

Stanisław Oleksiak, Magdalena Żóty
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Wybrane metody badań do monitoringu środków smarowych

Wprowadzenie

Środki smarowe w urządzeniach mechanicznych spełniają wiele funkcji. Do podstawowych i najważniejszych należy zaliczyć zmniejszenie tarcia i zużycia. Nie mniej istotna jest ochrona przed korozją, odprowadzanie ciepła i przenoszenie ciśnień w przypadku urządzeń ciśnieniowych. Środki smarowe są niezbędne w wielu obszarach przemysłu, przede wszystkim w ciężkim przemyśle maszynowym, silnikach i w energetyce. Oleje smarowe składają się głównie z dwóch grup składników: oleju bazowego, który stanowi trzon, oraz z pakietu dodatków poprawiających i utrzymujących dobre właściwości oleju bazowego [5]. Każdy środek smarowy ulega starzeniu, dlatego musi być okresowo wymieniany. Dominującym procesem starzenia, bezpośrednio wpływającym na okres użytkowania środka smarowego, jest utlenianie. Czynnikiem sprzyjającymi tym procesom są temperatura, obecność wody i metalicznych katalizatorów (metale pochodzące ze zużycia). Produkty starzenia oleju prowadzą w efekcie do powstawania szlamów, nagarów i laków. Analizie zwykle poddawane są nie tylko zmiany właściwości oleju wynikające z procesów starzenia, ale również obecność zanieczyszczeń dostających się do niego, głównie w wyniku procesów

żużyciowych. Okres użytkowania oleju jest ściśle związany z zawartością antyutleniacza. Monitoring środków smarowych pozwala m.in. na określenie ubytku dodatków antyutleniających w eksploatowanych środkach smarowych. Spośród najnowszych metod tego monitoringu na uwagę zasługują: ocena pozostałego okresu użytkowania (*Remaining Useful Life Evaluation Routine* – RULER), pozwalająca na określenie poziomu zawartości antyutleniacza z wykorzystaniem metody woltametrycznej, oraz kolorymetria sączka membranowego (*Membrane Patch Colorimetry* – MPC), wykrywająca nierozpuszczalne osady przy użyciu analizy widmowej. Uzupełnieniem informacji o stanie środka smarowego może być pomiar zawartości produktów ferromagnetycznych powstałych na skutek zużycia mechanicznego, takich jak żelazo i nikiel, w próbkach olejów i smarów z eksploatacji. Metoda ta opiera się na pomiarze zniekształcenia pola magnetycznego przy użyciu specjalnej aparatury, a wyniki przedstawiane są jako PQ Index. Istotne informacje o środku smarowym można uzyskać także z pomiaru rozkładu wielkości zanieczyszczeń. Aparat wykorzystujący układ laserowo-optyczny pozwala otrzymać dokładny profil rozkładu wielkości cząstek.

Degradacja środka smarowego

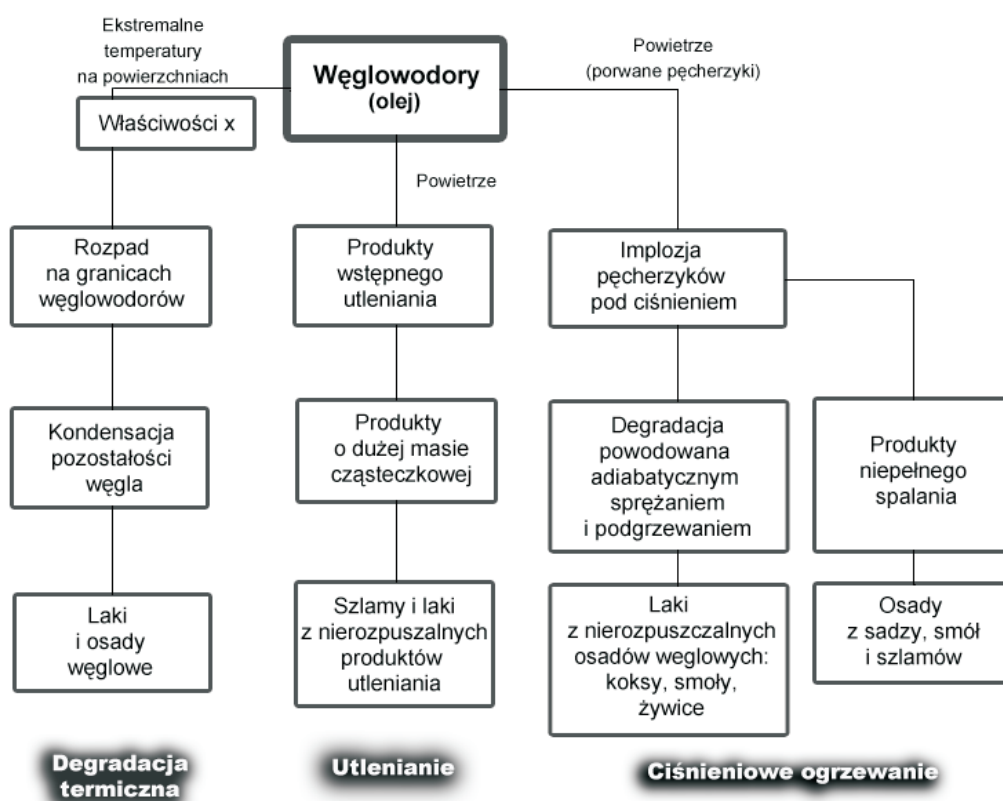
Degradacja środków smarowych prowadzi do korozji, zmiany lepkości oraz formowania się szlamów i laków. Zmiana lepkości i korozja przyczyniają się do zmian warunków eksploatacji, które z kolei mogą doprowadzić do uszkodzenia mechanizmów maszyn i urządzeń. Osady zakłócają przepływ oraz powodują przyspieszone zużycie i korozję. Za trzy główne przyczyny niszczenia środka sma-

rowego uważa się degradację termiczną i ciśnieniową oraz utlenianie (rysunek 1). Starzenie w wyniku utleniania jest jednak procesem dominującym, bezpośrednio wpływającym na okres użytkowania środka smarowego [1]. Produkty utleniania ulegają reakcjom polimeryzacji, a powstałe w ich wyniku substancje wielkocząsteczkowe wytrącają się, aglomerują i zbierają na powierzchniach metalowych.

Termiczna i ciśnieniowa degradacja oleju bazowego

Termiczna albo ciśnieniowa degradacja środka smarowego zachodzi wówczas, gdy styka się on z gorącymi powierzchniami maszyn. Może się to również zdarzyć w przypadku nagłego i szybkiego wzrostu temperatury w połączeniu z adiabatycznym sprężeniem pęcherzyków powietrza w łożyskach, pompach i innych obszarach zwiększonego ciśnienia. Warstwa oleju, która styka się z gorącą powierzchnią elementów maszyny lub ze sprężonymi pęcherzykami powietrza, może ulegać różnorodnym

zmianom chemicznym. Dla zapoczątkowania degradacji termicznej wymagana jest temperatura powyżej 200°C. Natomiast w przypadku degradacji ciśnieniowej wymagany jest niewielki wzrost ciśnienia o 250 psi powyżej ciśnienia atmosferycznego, dzięki czemu możliwy będzie wzrost temperatury z 37°C do 200°C. Jedną z pierwszych oznak degradacji termicznej środka smarowego jest zmiana jego koloru, związana z formowaniem się nierozpuszczalnych produktów ubocznych w nim zawieszonych [1, 4].



Rys. 1. Główne procesy degradacji oleju [1]

Utlenianie

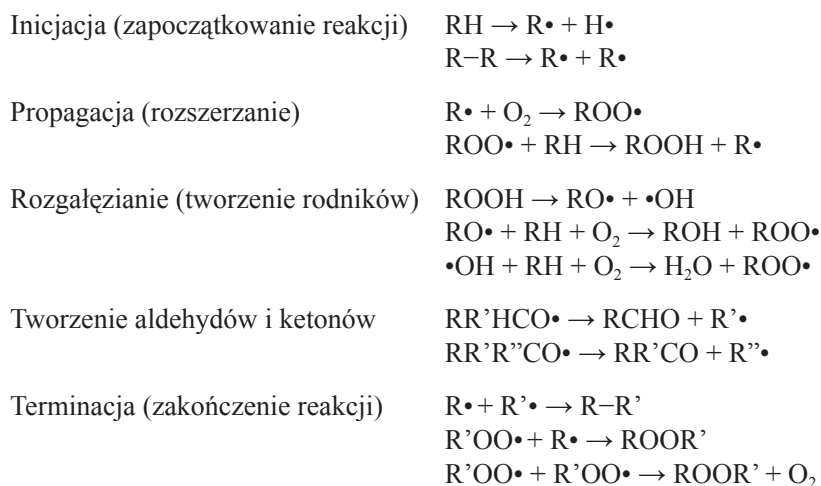
Utlenianie jest najbardziej powszechną reakcją chemiczną prowadzącą do degradacji środka smarowego, następującej w wyniku działania tlenu na cząsteczkę węglowodoru. Jego konsekwencją jest powstawanie wielu związków chemicznych, takich jak: aldehydy, ketony, wodoronadtlenki i kwasy karboksylowe. Procesy utleniania mogą być zatrzymane lub spowolnione dzięki zastosowaniu przeciwutleniaczy. Do momentu ich wyczerpania reakcja przebiega stopniowo i w łagodnych warunkach. Po tym czasie zaczyna postępować intensywnie, co powoduje zmiany chemiczne, mające stały wpływ na degradację oleju.

Istnieje szereg czynników, które przyspieszają procesy utleniania. Należą do nich woda, metale (takie jak żelazo i miedź), substancje zanieczyszczające i zwiększona aercja. Prawdopodobnie najbardziej krytycznym czynnikiem jest jednak temperatura.

Jak w wielu reakcjach chemicznych, również szybkość utleniania wzrasta wraz ze wzrostem temperatury. Zgodnie z regułą van't Hoffa wzrost temperatury o 10 K powoduje 2- do 4-krotny wzrost szybkości reakcji. Reguła ta jest spełniona dla reakcji homogenicznych w temperaturze do 500°C [1, 2].

Mechanizm utleniania olejów

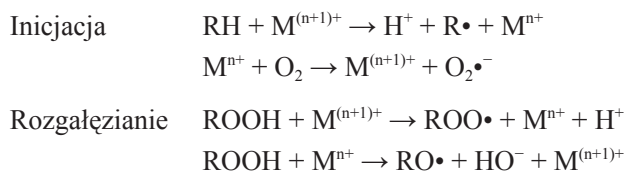
Mechanizm utleniania składa się z czterech etapów: inicjacji, propagacji, rozgałęziania i terminacji, co schematycznie przedstawiono poniżej [2, 14]:



Inicjacja reakcji utleniania jest wynikiem dostarczenia energii do cząsteczki węglowodoru, m.in. w formie ciepła, naprężeń ścinających i światła UV. Proces może być katalizowany przez jony metali. W temperaturze pokojowej szybkość reakcji jest bardzo mała, ale zdecydowanie wzrasta ona powyżej temperatury 100°C. Łatwość tworzenia się rodników zależy od siły wiązań C-H, C-C i stabilności powstających rodników. W fazie propagacji rodniki alkilowe reagują nieodwracalnie z rozpuszczonym w oleju tlenem i tworzą nadtlenkowe rodniki alkilowe. Kolejną reakcją tworzenia wodoronadtlenków i innych rodników alkilowych jest usunięcie atomu wodoru z czą-

steczki węglowodoru. Następstwem tego jest rozgałęzienie łańcucha. Wodoronadtlenki rozszczepiają się na rodniki alkoksyłowe i hydroksyłowe. Energia aktywacji tych reakcji jest wysoka i dlatego zachodzą one w temperaturze powyżej 150°C. Rodniki reagują z węglowodorami, tworząc wodę, alkohole i coraz więcej rodników alkoksyłowych. Drugo- i trzeciorzędowe rodniki alkoksyłowe tworzą aldehydy i ketony, które łączą się w reakcji kondensacji aldolowej katalizowanej kwasami. Produkty kondensacji mogą polimeryzować, co prowadzi do dalszej degradacji, tworząc szlamy i laki. Połączenie rodników powoduje zakończenie tych reakcji. Dwa rodniki alkilowe mogą utworzyć cząsteczkę węglowodoru, a rodnik alkilowy może wiązać się z nadtlenkowym rodnikiem alkilowym, dając nadtlenek i dwa nadtlenkowe rodniki alkilowe – nadtlenek i tlen.

W przypadku obecności metali takich jak żelazo i miedź inicjacja reakcji może nastąpić w znacznie niższej temperaturze. Jony metali mogą również katalizować reakcję rozgałęziania. Obie reakcje pokazano poniżej [14]:



Ocena pozostałego okresu użytkowania, RULER – ASTM D 6971 i ASTM D 6810

Ocena pozostałego okresu użytkowania, ogólnie znana pod nazwą RULER, jest voltametryczną metodą pozwalającą, poprzez pomiar poziomu zawartości antyutleniaczy, ocenić możliwość dalszego stosowania środka smarowego. Próbkę o objętości 200÷400 µl umieszcza się w naczynku pomiarowym zawierającym odpowiedni elektrolit i warstwę piasku. Podczas wstrząsania fiolki antyutleniacze fenolowe, aminowe i inne rozpuszczalne w elektrolicie składniki oleju ekstrahowane są do cieczy testowej. Kropelki oleju aglomerują się w piasku i opadają na dno. Przez naczynko pomiarowe przepuszcza się wzrastające liniowo napięcie. Podczas jego wzrostu na powierzchni elektrody następuje utlenianie elektroaktywnych cząstek



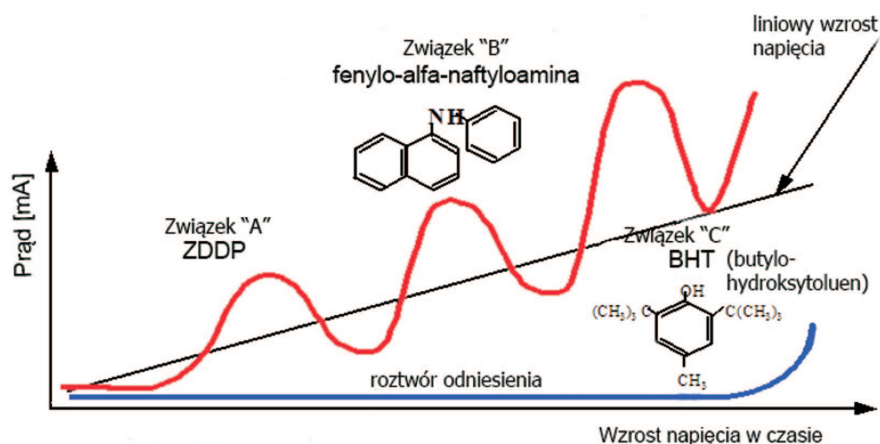
Fot. 1. Aparat RULER CE520 firmy Fluitec

(tj. dodatków fenolowych i aminowych), co prowadzi do wzrostu natężenia prądu.

Aparat RULER CE 520 (fotografia 1) przedstawia tę zależność w formie wykresu natężenia prądu od czasu, gdzie jednej sekundzie odpowiada wzrost napięcia o 0,1 V. Podczas wzrostu potencjału następuje spadek stężenia aktywnych cząstek na powierzchni elektrody i wykładniczy wzrost szyb-

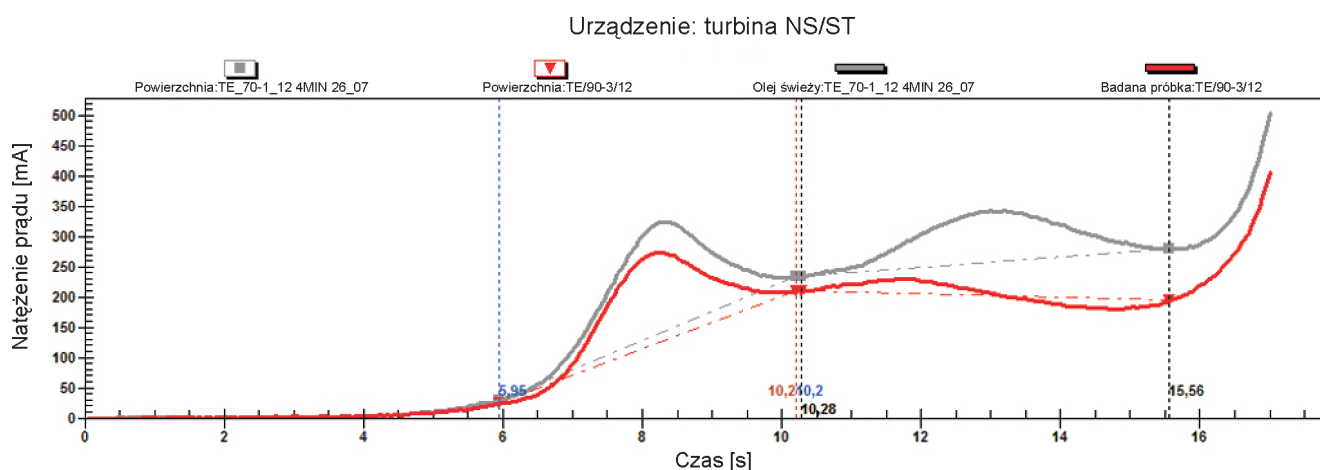
kości utleniania do momentu osiągnięcia maksimum na krzywej voltametrycznej. Poszczególne antyutleniacze reagują przy różnych wartościach napięcia, dzięki czemu możliwe jest ich rozróżnienie (rysunek 2) [6, 10, 11].

Krzywa uzyskana dla świeżego oleju stanowi odniesienie, dla którego zawartość antyutleniaczy wynosi 100%. Z kolei krzywa wyznaczona dla czystego elektrolitu używana jest jako odniesienie o wartości 0%, ponieważ nie zawiera on żadnych dodatków. W metodzie tej mierzy się powierzchnię pod każdym pikiem krzywej, a następnie jest ona porównywana z powierzchnią wyznaczoną dla próbki świeżego oleju (rysunek 3). Jeżeli maksymalna powierzchnia pod pikiem dla oleju badanego jest o połowę mniejsza od powierzchni dla oleju świeżego, przyjmuje się, że dla tego przeciwutleniacza wynik wynosi 50% RUL.



Rys. 2. Krzywa zależności zmian napięcia w czasie od natężenia prądu dla różnych typów antyutleniaczy

Oprogramowanie RULER pozwala również zmierzyć całą powierzchnię pod krzywą, co umożliwia określenie całkowitej elektrochemicznej aktywności oleju, a nie tylko pojedynczego dodatku. Wynik ten jest także odnoszony do próbki wzorcowej i podawany w procentach [12].



Rys. 3. Przykład wykresu zależności natężenia prądu od czasu uzyskanego w INiG dla oleju turbinowego świeżego (kolor szary) i po kilkuletniej eksploatacji (kolor czerwony)

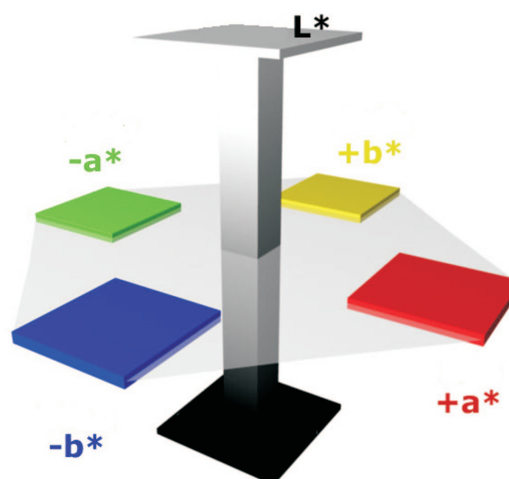
Kolorymetria sączka membranowego, test MPC

Pierwszym fizycznym objawem degradacji środka smarowego jest tworzenie się ekstremalnie małych (rzędu części mikrometra) cząstek zanieczyszczeń. Mogą one powstawać w wyniku degradacji olejów bazowych, ale często pierwsze tego typu cząstki powstają z degradacji antyutleniaczy. Testy rozkładu wielkości cząstek zanieczyszczeń, które uwzględniają cząstki większe niż 4 μm , nie wykrywają cząstek o takich rozmiarach. Kolorymetria sączka membranowego, tzw. test MPC, okazała się najbardziej obiecującą metodą identyfikacji produktów degradacji środków smarowych.

Test MPC to metoda pozwalająca na ocenę zawartości nierozpuszczalnych zanieczyszczeń w eksploatacyjnym oleju z wykorzystaniem analizy widmowej. Badanie rozpoczyna się od przygotowania próbki. Badany olej o objętości 50 ml jest dokładnie mieszany z taką samą ilością heptanu (benzyny ekstrakcyjnej). Heptan, który jest rozpuszczalnikiem niepolarnym, rozpuszcza się w oleju bazowym, przez co zmniejsza się zdolność jego rozpuszczania. Obecne w oleju polarne substancje zanieczyszczające (np. produkty utleniania) ulegają aglomeracji i wytrącają się z oleju. Mieszanina jest następnie filtrowana



Fot. 2. Aparat iLab F 475 do analizy widmowej MPC firmy Fluitec

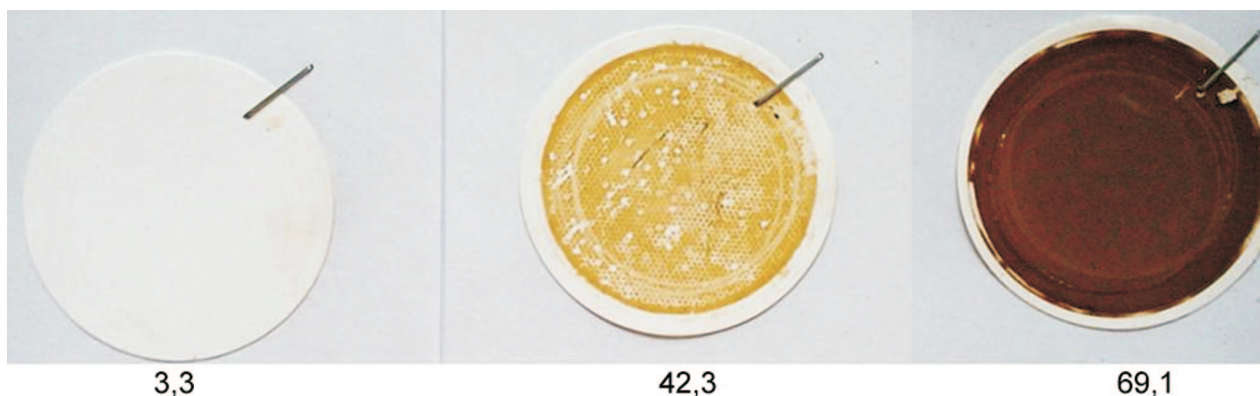


Rys. 4. Przestrzeń barw CIE Lab (ASTM E 308) [16]

przez celulozowy sącze membranowy o średnicy porów $0,45 \mu\text{m}$, pod ciśnieniem 71 kPa . Po tym procesie sącze dwukrotnie przepłukuje się heptanem. Następnie jest on suszony przez 3 godziny w temperaturze 80°C . Kolejny etap stanowi analiza widma sącza z zanieczyszczeniami. Przed rozpoczęciem badania właściwego sącza należy dokonać pomiaru tła odniesienia, które stanowi świeży (nieużywany), suchy filtr celulozowy. Wartości otrzymane dla sącza, na którego powierzchni znajdują się zanieczyszczenia z badanej próbki oleju, odnoszone są do wyników otrzymanych dla czystego filtru [8]. Aparat iLab F 475 automatycznie dokonuje analizy widm badanych próbek poprzez przetransponowanie wyników do ortogonalnego systemu kolorów o nazwie CIE Lab (rysunek 4). System ten oparty jest na trzech wektorach: L^* = luminancja (jasność; jej niska wartość wskazuje na wysokie zaciemnienie filtru), a^* = barwa od koloru czerwonego do zielonego, na której wartość wpływa korozja i degradacja dodatków EP oraz b^* = barwa od koloru niebieskiego do żółtego, która wskazuje na degradację antyutleniaczy i komponentów oleju bazowego.

W wyniku porównania dwóch kolorów w systemie CIE Lab obliczana jest wartość CIE dE (różnica odległości pomiędzy barwami). W teście MPC wartość CIE dE nazywana jest indeksem MPC. Indeks ten jest wielkością bezwymiarową, a jego wartość mieści się w granicach pomiędzy 1 a 100 i im jest ona wyższa, tym ryzyko powstania osadów jest większe. Test MPC daje bezpośrednią korelację między kolorem nierozpuszczalnych zanieczyszczeń, a stopniem degradacji oleju. Metoda identyfikuje miękkie substancje zanieczyszczające, które bezpośrednio przyczyniają się do degradacji oleju. Większe, twarde substancje zanieczyszczające, niezwiązane z degradacją oleju, nie wpływają w istotny sposób na wyniki testu. Zasadniczo przyjmuje się, że wartość indeksu MPC równa 35 stanowi poziom alarmowy.

Poniżej (fotografia 3) przedstawiono kilka przykładów badanych sączków wraz z odpowiadającymi im wartościami indeksu MPC. Procedura badawcza dla metody MPC nie została jeszcze opublikowana przez ASTM, jednakże istnieje już gotowy projekt, który oczekuje na zatwierdzenie [7, 9].



Fot. 3. Sączi poddane analizie za pomocą aparatu iLab F 745 wraz z odpowiadającymi im wartościami indeksu MPC

PQ Index

Pomiar zawartości metali ferromagnetycznych w środkach smarowych za pomocą aparatu Analex pql opiera się na zjawisku zniekształcenia pola magnetycznego. Głowica pomiarowa aparatu zawiera dwie cewki: pomiarową i wzorcową, pozostające w równowadze magnetycznej. Jeżeli badana próbka zawiera cząstki ferromagnetyczne, oddziałują one na rdzeń cewki pomiarowej, wzmacniając jej pole magnetyczne. Efektem jest indukcja cewki wzorcowej. Sygnał z zakłócenia równowagi magnetycznej jest wzmacniany, filtrowany i wyświetlany jako bezwymiarowy parametr PQ Index.

Metoda ta znalazła zastosowanie zarówno do określania zawartości cząstek ferromagnetycznych w próbkach olejów, jak i w smarach plastycznych. W celu określenia ich zawartości w eksploatowanym środku smarowym przed rozpoczęciem badania należy pozostawić analizowaną próbkę bez wytrząsania do czasu, aż większe cząsteczki opadną na dno naczynia pomiarowego. Aparat zlicza wszystkie magnetyczne składniki zużycia w badanej próbce. Nie jest jednak czuły na ich rozmiar. Wysoki poziom metalicznego ściaru wyrażony jest poprzez wysoką wartość PQ Index i odwrotnie – dla niskiego poziomu cząstek ferromagnetycznych jego wartość jest niska. Przyjmuje się, że jeżeli PQ Index nie przekracza wartości 25, mamy do czynienia z normalnym procesem zużycia podczas eksploatacji. Wyniki otrzymane metodą PQ są bardzo często uzupełnieniem informacji uzyskanych dzięki metodzie AES (spektroskopia emisji atomowej), która bywa niedokładna



Fot. 4. Aparat Analex pql do oznaczania PQ Index firmy Kittiwake

z uwagi na jej wrażliwość na duże cząstki i problemy wynikające z braku homogeniczności badanej próbki. Porównanie wyników analizy powyższych metod pozwala na uzyskanie dodatkowych informacji. Gdy zawartość cząstek ferromagnetycznych wyrażona w mg/kg jest wysoka, a wartość indeksu PQ niska, oznacza to, że obecność ich jest efektem korozji. Zależność ta wynika z faktu, iż składniki rdzy mają niewielkie właściwości magnetyczne i przez to dają niskie wartości indeksu PQ. Z kolei wysoka wartość indeksu PQ, przy jednoczesnej niskiej zawartości Fe i Ni zmierzonej metodą AES, wskazuje na intensywne procesy niszczenia warstw wierzchnich, np. *fretting* [17].

Rozkład wielkości cząstek zanieczyszczeń

Pomiar z zastosowaniem automatycznego licznika cząstek jest nieocenioną metodą aktywnego (czynnego) monitoringu środków smarowych, pozwalającą upewnić się, czy nie nastąpiło zwiększenie zużycia ściernego łożysk, ocenić wypełnienie filtra i określić, czy ciecze hydrauliczne są wystarczająco czyste, aby pracować niezawodnie. W połączeniu z pozostałymi, rutynowymi metodami badawczymi, pomiar ten pomaga określać różnicę pomiędzy zabrudzonym olejem a zużytym, zawierającym nadmierną ilość zanieczyszczeń. Wykorzystywany jest do badania klasy czystości olejów hydraulicznych, przekładniowych, silnikowych, turbinowych, izolacyjnych oraz rozpuszczalników. Najczęściej stosowanym sposobem zapisywania klasy czystości płynów jest system kodowania ISO według normy ISO 4406:2005 [3, 8, 15], określającej kod stosowany do oznaczenia liczby cząstek stałych w cieczy

roboczej. Jego celem jest uproszczenie oznaczenia danych dotyczących liczby cząstek, poprzez przekształcenie liczby cząstek w klasy o szerokich zakresach lub kody, gdzie zwiększenie kodu o jeden oznacza zazwyczaj podwojenie poziomu zanieczyszczeń (dla liczby skali 22 liczba cząstek w 100 ml cieczy roboczej mieści się w zakresie pomiędzy 2 000 000 a 4 000 000, a dla liczby skali 23 zakres ten wynosi od 4 000 000 do 8 000 000 cząstek). System ten składa się z trzech liczb skali (>4 µm, >6 µm, >14 µm w 100 ml cieczy roboczej), które umożliwiają zróżnicowanie wymiaru i rozkładu wymiarowego cząstek [13]. Automatyczny licznik cząstek (fotografia 5) jest układem laserowo-optycznym gwarantującym wysoką precyzję, co wynika z zastosowania wolumetrycznej cewki pomiarowej o unikalnej konstrukcji i odpowiednio dobranych pozostałych komponentów układu pomiarowego.



Fot. 5. Automatyczny licznik cząstek, typ SBSS, firmy PAMAS

Działanie automatycznego optycznego licznika cząstek oparte jest na metodzie wykorzystującej laser półprzewodnikowy o maksymalnej mocy 5 mW i długości fali 670 nm. Dioda lasera, wbudowana w zamknięty element czujnika, który znajduje się wewnątrz urządzenia, należy do klasy 3R i emituje promieniowanie widzialne. Promień lasera emitowany jest wewnątrz długiej rurki i nie może się wydostać na zewnątrz obudowy czujnika

podczas żadnego z etapów pomiaru. Każda cząsteczka przechodząca przez czujnik zostaje wykryta i zliczona. Możliwe jest zaprogramowanie do 32 kanałów (wielkości cząstek), dzięki czemu uzyskuje się dokładny profil rozkładu wielkości cząstek. W urządzeniach wyposażonych w laser rozproszenie niezatrzymanego promienia lasera uderzającego o cząsteczki jest minimalne. Rozproszone promienie lasera uderzają w fotokomórkę. Zmiana napięcia wzdłuż fotokomórki jest wprost proporcjonalna do wielkości cząstek. Odpowiednie oprogramowanie komputerowe umożliwia obserwację trendu w zanieczyszczeniach olejów, co pozwala odpowiednio szybko i właściwie reagować na nietypowe zmiany [18].

Dzięki automatycznemu licznikowi cząstek można dokonywać rutynowej kontroli olejów pracujących w układach (wraz z określeniem ich poziomu czystości) i szybkiej identyfikacji zużytych lub uszkodzonych filtrów, sprawdzać czystość świeżych olejów, zapewnić utrzymanie w czystości uszczelek i odpowietrzników, układów po naprawach, określić czas przydatności filtrów oraz czas zużycia łożysk maszyn, a także oznaczać produkty rdzy i korozji. Do istotnych cech aparatu należy programowane, pneumatyczne pobieranie próbki o objętości od 5 ml do 1000 ml, możliwość pomiaru w 8, 16 i 32 kanałach oraz stały przepływ próbki z dokładnym sterowaniem [18]. Automatyczny licznik cząstek dostarcza dużej ilości informacji na temat badanych olejów, przy stosunkowo niskiej cenie badania.

Podsumowanie

Serwis olejowy zapewnia najbardziej optymalne warunki smarowania maszyn i urządzeń, przy możliwie najniższych kosztach tych działań. Dobrze zaplanowany i dostosowany program analiz olejowych pozwala na kompleksowe rozwiązanie problemów związanych ze smarowaniem maszyn i urządzeń, określenie stanu środka smarowego, a pośrednio również stanu technicznego danego urządzenia. Stanowi znakomite narzędzie w utrzymaniu ruchu. Jest pewnego rodzaju systemem bardzo wczesnego ostrzegania. Analizy olejowe nie zastępują innych metod diagnostycznych, ale znakomicie je uzupełniają. W przypadku pojazdów samochodowych monitoring właściwości olejów jest nieocenionym narzędziem pozwalającym na wyeliminowanie możliwości wystąpienia poważnych awarii silnika jeszcze w okresie, kiedy mamy do czynienia

jedynie z podwyższonym zużyciem elementów. Monitoring środków smarowych pozwala na:

- wydłużenie trwałości i zmniejszenie awaryjności urządzeń,
- wydłużenie okresów eksploatacji środków smarowych,
- prostsze uzyskiwanie informacji o stanie technicznym maszyn,
- ograniczenie kosztów eksploatacji,
- identyfikację przyczyn źródłowych potencjalnych awarii (woda, kurz, pył, ścier itp.).

Monitoring środków smarowych u użytkownika jest nierozłączną częścią systemu eksploatacji maszyn i urządzeń zorientowanego na optymalną niezawodność, skupiającego wiele narzędzi diagnostycznych umożliwiających ciągły nadzór eksploatowanych urządzeń.

Literatura

- [1] Barnes M.: *The Lowdown on Oil Breakdown*. „Practicing Oil Analysis” 2003, May/June.
- [2] Cobb T. W., Gatto V. J., Moehle W. E., Schneller E. R.: *Oxidation Fundamentals and its Application to Turbine Oil Testing*. „Journal of ASTM International” 2006, vol. 3, issue 4.
- [3] Corporation N.: *Particle Counting – Oil Analysis 101*. „Practicing Oil Analysis” 2002, July.
- [4] Fitch J. C., Gebarin S.: *Sludge and Varnish in Turbine Systems*. „Practicing Oil Analysis” 2006, May/June.
- [5] Govender M.: *You’re only as old as antioxidants say you are – Predicting the remaining useful life of your lubricant*. „WearCheck Technical Bulletin” 2009.
- [6] Herguth W. R., Phillips S.: *Comparison of Common Analytical Techniques to Voltammetric Analysis of Antioxidants in Industrial Lubricating Oils*. STLE 1994, Annual Meeting Kansas City.
- [7] Johnson M., Spurlock M.: *Strategic Oil Analysis, Estimating Remaining Lubricant Life*. „Tribology & Lubrication Technology” 2010.
- [8] Johnson M., Spurlock M.: *Strategic Oil Analysis: Setting the Test Slate*. „Tribology and Lubrication Technology” 2009, no. 5.
- [9] Livingstone G. J., Prescott J., Wooton D.: *Determining the Root Causes of Fluid Degradation*. „Practicing Oil Analysis” 2007, January.
- [10] Norma ASTM D 6971 *Standard Test Method for Measurement of Hindered Phenolic and Aromatic Amines Antioxidant Content in Non Zinc Turbine Oils by Linear Sweep Voltammetry*, 2009.
- [11] Norrby T., Pach M., Zobel H. K.: *Evaluation and Comparison between Oxidation Stability Test Method for Turbine Oils*. „Journal ASTM International” 2006.
- [12] Operation and Instruction Manual Version 2.0: *R-DMS 2 RULER Data Management Software*. Fluitec International.
- [13] Polska Norma PN-ISO 4406:2005 *Napędy i sterowania hydrauliczne. Ciecze robocze. Metoda kodowania poziomu zanieczyszczeń w postaci cząstek stałych*.
- [14] Rudnick L.: *Lubricant Additives Chemistry and Applications*. Second Edition, CRC Press 2008.
- [15] Spurlock M., Corporation N.: *Particle Counting or Ferrous Density ... or Both?* „Practicing Oil Analysis” 2006, November.
- [16] www.gamafix.lt/duk/37-spalvu-valdyme-naudojami-terminai-ir-trumpiniai/73-cielab.html, dostęp: lipiec 2012 r.
- [17] www.oelcheck.de/en/oil-analysis-tests/pq-index.html, dostęp: kwiecień 2012 r.
- [18] www.tusnovics.cc.pl/current/files/259/1255864035.pdf, dostęp: kwiecień 2012 r.



Dr inż. Stanisław OLEKSIĄK – absolwent Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej. Adiunkt, kierownik Zakładu Oceny Właściwości Eksploatacyjnych Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Realizuje prace badawcze z zakresu oceny właściwości użytkowych paliw silnikowych i środków smarowych. Autor około 80 publikacji.



Mgr inż. Magdalena ŻÓŁTY – specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Oceny Właściwości Eksploatacyjnych Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Absolwentka Politechniki Krakowskiej, Wydziału Inżynierii i Technologii Chemicznej, specjalności Technologia Ropy i Gazu.