

Waldemar TUSZYŃSKI*, Elżbieta ROGOŚ*, Andrzej URBAŃSKI*

KOMPLEKSOWE PORÓWNANIE DWÓCH OLEJÓW PRZEKŁADNIOWYCH PRZEMYSŁOWYCH Z BAZĄ NATURALNĄ I MINERALNĄ

A THOROUGH COMPARISON OF TWO INDUSTRIAL GEAR OILS WITH A NATURAL AND MINERAL BASE

Słowa kluczowe:

przemysłowy olej przekładniowy, olej ekologiczny, właściwości tribologiczne, właściwości fizykochemiczne, biodegradowalność, aparat czterokulowy, stanowisko przekładniowe

Key-words:

Industrial gear oil, ecological oil, tribological properties, physico-chemical properties, biodegradability, four-ball tester, gear test rig

Streszczenie

W ITeE – PIB w Radomiu opracowano olej ekologiczny o nazwie Arol P220 do przekładni przemysłowych. Jego bazę stanowi mieszanina oleju rzepakowego i rycynowego. Jest zamiennikiem oleju handlowego z bazą

* Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom, e-mail (osoba kontaktowa): waldemar.tuszynski@itee.radom.pl

mineralną w klasie lepkości ISO VG 220. Opracowany olej spełnia najważniejsze wymagania normy PN-C-96056:1990 odnośnie do charakterystyki fizykochemicznej oraz właściwości tribologicznych.

Jednak coraz większe znaczenie przywiązywane jest do innych właściwości, nieujętych we wspomnianej normie. Są to: opory tarcia, odporność kół zębatach na zacieranie w zaostrzonych warunkach, odporność kół zębatach na pitting i mikropitting, odporność łożysk tocznych przekładni na pitting, generowane drgania przekładni oraz stabilność termooksydacyjna oleju wykazywana w długotrwałych testach przekładniowych i stabilność fizykochemiczna oleju w czasie długotrwałego magazynowania. Dlatego przeprowadzono szereg dodatkowych testów porównawczych obu olejów (ekologicznego i handlowego mineralnego) – czterokulowych (styk ślizgowy i toczny), przekładniowych i fizykochemicznych, nie ujętych w normie PN-C-96056:1990. Wykazano, że olej ekologiczny pozwala obniżyć współczynnik tarcia oraz zwiększyć odporność kół zębatach na mikropitting w porównaniu z olejem mineralnym. W warunkach smarowania zanurzeniowego (testy pittingu) olej ekologiczny pozwala na redukcję poziomu drgań w porównaniu z olejem mineralnym, jednak w czasie badań mikropittingu (smarowanie natryskowe) sytuacja jest odwrotna. Znaczącą wadą oleju ekologicznego jest niekorzystna zmiana (spadek) wskaźnika lepkości w czasie długotrwałego magazynowania, gorsza stabilność termooksydacyjna po testach przekładniowych (duży wzrost lepkości) oraz spadek odporności smarowanej powierzchni na zacieranie w warunkach bardzo wysokich nacisków. Najistotniejszą wadą oleju ekologicznego jest jednak znaczne skrócenie czasu do momentu pojawienia się pittingu elementów tocznych łożysk. Wady te, w przypadku braku możliwości ich usunięcia, można częściowo skompensować skróceniem okresu magazynowania i eksploatacji oleju ekologicznego oraz stosowaniem go do smarowania przekładni pracujących w warunkach umiarkowanych obciążeń.

WPROWADZENIE

W ostatnich latach coraz większe znaczenie przypisuje się ekologicznym skutkom eksploatacji środków smarowych [L. 1–3]. Jest to konsekwencją negatywnego wpływu produkcji i eksploatacji środków smarowych na środowisko [L. 1]. Coraz więcej przedsiębiorstw realizuje nowe podejście do ochrony ekosystemu; podkreślają ekologiczny aspekt swojej dzia-

łałności wdrażając normy takie jak np. ISO 14 001 [L. 4] czy BS 7750 [L. 5]. W ocenie oddziaływań na środowisko podkreśla się wszelkie bezpośrednie oraz pośrednie skutki działania przedsiębiorstw zarówno pozytywne, jak i negatywne.

Stosowane powszechnie mineralne środki smarowe stanowią zagrożenie ekologiczne na każdym etapie użytkowania. Szkodliwe są składniki bazy mineralnej i dodatków uszlachetniających, a w szczególności produkty przemian termooksydacyjnych powstające w czasie eksploatacji [L. 6–9]. Przepracowane mineralne oleje smarowe uznawane są za substancje silnie oddziałujące na środowisko – w załączniku nr 1 do Ustawy o odpadach [L. 10], dotyczącej klasyfikacji odpadów, zaliczone zostały do odpadów niebezpiecznych.

Możliwość przedostania się do środowiska szkodliwych ekologicznie środków smarowych stanowi ważną przesłankę skłaniającą do podejmowania przedsięwzięć umożliwiających zmniejszenie tego zagrożenia. Wymierne korzyści ekologiczne można uzyskać przez zastępowanie mineralnych środków smarowych produktami o mniejszej szkodliwości dla środowiska – przede wszystkim w tych układach smarowania, w których nieunikniona jest interakcja środków smarowych z otoczeniem, wynikająca ze stosowanego systemu smarowania. Ma to miejsce w przelotowych układach smarowania oraz maszynach i urządzeniach pracujących poza zamkniętymi pomieszczeniami, np. maszynach rolniczych, leśnych, ogrodniczych, pracujących w kopalniach odkrywkowych, zaporach wodnych, budowlach hydrologicznych. W praktyce zastępowanie mineralnych środków smarowych skutkuje ograniczeniem zawartości wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w olejach smarowych (do ilości <5%), eliminowaniem z ich składu związków chloru, fosforu, chloroparafiny i innych [L. 1, 3]. Dąży się do wytwarzania ekologicznych środków smarowych na bazie produktów nietoksycznych i biodegradowalnych, np. naturalnych (głównie roślinnych) [L. 11–14]. Ponieważ oleje ekologiczne są obecnie w fazie produkcji niszowej – w UE stanowią tylko 5% rynku środków smarowych stosowanych w przemyśle, a w USA jedynie 1% – potencjalny rynek na tego typu produkty wydaje się znaczący [L. 15].

W ITeE – PIB w Radomiu opracowano olej ekologiczny o nazwie Arol P 220 do przekładni przemysłowych [L. 16]. Jego bazę stanowi mieszanina oleju rzepakowego i rycynowego. Arol P 220 posiada podobne właściwości jak olej handlowy z bazą mineralną w klasie lepkości ISO

VG 220 i może być traktowany jako jego zamiennik. Litera „P” w nazwie oznacza olej przekładniowy, a liczba obok – klasę lepkości.


Opracowany olej spełnia wymagania normy PN-C-96056:1990 odnośnie do charakterystyki fizykochemicznej oraz wybranych właściwości tribologicznych. Niemniej jednak ostatnio coraz większe znaczenie przywiązywane do innych, nieujętych we wspomnianej normie właściwości, takich jak: opory tarcia, odporność kół zębatach na zacieranie w zaostzonych warunkach, odporność kół zębatach na pitting i mikropitting, odporność łożysk tocznych przekładni na pitting, generowane drgania przekładni oraz stabilność termooksydacyjna oleju wykazywana w długotrwałych testach przekładniowych i stabilność fizykochemiczna oleju w czasie długotrwałego magazynowania. Dlatego przeprowadzono szereg dodatkowych testów – czterokulowych (styk ślizgowy i toczny), przekładniowych i fizykochemicznych. Ich wyniki są przedmiotem niniejszego artykułu.





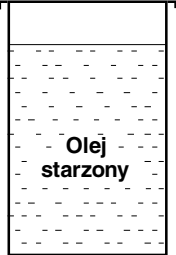
METODYKA BADAŃ

W **Tabeli 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 [L. 17]	Graniczny nacisk zatarcia (poz)	Aparat czterokulowy T-02	
Właściwości przeciwzatarciowe (EP) PN-C-04147:1976	Obciążenie zacierające (Pt)		
Odporność łożysk tocznych przekładni na pitting IP 300	Trwałość zmęczenia 10% (L10)	Aparat czterokulowy T-03	

Właściwość Norma/procedura	Oznaczany wskaźnik	Urządzenie testowe	Węzeł tarcia / badany obiekt
Odporność kół zębatych na zacieranie w zaostrzonych warunkach ISO 14635-2 – metoda A10/16,6R/120	Stożek obciążenia niszczącego (FLS) Najgroźniejsza forma zużycia zęba	Stanowisko przekładniowe T-12U	 (koła FZG A10)
Odporność kół zębatych na pitting FVA No. 2/IV – metoda PT C/10/90	Trwałość zmęczeniowa 50% (LC50)	Stanowisko przekładniowe T-12U	 (koła FZG C-PT)
Odporność kół zębatych na mikropitting FVA No. 54/7 – metoda GT-C/8,3/90	Stożek obciążenia niszczącego Klasa przeciwdziałania mikropittingowi (GFT)	Stanowisko przekładniowe T-12U	 (koła FZG C/GF)
Drgania przekładni (testy pittingu i mikropittingu) 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)	Stanowisko przekładniowe T-12U	 (koła FZG C-PT oraz FZG C/GF)
Stabilność termooksydacyjna oleju wykazywana w długotrwałych testach przekładniowych (testy pittingu i mikropittingu) PN-EN ISO 3104:2004 PN-C-04013:1979 Stabilność fizykochemiczna oleju wykazywana w czasie długotrwałego magazynowania (3 lata) PN-EN ISO 3104:2004 PN-C-04013:1979	Zmiana lepkości w temp. 40 i 100°C Zmiana wskaźnika lepkości	Aparat do oznaczania lepkości	 Olej starzony

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_{02}) za pomocą aparatu czterokulowego była przedmiotem licznych publikacji, np. [L. 17]. Zastosowane metody badań przekładniowych opisano w pracach [L. 18, 19].

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

Do pomiaru drgań użyto 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.

CHARAKTERYSTYKA BADANYCH OLEJÓW

Testom poddano olej ekologiczny do przekładni przemysłowych o nazwie Arol P 220, opracowany w ITeE – PIB oraz olej handlowy z bazą mineralną. Oba oleje należą do klasy lepkości ISO VG 220.

Bazę oleju Arol P 220 stanowi mieszanina oleju rzepakowego i rycynowego. Zawiera w sobie antyoksydant, dodatki typu AW (przeciwzużyciowe) i EP (przeciwzatarciowe) oraz dodatek przeciwpienny. Skład chemiczny oleju Arol P 220 jest przedmiotem zgłoszenia patentowego.

W **Tab. 2** przedstawiono podstawowe właściwości obu testowanych olejów.

Z **Tab. 2** wynika, że Arol P 220 posiada podobne właściwości do oleju handlowego z bazą mineralną i może być traktowany jako jego zamiennik. Wysoka biodegradowalność pozwala zakwalifikować olej Arol P 220 do grupy olejów ekologicznych.

Tabela 2. Charakterystyka oleju Arol P 220 oraz jego handlowego odpowiednika; gwiazdką (*) zaznaczono testy wymagane normą PN-C-96056:1990

Table 2. Characteristics of Arol P 220 oil and its commercial equivalent; a symbol of star (*) denotes the tests required by PN-C-96056:1990 standard

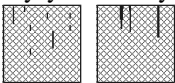
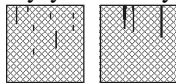

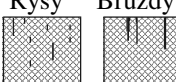
Właściwość	Arol P 220	Olej handlowy	Norma
Lepkość kinematyczna w 40°C, mm ² /s ^(*)	201	186	PN-EN ISO 3104:2004
Lepkość kinematyczna w 100°C, mm ² /s	19,2	20,3	PN-EN ISO 3104:2004
Wskaźnik lepkości ^(*)	107	127	PN-C-04013:1979
Temperatura zapłonu, °C ^(*)	170	230	PN-EN ISO 2592:2008
Temperatura krzepnięcia, °C	-20	-21	PN-C-04016:1955
Wł. przeciwzużyciowe – średnica śladu zużycia (1450 obr/min, 392 N, 60 min), mm ^(*)	0,43	0,43	PN-C-04147:1976
Wł. smarne - wskaźnik zużycia pod obciążeniem (I _h) ^(*) , daN - obciążenie zespawania (P _z), daN	76±7 392±63	51±5 309±49	PN-C-04147:1976
Zdolność do przenoszenia obciążeń ^(*) (FZG A/8,3/90)	12	12	PN-C-04169:1978
Działanie korodujące na miedź (3 h, 120°C) – stopień korozji ^(*)	4	4	PN-EN ISO 2160:2004
Wł. przeciwpienne (25/95/25°C) ^(*) - objętość piany, cm ³ - trwałość piany, cm ³	0/30/10 0/0/0	10/20/0 0/0/0	PN-C-04055:1985
Liczba kwasowa, mg KOH/g oleju	6,68	0,63	PN-C-04049:1988
Biodegradowalność, %	87	37	CEC-L-33-T-94

WYNIKI BADAŃ I ICH DYSKUSJA

W Tabeli 3 przedstawiono wyniki testów porównawczych obu olejów do przekładni przemysłowych. Tam, gdzie było możliwe, podano rozrzuty wyników.

Tabela 3. Wyniki testów oleju ekologicznego Arol P 220 i jego handlowego odpowiednika z bazą mineralną

Table 3. Test results for Arol P 220 ecological oil and its commercial, mineral equivalent

Właściwość	Oznaczany wskaźnik	Arol P 220	Olej handlowy
Opory tarcia	Współczynnik tarcia	0,12±0,01	0,15±0,06
Właściwości przeciwzatarciowe (EP)	Graniczny nacisk zatarcia (poz), N/mm ²	2039±245	2843±341
Właściwości przeciwzatarciowe (EP)	Obciążenie zacierające (Pt), N	2830±340	2433±292
Odporność łożysk tocznych przekładni na pitting	Trwałość zmęczeniowa 10% (L10), min	37±2	94±1
Odporność kół zębatych na zacieranie w zaostzonych warunkach	Stopień obciążenia niszczonego (FLS)	>10	>10
	Najgroźniejsze uszkodzenia zębów małego koła testowego i łączne pole ich powierzchni, mm ²	9 st. obciążenia Rysy Bruzdy  ≈ 0	9 st. obciążenia Rysy Bruzdy  ≈ 0
		10 st. obciążenia Bruzdy Zacieranie  85	10 st. obciążenia Rysy Bruzdy  ≈ 0
	Końcowa temperatura oleju pod najwyższym obciążeniem, °C	138	151
Odporność kół zębatych na pitting	Trwałość zmęczeniowa 50% (LC50), mln cykli	>20,8	>20,8
Odporność kół zębatych na mikropitting	Stopień obciążenia niszczonego	10	9
	Klasa przeciwdziałania mikropittingowi (GFT)	GFT-high (wysoka)	GFT-medium (średnia)
Drgania przekładni	Poziom ogólny drgań – wartość skuteczna amplitudy przyspieszenia drgań w paśmie 20 Hz–20 kHz (średnia z pomiarów w kierunku pionowym i poziomym), m/s ² (drżania mierzone w czasie testów pittingu)	Bieg 3 49±5 Bieg 9 59±6 Bieg 12 64±6	Bieg 3 62±6 Bieg 9 67±7 Bieg 12 69±7

Właściwość	Oznaczany wskaźnik	Arol P 220	Olej handlowy
	jw. (drgania mierzone w czasie testów mikropittingu)	Stopień obciąż. 5 21±2 Stopień obciąż. 7 34±3 Stopień obciąż. 9 46±5	Stopień obciąż. 5 13±1 Stopień obciąż. 7 25±3 Stopień obciąż. 9 42±4
Stabilność termooksydacyjna oleju wykazywana w długotrwałych testach przekładniowych (pittingu)	Względna zmiana lepkości mierzonej w temp. 100°C, %	57	-6,0
	Względna zmiana wskaźnika lepkości, %	-1,5	-4,3
Stabilność termooksydacyjna oleju wykazywana w długotrwałych testach przekładniowych (mikropittingu)	Względna zmiana lepkości mierzonej w temp. 100°C, % (wartość odniesiona do jednego stopnia obciążenia)	5,0	0
	Względna zmiana wskaźnika lepkości, % (wartość odniesiona do jednego stopnia obciążenia)	2,3	-1,4
Stabilność fizykochemiczna oleju wykazywana w czasie długotrwałego magazynowania (3 lata)	Względna zmiana lepkości mierzonej w temp. 100°C, %	8,9	9,0
	Względna zmiana wskaźnika lepkości, %	-19,3	12,0

Na podstawie **Tab. 3** można dokonać poniższej oceny właściwości porównywanych olejów.

Opory tarcia

Olej ekologiczny Arol P 220 pozwala na obniżenie współczynnika tarcia w porównaniu z olejem handlowym z bazą mineralną. Także we wszystkich testach przekładniowych (wyniki pominięte w tym artykule) stwierdzono mniejsze opory ruchu w przypadku smarowania olejem ekologicznym. Ma to niebagatelne znaczenie w aspekcie dążenia do zmniejszania zużycia energii. Uzyskane wyniki korelują z końcową temperaturą oleju stwierdzoną po biegu pod najwyższym obciążeniem w przekładniowych

testach zacierania w zaostzonych warunkach – olej ekologiczny pozwolił na znaczne zmniejszenie temperatury w porównaniu z olejem mineralnym. Na skutek redukcji temperatury oleju możliwe jest zmniejszenie intensywności niekorzystnych przemian termooksydacyjnych w jego objętości.

Właściwości przeciwzatarciowe (EP)

Ocena różnych wskaźników charakteryzujących właściwości przeciwzatarciowe daje niejednoznaczne wyniki. Znormalizowany wskaźnik oceny, tj. obciążenie zacierające (P_t), wskazuje na lepsze właściwości przeciwzatarciowe oleju ekologicznego Arol P 220 niż oleju z bazą mineralną. Z kolei oznaczany według metody własnej graniczny nacisk zatarcia (p_{oz}) daje wyniki korzystniejsze dla oleju mineralnego. Dlatego jako rozstrzygające należy traktować wyniki przekładniowych testów zacierania w zaostzonych warunkach. Dla obu olejów osiągnięto co prawda maksymalny, 10. stopień obciążenia bez stwierdzenia zatarcia. Jednak zauważyć można, że chociaż pod przedostatnim (9.) stopniem obciążenia na powierzchni roboczej zębów małego koła testowego zidentyfikowano identyczne formy zużycia dla obu porównywanych olejów, to już pod ostatnim (10.) stopniem obciążenia pojawiła się znacząca różnica. Mianowicie dla oleju ekologicznego Arol P 220 na części zębów zidentyfikowano ślady zacierania o znacznej powierzchni, podczas gdy olej mineralny dawał co najwyżej bruzdy. Koreluje to ze znacznym spadkiem wskaźnika p_{oz} w czterokulowym węzle tarcia zaobserwowanym dla oleju ekologicznego.

Odporność łożysk tocznych przekładni na pitting

Olej ekologiczny znacząco przyspiesza pojawianie się pittingu elementów tocznych łożysk (kulek). Jest to najsłabsza strona badanego oleju ekologicznego.

Odporność kół zębatych na pitting

Oba porównywane oleje pozwalają uzyskać podobną odporność testowych kół zębatych na pitting. Należy tu dodać, że badania pittingu kół zębatych prowadzi się do osiągnięcia ok. 40 mln cykli zmęczeniowych. Jednak w przypadku pojawienia się na zębach znaczącego mikropittingu, testy należy przerwać, co miało miejsce dla obu olejów. Warto zauważyć, że wyniki testów pittingu kół zębatych nie korelują z wynikami testów pittingu elementów tocznych łożysk (kulek łożyskowych).

Odporność kół zębatych na mikropitting

Ekologiczny olej Arol P 220 pozwala uzyskać wyższą odporność testowych kół zębatych na mikropitting niż olej mineralny.

Drgania przekładni

Wyniki pomiaru drgań przekładni testowej nie są jednoznaczne. Podczas badań pittingu stwierdzono, że w czasie smarowania przekładni olejem ekologicznym poziom drgań był znacząco mniejszy niż dla oleju mineralnego, szczególnie na początku cyklu (bieg 3). Jednak podczas testów mikropittingu sytuacja była odwrotna.

W czasie testów pittingu (smarowanie zanurzeniowe) poziom drgań koreluje z oporami ruchu – olej Arol P 220, który zapewnia zmniejszenie oporów ruchu (np. poprzez lepsze dotarcie powierzchni zęba, grubszy film smarowy, mniejszy współczynnik tarcia), pozwala na zmniejszenie poziomu generowanych drgań w porównaniu z olejem mineralnym. Nie stwierdzono korelacji pomiędzy poziomem drgań a lepkością oleju czy wskaźnikiem lepkości.

Nie zidentyfikowano natomiast przyczyny zwiększonego poziomu drgań przekładni smarowanej olejem ekologicznym w porównaniu z olejem mineralnym w czasie testów mikropittingu (smarowanie natryskowe) – stwierdzono brak korelacji z oporami ruchu, lepkością oleju czy wskaźnikiem lepkości.

Stabilność termooksydacyjna oleju w długotrwałych testach przekładniowych

Zaobserwować można, że w wyniku procesów starzenia nastąpiły znaczące zmiany lepkości oleju ekologicznego Arol P 220. Szczególnie widoczny jest wzrost lepkości w wyniku testów pittingu. Wynika on z obecności w strukturze chemicznej olejów roślinnych wielonienasyconych kwasów tłuszczowych, które wykazują wysoką podatność na działanie tlenu i temperatury w czasie testów.

Stabilność fizykochemiczna oleju w czasie długotrwałego magazynowania

Po upływie 3 lat od daty wytworzenia oleju zaobserwować można, że w czasie magazynowania w wyniku procesów starzenia nastąpiły znaczące, niekorzystne zmiany wskaźnika lepkości oleju ekologicznego – uległ on znaczącemu obniżeniu.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Olej ekologiczny w porównaniu z olejem mineralnym pozwala obniżyć współczynnik tarcia oraz zwiększyć odporność kół zębatych na mikropitting. W warunkach smarowania zanurzeniowego (testy pittingu) olej ekologiczny pozwala na redukcję poziomu drgań w porównaniu z olejem mineralnym, jednak w czasie badań mikropittingu (smarowanie natryskowe) sytuacja jest odwrotna. Znaczącą wadą oleju ekologicznego jest niekorzystna zmiana (spadek) wskaźnika lepkości w czasie długotrwałego magazynowania, gorsza stabilność termooksydacyjna w testach przekładniowych (duży wzrost lepkości) oraz spadek odporności smarowanej powierzchni na zacieranie w warunkach bardzo wysokich nacisków. Najistotniejszą wadą oleju ekologicznego jest jednak znaczne skrócenie czasu do momentu pojawienia się pittingu elementów tocznych łożysk. Wady te, w przypadku braku możliwości ich usunięcia, można częściowo skompensować skróceniem okresu magazynowania i eksploatacji oleju ekologicznego oraz stosowaniem go do smarowania przekładni pracujących w warunkach umiarkowanych obciążeń.

LITERATURA

1. Gawrońska H., Górski W.: Biodegradowalność i ekotoksyczność wybranych rodzajów cieczy eksploatacyjnych. Paliwa, oleje i smary w eksploatacji. 1999, 68, s. 11–14.
2. Haus F., German J., Junter G-A.: Primary biodegradability of mineral base oils in relation to their chemical and physical characteristics. Chemosphere. 2001, 45, s. 983–990.
3. Podniadło A.: Paliwa, oleje i smary w ekologicznej eksploatacji. Wyd. WNT, Warszawa 2002.
4. ISO 14 001. Systemy Zarządzania Środowiskiem – wymagania z wytycznymi ich stosowania.
5. BS 7750. Zarządzanie Systemem Ochrony Środowiska.
6. Bartz W.J.: Lubricants and the environment. Tribology International. 1998, 31, s. 35–47.
7. Battersby N.S.: The biodegradability and microbial toxicity testing of lubricants – some recommendations. Chemosphere. 2000, 41, s. 1011–1027.
8. Haus F., Boissel O., Junter G-A.: Primary and ultimate biodegradabilities of mineral base oils and their relationships with oil viscosity. International Biodeterioration and Biodegradation. 2004, 54, s. 189–192.

9. Battersby N.S., Morgan P.: A note on the use of the CEC L-33A-93 test to predict the potential biodegradation of mineral oil based lubricants in soil. *Chemosphere*. 2007, 35, s. 1773–1779.
10. Ustawa z dn. 27 kwietnia 2001 r., Dz. U. Nr 62, poz. 628.
11. Bartz W.J.: Ecotribology: environmentally acceptable tribological practices. *Tribology International*. 2006, 39, s. 728–733.
12. Keller U. i inni: Neue Schmierstoffe auf der Basis nachwachsender Rohstoffe: Ökotoxikologische und oxidative Eigenschaften. *Ölenhydraulik und Pneumatik*. 2000, nr 4, s. 385–395.
13. Erhan S.Z., Asadauskas S.: Lubricant basestocks from vegetable oils. *Industrial Crops and Products*. 2000, 11, s. 277–282.
14. Pettersson A.: High-performance base fluids for environmentally adapted lubricants. *Tribology International*. 2007, 40, s. 638–645.
15. 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).
16. 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.
17. Szczerek M., Tuszyński W.: *Badania tribologiczne. Zacieranie*. Wyd. ITeE, Radom 2000.
18. Tuszyński W., Wulczyński J.: Nowe metody badania wpływu olejów smarowych na zacieranie, pitting i mikropitting kół zębatych. *Tribologia*. 2007, 3, s. 303–317.
19. Szczerek M., Tuszyński W.: Rozwój metod badania kół zębatych. *Materiały Międzynarodowego Seminarium Naukowo-Technicznego SIMP „Nowoczesne technologie w produkcji i eksploatacji kół i przekładni zębatych”*, Warszawa 2009.

Pracę badawczą sfinansowano z następujących źródeł:

- projektu badawczego (grantu) nr 4 T09B 068 23,
- projektu badawczego (grantu) nr 3 T09B 074 28,
- działalności statutowej ITeE – PIB w latach 2006–2007.

Recenzent:
Stanisław NOSAL

Summary

At ITeE – PIB in Radom, an ecological industrial gear oil, denoted as Arol P220, has been formulated. The oil is based on the mixture of rapeseed and castor oils, and is a substitute for a VG 220 commercial gear oil with a mineral base. Arol P220 fulfils the most important requirements of the domestic standard PN-C-96056:1990 concerning the physico-chemical characteristic and tribological performance.

However, greater and greater attention is being put on other properties not included in the mentioned standard. They are friction, resistance of gears to scuffing under severe conditions, resistance of gears to pitting and micropitting, fatigue life of rolling elements of bearings, gear vibrations, thermo-oxidative stability of the oil after long-lasting gear experiments, and physico-chemical oil stability during a long-lasting storage. This is why a number of additional tests were performed – four-ball tests (pure sliding and rolling contacts), gear tests and physico-chemical analyses. The ecological oil and its commercial, mineral equivalent were compared. Standardised and the author's test methods were carried out, not included in the PN-C-96056:1990 standard. The results show that Arol P220 reduces friction and improves the resistance of gears to micropitting compared with the mineral oil. Under conditions of dip lubrication (the gear pitting tests), the ecological oil reduces the level of vibrations in comparison with the mineral oil, but during the gear micropitting tests (spray lubrication) a reverse trend is observed. However, there are significant drawbacks to the ecological oil. They are the unfavourable change (drop) in the viscosity index during long-lasting storage, worse thermo-oxidative stability (much viscosity rise) after the gear experiments, and a drop in the resistance of gears to scuffing under very large loads. The worst drawback is a significant acceleration of pitting of bearing balls. When removal of these drawbacks appears impossible, they can be partly compensated by a shorter time of storage and exploitation of the ecological oil and using it for lubrication of gears working under moderate conditions.