

Zmiana parametrów oleju silnikowego w trakcie próby trwałościowej na hamowni silnikowej

Andrzej Suhecki, Joanna Śledź, Krzysztof Brodzik

1. Wstęp

Oleje silnikowe spełniają w silniku szereg funkcji, od typowo trybologicznych, takich jak zagwarantowanie pracy wszystkich węzłów tarcia (skojarzeń trących), przez uszczelnianie cylindrów aż do transportowania do filtra oleju zanieczyszczeń z układu.

Główne wymagania stawiane olejom silnikowym:

- smarowanie elementów współpracujących w celu zmniejszenia tarcia i zapobieganie zniszczeniom powierzchni i zatarciom;
- wymywanie zanieczyszczeń i zapobieganie korozji;
- odprowadzanie ciepła;
- wydłużenie trwałości oleju ze względu na bardzo duże przebiegi;
- ograniczenie emisji związków szkodliwych;
- doszczelnienie komory spalania.

Zapewnienie wymaganej wszechstronności oleju silnikowego uzyskuje się poprzez połączenie odpowiedniej bazy olejowej z dodatkami uszlachetniającymi. Nawet najlepszej jakości oleje bazowe nie są w stanie jednocześnie zapewnić odpowiednich właściwości nisko- i wysokotemperaturowych, odpowiedniej odporności na utlenianie prowadzącej do tworzenia nierozpuszczalnych

wydzielin i osadów oraz usunąć zanieczyszczeń z układu. Wymienione wyżej główne wymagania stawiane olejom silnikowym sprawiają, że niezbędne jest stosowanie dodatków pełniących różne funkcje (tabela 1).

Do najważniejszych właściwości oleju silnikowego z punktu widzenia eksploatacji należą:

Lepkość kinematyczna: parametr ten odpowiada za zachowanie się oleju w warunkach smarowania. Lepkość w 100°C odpowiada lepkości oleju w normalnych warunkach pracy, a w 40°C odpowiada pracy na zimnym silniku.

Całkowita liczba zasadowa (Total Basic Number): wskazując na ilość dodatków o charakterze zasadowym, charakteryzuje ona zdolności myjąco-dyspergujące oleju. TBN jest miarą zawartości detergentów i dyspergatorów w oleju. Im większa, tym lepsze są właściwości myjące i neutralizujące kwaśne produkty spalania paliwa czy oleju. Im większa zawartość siarki w paliwie, tym większa powinna być liczba zasadowa oleju. Oleje do silników wysokoprężnych powinny mieć wyższą TBN ze względu na cięższe warunki pracy.

Zawartość pierwiastków: jeden z podstawowych parametrów monito-

Streszczenie: Niniejsze opracowanie przedstawia wyniki badań czterech rodzajów olejów silnikowych o podobnej klasie lepkościowej, różnych producentów. Badania polegały na przeprowadzeniu 400-godzinnych testów trwałościowych na hamowni silnikowej, na czterech nowych silnikach o zapłonie samoczynnym, o pojemności 1,9 l. Przedstawiono wyniki analiz chemicznych próbek olejów pobranych w trakcie testów. Zaprezentowano analizę zmian podstawowych parametrów określających jakość oleju w trakcie próby trwałościowej, takich jak lepkość kinematyczna, zawartość sadzy, wartość TBN i ilości pierwiastków metali. Zaproponowano limity podstawowych parametrów oleju określające jego własności trwałościowe.

rowanych w olejach eksploatowanych. W początkowym etapie eksploatacji oleju najbardziej istotne są stężenia takich pierwiastków, jak: Ba, Ca, Mg, P i Zn. Niektóre formułacje i dodatki mogą zawierać również B, Na, K i Mo.

Źródłem pochodzenia poszczególnych pierwiastków w oleju mogą być [1, 2]:

- dodatki do olejów – Ca, Zn, B, Ba, Mg, P, Si, S;
- Si – tłoki;
- S – paliwo (na skutek połączenia siarki z wodą powstają tlenki siarki);
- Fe – cylindry, popychacze, blok silnika, pompa oleju, układ rozrządu, wał korbowy;
- Cr – tuleje, pierścienie tłokowe;
- Al – tłoki, łożyska, popychacze, chłodnica powietrza, pompa oleju, dodatki;
- Cu – łożyska;
- Pb – łożyska;
- Sn – łożyska.

Tabela 1. Funkcje dodatków uszlachetniających i ich przykłady

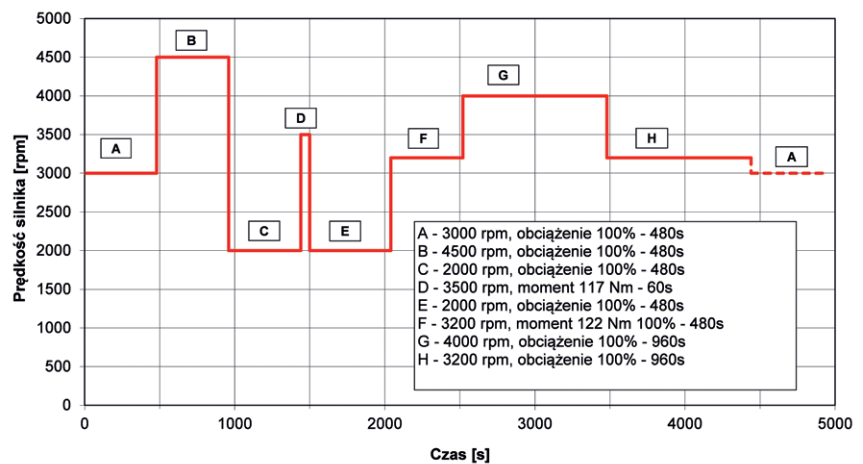
Funkcja	Przykład
Modyfikatory lepkości	Kopolimery olefinowe, poliizobutyleny, polimetakrylany, kopolimery styrenowo-izoprenowe, kopolimery styrenowo-butadienowe
Inhibitory utleniania	Pochodne fenolu, aminy aromatyczne, organiczne związki siarki, fosforyny, związki miedzi, związki boru
Detergenty	Sulfoniany, fenolany, salicylany metali (głównie Ca i Mg)
Dyspergatory	Alkiloowe pochodne fenoli, oligomery poliizobutyleny i etylenu-propylenu z O i N w grupach funkcyjnych
Przeciwzużyciowe (AW)	Alkiloditiofosforany metali, fosforyny, karbaminiany
Przeciwzatarciowe (EP)	Organiczne związki S, P i Cl
Inhibitory korozji	Pochodne kwasu bursztynowego, aminy, fosforany, sulfoniany, tiazole

Zawartość sadzy: monitorowanie tego parametru w trakcie eksploatacji oleju silnikowego pozwala na ocenę efektywności dyspergatorów obecnych w oleju. Ich słaba efektywność może prowadzić do tworzenia się dużych cząstek sadzy (zatykających filtr oleju i kanały olejowe), będących jedną z przyczyn powstawania szlamów w misce olejowej. Wzrost ilości sadzy oleju powoduje wzrost sił tarcia i zwiększenie zużycia współpracujących elementów [5].

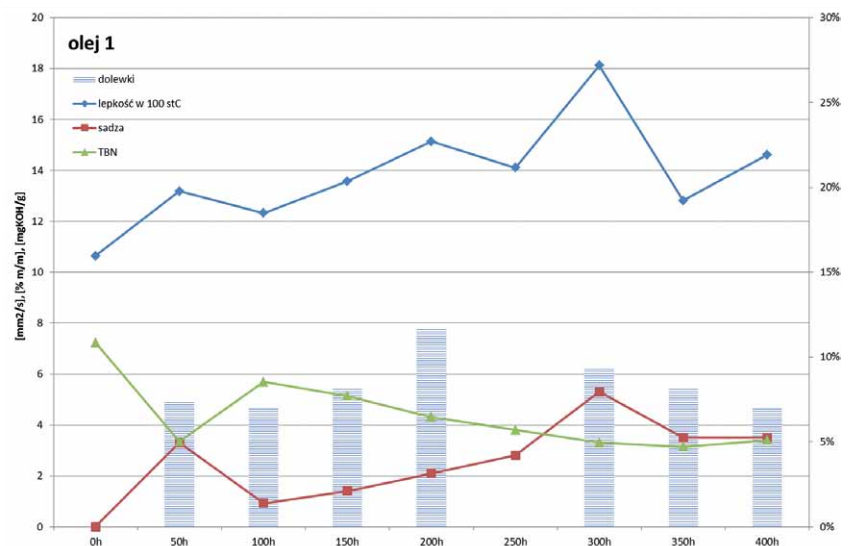
W celu monitorowania jakości oleju silnikowego w trakcie pracy istotne jest również określenie takich parametrów, jak:

- **ilość zanieczyszczeń nierozpuszczalnych/cząstek stałych:** może być problematyczne w przypadku olejów zawierających dużo sadzy, gdy zliczanie cząstek zazwyczaj opiera się na metodach optycznych;
- **liczba kwasowa:** mówiąca o ilości zanieczyszczeń kwaśnych w oleju pochodzących z przedmuchiów spalin lub częściowego utleniania składników oleju z wytworzeniem kwasów organicznych, zwiększenie liczby zasadowej wskazuje na zwiększone ryzyko korozji;
- **spektroskopia w podczerwieni:** pozwala na stwierdzenie obecności sadzy, wody, glikolu i paliwa w próbce oleju, możliwe jest też monitorowanie zmian w ilości produktów degradacji oleju, np. produktów utleniania, azotanów czy siarczanów;
- **zawartość wody:** ilość wody w oleju jest najczęściej oznaczana metodą Karla Fischera (wolumetrycznie lub kulometrycznie), a jej obecność może wynikać z przecieków płynu chłodniczego, kondensacji atmosferycznej, przerywanej pracy silnika oraz obsługi w niskiej temperaturze. Na dokładność oznaczenia ma wpływ m.in. obecność dodatków zawierających siarkę;
- **temperatura zapłonu i rozcieńczenie paliwem:** obecność paliwa w oleju istotnie wpływa na efektywność oleju silnikowego, szczególnie na parametry lepkościowe, i może powodować zagrożenie pożarem.

Dążenie do wydłużenia czasu pracy olejów silnikowych bez istotnych negatywnych skutków dla silnika



Rys. 1. Elementarny cykl testu



Rys. 2. Zestawienie wyników badań dla oleju 1

zaowocowało opracowaniem wielu metod badawczych pozwalających na powtarzalne i odtwarzalne określenie właściwości oleju. Wspólny wysiłek producentów samochodów, paliwa i środków smarowych pozwolił na przestrzeni kilkudziesięciu lat ograniczyć zarówno ilość zużywanego paliwa, jak i – nawet w większym stopniu – ilości środków smarowych. Trzy podstawowe systemy specyfikacji właściwości olejów: trójstronny system API (Ameryka Północna), system ILSAC (Japonia, zbliżony do API) oraz system ACEA (Europa) z czasem stają się coraz bardziej jednolite. W Ameryce trójstronny system API opiera się na pracy ASTM definiującej

metody badawcze i wymagania SAE, wskazującej potrzeby i łączącej zebrane informacje w swoich poradnikach, oraz API, rozwijającej i kontrolującej oznaczenia oraz język komunikacji z użytkownikami. W Europie rolę zbliżoną do amerykańskiego ASTM pełni CEC, przy czym jego aktywność ogranicza się do badań silnikowych. Metody badawcze dotyczące środków smarowych są opracowywane przez instytucje takie, jak Energy Institute (dawniej Institute of Petroleum) czy Niemiecki Komitet Normalizacyjny (DIN). Wymagania jakościowe dotyczące olejów silnikowych są również opracowywane przez producentów samochodów (OEM),

takich jak Volkswagen, GM, Daimler-Benz, Peugeot czy Fiat. W niniejszej pracy skoncentrowano się na analizie wyników uzyskanych w oparciu o wymagania jednej z takich specyfikacji.

2. Opis badań

Badaniom poddano cztery rodzaje olejów silnikowych o podobnej klasie lepkościowej, ale różnych producentów. Badania polegały na przeprowadzeniu 400-godzinnych testów trwałościowych na hamowni silnikowej. Do badań użyto 4 nowych silników o zapłonie samoczynnym, tego samego typu, o pojemności 1,9 l. Elementarny cykl testu trwałościowego trwał 74 min (4440 s) i był powtarzany 325 razy dla osiągnięcia całkowitego czasu 400 godzin. Elementarny cykl pracy silnika w teście przedstawiono na rys. 1.

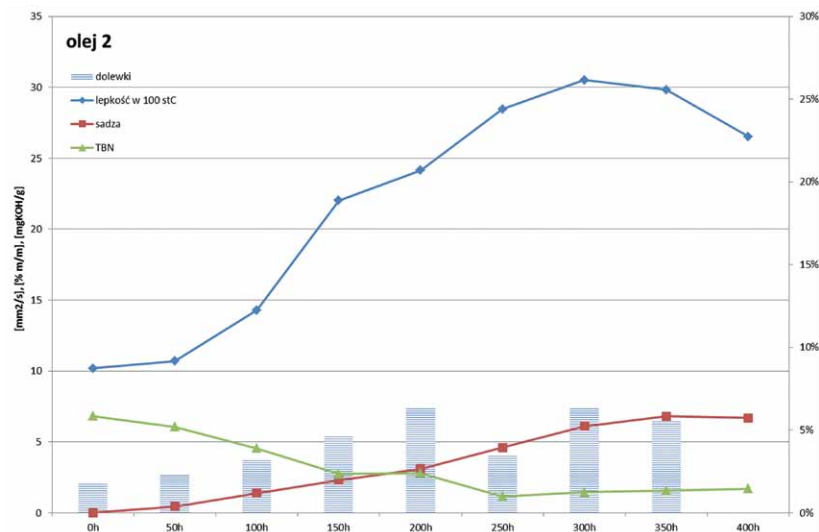
W trakcie testu, co 50 godzin, pobierano próbkę oleju i przeprowadzono analizę chemiczną zmian podstawowych parametrów oleju, jak również ilości zanieczyszczeń. Do analiz użyto następującej aparatury:

- spektrometr emisyjny ICP-OES Optima 4300 DV (Perkin-Elmer, USA);
- waga analityczna (Radwag, Polska);
- lepkościomierz Mini AV-X (Cannon, USA);
- titrator GT-200 (Mitsubishi, Japonia);
- spektrometr FTIR Nicolet 6700 (Thermo, USA).

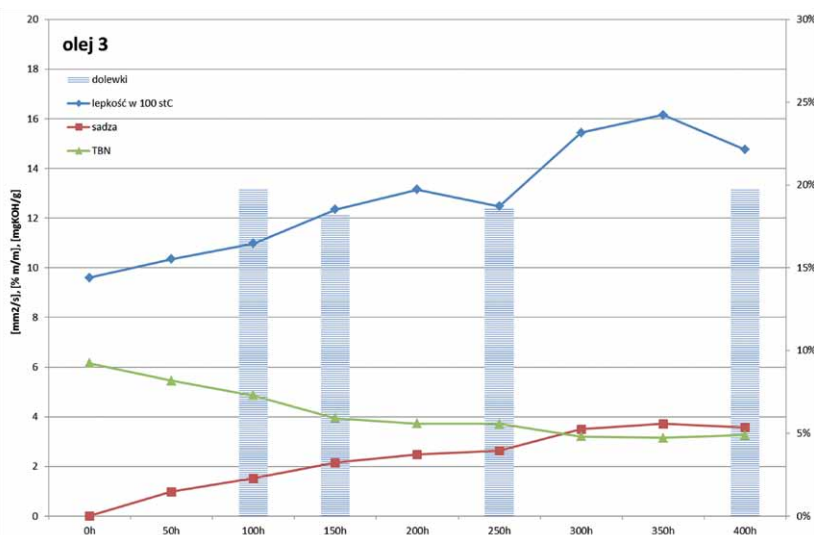
3. Wyniki badań

Zmiany właściwości olejów silnikowych odniesiono do wymagań norm uznanych producentów silników spalinyowych, jak również do doświadczeń własnych, i zaproponowano następujące limity niektórych parametrów oleju: **zawartość sadzy-max. 4[%], Fe-max. 550[ppm], TBN-min. 2,5[mgKOH/g].**

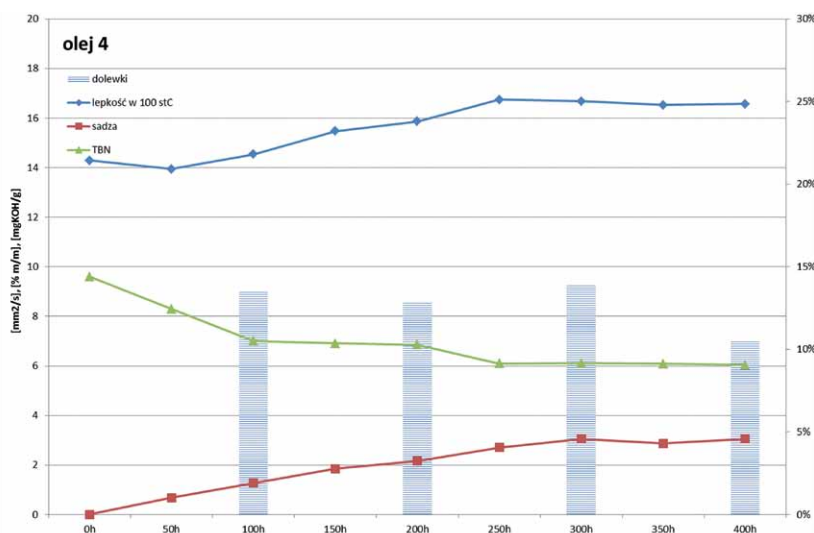
W trakcie próby 400 godzin w oleju 3 i 4 nie została przekroczona zawartości sadzy 4%. Chociaż w pozostałych olejach wartość ta została przekroczona, nie miało to większego wpływu na pracę i zużycie silnika. Zwiększaniu zawartości sadzy w oleju silnikowym w trakcie testu towarzyszy zwiększanie lepkości, przy czym w przypadku oleju 3 i 4 zmiany te występują w największej korelacji. W trakcie eksploatacji widocznie



Rys. 3. Zestawienie wyników badań dla oleju 2



Rys. 4. Zestawienie wyników badań dla oleju 3



Rys. 5. Zestawienie wyników badań dla oleju 4

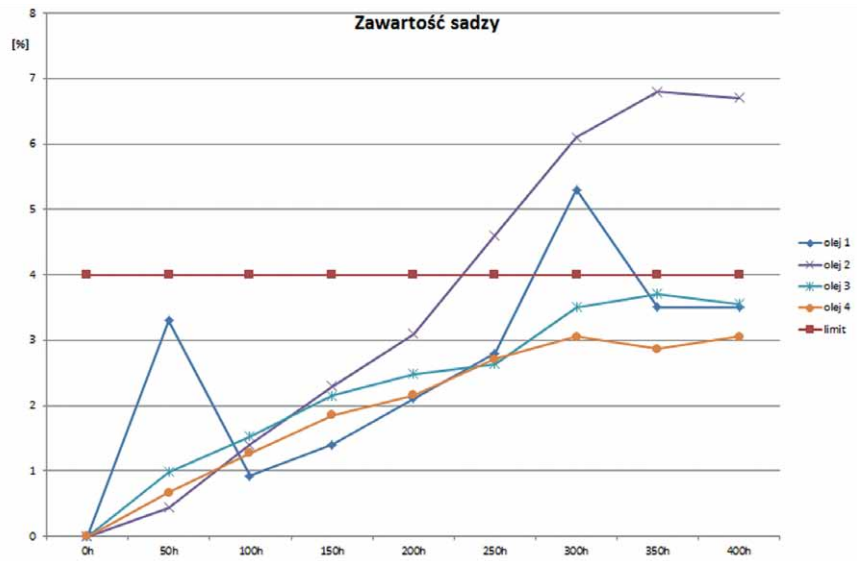
zmniejsza się liczba zasadowa, wskazując na zużywanie się dodatków odpowiadających za neutralizację kwaśnych produktów spalania paliwa oraz degradacji oleju. Na rysunkach 2–5 oprócz zmian lepkości, zawartości sadzy i TBN przedstawiono również wielkość dolewek świeżego oleju w trakcie badań. Porównanie udziału dolewek w całkowitej objętości oleju silnikowego z oznaczonymi właściwościami pozwala na wyciągnięcie wniosków świadczących o poprawie jakości środka smarowego na skutek dodatku jego świeżej porcji. Szczególnie w przypadku oleju 3 i 4 każda z zastosowanych dolewek powodowała zmniejszenie szybkości degradacji oleju, co jest wyraźnie widoczne na podstawie zmian TBN.

Wartość TBN dla olejów 1, 3 i 4 była większa od 3 mgKOH/g. Jedynie dla oleju 2 spadła do wartości 1,16 mgKOH/g. Z tego można wnioskować, że pakiet dodatków uszlachetniających zastosowany w oleju 2 nie zapobiegał degradacji oleju w wystarczającym stopniu. Z kolei pomimo dobrych parametrów lepkości, zawartość sadzy i TBN w oleju 1 zmieniają się w sposób nieregularny. Może to być spowodowane dolewkami oleju lub może świadczyć o pewnych nieprawidłowościach przy współpracy newralgicznych elementów silnika.

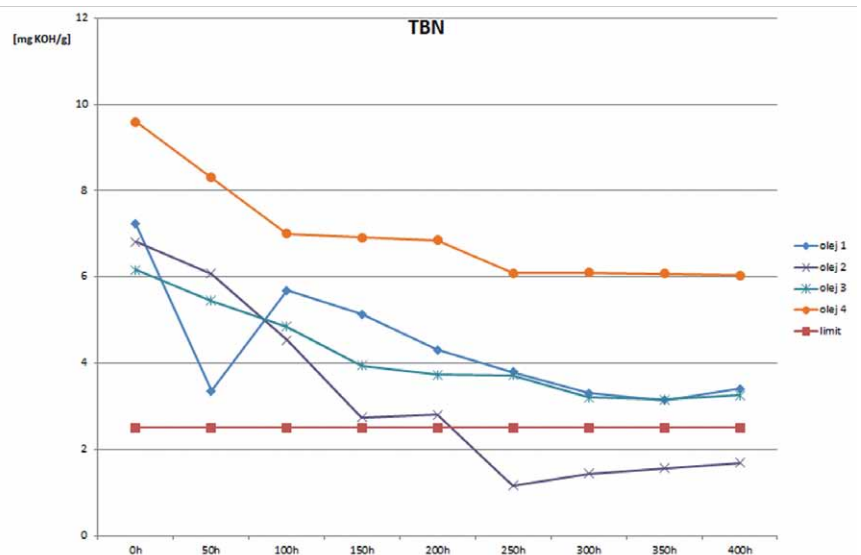
Pomiędzy olejami stwierdzono również znaczące różnice w zmianach stosunku zawartości sadzy do lepkości. Olej 2 wykazuje największy procentowy wzrost lepkości w stosunku do wzrostu zawartości sadzy. W tym oleju odnotowano największy przyrost zawartości sadzy. W oleju 4 natomiast zauważyć można najmniejsze zmiany lepkości, pomimo że przyrost ilości sadzy w olejach 1, 3 i 4 był na podobnym poziomie.

W trakcie próby monitorowano również ilości pierwiastków w oleju. Wyraźny wzrost takich pierwiastków, jak Fe, Al, Cu, Si, Pb, może świadczyć o nieprawidłowej współpracy smarowanych elementów.

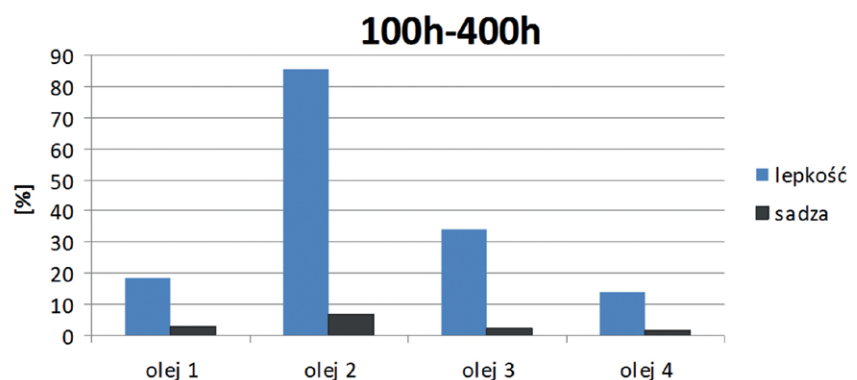
Przyjmując limit dla Fe 550 ppm, stwierdzono, że jedynie w przypadku oleju 1 norma została przekroczona po około 300 godzinach pracy, co może świadczyć o nadmiernym zużyciu elementów takich, jak cylindry, popychacze,



Rys. 6. Zawartość sadzy w olejach w trakcie próby

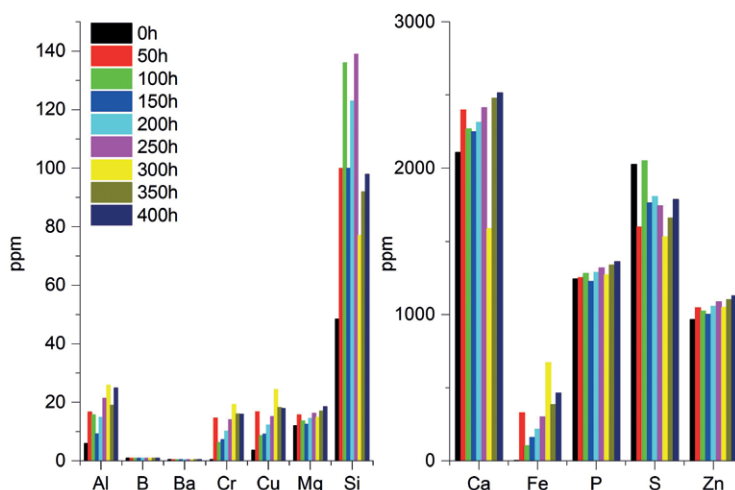


Rys. 7. Wielkość TBN w olejach w trakcie próby

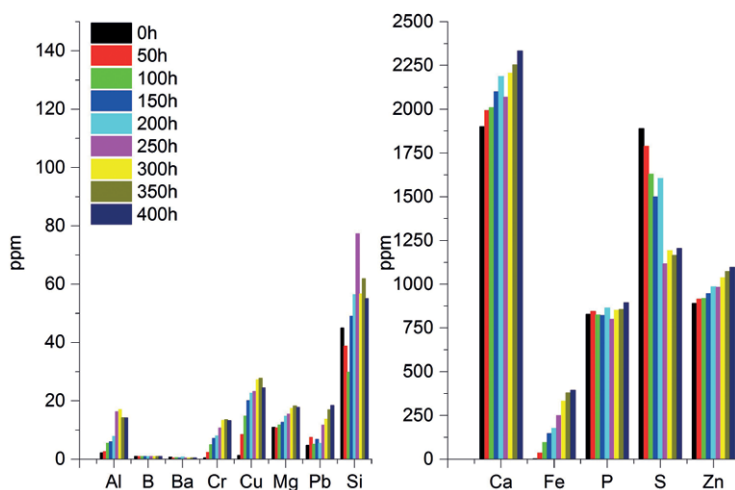


Rys. 8. Porównanie wzrostu lepkości w stosunku do wzrostu zawartości sadzy

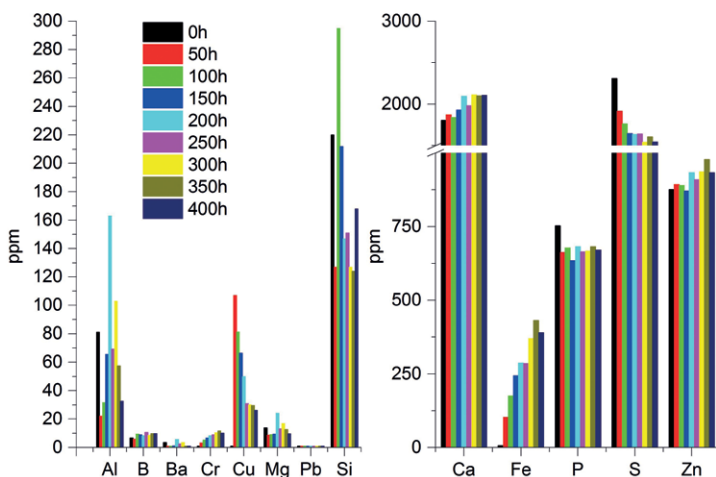
wał korbowy itp. (rys. 9). Znaczny wzrost sadzy w oleju w tym samym czasie może świadczyć o nieprawidłowej współpracy tłoków i pierścieni z tuleją cylindrową. Jednak pomiary metrologiczne po próbie nie potwierdziły jednoznacznie tego zjawiska. Analiza składu pierwiastkowego próbek oleju 1 i 2 jednoznacznie wykluczyła obecność w nich dodatków opartych na borze i barze, a dodatki zawierające wapń były obecne na poziomie zbliżonym do oleju 3. W trakcie badań stanowiskowych stwierdzono znaczące zmniejszenie stężenia siarki w olejach, wskazujące na postępujące zużycie dodatków uszlachetniających. W oleju 2 stwierdzono największy przyrost ilości łożysk pochodzącego najprawdopodobniej z półpanewek łożysk. Natomiast zawartość miedzi mogącej pochodzić również z półpanewek łożysk zwiększyła się znacznie na początku testu w oleju 3, po czym jej zawartość zmniejszała się prawdopodobnie na skutek dolewek świeżego oleju. Zmiany zawartości pozostałych pierwiastków zachodziły w podobny sposób dla wszystkich olejów. Analiza wyników wskazuje, że najlepszy z punktu widzenia eksploatacji wydaje się być olej nr 4, ponieważ przy znacznym zanieczyszczeniu oleju sadzą po 100 i 200 godzinach pracy wzrost wartości lepkości kinematycznej był najmniejszy w stosunku do wzrostu zawartości samej sadzy. Zmiany lepkości w tym oleju przez cały czas były najmniejsze. Zmiany zawartości pierwiastków zużyciowych również świadczą o jego dobrych właściwościach użytkowych, co jest zapewne wynikiem większej zawartości dodatków uszlachetniających. Olej ten charakteryzował się największą zawartością wapnia i siarki. Wartość TBN także odnotowuje najmniejszy spadek dla tego oleju, co oznacza, że jego zdolność do neutralizowania zanieczyszczeń kwaśnych pogorszyła się w znacznie mniejszym stopniu niż w innych olejach. Olej nr 3 zawiera najwięcej dodatków opartych na krzemie (ok. 200 ppm w świeżym oleju) i był jedynym spośród porównywanych zawierającym również dodatki oparte na borze. Pomimo różnic w ilości poszczególnych pierwiastków w olejach pomiary metrologiczne wykonane przed i po próbie wykazały bardzo



Rys. 9. Zmiany zawartości pierwiastków w oleju 1



Rys. 10. Zmiany zawartości pierwiastków w oleju 2



Rys. 11. Zmiany zawartości pierwiastków w oleju 3

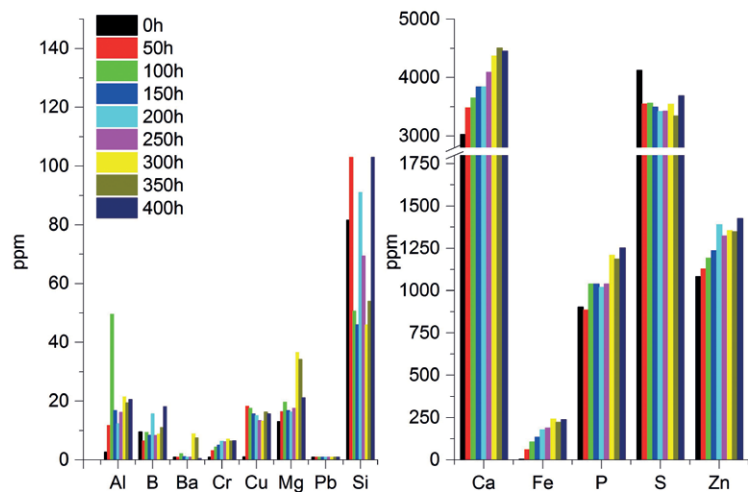
zbliżone wartości zużyć newralgicznych części silnika dla wszystkich czterech silników.

4. Wnioski

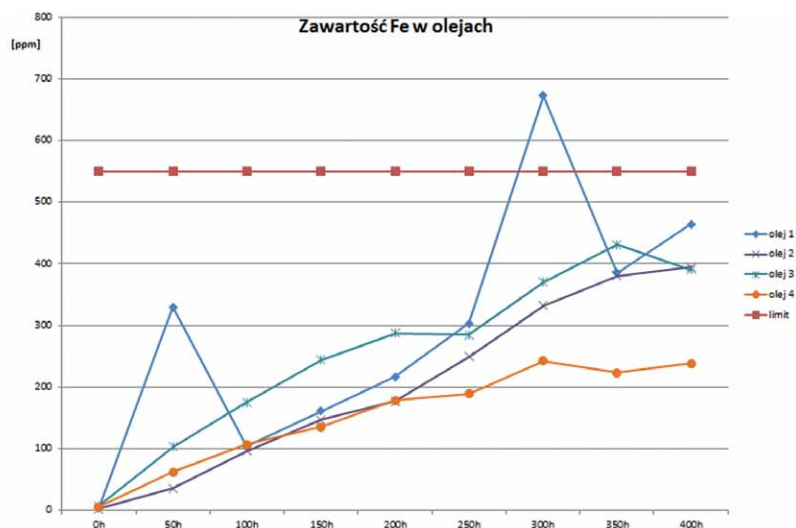
Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że testy olejów silnikowych na stanowiskach hamowanych są szybką i dobrą metodą oceniającą jakość badanego oleju. Czas trwania i przebieg testu powinny być dostosowane do klasy oleju i do rodzaju jego zastosowania w trakcie eksploatacji silnika. Próba 400 godzin potwierdzająca jakość danego oleju może być przeprowadzona na hamowni silnikowej w ciągu jednego miesiąca.

Podstawowymi parametrami służącymi do określenia jakości i przydatności nowego oleju do danego zastosowania są:

- Zawartość sadzy w oleju. Przyjęto wartość graniczną max. 4%, jednak należy przeprowadzić dodatkowe analizy i badania w celu potwierdzenia, czy można zwiększyć tę wartość do 5%.
 - Wartość TBN. Przyjęto wartość graniczną min. 2,5 mgKOH/g. Należy przeprowadzić analizy, czy można zmniejszyć tę wartość do 2 mgKOH/g.
 - Zawartość Fe. Przyjęto wartość graniczną 550 ppm, jednak na podstawie przeprowadzonych badań można zaproponować wartość 500 ppm.
 - Lepkość kinematyczna. Nie powinna się zmienić o 50%. Zjawisko spadku lepkości związane jest głównie z rozrzedzeniem oleju silnikowego olejem napędowym podczas regeneracji filtra DPF oraz ze wzrostem zawartości sadzy. Jeżeli ilość oleju napędowego w oleju silnikowym jest na poziomie do 1%, odnotowujemy wzrost lepkości oleju spowodowany wzrostem ilości sadzy.
 - Nagły wzrost (powyżej 100 ppm) takich pierwiastków, jak Al, Pb, Cu, Sn, Cr, Si, może świadczyć o nieprawidłowej współpracy takich elementów silnika, jak tłoki, pierścienie tłokowe, łożyska.
- Przeprowadzone badania i analizy potwierdziły również starą zasadę, że korzystne są nawet niewielkie dolewki świeżego oleju w trakcie eksploatacji silnika. Dolewki te powodują, że parametry oleju wolniej podlegają degradacji.



Rys. 12. Zmiany zawartości pierwiastków w oleju 4



Rys. 13. Zawartość Fe w olejach w trakcie próby

Literatura

- [1] TOTTEN G.E. [ED.]: *Fuels and lubricants handbook: technology, properties, performance and testing*. ASTM International, 2003
- [2] URZĘDOWSKA W., STĘPIEŃ Z.: *Wybrane zagadnienia dotyczące zmian właściwości silnikowego oleju smarowego w eksploatacji*. NAFTA-GAZ, 12/2012.
- [3] SUCHECKI A., NOWAKOWSKI J., GÓRNA H.: *Rozcieńczanie oleju silnikowego olejem napędowym*. Środki Smarowe 2014, Muszyna.
- [4] MANG T., DRESEL W., [EDS.]: *Lubricants and lubrication*, 2nd Edition, WILEY-VCH Verlag, 2007.
- [5] MRUK A.: *Wpływ obecności sadzy w oleju silnikowym na jego własności tribologiczne*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej z. 7-M/2008.

Andrzej Suchecki – Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL w Bielsku-Białej;
Joanna Śledź – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej;
Krzysztof Brodzik – Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL w Bielsku-Białej