami „klasycznymi" olej z bazą naturalną (rzepakową) pozwala obniżyć poziom drgań przekładni, daje podobny współczynnik tarcia, zbliżoną odporność kół zębatych na pitting, zbliżoną odporność na starzenie w czasie długotrwałego magazynowania. Wykazuje jednak liczne wady – spadek odporności kół zębatych na zacieranie w warunkach ekstremalnych nacisków, znacznie niższą odporność kół zębatych na mikropitting, znaczne przyspieszenie pojawiania się pittingu elementów łożysk tocznych oraz gorszą stabilność termooksydacyjną w testach przekładniowych.

Stwierdzone wady olejów z bazą białą i naturalną, w przypadku braku możliwości ich usunięcia, można skompensować poprzez stosowanie ich do smarowania węzłów tarcia (np. przekładni zębatych) pracujących w warunkach umiarkowanych obciążeń. Dodatkowo dla oleju naturalnego zalecane jest skrócenie okresu eksploatacji.

WPROWADZENIE

Obecnie w wielu obszarach techniki, ze względu na niebezpieczeństwo wycieku oleju smarowego, dąży się do zastępowania olejów „klasycznych" olejami biodegradowalnymi i/lub nietoksycznymi. Oleje biodegradowalne są coraz częściej stosowane w przelotowych układach smarowania oraz maszynach i urządzeniach pracujących poza zamkniętymi pomieszczeniami – w rolnictwie, ogrodnictwie, leśnictwie, w kopalniach odkrywkowych oraz budowlach hydrologicznych. Istnieje nawet wymóg stosowania olejów biodegradowalnych do smarowania pił łańcuchowych w leśnictwie. Oleje biodegradowalne są wytwarzane na bazie olejów naturalnych (głównie roślinnych), cechujących się najwyższą biodegradowalnością (70–100%). Z kolei nietoksyczne oleje smarowe, znane jako „oleje białe", wymagane są do smarowania maszyn w przemyśle spożywczym, farmaceutycznym i kosmetycznym i są otrzymywane w wyniku głębokiej rafinacji olejów mineralnych. Oleje białe są biodegradowalne tylko w 25–45%.

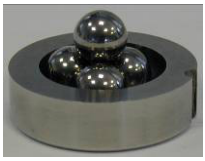
Oleje ekologiczne, pomimo coraz częstszego stosowania, są cały czas w fazie produkcji niszowej – w UE stanowią tylko 5% rynku środków smarowych stosowanych w przemyśle, a w USA jedynie 1% **[L. 1]**. Ponieważ potencjalny rynek na tego typu produkty wydaje się znaczący, w ITeE – PIB w Radomiu opracowano olej ekologiczny do przekładni przemysłowych o nazwie Arol P 220 **[L. 2]**. Jego bazę stanowi mieszanina oleju rzepakowego i rycynowego. Od lat opracowuje się także ekologiczne smary plastyczne na bazie olejów białych **[L. 3, 4]**. Jest to również wyjście naprzeciw spodziewanym w przyszłości uregulowaniom prawnym UE nakazującym stosowanie biodegradowalnych środków smarowych w określonych obszarach **[L. 5]**.

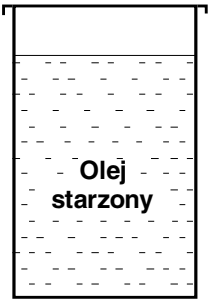
Celem prac opisanych w niniejszym artykule było sprawdzenie możliwości zastosowania olejów z bazą naturalną i białą do komponowania olejów przekładniowych. W tym celu wykonano wiele testów, głównie tribologicznych, a wyniki odniesiono do uzyskanych dla olejów „klasycznych". Dodać należy, że mimo istnienia wielu publikacji poświęconych olejom białym i naturalnym, ich wpływ na niektóre niebezpieczne formy zużycia (np. pitting czy mikropitting kół zębatych, pitting elementów łożysk tocznych) czy cechy eksploatacyjne, takie jak np. poziom drgań przekładni, jest mało poznany. Czynnikiem decydującym jest tu słaba dostępność odpowiedniej aparatury, a także duża czasochłonność i wysokie koszty testów. Niniejszy artykuł stanowi próbę częściowego wypełnienia opisanej luki.

METODYKA BADAŃ

W **Tab. 1** zestawiono wykorzystane metody testowe oraz użytą aparaturę.

Tabela 1. Metodyka i aparatura testowa
Table 1. Test methods and instruments

Właściwość Norma/procedura	Oznaczany wskaźnik	Urządzenie testowe	Węzeł tarcia / badany obiekt
Opory tarcia- ASTM D 5183	Współczynnik tarcia	Aparat czterokulowy T-02	
Właściwości przeciwzatarciowe (EP) Metoda własna [6]	Graniczny nacisk zatarcia (p_{oz})		
Odporność elementów łożysk tocznych na pitting IP 300	Trwałość zmęczeniowa 10% (L_{10})	Aparat czterokulowy T-03	
Odporność kół zębatych na zacieranie w zaostrzonych warunkach ISO 14635-2 – metoda A10/16,6R/120	Stopień obciążenia niszczącego (FLS)	Stanowisko przekładniowe T-12U	(koła FZG A10)
Odporność kół zębatych na pitting FVA No. 2/IV – metoda PT C/10/90	Trwałość zmęczeniowa 50% (LC_{50})	Stanowisko przekładniowe T-12U	(koła FZG C-PT)
Odporność kół zębatych na mikropitting mierzona w testach pittingu Metoda własna	Czas do pojawienia się znaczącego mikropittingu		

Właściwość Norma/procedura	Oznaczany wskaźnik	Urządzenie testowe	Węzeł tarcia / badany obiekt
Drgania przekładni (testy pittingu) ISO 10816-1:1995	Poziom ogólny drgań – wartość skuteczna amplitudy przyspieszenia drgań w paśmie 20 Hz-20 kHz (średnia z pomiarów w kierunku pionowym i poziomym)		
Stabilność termooksydacyjna oleju wykazywana w testach przekładniowych (testy pittingu) PN-EN ISO 3104:2004 PN-C-04013:1979 PN-C-04049:1988	Zmiana lepkości w temp. 100ºC Zmiana wskaźnika lepkości Zmiana liczby kwasowej	Lepkościomierz Titrometr	
Stabilność fizykochemiczna oleju wykazywana w czasie długotrwałego magazynowania (3 lata) PN-EN ISO 3104:2004 PN-C-04013:1979			

Praktycznie wszystkie zastosowane metody testowe są albo znormalizowane, albo ujęte w dokumentach roboczych FVA. Przy oznaczaniu współczynnika tarcia zmodyfikowano procedurę opisaną normą ASTM D 5183, stosując prędkość obrotową 500 obr./min oraz rozpoczynając badania w temperaturze otoczenia. Metoda własna oceny właściwości przeciwzatarciowych środków smarowych (oznaczanie wskaźnika p_{oz}) za pomocą aparatu czterokulowego była przedmiotem licznych publikacji, np. **[L. 6]**. Zastosowane metody badań przekładniowych opisano w pracy **[L. 7]**. Odporność kół zębatych na mikropitting scharakteryzowano według metody własnej – czasem do pojawienia się znaczącego mikropittingu, którego łączny obszar osiąga 30% pola części roboczej zębów.

Użyte do badań tribologicznych aparaty czterokulowe (T-02 i T-03) oraz stanowisko przekładniowe (T-12U) zostały opracowane i są wytwarzane w Idee – PIB w Radomiu. Aparaturę uzupełniającą stanowiły mikroskop optyczny pomiarowy (do pomiaru średnic śladów zużycia) oraz komparator masy (do wyznaczania ubytku masy kół zębatych).

Drgania mierzono za pomocą analizatora drgań. Pomiarów dokonywano przetwornikami piezoelektrycznymi (akcelerometrami). Drgania mierzono w kierunku pionowym i poziomym, a akcelerometry przykręcone były na płycie bocznej w rejonie łożyskowania małego koła testowego. Wyboru miejsca zamocowania przetworników drgań dokonano w oparciu o zalecenia normy ISO 10816-1:1995.

Do analiz fizykochemicznych użyto lepkościomierza i titrometru.

CHARAKTERYSTYKA BADANYCH OLEJÓW

Do badań zastosowano modelowe kompozycje olejowe powstałe poprzez zmieszanie oleju bazowego z dodatkami uszlachetniającymi. Zastosowano cztery rodzaje olejów bazowych: mineralny, syntetyczny (węglowodorowy – PAO), mineralny głębokorafinowany (biały) oraz naturalny (rzepakowy rafinowany). Oleje bazowe wybrano w ten sposób, aby ich lepkości w temperaturze 100ºC były podobne. Wybrane właściwości reologiczne tych olejów, tzn. lepkość kinematyczną (ν) i wskaźnik lepkości (WL), zestawiono w **Tab. 2**.

Tabela 2. Wybrane właściwości reologiczne olejów bazowych
Table 2. Selected theological properties of the base oils

Olej bazowy	Rodzaj	Symbol	ν (40°C) [mm^2/s]	ν (100°C) [mm^2/s]	WL
Hydrorafinat SAE 30/95	Mineralny	„Mineralny”	86,4	9,8	91
Polialfaolefina PAO 8	Syntetyczny węglowodorowy	„PAO”	47,0	7,8	136
Biały	Mineralny głębokorafinowany	„Biały”	75,3	9,3	99
Rzepakowy rafinowany	Naturalny (roślinny)	„Rzepakowy”	39,5	8,4	196

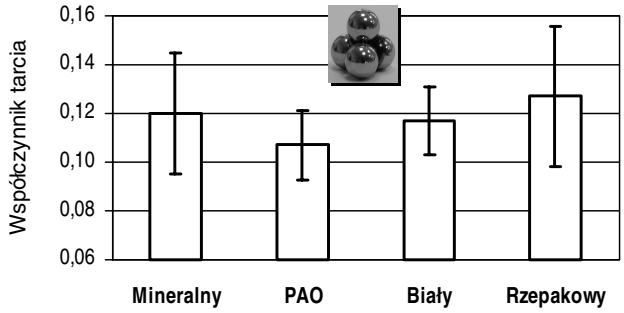
Do olejów bazowych dodawano różnego typu handlowe pakiety dodatków uszlachetniających. Dodatki smarnościowe (typu EP) dodano

w stężeniu 5% wag., dodatki przeciwpienne w stężeniu 0,01% wag., a inhibitory utleniania w stężeniu 5% wag. Pakiet EP zawierał dodatki smarnościowe oparte na organicznych związkach siarkowo-fosforowych (S-P). Jego ilość w oleju wynikała z zaleceń producenta. Jako przeciwpienny zastosowano dodatek silikonowy. Zastosowana jego ilość wynika z oznaczonej odporności na pienienie. Największą skłonność do pienienia wykazał olej mineralny. Dodatek przeciwpienny w ilości 0,01% wag. obniżył ilość piany do zera. Dla pozostałych olejów przyjęto tę samą ilość dodatku. Jako inhibitor utleniania zastosowano 2,6-di-tert-butylo-4--metylofenol, powszechnie stosowany w przemyśle spożywczym. Zastosowana jego ilość wynika z oznaczonej stabilności termooksydacyjnej. Największe zmiany w wyniku termooksydacji zaobserwowano dla oleju rzepakowego. Dodanie inhibitora utleniania w ilości 5% wag. spowodowało uzyskanie satysfakcjonującej stabilności termooksydacyjnej tego oleju. Tę samą ilość dodatku przyjęto dla pozostałych olejów.

WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

Opory tarcia

Opory tarcia scharakteryzowano za pomocą współczynnika tarcia – **Rys. 1**.

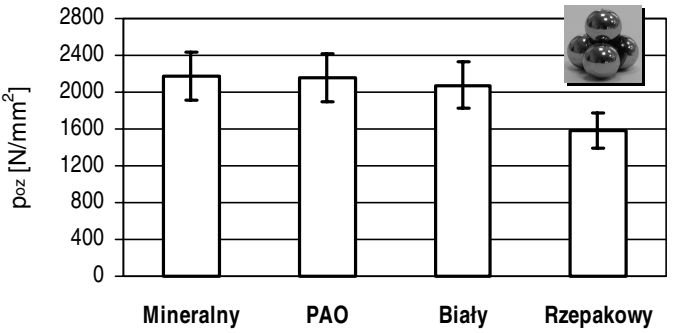


Rys. 1. Wartości współczynnika tarcia uzyskane dla badanych kompozycji olejowych
Fig. 1. Friction coefficients for the tested oils

Wartości współczynnika tarcia uzyskane dla olejów bazowanych na oleju białym i naturalnym są zbliżone do olejów „klasycznych".

Właściwości przeciwzatarciowe (EP)

Właściwości przeciwzatarciowe (EP) scharakteryzowano za pomocą granicznego nacisku zatarcia (p_{oz}) **– Rys. 2.**



Rys. 2. Wartości granicznego nacisku zatarcia (p_{oz}) dla badanych kompozycji olejowych

Fig. 2. Limiting pressure of seizure (p_{oz}) for the tested oils

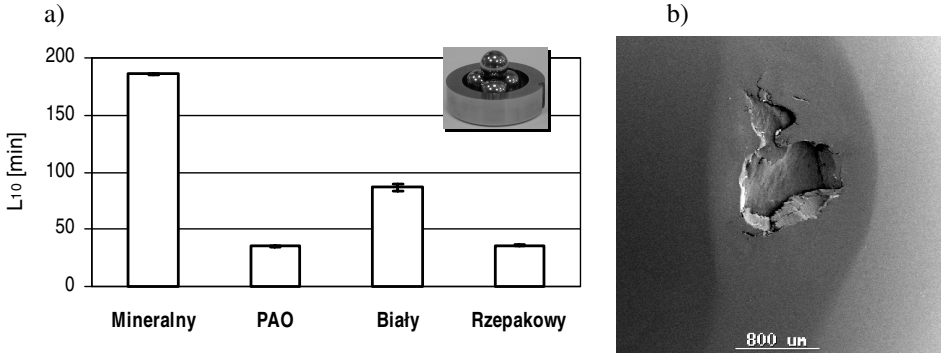
Wartości granicznego nacisku zatarcia (p_{oz}) uzyskane dla kompozycji na bazie oleju białego są zbliżone do olejów „klasycznych". Najniższe właściwości przeciwzatarciowe wykazuje olej z bazą naturalną. Jak wykazano w raporcie **[L. 8]**, przyczynia się do tego mniejsza zawartość w śladzie zużycia siarki i fosforu pochodzących z reakcji chemicznych dodatków EP z powierzchnią stali; jak wiadomo – ich związki są odpowiedzialne za kształtowanie odporności na zacieranie poprzez przeciwdziałanie powstawaniu sczepień adhezyjnych albo ułatwianie ich zrywania **[L. 9–11]**.

Odporność łożysk tocznych na pitting

Odporność łożysk tocznych na pitting scharakteryzowano za pomocą trwałości zmęczeniowej 10% (L_{10}) **– Rys. 3.**

Wartości trwałości zmęczeniowej 10% (L_{10}) uzyskane dla kompozycji na bazie oleju białego i naturalnego są kilkukrotnie niższe niż oleju mineralnego. Najniższe właściwości przeciwzatarciowe wykazuje olej z bazą naturalną, ale również PAO. Jak wykazano w raporcie **[L. 8]**, przyczynia się do tego najprawdopodobniej najcieńszy film smarowy stwierdzony dla obu tych olejów. Inna przyczyna może być związana ze

stwierdzoną najniższą zawartością siarki i fosforu w ścieżce zużycia dla oleju z bazą naturalną i PAO, choć różnice stężenia tych pierwiastków leżą praktycznie w granicach błędu pomiaru **[L. 8]**. Oznaczałoby to brak ochronnego depozytu związków chemicznych na ścieżce zużycia, co dla obu wymienionych olejów przejawia się najniższą powierzchniową trwałością zmęczeniową.

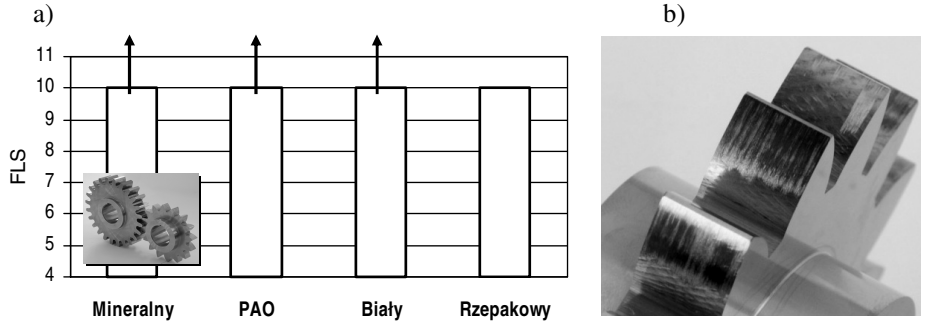


Rys. 3. Testy odporności łożysk tocznych na pitting: a) wartości trwałości zmęczeniowej 10% (L_{10}) dla badanych kompozycji olejowych, b) typowe wykruszenie zmęczeniowe (pitting) na kulce testowej

Fig. 3. Tests of the surface fatigue life of the elements of rolling bearings: a) 10% fatigue life (L_{10}) for the tested oils, b) typical pitting on the test ball

Odporność kół zębatych na zacieranie w zaostrzonych warunkach

Odporność kół zębatych na zacieranie w zaostrzonych warunkach scharakteryzowano za pomocą stopnia obciążenia niszczącego (FLS) **– Rys. 4.**



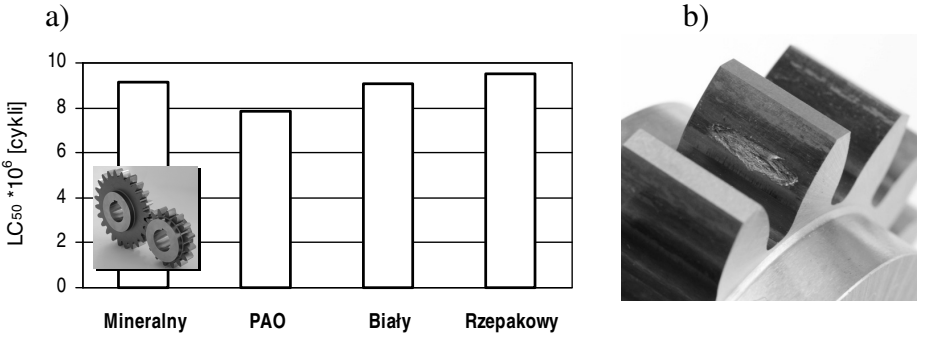
Rys. 4. Testy odporności kół zębatych na zacieranie w zaostrzonych warunkach: a) wartości stopnia obciążenia niszczącego (FLS) dla badanych kompozycji olejowych, b) strefy zacierania na zębach koła testowego

Fig. 4. Tests of the resistance of gears to scuffing under extreme conditions: a) failure load stage (FLS) for the tested oils, b) scuffing areas on the teeth of the test gear

Kompozycja na bazie oleju białego, podobnie jak oleje „klasyczne" pozwala uzyskać stopień obciążenia niszczącego (FLS) przewyższający maksymalną wartość, tj. 10. Niższy, dokładnie 10. stopień obciążenia niszczącego, stwierdzono dla oleju z bazą naturalną, co koreluje ze spadkiem wskaźnika p_{oz} w czterokulowym węźle tarcia zaobserwowanym dla tego oleju (**Rys. 2**).

Odporność kół zębatych na pitting

Odporność kół zębatych na pitting scharakteryzowano za pomocą trwałości zmęczeniowej 50% (LC_{50}) **– Rys. 5.**



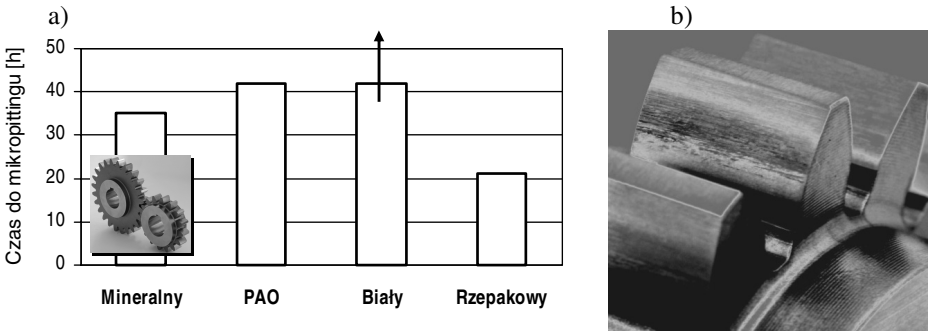
Rys. 5. Testy odporności kół zębatych na pitting: a) wartości trwałości zmęczeniowej 50% (LC_{50}) dla badanych kompozycji olejowych, b) wykruszenie zmęczeniowe (pitting) na zębie koła testowego

Fig. 5. Tests of pitting of gears: a) 50% fatigue life (LC_{50}) for the tested oils, b) typical pitting on the tooth of the test gear

Wartości trwałości zmęczeniowej 10% (L_{10}) uzyskane dla kompozycji na bazie oleju białego i naturalnego są porównywalne do olejów „klasycznych". Najniższą trwałość zmęczeniową uzyskano dla oleju z bazą PAO. Jak wykazano w raporcie **[L. 8]** przyczynia się do tego najcieńszy film smarowy stwierdzony dla tego oleju.

Odporność kół zębatych na mikropitting

Odporność kół zębatych na mikropitting scharakteryzowano według metody własnej – czasem do pojawienia się znaczącego mikropittingu, którego łączny obszar osiąga 30% pola części roboczej zębów – **Rys. 6.**



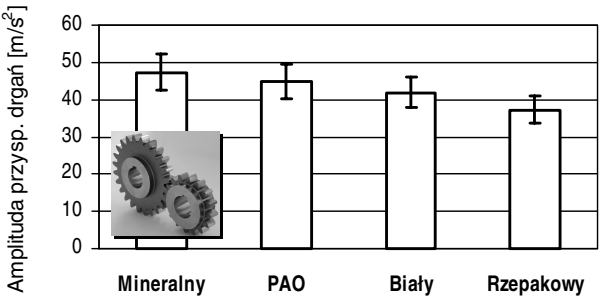
Rys. 6. Testy odporności kół zębatych na mikropitting: a) czas do pojawienia się znaczącego mikropittingu, b) mikropitting na zębie koła testowego (szare pasmo w dolnej części zęba)

Fig. 6. Tests of micropitting of gears: a) time to appearance of significant micropitting, b) micropitting on the tooth of the test gear (grey stripe at the lower part of the tooth)

Odporność na mikropitting uzyskana dla kompozycji na bazie oleju białego przewyższa oleje „klasyczne". Najniższą odporność na mikropitting uzyskano dla oleju z bazą naturalną.

Drgania przekładni

Drgania przekładni scharakteryzowano za pomocą wartości skutecznej amplitudy przyspieszenia drgań w paśmie 20 Hz–20 kHz (poziom ogólny drgań). Ponieważ badania prowadzono w kierunku pionowym i poziomym, za ostateczny wynik przyjęto średnią z obu kierunków. Drgania mierzone były w czasie testów pittingu, po dotarciu kół testowych, ale przed stwierdzeniem początków pittingu (bieg 3, 4) – **Rys. 7**.



Rys. 7. Wartości skuteczne amplitudy przyspieszenia drgań uzyskane dla badanych kompozycji olejowych

Fig. 7. RMS values of amplitude of acceleration of vibrations for the tested oils

Poziom drgań przekładni smarowanej kompozycją z olejem bazowym białym jest zbliżony do olejów „klasycznych". Natomiast olej z bazą naturalną pozwala w znaczący sposób obniżyć drgania. Ani analiza oporów ruchu, ani grubości filmu smarowego **[L. 8]** nie pozwoliła wyjaśnić przyczyny tej redukcji. Nie stwierdzono także korelacji pomiędzy poziomem drgań a lepkością oleju czy wskaźnikiem lepkości.

Stabilność termooksydacyjna olejów w testach przekładniowych

Stabilność termooksydacyjną oleju w testach przekładniowych (pittingu) scharakteryzowano za pomocą względnej zmiany lepkości kinematycznej ($\Delta\nu_{100}$), wskaźnika lepkości (Δ_{WL}) oraz liczby kwasowej (Δ_{TAN}) – **Tab. 3**. Ze względu na różną liczbę biegów do stwierdzenia pittingu dla poszczególnych olejów, w celu porównania wyników odniesiono je do jednego biegu (całkowitą zmianę danego wskaźnika podzielono przez liczbę biegów).

Tabela 3. Wskaźniki stabilności termooksydacyjnej oleju w testach przekładniowych

Table 3. Measures of thermo-oxidative stability of the oils in gear tests

	Mineralny	PAO	Biały	Rzepakowy
$\Delta\nu_{100}$ [%/bieg]	-0,2	-0,3	0	0,8
Δ_{WL} [%/bieg]	3,0	-0,4	0,3	0
Δ_{TAN} [%/bieg]	2,8	0	-3,0	8,2

Zaobserwować można, że w wyniku procesów starzenia podczas badań przekładniowych nastąpiła bardzo wysoka zmiana liczby kwasowej oleju z bazą naturalną (olej rzepakowy) w porównaniu z olejami „klasycznymi". Zwiększenie wartości liczby kwasowej kompozycji na bazie oleju naturalnego jest spowodowane procesami utleniania bazy i dodatków uszlachetniających, w wyniku których tworzą się produkty o charakterze kwaśnym. Z kolei widoczne zmniejszenie wartości liczby kwasowej kompozycji na bazie oleju białego może być spowodowane przekształceniem obecnych + w oleju substancji kwaśnych, pochodzących z procesu technologicznego lub dodatków uszlachetniających, w produkty o charakterze bardziej obojętnym. Najwyższą stabilność termooksydacyjną stwierdzono dla oleju z bazą PAO.

Stabilność fizykochemiczna olejów w czasie długotrwałego magazynowania

Stabilność fizykochemiczną olejów wykazywaną w czasie długotrwałego magazynowania (3 lata) scharakteryzowano za pomocą względnej zmiany lepkości kinematycznej ($\Delta\nu_{100}$) i wskaźnika lepkości (Δ_{WL}) – **Tab. 4**.

Tabela 4. Wskaźniki stabilności fizykochemicznej oleju w czasie długotrwałego magazynowania

Table 4. Measures of physico-chemical stability of the oils during long-lasting storage

	Mineralny	PAO	Biały	Rzepakowy
$\Delta\nu_{100}$ [%]	-2,3	-1,4	0	5,4
Δ_{WL} [%]	9,0	-9,3	-2,0	6,1

Po upływie 3 lat od daty wytworzenia oleju zaobserwowano, że olej z bazą naturalną (rzepakową) wykazuje średni poziom zmian starzeniowych podobny do olejów „klasycznych". Największą odporność na starzenie w czasie magazynowania stwierdzono dla kompozycji z olejem bazowym białym.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W porównaniu z olejami „klasycznymi" (mineralny, PAO) olej z bazą białą pozwala polepszyć odporność kół zębatych na mikropitting, wykazuje wyższą odporność na starzenie w czasie długotrwałego magazynowania, daje podobny współczynnik tarcia, zbliżoną odporność kół zębatych na zacieranie w warunkach ekstremalnych nacisków, zbliżoną odporność kół zębatych na pitting, podobny poziom drgań przekładni oraz wykazuje zbliżoną stabilność termooksydacyjną w testach przekładniowych. Ma jednak wadę – znacznie przyspiesza pojawianie się pittingu elementów łożysk tocznych.

W porównaniu z olejami „klasycznymi" olej z bazą naturalną (rzepakową) pozwala obniżyć poziom drgań przekładni, daje podobny współczynnik tarcia, zbliżoną odporność kół zębatych na pitting, zbliżoną odporność na starzenie w czasie długotrwałego magazynowania. Wykazuje jednak liczne wady – spadek odporności kół zębatych na zacieranie w warunkach ekstremalnych nacisków, znacznie niższą odporność kół

zębatych na mikropitting, znaczne przyspieszenie pojawiania się pittingu elementów łożysk tocznych oraz gorszą stabilność termooksydacyjną w testach przekładniowych.

Stwierdzone wady olejów z bazą białą i naturalną, w przypadku braku możliwości ich usunięcia, można skompensować poprzez stosowanie ich do smarowania węzłów tarcia (np. przekładni zębatych) pracujących w warunkach umiarkowanych obciążeń. Dodatkowo dla oleju naturalnego zalecane jest skrócenie okresu eksploatacji.

LITERATURA

1. Battersby N.S.: Environmentally acceptable lubricants: current status and future opportunities. Materiały III World Tribology Congress. Washington, 2005, referat nr WTC2005-63503 (zamieszczony na płycie CD).
2. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego (grantu) nr 4 T09B 068 23: Kształtowanie właściwości funkcjonalnych biodegradowalnych środków smarowych poprzez modyfikację roślinnej bazy olejowej. ITeE, Radom 2004.
3. Pawelec E., Drabik J.: Wpływ komponentów na charakterystyki tribologiczne ekologicznego smaru plastycznego. Tribologia. 2007, 5, s. 109–117.
4. Bajer J.: Wpływ przedłużonego ugniatania w obecności wody na właściwości tribologiczne smarów plastycznych z organicznym i mineralnym dodatkiem smarowym. Tribologia. 2009, 1, s. 23–35.
5. Górski W.: Biogazy – składnik cieczy eksploatacyjnych. Materiały III Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Środki Smarowe 2010", Rytro 2010, s. 10 (referat dostępny w postaci elektronicznej).
6. Szczerek M., Tuszyński W.: Badania tribologiczne. Zacieranie. Wyd. ITeE, Radom 2000.
7. Tuszyński W., Wulczyński J.: Nowe metody badania wpływu olejów smarowych na zacieranie, pitting i mikropitting kół zębatych. Tribologia. 2007, 3, s. 303–317.
8. Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego (grantu) nr 3 T09B 074 28: Nowe, kompleksowe podejście do oceny wpływu konwencjonalnych i ekologicznych środków smarowych na właściwości przeciwzatarciowe i powierzchniową trwałość zmęczeniową modelowego i rzeczywistego węzła tarcia. ITeE, Radom 2008.
9. Godfrey D.: Boundary lubrication. Materiały sympozjum „Interdisciplinary approach to friction and wear" w San Antonio. 1967, s. 335–384.

10. 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. 1975, t. 18, s. 163–174.
11. Stachowiak G.W., Batchelor A.W.: Engineering tribology. Elsevier. Amsterdam 1993.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

The aim of the work was to assess the possibilities of using natural and white oils as potential bases of gear oils. Four model gear oils were tested – with mineral, synthetic hydrocarbon (PAO), white, and natural (rapeseed) base oil, all of similar viscosity. The oils contained additives typical of gear oils, e.g. EP additives, antifoam additives, and antioxidants.

Tribological four-ball tests (with sliding and rolling contact) and gear tests were performed. In addition, physico-chemical analyses of the aged oils were carried out.

The results show that, in comparison with "classical" oils, the white oil gives a better resistance of gears to micropitting, more stable physico-chemical characteristics during the long storage, similar antifriction properties, similar resistance of gears to scuffing under extreme conditions, close resistance of gears to pitting, a similar level of gear vibrations, and close thermo-oxidative stability in gear experiments. The white oil also shows a drawback, which is a significant acceleration of the pitting of bearing balls.

In comparison with "classical" oils, the natural (rapeseed) oil reduces the level of gear vibrations, gives similar antifriction properties, a similar resistance of gears to pitting, and close stability of physico-chemical characteristics during the long storage. However, the natural oil shows numerous drawbacks, e.g. a lower resistance of gears to scuffing under extreme conditions, a much lower resistance of gears to micropitting, a significant acceleration of pitting of bearing balls, and worse thermo-oxidative stability in gear experiments.

When removal of the drawbacks of the white and natural oils appears impossible, they can be partly compensated by using them for the lubrication of machine elements (e.g. gears) working under moderate conditions. Additionally, in case of natural oils, it is recommended that the time of their exploitation should be shortened.