



## Badanie procesów starzenia olejów eksploatowanych w łożyskach porowatych

TADEUSZ KAŁDOŃSKI, ARTUR KRÓL

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Mechanicznych  
i Transportu, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** W pracy scharakteryzowano proces starzenia środków smarowych w kontekście ich zastosowania do łożysk porowatych. Przeprowadzono analizę literatury w zakresie badania procesów starzenia środków smarowych i przedstawiono wyniki badań własnych wskazujące na dość intensywny charakter procesu starzenia olejów w łożyskach porowatych.

**Słowa kluczowe:** łożysko porowate, środek smarny, starzenie

**Symbol UKD:** 621.89

### 1. Wstęp

Porowate łożyska ślizgowe stanowią uzupełnienie szerokiej gamy łożysk ślizgowych i są stosowane, ze względu na swoje szczególne cechy, w węzłach tribologicznych o utrudnionym smarowaniu, przy małych prędkościach ślizgania, o zmiennym kierunku obrotów, przy ruchu start-stop, o ukośnym położeniu wału. Niski koszt produkcji i łatwość kształtowania wymiarów, a także ciągły rozwój konstrukcji, materiałów stosowanych do ich spiekania oraz środków smarnych powodują, że zastosowanie łożysk porowatych jest coraz bardziej powszechne.

Parametry pracy finalnie skonstruowanego łożyska determinują właściwości indywidualne i zespołowe wszystkich elementów wchodzących w skład takiego podstawowego systemu tribologicznego, tj. porowata tuleja-walek-środek smarowy. W tym względzie bardzo duże znaczenie mają odpowiednio dobrane środki smarowe determinujące zakres zastosowania, nośność łożyska, a także jego trwałość. Utrata zdolności smarowniczych tulei porowatej może być spowodowana: przekroczeniem

granicznych warunków pracy (temperatura, prędkość, obciążenie); nadmierną utratą środka smarnego (spowodowaną odparowaniem lub wyciekami); zestarzeniem się środka smarnego w warunkach bardzo rozwiniętej porowatej powierzchni; zwiększoną ilością zanieczyszczeń stałych w porowatej strukturze i w szczelinie smarnej łożyska. Jednakże autorzy wielu pozycji na ten temat [1-13] za główną przyczynę uważają degradację środka smarnego w wyniku procesu starzenia. Proces ten, w przeciwieństwie do łożysk konwencjonalnych, może być szczególnie nasilony ze względu na to, że ilość środka smarnego zapewniającego proces samosmarowania jest ograniczona objętością porów tulei i ewentualnie zastosowanych zbiorniczków zasilających [2], co utrudnia lub wręcz uniemożliwia wymianę oleju na świeży. Ponadto niższy współczynnik przewodzenia ciepła łożyska ślizgowego z tuleją porowatą od łożyska konwencjonalnego pogarsza wymianę cieplną. Dyfundujący w głąb tulei tlen oraz jej metalowa porowata struktura, oddziałująca katalitycznie, przyspieszają utlenianie oleju i zmianę jego właściwości.

W trakcie procesu starzenia w oleju pojawiają się produkty aktywne powierzchniowo, które z jednej strony poprawiają jego właściwości smarowości, ale z drugiej łatwo tworzą warstwy graniczne wewnątrz porowatych kanałów, zmniejszając znacząco ich średnicę i utrudniając wypływ oleju. Zwraca na to uwagę niewielu autorów [2-4, 10, 11] i kilku producentów (Klüber Lubrication [12, 13], GKN Sinter Metals [14]), wskazując jednocześnie, że to właśnie zjawisko jest prawdopodobną przyczyną utraty zdolności samosmarowania przez łożysko porowate.

## **2. Przegląd literatury w zakresie badania procesów starzenia środków smarowych eksploatowanych w łożyskach porowatych**

Badania określające wpływ produktów starzenia na parametry pracy łożysk porowatych mają duże znaczenie, a wyniki już przeprowadzonych badań wskazują na konieczność poznania tego obszaru wiedzy. Istniejące rozbieżności, co do pozytywnego czy negatywnego oddziaływania produktów starzenia olejów i smarów, nie wynikają z błędów i różnic w programach badawczych, ale z fizykochemii procesów starzenia i powstających produktów starzenia. Dlatego też odpowiednie właściwości środków smarnych (np.: odporność na utlenianie, stabilność termooksydacyjna, działanie korodujące, liczba zasadowa, liczba kwasowa) będą decydować o prawidłowej pracy łożyska. Analiza wpływu tych właściwości oleju smarnego na charakterystyki tribologiczne porowatych łożysk ślizgowych jest tematem nielicznych prac [1, 15]. Wielu autorów [4-14, 16, 18-21] wymienia wśród niezbędnych właściwości oleju do porowatych łożysk ślizgowych ogólnie rozumianą odporność na utlenianie. Jednak autorzy nie podają, jakimi metodami należy tę odporność określać. Ponadto brak jest kompleksowych wyników badań nośności i trwałości

łożysk porowatych w zależności od poziomu odporności oleju na utlenianie, jego działania korodującego, wartości liczby kwasowej i zasadowej. Wyniki nielicznych badań [1, 15] wskazują na konieczność uwzględniania powyższych właściwości w procesie doboru olejów do łożysk porowatych.

## 2.1. Działanie produktów utleniania w warunkach tarcia

Ogólnie w procesie starzenia reakcje tlenu z powietrza z olejem prowadzą do powstania produktów o charakterze kwaśnym (wynik łączenia się tlenu z cząsteczkami węglowodorów) lub asfaltowo-żywicznym (procesy odwodornienia pod wpływem tlenu i następnie kondensacji) [23-30]. Produkty starzenia mają dobre właściwości smarne, ale jedna grupa produktów starzenia wpływa w odmienny sposób na pracę łożysk, prowadząc do korozji, intensywnego zużycia, rozwoju mikropełnięć, a druga zwiększa zdolność konserwacji i nie wywołuje takich niepożądanych zjawisk.

Przede wszystkim jest rozpowszechniany mylny pogląd [4, 30], że przyczyną zatarcia łożysk jest utrata właściwości smarnościowych w wyniku zestarzenia. Badania właściwości smarnościowych produktów starzenia substancji ropopochodnych wskazują, że nie ma zgodności co do ich pozytywnego lub negatywnego oddziaływania. Badania wpływu składu chemicznego środków smarowych na charakterystyki tribologiczne węzłów ślizgowych były już prowadzone przez Kosteckiego i Winogradowa [15, 31], a ich obszerny przegląd, uzupełniony wynikami własnych badań, podał Zozulia [1].

Zgodnie ze współczesnymi poglądami zjawisko smarujących zdolności mineralnych produktów naftowych zawiera się w tym, że zabezpieczają one przed tlenem powierzchnie tarcia, tworząc przypowierzchniowe wielocząsteczkowe quasi-sprężyste warstwy przy występowaniu w oleju polarno-aktywnych komponentów, ułatwiając plastyczne płynięcie tych cienkich warstw. Kostecki i Winogradow [15, 31] dowodzą, że zdolność smarowania olejów bez dodatków istotnie zależy od koncentracji w nich tlenu, aktywnych (zawierających w swoim składzie tlen) związków i od warunków aktywności tlenu w strefie tarcia.

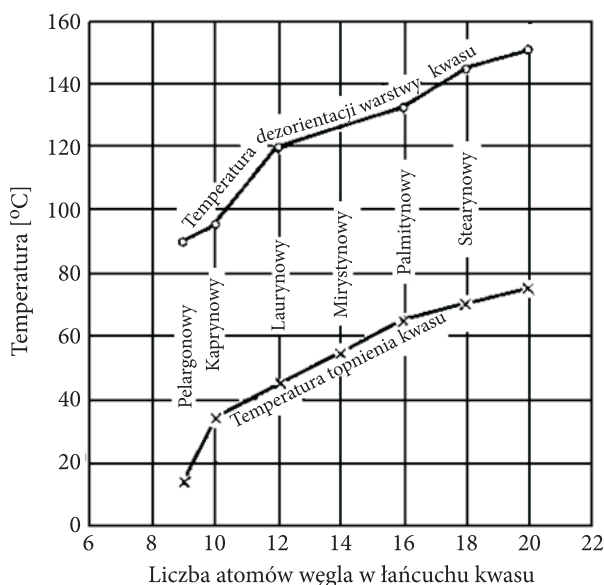
Bez tego oleje smarujące okazują się nieefektywne — zwiększa się współczynnik tarcia, ułatwia powstawanie zacierania. Intensyfikacja procesów utleniania olejów zwiększa dopuszczalne obciążenia i szybkości ślizgania, przerywa procesy zacierania, ale jest też przyczyną szybszego procesu starzenia oleju. Ciągły wzrost zawartości produktów utleniania powoduje zwiększenie skłonności olejów do lakowania i nagarowania [24, 26].

Większość badaczy wyjaśnia pożyteczność produktów starzenia olejów mineralnych ich polarną budową. Adsorbując na powierzchniach tarcia i tworząc quasi-sprężyste wielocząsteczkowe warstwy polarne, cząstki skutecznie rozdzielają elementy węzła tarcowego i nie dopuszczają do metalicznego kontaktu. Taki punkt widzenia reprezentują Fuks i Achmatow [za 1], którzy uważają, że dla polepszenia smarności

olejów nie należy usuwać z nich kwasów, estrów i innych produktów utleniania. Według Bowdena i Tabora [za 26, 28] w warunkach tarcia zachodzi chemisorpcja kwasów na powierzchni zakończona powstaniem mydeł. Warstewką ochronną jest zatem warstewka mydła kwasu tłuszczowego, którego temperatura mięknienia jest znacznie wyższa niż temperatura topnienia kwasu tłuszczowego (rys. 1). Film utworzony z mydeł charakteryzuje się silnym związaniem z powierzchnią tarcia. Bowden i Tabor [za 26, 28] stwierdzili, że podwyższanie temperatury powoduje mięknienie mydeł i zmniejszenie siły, z jaką cząsteczki związane są z powierzchnią i następuje przerwanie filmu.

Kajdas [32] zaprezentował anionorodnikowy mechanizm działania kwasów tłuszczowych w warunkach tarcia oparty na procesie jonizacji kwasów pod wpływem działania elektronów niskiej energii. Jahanamir [za 28] wyróżnia dwa rodzaje temperatury krytycznej związanej ze zjawiskiem „stick-slip”. W pierwszej pojawia się zjawisko „stick-slip” i związane jest to z dezorientacją warstwy utworzonej na powierzchni metalu, a w drugiej następuje gwałtowny wzrost współczynnika tarcia wynikający z desorpcji cząsteczek. Ponadto pozytywne oddziaływanie kwasów jest obserwowane do pewnej optymalnej wartości stężenia, powyżej którego następuje pogorszenie właściwości przeciwzużyciowych olejów [26] (rys. 1).

Jednocześnie wielu autorów [22-26, 29] zauważa, że obecność kwasów może prowadzić do intensyfikacji oddziaływań korozyjnych. Zatem pozytywny wpływ kwasów nie jest tak oczywisty. Obecność korozyjnie agresywnych produktów utle-



Rys. 1. Temperatury dezorientacji warstw kwasów tłuszczowych i topnienia kwasu [26]

niania olejów w strefie tarcia nadaje mechanizmowi zużywania powierzchniowych warstw materiału korozyjno-mechaniczny charakter niszczenia. Istnienie szczątkowych naprężeń i plastycznych deformacji intensyfikuje korozyjno-mechaniczne zużywanie. W pracy Karpenko [za 1] omówiono wpływ aktywowanych kwasami tłuszczowymi olejów na granicę zmęczenia stali. Olej mineralny nieaktywowany nieznacznie zmniejszał granicę zmęczenia (od 3 do 8%), olej roślinny obniżył granicę zmęczenia o 16%. Aktywowanie kwasami tłuszczowymi obniżyło ją o 20%. Znamienne, że olej przepracowany MS obniżył granicę zmęczenia mniej niż świeży.

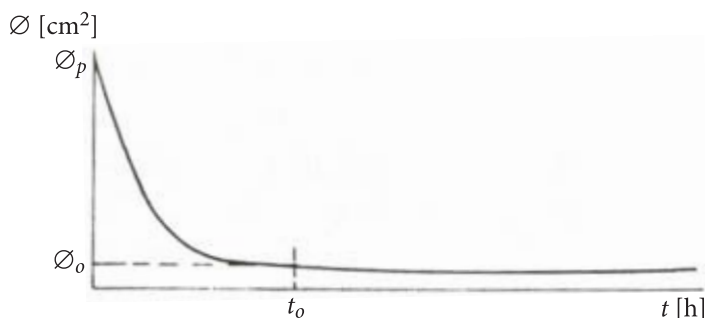
Podwyższoną smarność oleju próbuje się wyjaśnić zwiększoną w nim zawartością substancji powierzchniowo-aktywnych. Zauważa się, że nie ma wspólnego zdania, czy szczególne własności cienkich warstw tych substancji (duża wytrzymałość na obciążenia, wysoka trwałość, podwyższona lepkość przylegających warstw itd.) są rezultatem fizycznych, czy chemicznych procesów z powierzchniami metali. Związek powierzchniowo-aktywnych substancji z powierzchnią metalu wielu badaczy wyjaśnia elektrostatycznym współdziałaniem ładunków cząstek oleju i atomów powierzchni tarcia, a także pojawieniem się sił van der Waalsa. Przyczyny szczególnych właściwości przypowierzchniowej warstwy należy według [1, 22-26] szukać w międzymolekularnej współpracy, która zależy od momentu dipolowego i polaryzacji. Każda cząstka powierzchniowo-aktywnych substancji jest neutralna w całości — środki ciężkości dodatnich i ujemnych ładunków znajdują się na przeciwnych końcach cząstek. Dipole powierzchniowo-aktywnych substancji mogą obracać się względem siebie różnoimiennymi ładunkami, albo w „ogonek”, albo nierównolegle. Do zneutralizowania pola siłowego powierzchni metali, konieczne jest przyłączenie nie jednej, ale kilku warstw cząstek powierzchniowo-aktywnych substancji, ustawionych w ogonek jedna za drugą. Tym tłumaczy się wielocząsteczkowość przylegających warstw granicznych.

Energia potencjalna cząstki-dipola w elektrostatycznym polu innych cząstek zależy nie tylko od wielkości momentu, lecz także od geometrycznych rozmiarów cząstki. Tym tłumaczy się m.in. podwyższoną zdolność smarowania (smarność) produktów utleniania olejów mineralnych o wysokiej lepkości w porównaniu z produktami utleniania produktów naftowych o niskiej lepkości, których rozmiar cząstek jest mniejszy [1, 19, 26, 27]. Zatem produktami utleniania, najslabiej chroniącymi powierzchnię tarcia przed zużyciem, wydają się być małowcząsteczkowe kwasy hydroksykarboksylowe, a także wielocząsteczkowe kwasy, wykazujące w środowisku wody korozyjną agresywność.

Ostateczne produkty tlenowej polimeryzacji (żywice, asfalteny), a także pierwotne produkty utleniania (alkohole, aldehydy, ketony) są obojętnymi substancjami. Za pożądane substancje można uznać te, które w procesie tarcia dają obojętne, żywiczne produkty, które pozwalają na uniknięcie możliwości tworzenia kwasów organicznych, zwiększających w określonych warunkach zużywanie trącej pary. Polarność tychże żywicznych produktów nie ustępuje polarności wymienionych

wcześniej wielocząsteczkowych kwasów, a pod względem nośności i wytrzymałości termicznej substancje te znacznie przewyższają kwasy.

W świetle badań zaprezentowanych przez Olexę [3] powyższe wnioski mogą mieć niebagatelne znaczenie. Wykazał on bowiem, że oleje o dużej aktywności powierzchniowej mogą spowodować drastyczne obniżenie przepuszczalności łożyska porowatego, pogarszając znacząco warunki jego pracy. Olexa [3] analizował przepuszczalność łożysk porowatych używając trzech rodzajów oleju (zwykły z dodatkiem EP, olej przekładniowy zawierający dodatek EP, głębokorafinowany mineralny olej turbinowy z inhibitorami utleniania i korozji) i różnych materiałów łożysk w odniesieniu do trwałości. Stwierdził, że zmniejszenie przepuszczalności łożysk następowało w wyniku zatykania porów, które spowodowane było powstawaniem granicznej warstwy środka smarnego wewnątrz porów, co prowadziło do zmniejszenia ich średnicy, a w efekcie obniżenia przepuszczalności (rys. 2). Również Kałdoński [33] wskazywał na to zjawisko.

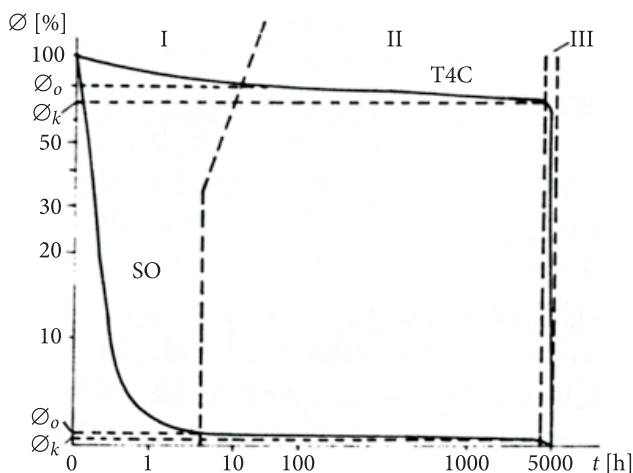


Rys. 2. Zmiana przepuszczalności  $\varnothing$  łożyska porowatego spowodowana zatykaniem (utrata drożności w wyniku tworzenia zbyt grubej warstwy granicznej środka smarnego);  $t_o$  — czas niezbędny do ustabilizowania się przepuszczalności do wartości  $\varnothing_o$  [3]

Czas spadku przepuszczalności różnił się w zależności od rodzaju zastosowanego oleju i zależał od szybkości tworzenia warstw granicznych w porach. Dla oleju SO (rys. 3) spadek przepuszczalności zakończył się prawie całkowitym zablokowaniem porów. Olexa wykazał zatem silną zależność trwałości od przepuszczalności i zastosowanego oleju (rys. 3).

Według tego autora można przepuszczalność określić jako funkcję zmiany jej wartości wywołanej zatykaniem por **produktami zużycia** porowatej panwi  $\varnothing_1$ , **produktami starzenia oleju**  $\varnothing_2$  oraz utratą drożności porów w wyniku **tworzenia** zbyt grubej **warstwy granicznej oleju smarnego** wewnątrz porów  $\varnothing_3$ , co można zapisać następującym wzorem:

$$\varnothing(t) = \varnothing_1(t) + \varnothing_2(t) + \varnothing_3(t). \quad (1)$$



Rys. 3. Zmiana przepuszczalności  $\varnothing(t)$  w funkcji trwałości łożyska; przepuszczalność wyrażona jako procent przepuszczalności początkowej  $\varnothing_p$  [3]

Oznacza to, że przepuszczalność zmienia się nie tylko wskutek kalibrowania łożyska i jego docierania, ale także w zależności od rodzaju środka smarnego. Jak wskazują wyniki badań Olexy [3], znaczący wpływ na to ma środek smarny i jego właściwości. Słaba odporność na utlenianie i niewłaściwy skład oleju może być przyczyną niewłaściwego funkcjonowania łożyska. Nie ma wyników badań ustalających brzegowe i krytyczne wartości zmian przepuszczalności, jakie mogą wystąpić, aby zachodził jeszcze proces samosmarowania. Dlatego nakładanie się efektu zmiany przepuszczalności panwi porowatej w wyniku docierania i kalibrowania oraz wpływu środka smarnego, w tym produktów starzenia, może doprowadzić do drastycznego zmniejszenia ilości środka smarnego w szczelinie smarnej, zmiany rodzaju występującego tarcia na mieszane, graniczne lub suche i w efekcie do zatarcia łożyska. Poznanie tych zależności, jak wskazuje kilku autorów badań [3, 34, 35], jest utrudnione ze względu na bezobstługowy charakter pracy łożysk i nakładanie się efektów działania różnych czynników. Jednak zbadanie tych mechanizmów jest możliwe metodami pośrednimi. Takie rozwiązanie proponuje Olexa [3] — poprzez pomiar przepuszczalności na badanym łożysku stosowanym do nasycania olejem smarnym. Z kolei Kalpakci i Klaus [36] badanie procesu tworzenia się przyściennej warstwy w porowatej matrycy realizowali w specjalnym wiskozymetrze, który w swojej konstrukcji zawierał porowatą celę, przez którą przepływał olej.

Zatem podsumowując, można stwierdzić, że produkty utleniania powstające w eksploatacji łożysk porowatych mogą negatywnie wpływać na trwałość i parametry pracy łożyska porowatego niezależnie od tego, czy są to kwasy organiczne (niższa trwałość filmu, korozyjno-mechaniczne zużywanie powierzchniowych warstw

materiału, obniżanie granicy zmęczenia powierzchni metali, duża polarność), czy też obojętne produkty utleniania (duża lepkość, gęstość, polarność).

Natomiast w innych badaniach wskazuje się na możliwe anomalie w zachowaniu się substancji powierzchniowo-aktywnych. Zjawisko to jest wyjaśniane przez Nobuo Ohmae, Shigeyuki Mori, Jeana Michela Martina [37]. Zauważyli oni, że następuje odwrócenie tendencji do adsorpcji związków aktywnych powierzchniowo. Wyjaśniają to, zwracając uwagę, że powierzchnie metali są ogólnie pokryte swoimi tlenkami. Chemiczna struktura tlenków jest odmienna od struktury metalu pozbawionego tlenków. Związki mające polarne grupy funkcjonalne, np. grupy karboksylowe, łatwo chemisorbują się na powierzchni metali pokrytej tlenkami, które również są polarne. Jednakże powierzchnie metali pozbawione tlenków są nieaktywne na chemisorpcję związków polarnych. Na takich powierzchniach najłatwiej chemisorbują się związki niepolarne, które mają ruchome elektrony  $\pi$  i wolną parę elektronów. Jako dowód przedstawili wyniki badań (tab. 1), z których wynika, że kwasy karboksylowe o największej aktywności powierzchniowej najsłabiej chemisorbowały się na powierzchni stali [37].

TABELA 1

Chemisorpcja gazów organicznych na czystej powierzchni stalowej pozbawionej tlenków [37]

Lp.	Rodzaj związku	Aktywność adsorpcyjna [AU]
1	<i>n</i> -heksan	0,14
2	cykloheksan	0,00
3	1-heksen	0,14
4	benzen	0,54
5	dwusiarczek dwuetylu	0,23
6	propionian metylu	0,12
7	kwasy propionowy	0,01
8	propyloamina	0,01

Jednocześnie specjaliści z firmy Nye [38] zwracają również uwagę na opisane powyżej anomalie i konieczność uwzględnienia odporności na katalityczne oddziaływanie powierzchni metali pozbawionych swoich tlenków. W obciążonych łożyskach i przekładniach, szczególnie przy małych prędkościach ślizgania, zaobserwowano zjawisko degradacji olejów PFPE pod wpływem katalitycznego oddziaływania czystej powierzchni metali pozbawionej tlenków metali w wyniku tarcia. W wyniku reakcji powstaje osad o półstałej konsystencji (określono go jako podobny do stopionego brązowego cukru) działający ściernie na powierzchnię metalowych

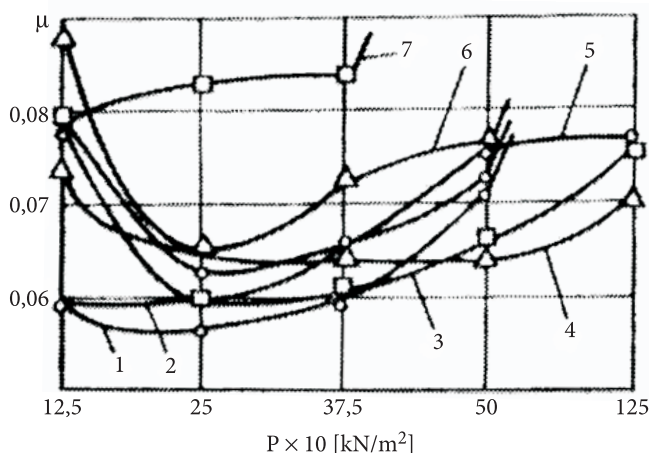


elementów współpracujących. Jednocześnie zaobserwowano, że różne typy PFPE mają odmienną odporność na katalityczne oddziaływanie czystej powierzchni metalu [38]. PFPE typu Z mają mniejszą odporność na takie zjawisko niż oleje typu D, co potwierdzano w testach na aparacie czterokulowym (75°C, czas 1 h, 1200 obr/min, obciążenie 40 kg, oleje D i Z o tej samej lepkości), średnica śladu zużycia była większa dla oleju typu Z i wyniosła 1,22 mm w porównaniu z wynikiem dla oleju typu Z — 0,39 mm [38].

## 2.2. Badania łożysk porowatych w aspekcie procesu starzenia środków smarnych

Wyniki badań procesów starzenia dotyczących porowatych łożysk ślizgowych są rzadko prezentowane.

Zozulia w swojej pracy [1] przedstawia wyniki badań takich łożysk nasączonych olejami oczyszczonymi i zawierającymi produkty utleniania. Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi wartości współczynników tarcia w zależności od obciążenia i rodzaju zastosowanych olejów. Takie oleje, jak pozostałościowe MK-22, nieoczyszczone samochodowo-ciągnikowe transmisyjne (Nigrol), cechowały się niższymi współczynnikami tarcia w porównaniu z dobrze oczyszczonym olejem maszynowym SU. Dowodzi to, że nie mając w swoim składzie produktów zawierających tlen, oczyszczone oleje w pierwszym okresie nie mogą chronić powierzchni tarcia wytrzymałą, odpowiednio grubą warstwą. W rezultacie powierzchnie tarcia przy



Rys. 4. Zależność współczynników tarcia od obciążeń i rodzaju olejów zawartych w porowatej strukturze łożyska: 1 — parafina; 2 — olej pozostałościowy MK-22; 3 — olej № 1; 4 — Nigrol; 5 — olej osiowy (wagonowy); 6 — olej maszynowy SU; 7 — olej silikonowy [1]

smarowaniu oczyszczonymi olejami częściej stykają się bezpośrednio. Oczywiście wzbogacanie oczyszczonych olejów w produkty starzenia w procesie zużywania jest intensywniejsze niż nieoczyszczonych posiadających takie antyutleniacze, jak produkty tlenowej polimeryzacji ropy naftowej.

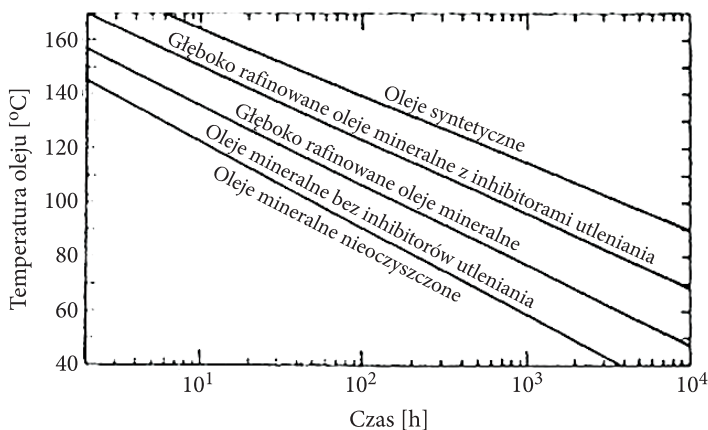
Zozulia ostatecznie stwierdza [1], że jeśli olej nie ma w swoim składzie produktów zawierających tlen lub jeżeli nie powstają one w nim w wyniku procesów tarcia, to zarówno początkowe jak i końcowe współczynniki tarcia będą wysokie. Na potwierdzenie tej hipotezy podaje przykład oleju silikonowego (7 na rysunku 4). Najmniejsze wartości współczynnika tarcia zaobserwowano dla tulei porowatych nasączonych parafiną, co autor słusznie wyjaśnił podwyższoną skłonnością parafiny do utleniania, z wytwarzaniem całego rzędu produktów, w tym wielkocząsteczkowych kwasów, będących dobrymi dodatkami podwyższającymi smarność.

Jednakże same wnioski co do oleju syntetycznego i określonego zakresu jego pracy mogą być słuszne, jeżeli była to jedynie czysta baza bez pakietu dodatków, w tym poprawiających smarność oleju, a lepkość, wskaźnik lepkości, przebieg zmiany temperatury były takie same jak pozostałych badanych olejów. W świetle wyników podanych w innych publikacjach [3, 35, 39, 40] prawdopodobną przyczyną zróżnicowanych wartości współczynnika tarcia mogła być różna przepuszczalność badanych łożysk, wynikająca z różnej aktywności powierzchniowej i składu badanych olejów. Zwraca na to uwagę również Klüber Lubrication [12, 13] wskazując, że powstające produkty utleniania w procesie starzenia mogą prowadzić do zaburzenia cyrkulacji i przepływu oleju w porowatej strukturze.

Ponadto dane prezentowane przez Klüber Lubrication [12, 13] i GKN Sinter Metals [14] wskazują, że spośród baz syntetycznych oleje silikonowe charakteryzują się jednymi z najgorszych właściwości smarnościowych. Dlatego też wprowadza się bazy silikonowe z wbudowanym fluorem (fluorosilikony) i chlorem (chlorometrylosilikony), dzięki czemu uzyskuje się poprawę właściwości smarnościowych. Zatem olej syntetyczny z odpowiednim pakietem dodatków mógłby pracować przy niższych współczynnikach tarcia oraz pozwoliłby prawdopodobnie osiągnąć znacznie większą trwałość porowatego łożyska.

Z kolei Morgan [41] zauważa, że niebagatelne znaczenie przy konstruowaniu łożyska porowatego ma rodzaj zastosowanego oleju i jego odporność na utlenianie, która wpływa na czas pracy oleju w łożysku. Autor wskazuje, że oleje syntetyczne mają największą odporność na utlenianie i pozwalają na zwiększenie trwałości łożysk, i prezentuje wykres możliwej temperatury pracy oleju w funkcji czasu pracy dla różnych rodzajów olejów (oprócz olejów syntetycznych wymienia kolejno głęboko rafinowane oleje mineralne z inhibitorami utleniania i bez inhibitorów utleniania, zwykłe oleje bez dodatku antyutleniającego i oleje nieoczyszczone) (rys. 5).

Klüber [12, 13], podobnie jak GKN [14], szczególnie uwagę zwraca na znaczenie temperatury pracy węzła tarcia. Producenci rekomendują do zastosowań o szerokim zakresie temperatury pracy oleje silikonowe o dużej wartości wskaźnika



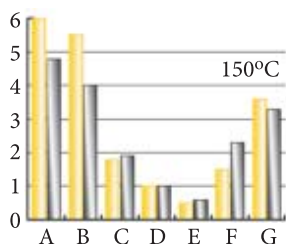
Rys. 5. Względna odporność na utlenianie różnych olejów jako funkcja czasu i temperatury pracy łożysk porowatych [41]

lepkości, czyli o dużej stabilności lepkości wraz ze zmianą temperatury. Do łożysk porowatych pracujących w węzłach tarcia w temperaturze powyżej 150°C Klüber proponuje oleje oparte na perfluoropolietarach (PFPE) ze względu na ich dużą odporność na utlenianie. Oleje bazowe polialfaolefinowe (PAO) i estrowe zalecane są do średnich warunków pracy ze względu na lepszą odporność na utlenianie i lepsze charakterystyki reologiczne niż oleje mineralne, a także ze względu na dobrą mieszalność z bazami mineralnymi.

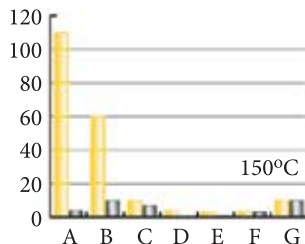
Klüber w swoich założeniach [13] zwraca jednocześnie uwagę na konieczność uwzględnienia w procesie doboru interakcji pomiędzy materiałem łożyska i zastosowanym środkiem smarnym. Proponuje to badać przez umieszczenie odpowiedniej ilości środka smarnego i spiekane odsączonego łożyska w naczyniu Petriego. Test prowadzi się w temperaturze 130°C przez 336 godzin (14 dni), ale zarówno temperaturę badania jak i czas jego trwania można dostosować do przewidywanych warunków pracy. Po przeprowadzeniu testu należy ocenić straty oleju w wyniku odparowania, wzrost liczby kwasowej i zmianę lepkości. Producent słusznie zaznacza, że w wyniku procesu starzenia pojawiają się kwaśne produkty, a sam proces może być silnie katalizowany materiałem tulei. W następstwie tworzą się bardziej skondensowane produkty utleniania, które utrudniają i zakłócają cyrkulację oleju w porowatej strukturze łożyska. Ponadto wzrostowi liczby kwasowej normalnie towarzyszy wzrost lepkości, w wyniku czego wzrastają opory tarcia i temperatura pracy łożyska. Według danych Klübera dla środków smarnych stosowanych do łożysk porowatych dopuszczalny jest maksymalnie wzrost liczby kwasowej o dwie jednostki.

Przykładowe wyniki badań po teście odporności na starzenie (130°C, 336 h, w kontakcie i bez z łożyskiem z proszków żelaza; dla oleju G test w 150°C) wskazują,

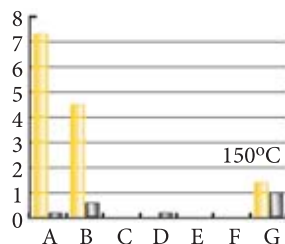
że oleje syntetyczne, w tym głównie poliaflaolefiny, estry i perfluoropolietyry (PFPE) charakteryzowały się najmniejszymi zmianami badanych właściwości (rys. 6).



Rys. 6a. Straty oleju w wyniku odparowywania po teście odporności na starzenie [13]



Rys. 6b. Wzrost lepkości po teście odporności na starzenie [13]



Rys. 6c. Wzrost liczby kwasowej po teście odporności na starzenie [13].

Kolor ciemny — olej starzony bez kontaktu z materiałem łożyska, kolor jasny — olej starzony w kontakcie z materiałem łożyska. Zastosowane oleje: A — olej turbinowy, B — olej mineralny (CONSTANT LS 50), C — olej PAO (CONSTANT OY 100), D — poliglikol (SYNTHEO HT 100), E — olej silikonowy (UNISILICON TK 05/100), F — olej PFPE (BARRIERTA 1 EL FLUID), G — olej estrowy (KLÜBERSYNTH DB 2-100)

Proces starzenia środka smarowego oprócz powstawania produktów utleniania prowadzi do degradacji i zużycia dodatków zawartych w substancji smarowej. Zużywanie dodatków zachodzi zarówno w wyniku procesu utleniania, jak i w wyniku ich zużycia mechanicznego (ściananie). Dlatego nowa kompozycja musi składać się nie tylko z bazy o dużej odporności na proces starzenia, ale również z odpowiednio dobranych dodatków, tak aby zapewnić odpowiednią trwałość całego łożyska.

Badania środków smarowych w takim ujęciu prowadzone są bardzo rzadko, a problem ten był raczej pomijany. Przykładem nowego spojrzenia na tę tematykę jest wspólny projekt dwóch producentów, tj. Klüber Lubrication i GKN Sinter Metals oraz Zachodniosaksońskiej Wyższej Szkoły w Zwickau, którzy przeprowadzili badania [42]. Łożyska nasączone były środkami smarowymi produkowanymi przez Klüber Lubrication CONSTANT OY 68 (olej PAO o lepkości kinematycznej  $68 \text{ mm}^2/\text{s}$  w  $40^\circ\text{C}$ ), Klübersynth DB 2-68 (olej estrowy o lepkości kinematycznej  $68 \text{ mm}^2/\text{s}$  w  $40^\circ\text{C}$ ), Klüberalfa DH 3-100 (oleje PFPE o lepkości kinematycznej  $100 \text{ mm}^2/\text{s}$  w  $40^\circ\text{C}$ ) i smar plastyczny CONSTANT GLY 2100 (na bazie PAO i mydła litowego). Badano charakterystyki brązowych łożysk baryłkowych (o średnicy wewnętrznej 8 mm i długości 16 mm) w testach trwałościowych 1000-godzinnych, przy parametrze  $p\nu = 1,26$  i  $2,52 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$  (3000 obr/min, obciążenie 1 i 2 MPa). Parametry testów zostały dobrane według warunków pracy łożysk porowatych w różnych urządzeniach. Jak zauważyli autorzy, w normalnej temperaturze pracy wymagania te mogły być spełnione przez wszystkie łożyska i substancje smarowe. Dlatego po

pierwsze postanowiono podwyższyć temperaturę pracy do 120°C, co jednakże nie spowodowało skrócenia czasu trwania 1000-godzinnych testów dla wszystkich łożysk i zróżnicowania wyników, ze względu na środek smarowy [42]. Jednakże w celu przyspieszenia testów i zróżnicowania wyników badań ze względu na zastosowany rodzaj środka smarowego, zwiększono prędkość obrotową do 4000 i 6000 obr/min, a obciążenie do 4 MPa (parametr  $p \cdot v = 13 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$ ). Wystąpiły znaczące różnice w czasie trwania testu od 10 do nawet kilkuset godzin. Po zakończonych testach łożyska i wałki poddano analizie w celu określenia przyczyn zatarcia łożysk. Stwierdzono częściowe zużycie dodatków zawartych w środkach smarowych, ponadto utlenianie olejów i nawet w niektórych przypadkach ich zwęglanie. Prowadziło to do zużycia i w efekcie zatarcia przeciążonych łożysk. Ostatecznie na dowód swoich obserwacji autorzy przedstawili przykładowe widmo smaru plastycznego zawartego w łożysku po teście w porównaniu z widmem świeżego smaru i stwierdzili całkowite zużycie dodatku antyutleniającego oraz zniszczenie mydła litowego zawartego w smarze. Również na powierzchni wałka po współpracy ze smarem wykryto produkty rozkładu smaru, w tym głównie inhibitory korozji [42].

Wyniki tych badań są dodatkowo znaczące, ponieważ prezentują po raz pierwszy badania procesów starzenia smarów plastycznych przy zastosowaniach do łożysk porowatych.

### **2.3. Podsumowanie przeglądu literatury w aspekcie procesów starzenia środków smarnych stosowanych do łożysk porowatych**

Podsumowując, należy stwierdzić, że badania procesów starzenia olejów stosowanych w łożyskach porowatych były bardzo rzadko prezentowane. Jednocześnie w badaniach tych stosowano z reguły różne gatunki olejów niskiej jakości, dziś już nieprodukowanych, co nie pozwala na ich zweryfikowanie. Ponadto badania procesu starzenia środków smarnych w porowatych łożyskach ślizgowych są utrudnione ze względu na ich bezobsługowy charakter, małą ilość środka smarowego i często brak możliwości określenia przyczyny zatarcia łożyska. Pojawiają się pierwsze wyniki takich badań, dostarczając nowych informacji na temat zastosowanego środka smarowego. Jednak ciągle istnieje konieczność wyznaczenia wielkości charakteryzujących odporność oleju (smaru) na proces starzenia i ich powiązania z trwałością łożysk, zmianą nośności w trakcie pracy, współczynnikiem tarcia i generowaną temperaturą.

Zatem zastosowanie nawet najbardziej zaawansowanych środków smarowych wymaga przeprowadzenia procesu doboru i uwzględnienia odpowiednich właściwości.

Zauważa się jednocześnie, że coraz więcej autorów widzi szansę poprawy konstrukcji i działania łożysk porowatych przez stosowanie środków smarnych o lepszych właściwościach [42-47]. Ponadto zagraniczni producenci środków smarnych

przedstawiają nowe substancje [12-14], które są przeznaczone do zastosowania do łożysk porowatych. Znamienne jest jednocześnie to, że producenci krajowi nie prowadzą żadnych prac rozwojowych w tym zakresie.

### 3. Przegląd wyników badań własnych

Autorzy niniejszej publikacji przeprowadzili szereg badań procesów starzenia olejów stosowanych do łożysk porowatych. Badania te dotyczyły kilku powyżej omówionych problemów:

- wpływu produktów starzenia zawartych w olejach na przepuszczalność i charakterystyki tribologiczne łożysk porowatych,
- zmiany właściwości olejów eksploatowanych w łożyskach porowatych po testach trwałościowych.

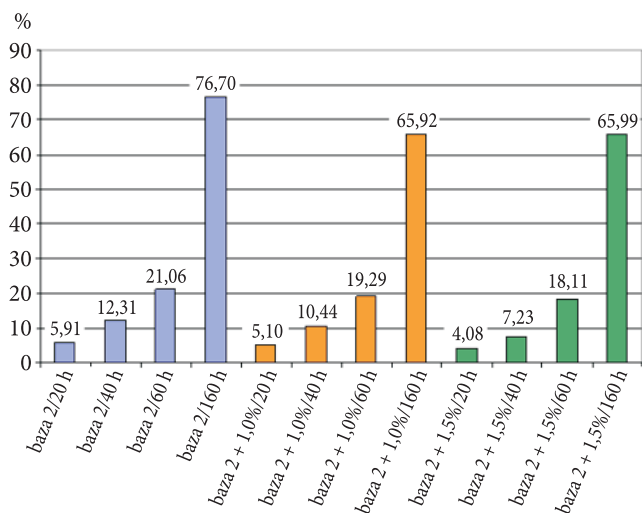
#### 3.1. Badanie wpływu produktów starzenia na przepuszczalność i charakterystyki tribologiczne łożysk porowatych

Jak wspomniano wcześniej podstawowym problemem przy planowaniu i przeprowadzeniu tego typu badań jest bardzo mała, ograniczona objętością porów otwartych łożyska, ilość środka smarnego dostępna po wykonanych testach stanowiskowych. Dlatego też pierwsze badania zaplanowano z wykorzystaniem olejów starzonych w warunkach laboratoryjnych, a następnie tak przygotowanymi olejami nasycano tuleje i prowadzono badania stanowiskowe [48].

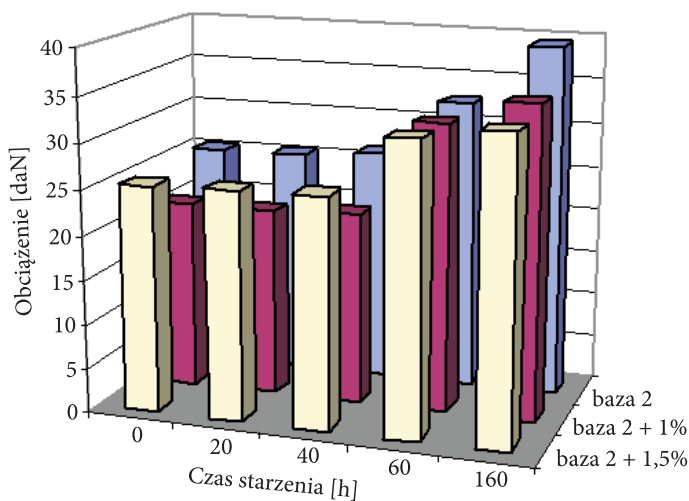
Do badań wytypowano bazę mineralną 1114 (SN350 — baza 2), do której wprowadzono dodatek antyutleniający Vanlube SL (mieszanina alkilizowanych difenyloamin — wzór chemiczny  $C_{20}H_{27}N$ ) w ilości 1,0 i 1,5%. Następnie przeprowadzono proces starzenia laboratoryjnego ( $120^{\circ}C$ , kontakt z tuleją porowatą i różny czas starzenia: 20, 40, 60 i 160 h). Dla tak uzyskanych próbek przeprowadzono badania podstawowych wybranych właściwości, a następnie zrobiono badania przepuszczalności i badania stanowiskowe tulei nasączonych olejami świeżymi i po procesie starzenia laboratoryjnego [48]. Na kolejnych wykresach przedstawiono zależności zmiany wybranych parametrów w funkcji czasu starzenia (rys. 7 i 8).

Ogólnie analiza wyznaczonych parametrów wykazała, że skomponowane oleje były dość dobrze zróżnicowane. Przedłużanie czasu starzenia skutkowało wzrostem lepkości, gęstości, liczby kwasowej, temperatury zapłonu, zwiększaniem wartości parametrów opisujących właściwości smarnościowe ( $I_h$ ,  $Pt$ ,  $Goz$ ). Zmiany te były nieznaczne dla próbek do 60 h starzenia, a wyraźne różnice występowały powyżej 60 h czasu trwania procesu starzenia laboratoryjnego.

Przebieg procesu starzenia przygotowanych próbek obserwowano wykonując badanie widm olejów w zakresie podczerwieni. Przeprowadzono analizę zmian



Rys. 7. Względna zmiana lepkości dynamicznej olejów w temperaturze 100°C po kolejnych etapach starzenia [48]



Rys. 8. Wartość wskaźnika zużycia pod obciążeniem  $I_h$  w funkcji czasu starzenia dla próbek świeżych i po kolejnych etapach starzenia [48]

składu strukturalno-grupowego olejów i wytypowano piki charakteryzujące proces starzenia. Według danych literaturowych w analizie produktów starzenia najczęściej są wykorzystywane następujące zakresy liczby falowej [27, 49-53]:

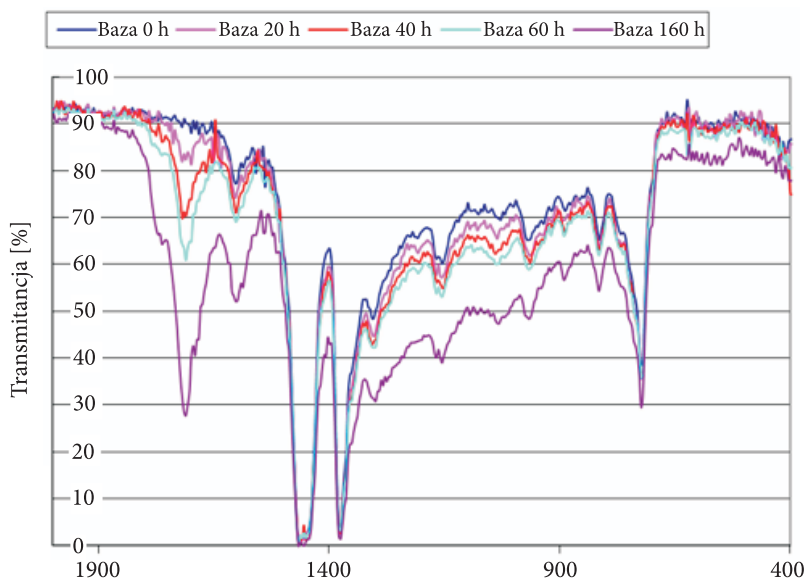
- 1420-1300  $\text{cm}^{-1}$ , 1610-1550  $\text{cm}^{-1}$ , 1710  $\text{cm}^{-1}$  — kwasy karboksylowe,
- 1604  $\text{cm}^{-1}$  — struktury aromatyczne,

- $1632\text{ cm}^{-1}$  — związki nienasycone ( $\text{C}=\text{C}-\text{C}=\text{O}$ ),
- $1680\text{-}1660\text{ cm}^{-1}$   $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  nienasycone aldehydy,
- $1720\text{ cm}^{-1}$  — ketony,
- $1730\text{ cm}^{-1}$  — estry kwasów aromatycznych lub  $\alpha$ ,  $\beta$  nienasycone kwasy,
- $1740\text{ cm}^{-1}$  — związki karbonylowe,
- $1774\text{ cm}^{-1}$  —  $\gamma$ -laktony, estry.

Pojawiające się charakterystyczne pasma pozwalały na identyfikowanie produktów starzenia, a ich „pogłębienie” świadczyło o wzroście ich ilości w próbce badanego oleju.

Analiza kształtu i przebiegu widm wykazała, że występowało wyraźne obniżenie transmitancji dla próbek olejów po kolejnych etapach starzenia (rys. 9). Jednocześnie zauważono wyraźny wpływ zawartości dodatku Vanlube SL na przebieg procesu starzenia. Niektóre pasma nie pojawiały się na widmach olejów z dodatkiem Vanlube SL, np.  $1604\text{ cm}^{-1}$  (struktury aromatyczne) obserwowany dla wszystkich próbek, ale dodatkowy pik około  $1600\text{ cm}^{-1}$  (związany z nienasyconymi ketonami [49]) nie występował w próbkach z dodatkiem.

Dla tak przygotowanych próbek olejów przeprowadzono kompleksowe badania przepuszczalności, czyli parametru decydującego o cyrkulacji oleju w porowatym szkielecie łożyska i w szczelinie smarowej [48]. Badania przeprowadzono, przetwarzając pod znanym ciśnieniem olej (12,5, 68 i 80 kPa) o odpowiedniej temperaturze (20, 40, 60 i  $100^\circ\text{C}$ ) przez tuleję porowatą.



Rys. 9. Widma w podczerwieni oleju baza 2 świeżego i po kolejnych etapach starzenia [48]

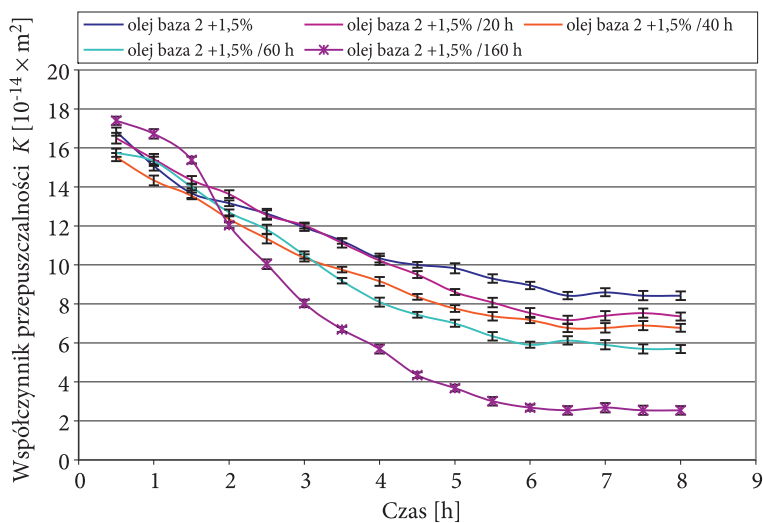


Wartość lepkościowego współczynnika przepuszczalności wyliczano według wzoru:

$$K = \frac{Q \cdot \eta \cdot \ln \frac{D_{ZEW}}{D_{WEW}}}{2\pi \cdot L \cdot \Delta p}, \quad (2)$$

gdzie:  $K$  — lepkościowy współczynnik przepuszczalności [ $\text{m}^2$ ];  
 $Q$  — objętościowe natężenie przepływu płynu [ $\text{m}^3/\text{s}$ ];  
 $\eta$  — lepkość dynamiczna płynu w temperaturze pomiaru [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ];  
 $e$  — wymiar wyrobu mierzony w kierunku przepływu płynu [ $\text{m}$ ];  
 $A$  — powierzchnia czynna przepływu [ $\text{m}^2$ ];  
 $\Delta p$  — spadek ciśnienia płynu przenikającego ciało porowate [ $\text{Pa}$ ].

Na rysunku 10 przedstawiono przykładowy wykres zmian współczynnika przepuszczalności dla próbek olejów, z dodatkiem Vanlube SL w ilości 1,5%, po kolejnych etapach starzenia [48].



Rys. 10. Wykres przebiegu zmian współczynnika przepuszczalności  $K$  dla oleju świeżego baza 2 + 1,5% Vanlube SL i po kolejnych etapach starzenia (naciśnienie  $p = 12,5$  kPa, temperatura  $60^\circ\text{C}$ ) [48]

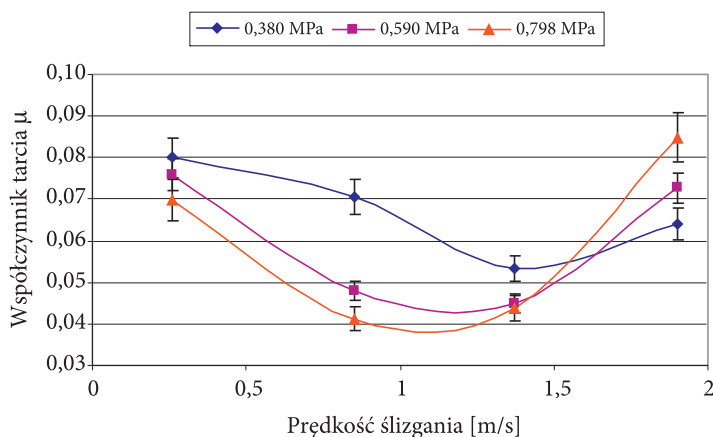
Analiza wyników badań charakterystyk przepuszczalności wykazała, że przeprowadzony proces starzenia miał istotny wpływ na końcową wartość przepuszczalności łożyska. Oleje po ostatnim stopniu zestarzenia powodowały największy względny spadek przepuszczalności w stosunku do oleju świeżego, co wiązało się z dużą zawartością wysokolepkich i aktywnych powierzchniowo produktów starzenia.

Najmniejsze zmiany przepuszczalności zaobserwowano dla olejów z 1,5% dodatkiem Vanlube SL, następnie nieznacznie większe dla oleju z 1% zawartością dodatku. Jednocześnie różnice pomiędzy wartościami współczynnika przepuszczalności osiągniętymi dla olejów po 20, 40 i 60 godzin starzenia były małe. Zarówno przyjęte ciśnienie, jak i temperatura badania nie wpływały na końcowy wynik badania przepuszczalności.

Po przeprowadzonej analizie stwierdzono istnienie silnych liniowych zależności pomiędzy analizowanymi właściwościami smarnościowymi olejów, liczbą kwasową, napięciem powierzchniowym, współczynnikiem przepuszczalności i zmianami składu chemicznego olejów, scharakteryzowanymi zmianą pola pików  $1710\text{ cm}^{-1}$  (kwas karboksylowe) i  $1604\text{ cm}^{-1}$  (struktury aromatyczne).

Uzyskane wyniki badań zostały potwierdzone na etapie badań stanowiskowych. Przeprowadzono je na stanowisku do badania porowatych łożysk ślizgowych. Badania kontynuowano przy 4 wartościach prędkości obrotowych (250 obr/min — 0,26 m/s, 650 obr/min — 0,85 m/s, 1050 obr/min — 1,37 m/s, i 1450 obr/min — 1,90 m/s) i 3 wartościach obciążenia: 0,380 MPa, 0,590 MPa i 0,798 MPa [48].

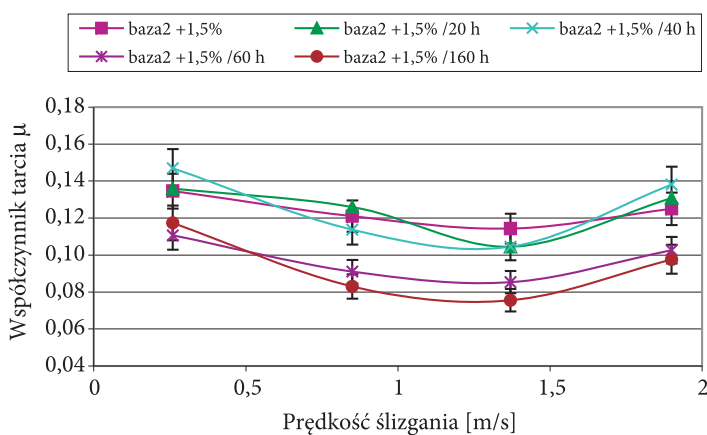
Analiza przebiegu otrzymanych wyników wskazuje, że dla wszystkich olejów (zarówno świeżych, jak i starzonych) zaobserwowano ogólnie spadek wartości współczynnika tarcia wraz ze wzrostem obciążenia (rys. 11) i wzrost temperatury pracy łożyska wraz ze wzrostem prędkości obrotowej. Jednakże oleje po procesie starzenia ze względu na swoje zróżnicowane właściwości (lepkość, smarność, gęstość, liczba kwasowa, przepuszczalność) powodowały, że łożyska pracowały przy różnych wartościach temperatury i współczynnika tarcia. Ogólnie zauważono, że łożyska nasączone olejami po kolejnych procesach starzenia pracowały stabilniej, a współczynnik tarcia i temperatura ustalały się szybko [48].



Rys. 11. Współczynnik tarcia łożysk nasączonych olejem baza 2 po 160 h starzenia w funkcji prędkości ślizgania dla kolejnych wartości obciążenia [48]

Otrzymywane końcowe ustabilizowane wartości tych parametrów były niższe wraz z pogłębianiem procesu starzenia laboratoryjnego olejów. Jednakże zmiany te najbardziej widoczne były dla olejów po 60 i 160 godzinach starzenia. Oleje o mniejszym stopniu zesterzenia wywoływały zmiany nieznaczne, które zawierały się w obszarze rozrzutu wyników dla olejów mniej zesterzonych.

Porównanie przebiegu wartości współczynnika tarcia w funkcji prędkości ślizgania dla różnych grup olejów wykazało, że różnice pomiędzy grupami uwidaczniały się przy porównaniach olejów po 60 i 160 godzinach starzenia (rys. 12).



Rys. 12. Współczynnik tarcia w funkcji prędkości ślizgania przy obciążeniu  $p = 0,380$  MPa dla olejów baza 2 + 1,5% świeżego i po kolejnych etapach starzenia [48]

Tuleje nasączone olejami z grupy baza 2 + 1,5% pracowały przy wyższych wartościach współczynnika tarcia przy analogicznych prędkościach ślizgania. Tuleje nasączone olejami o krótszym czasie starzenia miały przebiegi zbliżone bez względu na zawartość dodatku Vanlube SL.

Ostatecznie stwierdzono, że proces starzenia olejów powodował, że łożyska pracowały stabilniej przy niższych wartościach momentu, współczynnika tarcia i temperatury; jednakże zmiany te były w granicach błędów dla łożysk nasączonych olejami świeżymi, po 20 i 40 h starzenia; dopiero proces starzenia olejów przedłużony do 60 i 160 h wyraźnie skutkowało poprawą parametrów pracy. Ogólnie oleje grupy baza 2 (bez dodatku) pracowały bardziej stabilnie w niższej temperaturze i przy niższym współczynniku tarcia; tuleje szybciej się docierały, a temperatura pracy wyraźnie była niższa niż w przypadku pozostałych grup olejów, jednakże różnice te uwidaczniały się powyżej 60 godzin starzenia. Jednocześnie nie zaobserwowano różnic w parametrach pracy tulei nasączonych olejami z różną zawartością dodatku Vanlube SL. W rzeczywistych warunkach pracy łożysk proces starzenia przebiega inaczej, olej starzeje się w miarę czasu pracy i dlatego część wyników badań mogła

nie odpowiadać rzeczywistym zjawiskom zachodzącym w łożyskach porowatych. Również przyjęte parametry procesu starzenia mogą się znacznie różnić od rzeczywistych wymuszeń i w efekcie skutkować innym przebiegiem procesu starzenia.

Należało zatem podjąć dalsze badania mające na celu obserwację procesu starzenia oleju w trakcie pracy w łożysku (długotrwałe testy trwałościowe), w celu określenia zmian właściwości badanych olejów i określenia, czy przyczyną zacierania się łożysk może być odpowiednio zestarzony olej.

### 3.2. Badanie zmian właściwości olejów eksploatowanych w łożyskach porowatych po testach trwałościowych

W kolejnych pracach kontynuowano badania procesów starzenia środków smarowych zachodzących w trakcie eksploatacji łożysk porowatych [54-56].

W pierwszych badaniach przeprowadzono testy trwałościowe przez 1000 h lub do momentu zatarcia dla wyznaczonych wcześniej obciążeń granicznych łożysk nasączonych olejem mineralnym Antykol TS-120, powszechnie w Polsce stosowanym [55]. Zastosowano dwie prędkości obrotowe: 600 i 1000 obr/min, a po każdym teście odsączono olej z łożysk i zbadano widmo oleju w podczerwieni i liczbę kwasową oleju (tab. 2). Następnie przeprowadzono analizę i porównanie wyników badań z wynikami otrzymanymi dla oleju świeżego.

TABELA 2

Średnie wartości wyników badań etapu III dla poszczególnych partii badanych tulei [55]

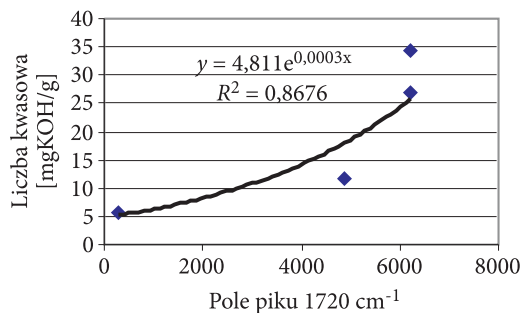
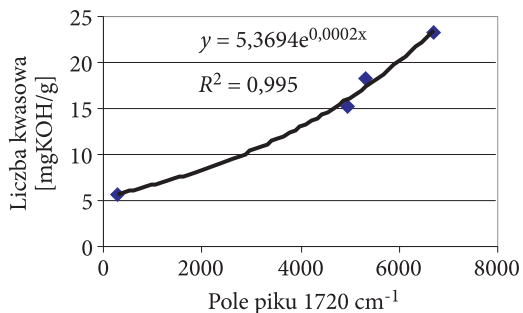
Rodzaj badania		$n$ [obr/min]	$p \cdot v$ [MPa·m/s]	$A^*$ [°C·h]	Liczba kwasowa [mgKOH/g]	$\epsilon^{**}$ 1720 cm <sup>-1</sup>	Pole piku 1720 cm <sup>-1</sup>
Badania obciążeń granicznych		600	max 2,16	34199	11,8	6,33	4858
		1000	max 1,89	29256	18,3	6,93	5301
Badania trwałości	Tuleje zatarte	600	2,16	24256	15,2	6,77	4940
		1000	1,89	23735	26,8	8,88	6204
	Tuleje niezatarte	600	2,16	73806	23,2	10,21	6682
		1000	1,89	70710	34,3	9,80	6229

$A^*$  — obciążenie cieplne wyliczone zgodnie ze wzorem 3,

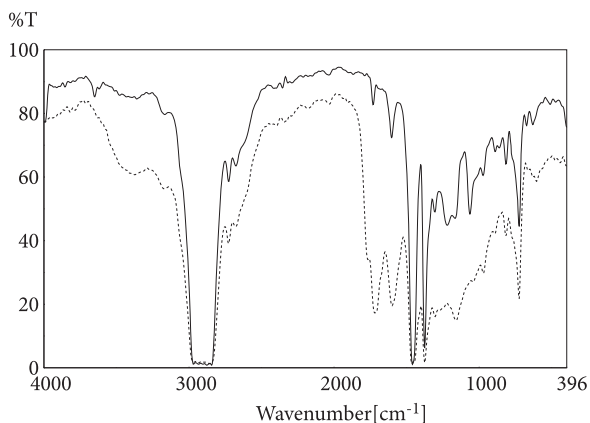
$\epsilon^{**}$  — współczynnik ekstynkcji przy danej liczbie falowej.

Tak otrzymane dane zestawiono na wykresach korelacyjnych (rys. 13 i 14).

Analiza otrzymanych wyników badań wykazała, że badany olej smarowy w trakcie badań stanowiskowych uległ głębokiemu i intensywnemu zestarzeniu

Rys. 13. Zależność TAN [mgKOH/g] od wielkości pola piku 1720 cm<sup>-1</sup> widma IR,  $n = 1000$  obr/min [55]Rys. 14. Zależność TAN [mgKOH/g] od wielkości pola piku 1720 cm<sup>-1</sup> widma IR,  $n = 600$  obr/min [55]

(rys. 15) (bardzo wysokie wartości liczby kwasowej), na co znaczący wpływ miała wysoka temperatura, czas pracy oraz oddziaływanie rozwinętej powierzchni porowatej osnowy.

Rys. 15. Przykładowy przebieg widma IR dla oleju świeżego (linia ciągła) i po badaniach trwałości dla  $n = 1000$  obr/min, z partii łożysk niezatartych (linia przerywana) [55]

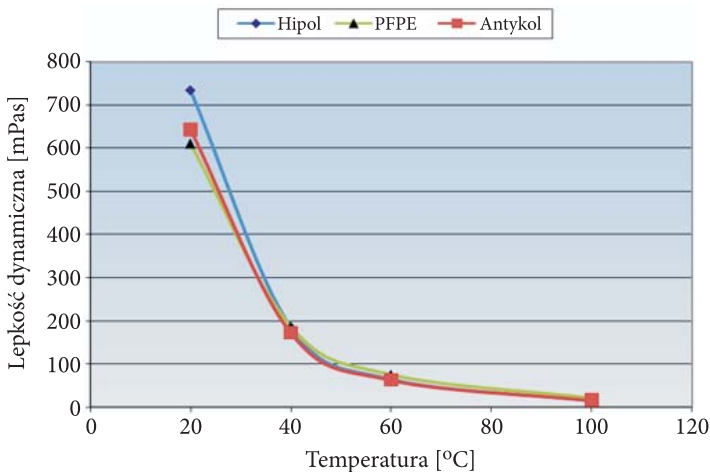
Zauważono również wyraźny wpływ prędkości obrotowej wału na wartość liczby kwasowej. Może on wynikać z intensywniejszego napowietrzenia i większej cyrkulacji oleju w porowatej osnowie. Stopień zesterzenia oleju zwiększał się wraz ze wzrostem czasu pracy łożysk oraz obciążenia cieplnego  $A$ , które wyliczano zgodnie ze wzorem [55]:

$$A = \int_{t_0}^t f(T)dt - \int_{t_0}^t f(T_{ot})dt, \quad (3)$$

gdzie:  $A$  — pole pod krzywą temperatury pracy łożyska w czasie, skorygowane o pole pod krzywą temperatury otoczenia;  
 $T$  — temperatura pracy [°C];  
 $T_{ot}$  — temperatura otoczenia [°C];  
 $t$  — czas pracy ( $t_0 = 0$ ) [h].

Obserwacja procesu starzenia środka smarowego w łożyskach porowatych nie była do tej pory prowadzona. Ponadto nie znano również żadnych właściwości oleju po eksploatacji w łożysku porowatym. Dlatego to badanie postanowiono kontynuować z innymi rodzajami środków smarowych, próbując jednocześnie ocenić inne ich dodatkowe właściwości. Takie podejście znalazło również naśladowców, jak choćby wspólne badania Klüber Lubrication, GKN Sinter Metals i Zachodniosaksońskiej Wyższej Szkoły z Zwickau [42], które opisano szczegółowo powyżej.

W kolejnych testach trwałościowych [56] przeprowadzono starzenie dwóch rodzajów olejów, które wybrano ze względu na fakt stosowania ich w łożyskach porowatych, a ponadto ze względu na to, że miały jednakowe charakterystyki lepkościowo-temperaturowe z zastosowanym wcześniej olejem Antykol TS-120 [55] (rys. 16).



Rys. 16. Porównanie charakterystyk lepkościowo-temperaturowych zastosowanych olejów [55, 56]

Użyto po pierwsze oleju mineralnego przekładniowego Hipol 15F i oleju syntetycznego na bazie PFPE (perfluoropolietery) produkowanego przez Klüber Lubrication o symbolu DH3-100. Olej ten według producenta charakteryzował się doskonałą odpornością na utlenianie, chemiczną stabilnością i odpornością na katalityczne oddziaływanie porowatego materiału łożyska. Rekomendowany jest do węzłów tribologicznych pracujących w szerokim zakresie temperatury ( $-25-200^{\circ}\text{C}$ ), osiągając najlepsze charakterystyki w temperaturze  $150^{\circ}\text{C}$ . Jednak wyniki badania lepkości kinematycznej wykazały, że wartość tego parametru była mniejsza niż dla oleju Hipol, ale jednocześnie olej PFPE miał prawie zgodną krzywą przebiegu lepkości dynamicznej w funkcji temperatury, ze względu na swoją dużą gęstość (tab. 3).

TABELA 3

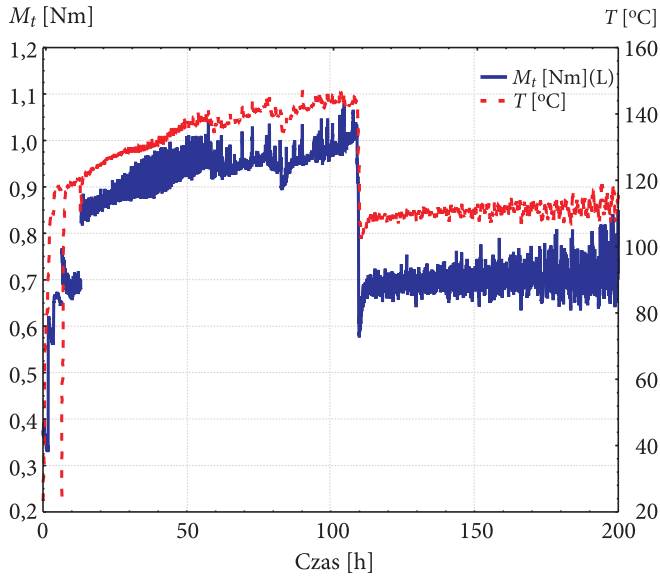
Zestawienie właściwości badanych olejów [56]

oleje	Lepkość kinematyczna [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]			Gęstość [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]			Lepkość dynamiczna [ $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ]			Wskaź- nik lepkości	Liczba kwasowa [ $\text{mgKOH}/\text{g}$ ]	Współcz. załamania światła, $n_D^{25}$
	$20^{\circ}\text{C}$	$40^{\circ}\text{C}$	$100^{\circ}\text{C}$	$20^{\circ}\text{C}$	$40^{\circ}\text{C}$	$100^{\circ}\text{C}$	$20^{\circ}\text{C}$	$40^{\circ}\text{C}$	$100^{\circ}\text{C}$			
Hipol	715,42	193,3	71,52	0,899	0,889	0,853	643,16	171,84	62,58	103	1,01	1,4883
PFPE	323,12	100,23	41,21	1,891	1,862	1,774	611,02	186,63	75,54	110	0,00	1,2850

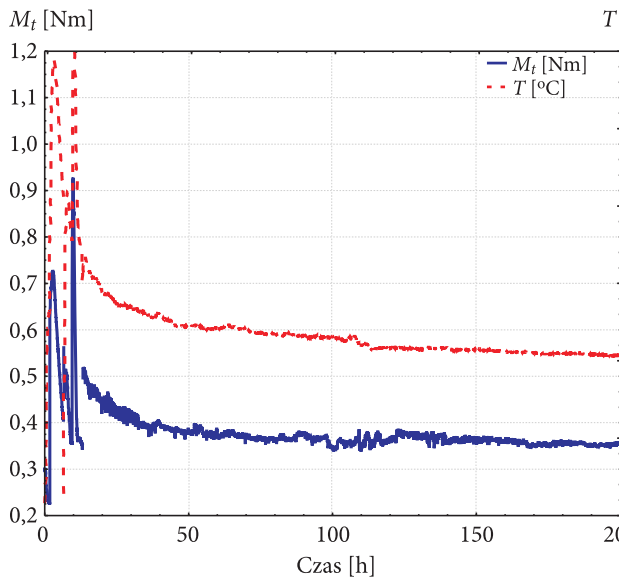
Przeprowadzono testy trwałościowe w czasie 100, 200 i 1000 godzin dla obu olejów przy prędkości obrotowej 1000 obr/min (1,31 m/s) i obciążeniu 727 N, co w efekcie pozwoliło osiągnąć współczynnik  $p \cdot v$  1,90  $\text{MPa} \cdot \text{m/s}$  [56]. Jednakże w trakcie badań łożyska nasączone olejem PFPE pracowały przy wysokim momencie tarcia i wysokiej temperaturze. Moment tarcia był niestabilny, dlatego obciążenie tych łożysk zawierających olej PFPE zostało zmniejszone do 220 N, tak aby kontynuować test trwałościowy (współczynnik  $p \cdot v$  0,58  $\text{MPa} \cdot \text{m/s}$ ). Jednakże pomimo to praca łożysk z olejem PFPE była niestabilna i nierównomierna (rys. 17) w porównaniu do oleju Hipol (rys. 18).

Łożyska nasączone olejem Hipol pracowały w temperaturze średnio około  $60^{\circ}\text{C}$ , a łożyska z olejem PFPE w temperaturze średnio około  $100^{\circ}\text{C}$ , która była wysoka nawet przy końcu testów. Aby kontynuować testy łożysk zawierających oleje PFPE, należało uzupełniać olej w trakcie trwania wszystkich testów trwałościowych.

Analiza wyników badań (tab. 4) wykazała, że łożyska nasączone olejem syntetycznym PFPE pracowały przy znacznie wyższym współczynniku tarcia i w wyższej temperaturze (różnice dochodzące nawet do  $40^{\circ}\text{C}$ ).



Rys. 17. Moment tarcia i temperatura łożyska nr 720 z olejem PFPE w 200-godzinym teście trwałościowym (prędkość obrotowa 1000 obr/min) [56]



Rys. 18. Moment tarcia i temperatura łożyska nr 714 z olejem Hipol w 200-godzinym teście trwałościowym (prędkość obrotowa 1000 obr/min) [56]



TABELA 4

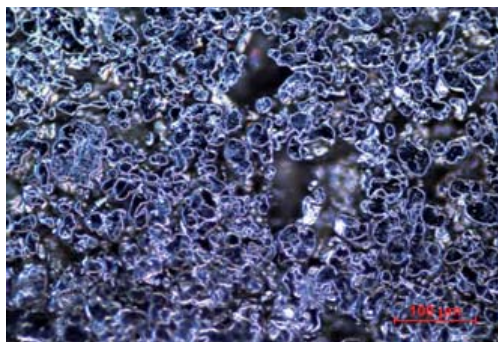
Podsumowanie wyników badań po testach trwałościowych [56]

Parametr	Czas trwania testu [h]	Olej Hipol	Olej PFPE
Współczynnik tarcia $\mu$	100	0,030	0,181
	200	0,039	0,248
	1000	0,035	0,221
Średnia temperatura łożysk [°C]	100	79,8	111,9
	200	68,2	118,9
	1000	62,0	103,6
Spadek masy łożysk po testach [g]	100	0,1012	0,9253
	200	0,0790	0,9997
	1000	0,0726	1,2757
Względny spadek masy łożysk po testach [%]	100	5,44%	23,09%
	200	4,25%	24,95%
	1000	4,03%	31,84%
Zużycie (zmiana średnicy wewnętrznej łożysk) po testach [mm]	100	0,008	0,017
	200	0,005	0,025
	1000	0,007	0,052

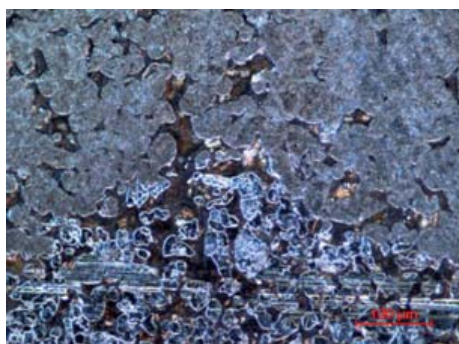
W konsekwencji ubytek oleju syntetycznego po zakończonych testach był znacznie większy, pomimo jego uzupełniania w trakcie badań. Związane to było prawdopodobnie z dużą gęstością oleju PFPE i działaniem sił odśrodkowych w pracującym łożysku. Jak wykazały również badania zużycie łożysk (zmiana średnicy wewnętrznej) nasączonych tym olejem było wyraźnie większe niż łożysk smarowanych olejem przekładniowym.

Obserwacje te zostały także potwierdzone badaniami mikroskopowymi powierzchni współpracy łożysk po zakończonych testach (rys. 19-21) [56].

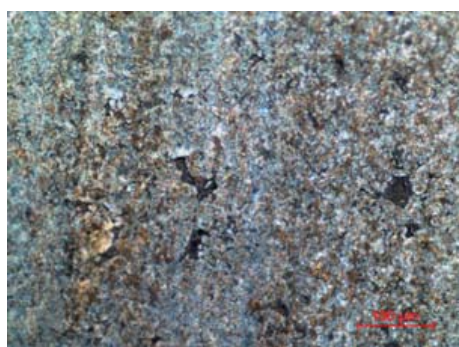
Ślad dotarcia tulei smarowanych olejem przekładniowym Hipol był mały, a zakończenia porowatych kanałów były jedynie nieznacznie zmniejszone (rys. 20) w porównaniu do łożyska nowego (rys. 19). Łożyska smarowane olejem syntetycznym miały szeroki na obwodzie ślad zużycia (nawet do 180°) wzdłuż całej osi łożyska, z pojedynczymi niezamkniętymi porami. Zatem dodatkowo utrudniona cyrkulacja oleju w obszarze tarcia była kolejnym czynnikiem pogarszającym warunki pracy łożysk nasączonych olejem syntetycznym.



Rys. 19. Widok mikroskopowy powierzchni nowego łożyska [56]



Rys. 20. Widok mikroskopowy powierzchni łożyska po teście trwałości (olej Hipol) [56]



Rys. 21. Widok mikroskopowy powierzchni łożyska po teście trwałości (olej PFPE) [56]

Po zakończonych testach trwałościowych przeprowadzono badania próbek oleju odsączonych z poszczególnych łożysk (tab. 5).

TABELA 5

Wyniki badań właściwości olejów po testach trwałościowych [56]

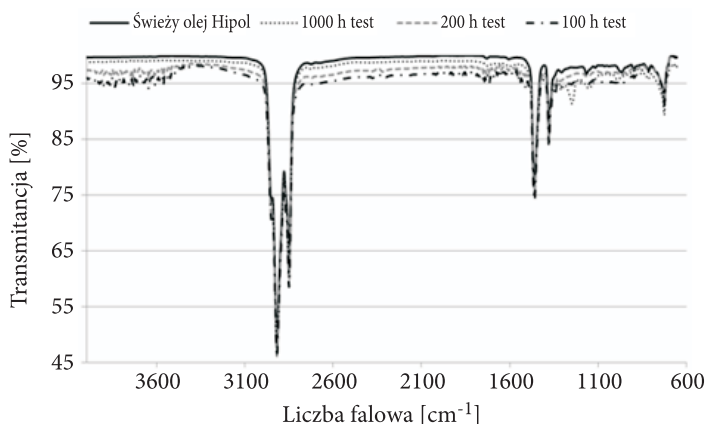
Parametr	Czas trwania testu [h]	Hipol	PFPE
Liczba kwasowa [mgKOH/g]	0	1,01	0,00
	100	1,19	3,34
	200	1,26	8,37
	1000	1,43	5,96 (15,3*)
Współczynnik załamania światła $n_D^{25}$	0	1,4883	1,2850
	100	1,4890	1,3018
	200	1,4890	1,3050
	1000	1,4895	1,3140

\* Liczba kwasowa osadu zebranego z powierzchni łożysk i wałków po 1000 godzinach testu.

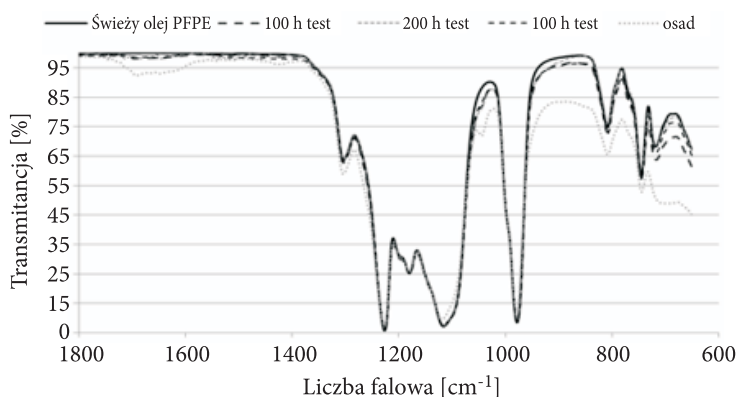
Analiza wyników tych badań wykazała, że właściwości oleju przekładniowego Hipol nie zmieniły się znacząco w stosunku do oleju świeżego. Wyniki badań oleju syntetycznego były zaskakujące, biorąc pod uwagę deklarowaną przez producenta bardzo dobrą odporność na utlenianie. Zaobserwowano znaczący wzrost liczby kwasowej w stosunku do oleju świeżego, pomimo że olej był uzupełniany w trakcie testów trwałościowych. Ponadto zbadano liczbę kwasową osadu zebranego z powierzchni tarcia łożysk i wałków smarowanych olejem syntetycznym i po 1000-godzinym teście otrzymano dużą wartość liczby kwasowej. Również wartość współczynnika załamania światła rosła wyraźnie dla oleju syntetycznego i wraz ze wzrostem czasu testu trwałościowego [56].

Analiza wyników badań widm FTIR wykazała, że różnice w przebiegu widm olejów przekładniowych po kolejnych testach trwałościowych były niewielkie i mało znaczące (rys. 22). W widmie po 1000 godzinach pracy pojawiają się pierwsze pasma świadczące o inicjowaniu procesów starzenia. Z kolei widma oleju syntetycznego (rys. 23) również nie różniły się znacząco między sobą, co mogło wynikać z faktu uzupełniania oleju w trakcie poszczególnych testów. Jednakże widmo osadu zebranego z powierzchni łożysk i wałka po 1000-godzinym teście wykazało, że olej syntetyczny uległ głębokim przemianom.

Ostatecznie przeprowadzone badania wykazały, że proces starzenia środków smarowych w łożyskach porowatych jest silnie zależny od temperatury pracy łożysk w trakcie testów. Zastosowanie oleju syntetycznego PFPE nie przyniosło spodziewanych pozytywnych rezultatów, łożyska pracowały w bardzo niekorzystnych warunkach. Przyczyną tego był kompleks właściwości zastosowanego oleju, tj. duża gęstość skutkująca intensywnym ubytkiem oleju, słabe właściwości prze-



Rys. 22. Widma FTIR oleju przekładniowego po kolejnych testach trwałościowych [56]



Rys. 23. Widma FTIR oleju syntetycznego po kolejnych testach trwałościowych [56]

ciwżużyciowe, skutkujące dużym zużyciem tulei, dużą wartością współczynnika tarcia i wreszcie utrudnioną cyrkulacją oleju w obszarze tarcia. Prawdopodobną przyczyną mogło być również zjawisko opisywane przez Nye Lubricants [38], polegające na wytrącaniu się brązowego osadu, będącego produktem intensywnego utleniania pod wpływem katalitycznego oddziaływania powierzchni tarcia pozbawionej tlenków metali [37].

Potwierdzono, że oleje są głęboko utleniane i osiągają duże wartości liczby kwasowej nawet w przypadku stosowania oleju syntetycznego, co w kontekście ich dalszej pracy i trwałości łożysk jest niepożądanym efektem. Jednocześnie należy zauważyć, że w dotychczas przeprowadzonych symulacjach procesu starzenia w warunkach laboratoryjnych nie osiągnięto takich zmian właściwości olejów jak w procesie starzenia eksploatacyjnego.

## 4. Podsumowanie

Należy podjąć dalsze badania mające na celu obserwację procesu starzenia oleju w trakcie pracy w łożysku (głównie długotrwałe testy trwałościowe) w celu określenia zmian właściwości badanych olejów i określenia, czy przyczyną zacierania się łożysk może być zestarzony olej. Jednocześnie podobne w swoim zakresie badania należy podjąć dla smarów plastycznych.

Należy poszukiwać dodatkowych parametrów do oceny właściwości środków smarnych, które można zbadać, dysponując małą ilością oleju po badaniach. Ponadto niezbędne jest opracowanie metodyki testu starzeniowego środków smarnych adekwatnego do warunków, jakim podlegają w eksploatowanych łożyskach porowatych.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w listopadzie 2009 r.

### LITERATURA

- [1] В. Д. ЗОЗУЛЯ, *Смазки для спеченных самосмазывающихся подшипников*, Киев, Науковая Думка, 1976.
- [2] Z. LAWROWSKI, *Mechanizm samosmarowania łożysk z tulejek porowatych na przykładzie pometów stalowych*, Przegląd Mechaniczny, 22, 1962, 691-696.
- [3] J. OLEXA, *Investigation of the relations between the permeability and the service life of porous self-lubricated bearings*, Wear, 58, 1980, 1-14.
- [4] A. KRÓL, T. KAŁDOŃSKI, *Permeability of porous sliding bearings*, Proceedings of Second International Tribology Conference, SITC 2002, Zielona Góra, August 25-28, International Journal of Applied Mechanics, Special issue: "SITC 2002", vol. 7, 2002, 255-262.
- [5] K. KRZEMIŃSKI, *Zastosowanie i dobór samosmarujących łożysk porowatych*, Przegląd Mechaniczny, 5-6, 1981, 5-7.
- [6] Z. LAWROWSKI, *Tendencje rozwojowe ślizgowych łożysk bezobsługowych*, Tribologia, 4, 1999, 521-533.
- [7] Z. LAWROWSKI, *Podstawy doboru materiałów na ślizgowe łożyska bezobsługowe*, Tribologia, 5-6, 1997, 734-743.
- [8] A. KRÓL, T. KAŁDOŃSKI, *Research of ageing process of oils used in porous bearings*, Biul. WAT, 52, 8-9, 2003, 161-180.
- [9] A. KRÓL, T. KAŁDOŃSKI, *Selection of oils to porous sliding bearings*, Conference Proceedings and Monographs, Tribology: Science and Applications, Vienna, vol. 4, 2004, 325-347.
- [10] T. KAŁDOŃSKI, *Złożony mechanizm samosmarowania łożyska porowatego — dwa modele*, Tribologia, 5-6, 1997, 653-657.
- [11] A. KRÓL, T. KAŁDOŃSKI, *Badania wstępne procesów starzenia olejów do łożysk porowatych*, Materiały Konferencyjne VIII Międzynarodowego Sympozjum IPM Wojskowej Akademii Technicznej, Rynia, 11-13 grudnia 2002, część II, 149-158.

- [12] Multi-author work, *Klüber special lubricants for plain bearings. The right choice made easy*, Klüber Lubrication [www.klueber.com](http://www.klueber.com), 2001.
- [13] H. MILLER, C. TETZLAFF, *Well oiled. Special and additional lubricants for sintered metal plain bearings*, *Tribojournal*, 1, Klüber Lubrication [www.klueber.com](http://www.klueber.com), 2002.
- [14] *GKN Sinter Metals: Bearings technology*, Italy, 2004, [www.gknsintermetals.com](http://www.gknsintermetals.com).
- [15] Г. ВИНОГРАДОВ, *Противоизносные свойства масел при тяжелых режимах трения. Трени и износ в машинах*, 15, 1961, 23-29.
- [16] B. KORYTKOWSKI, *Trwałość łożysk samosmarujących*, *Przegląd Mechaniczny*, 17-18, 1975, 567-570.
- [17] T. KAŁDOŃSKI, K. KRZEMIŃSKI, E. SZCZAWNICKA, E. WŁODARCZYK, *Charakterystyki pracy łożysk porowatych smarowanych olejem z dodatkiem azotku boru*, *Tribologia*, 6, 1995, 702-714.
- [18] B. KORYTKOWSKI, *Samosmarowność łożysk porowatych*, *Przegląd Mechaniczny*, 24, 1973, 860-862.
- [19] Z. LAWROWSKI, *Technika smarowania*, PWN, Warszawa, 1987.
- [20] W. MISSOL, *Spiekane części maszyn*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1978.
- [21] V. T. MORGAN, *Porous metal bearings*, *Powder Metallurgy*, 12, 24, 1969, 426-451.
- [22] A. WACHAL, *Dobór i zastosowanie materiałów pędnych i smarów*, Część I. *Dobór olejów do silników spalinowych*, WAT, wewn. 2105/92, Warszawa, 1992.
- [23] A. WACHAL, *Zasady doboru olejów do smarowania podstawowych skojarzeń urządzeń mechanicznych*, WAT, Warszawa, 1973.
- [24] K. BIERNAT, *Analiza zmian zachodzących w olejach smarowych podczas eksploatacji oraz kryteriów ich oceny*, *Biul. WAT*, 8, 1993, 81-105.
- [25] A. WACHAL, A. KULCZYCKI, *Zmiany w silnikowym oleju smarowym w wyniku oddziaływań cieplnych*, *Paliwa Oleje i Smary w Eksploatacji*, nr 27, 1996, 6-8, nr 28, 1996, 4-7.
- [26] M. HEBDA, A. WACHAL, *Trybologia*, WNT, Warszawa, 1980.
- [27] Cz. KAJDAS, *Chemia i fizykochemia ropy naftowej*, WNT, Warszawa, 1979.
- [28] *Tribologia i tribotechnika*, (red.) M. Szczerka, M. Wiśniewski, Wydawnictwo ITeE, Radom, 2000.
- [29] K. BACZEWSKI, T. KAŁDOŃSKI, *Problemy monitorowania stanu olejów silnikowych*, *Biul. WAT*, 52, 1, 2005, 57-73.
- [30] K. KRZEMIŃSKI, *Własności ruchowe samosmarujących łożysk porowatych stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym*, *Przegląd Mechaniczny*, 7, 1985, 10-13.
- [31] Б. И. КОСТЕЦКИЙ, *Трение смазка и износ в машинах*, Техника, Киев, 1970.
- [32] Cz. KAJDAS, *Anionorodnikowy mechanizm działania kwasów i alkoholi w strefie tarcia*, *Zeszyty Naukowe WSI w Radomiu, Seria: Materiałoznawstwo Chemiczne i Technologia Obuwia*, 7, 1985, 157-194.
- [33] T. KAŁDOŃSKI, *Złożony mechanizm samosmarowania łożyska porowatego — dwa modele*, *Tribologia*, 5-6, 1997, 653-657.
- [34] N. M. BUJURKE, H. P. PATIL, *The effect of variable permeability and rotation on the performance characteristics of porous bearings*, *Wear*, 155, 1992, 7-14.
- [35] Z. LAWROWSKI, *Mechanizm samosmarowania łożysk z tulejek porowatych na przykładzie pometów stalowych*, *Przegląd Mechaniczny*, 22, 1962, 691-696.

- [36] B. KALPAKCI, E. E. KLAUS, *A porous media viscometer for the detection of anomalous viscosity effects applicable to elastohydrodynamic and boundary lubrication*, ASLE Transactions, 25, 3, 1982, 283-288.
- [37] NOBUO OHMAE, SHIGEYUKI MORI, J. M. MARTIN, *Micro and Nanotribology*, ASME Press, 2005
- [38] B. MOCK GEORGE, *Nye Lubricants: A Guide to Selecting the Right PFPE Lubricant*, USA, 2001, [www.nyelubricants.com](http://www.nyelubricants.com).
- [39] K. KRZEMIŃSKI, *Rozkłady przepuszczalności w porowatych tulejach łożyskowych spiekanych z proszków żelaza*, Metalurgia Proszków, 1984, 85-95.
- [40] K. KRZEMIŃSKI, *Właściwości użytkowe łożysk porowatych i konwencjonalnych w ruchu obrotowym i obrotowo-zwrotnym*, Metalurgia Proszków, 1983, 47-53.
- [41] V. T. MORGAN, *Porous metal bearings*, Powder Metallurgy, 12, 24, 1969, 426-451.
- [42] *Optimized tribology in sintered metal plain bearings. Joint research project of GKN and Klüber Lubrication at the Westsächsische Hochschule Zwickau*, Klüber Lubrication, Tribology International 2, 2007, [www.klueber.com](http://www.klueber.com).
- [43] V. D'AGOSTINO, V. NIOLA, G. CAPORICCIO, *Tribological behaviour of sintered iron bearings self-lubricated with PFPE under severe operating conditions*, Tribology International, 21, 2, April 1988, 105-108.
- [44] H. NAKAGAWA, M. TAKIZAWA, T. OHTAKI, K. NAGANO, M. ONOYAMA, T. ICHIMARU, *Lubricating oil composition for use with sintered porous bearings*, United States Patent 5.631.211, 1997.
- [45] R. JUNGHANS i in., *The use of sintered metal bearings for high sliding velocities*, Tribology International, 1996, 29, 3, 181-192.
- [46] B. GIEMZA, K. KAŁDOŃSKI, *The investigations of friction and wear of porous bearings lubricated by greases*, Applied Mechanics and Engineering, Special issue: ITC 2004, 9, Zielona Góra, 2004, 147-152.
- [47] B. GIEMZA, K. KAŁDOŃSKI, *Greases as lubricant for porous bearings*, Proceedings of 14th International Colloquium Tribology: Tribology and Lubrication Engineering, 2, Technische Akademie Esslingen, 2004, 683-689.
- [48] A. KRÓL, *Badania i analiza właściwości olejów w aspekcie doboru do smarowania porowatych łożysk ślizgowych*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 2006.
- [49] Z. NOWAK, W. STACHOWICZ, A. WACHAL, *Badanie starzenia oleju silnikowego metodami spektrofotometrycznymi*, Przemysł Chemiczny, 49, 6, 350-353.
- [50] J. P. COATES, L. C. SETTI, *Infrared Spectroscopic Methods for the Study of Lubricant Oxidation Products*, ASLE Transactions, 29, 3, 394-401.
- [51] M. GRĄDKOWSKI, E. SIWIEC, *Eksploatacyjne zmiany właściwości syntetycznego oleju silnikowego*, Tribologia, 4, 2000, 685-695.
- [52] A. S. WALISZEWSKI, *Możliwość badania oddziaływania kwasowych produktów utleniania olejów smarowych z metalami metodą spektrofotometrii w podczerwieni*, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Seria Maszyny Robocze i Pojazdy, 26, 1986, 195-201.
- [53] *Określanie struktury związków metodami spektroskopowymi*, (red.) M. Szafran, Z. Dega-Szafran, Tablice i ćwiczenia, PWN, Warszawa, 1988.
- [54] T. KAŁDOŃSKI, A. KRÓL, *Research of ageing process of oils used in porous bearings*, Biul. WAT, 52, 8-9, 2003, 161-180.
- [55] B. GIEMZA, T. KAŁDOŃSKI, A. KRÓL, *Problem of the Service Life of Self-Lubricated Friction Couples*, Solid State Phenomena: Mechatronic Systems and Materials, 113, 2006, 399-404.

- [56] B. GIEMZA, T. KAŁDOŃSKI, A. KRÓL, *The Research on The Lubricant Aging under Durability Test of The Porous Sliding Bearings*, Proceedings of CIST2008 & ITS-IFTToMM2008 Beijing, China.

T. KAŁDOŃSKI, A. KRÓL

**Research of aging process of oils used in porous bearings**

**Abstract.** In the work, aging process of lubricants was described regarding their implementation to porous bearings. The review of existing opinions on the aging process of lubricants in the porous bearings was presented. Finally, the results of own investigations were described and it was observed that the process in real conditions was intensive.

**Keywords:** porous bearing, lubricant, aging

**Universal Decimal Classification:** 621.89