

Wpływ sadzy na proces żelowania oleju silnikowego

Influence of the soot on the gelation process of the engine oil

Monika Ziółkowska

Przemysłowy Instytut Motoryzacji

STRESZCZENIE: Sadza wytworzona w silnikach może być przyczyną powstawania ciężkich osadów, gwałtownego wzrostu lepkości oleju smarowego lub żelowania oleju. nierozpuszczalne cząstki sadzy, które nagromadziły się na pierścieniach tłoka, a potem znalazły się w oleju mogą również zwiększać lepkość oleju smarowego. W olejach smarowych stosowanych w silnikach wysokoprężnych, w skład osadów nierozpuszczalnych wchodzi: sadza, węglowodory i popiół. Generalnie osady nierozpuszczalne nie wywołują znaczącego wzrostu lepkości oleju, jeśli cząstki sadzy są rozproszone, ponieważ mają niewielkie średnice. Jednak cząstki sadzy mają tendencję do aglomeracji. Takie aglomeraty nierozpuszczalnych cząstek sadzy wywołują wzrost lepkości. Dzieje się tak dlatego, że zgromadzone cząstki sadzy wiążą olej w swoich strukturach i wpływają na wzrost lepkości oleju. W szczególnych przypadkach cząstki sadzy mogą utworzyć rozwiniętą sieć tworzącą bardzo mocną żelową strukturę. W silnikach, w których tworzy się bardzo dużo osadów nierozpuszczalnych, uległe aglomeracji cząstki sadzy mogą być główną przyczyną wzrostu lepkości. W artykule przedstawiono wyniki badań zawartości sadzy w olejach silnikowych w czasie eksploatacji. Badania wykonano metodą termogravimetryczną zgodnie z normą ASTM D 5967-05. Ta metoda badawcza obejmuje procedurę badań silnikowych, która służy do oceny olejów napędowych pod kątem spełnienia wymagań, w tym wzrostu lepkości i zawartości sadzy. W artykule wskazano przyczyny wzrostu lepkości olejów silnikowych w czasie eksploatacji. Wzrost osadów nierozpuszczalnych powoduje duży wzrost lepkości, co wskazuje, że cząstki sadzy łączą się tworząc formę żelu, a aglomeracja sadzy ma większy wpływ na wzrost lepkości niż poziom osadów nierozpuszczalnych. Określono wpływ sadzy na proces żelowania olejów silnikowych. Wyniki badań wskazują, że sadza ma skłonność do aglomeracji i jest główną przyczyną żelowania olejów silnikowych w wysokiej temperaturze.

Słowa kluczowe: olej silnikowy, żel, sadza, proces żelowania.

ABSTRACT: The soot generated in an engine can cause heavy sludge, high lubricant viscosity increase, or oil gelling. Insoluble soot particles introduced into the lubricant in the piston ring zone can also increase lubricant viscosity. In diesel engine lubricants, the insoluble sludges include: soot, hydrocarbons and ash. Generally, insoluble sludges do not cause significant viscosity increase if the soot particles are dispersed, due to their small individual size. However, the soot particles have a tendency to agglomerate. These agglomerated soot particles induce a viscosity increase. This is because the particles trap lubricant within their agglomerated structures and they affect the increase of viscosity. In extreme cases, the soot particles can form an extensive agglomerated network, forming a highly viscous gel like structure. In engines with high insolubles levels, agglomerated soot particles can be the primary source of viscosity increase. The paper presents results of soot tests in engine oils during their exploitation. Tests were carried out using the thermogravimetric method according to the ASTM D 5967-05 Standard. This test method covers an engine test procedure for evaluating diesel oils' performance characteristics, including viscosity increase and soot concentration. The paper determines the causes of viscosity increase of engine oils during exploitation. A relatively small amount of insolubles produced a large viscosity increase, showing that the soot particles are combining to form a gel and the soot agglomeration had a greater effect on viscosity increase than the amount of insolubles. Influence of the soot on the gelation process of engine oils was determined. The results show, that the soot has a tendency to agglomerate and it is the main cause of gelling of engine oils at high temperature.

Key words: engine oil, gel, soot, gelation process.

Wprowadzenie

Problem żelowania olejów silnikowych w Polsce po raz pierwszy pojawił się w latach 90. ubiegłego wieku. Głównie

obserwowano go w pojazdach zasilanych olejami napędowymi, których silniki smarowane były olejami silnikowymi niższych klas jakościowych. Przypuszczano, że mogło się to wiązać z wprowadzeniem nowej kategorii olejów silnikowych,

Autor do korespondencji: M. Ziółkowska, e-mail: m.ziolkowska@pimot.eu

Artykuł nadesłano do Redakcji 21.11.2018 r. Zatwierdzono do druku 14.03.2019 r.

w tym klasy CD według API. Klasa jakościowa CD wprowadzała wówczas nowej generacji dodatki uszlachetniające zwłaszcza detergenty i dyspergatory. Lecz niedługo okazało się, że problem żelowania pojawił się również w olejach silnikowych wyższych klas jakościowych. W związku z tym zaczęto szukać przyczyny żelowania, biorąc pod uwagę warunki eksploatacyjne olejów silnikowych. Dodatkowo rozpoczęła się też proces ograniczania zawartości siarki w oleju napędowym, co początkowo uważano, że mogło niekorzystnie wpływać na właściwości eksploatacyjne oleju silnikowego.

Cechą charakterystyczną oleju zżelowanego jest bardzo wysoka lepkość kinematyczna, przy czym pozostałe parametry fizykochemiczne są na poziomie oleju świeżego. Z danych literaturowych wynika, że przyczyną żelowania olejów silnikowych może być gwałtowny wzrost zanieczyszczeń, osadów i nagarów oraz sadzy. Taką sytuację zaobserwowano w pojazdach, w których oleje pracowały w podwyższonej temperaturze. Jest to bardzo niekorzystne dla silnika, gdyż może doprowadzić do jego zatarcia.

Zanieczyszczenia i sadza w oleju silnikowym

Wysoka temperatura pracy silników wpływa niekorzystnie na właściwości eksploatacyjne olejów silnikowych. Dlatego też producenci olejów powszechnie stosują inhibitory utleniania, jednak te w miarę eksploatacji oleju ulegają degradacji, a ich wyjściowy potencjał maleje i proces utleniania może przebiegać z większą prędkością, zwłaszcza w okresach przegrzewania elementów silnika, przy dużym dostępie powietrza. Postępujące utlenianie prowadzi do zagęszczania oleju i podnoszenia jego liczby kwasowej. Z biegiem czasu olej zaczyna być coraz bardziej nasycony rozpuszczalnymi i nierozpuszczalnymi produktami utleniania, co powoduje, że efektywność dodatków dyspergująco-detergencyjnych jest niewystarczająca do utrzymania ich w stanie zawieszenia w oleju, następuje wytrącanie substancji smolistych i szlamów na elementach silnika (Jakóbiec i Budzik, 2007).

Szlamy zaczynają pokrywać wewnętrzne powierzchnie różnych elementów silnika, ograniczając wymianę i odprowadzenie ciepła z silnika, co powoduje stopniowy wzrost temperatury jego pracy i dalszą, przyspieszoną destrukcję oleju.

We współczesnych silnikach wysokoprężnych w celu spełnienia coraz ostrzejszych wymagań ekologicznych odnośnie emisji tlenków azotu NO_x stosowana jest recyrkulacja spalin. W spalinach silnika znajdują się różne związki toksyczne, takie jak: CH , NO_x , CO oraz cząstki stałe, których głównym składnikiem jest sadza (Merkisz, 1999). Część sadzy nie ulega spaleniowi i osadza się na ściankach cylindra. Sadza ta wraz z filmem olejowym jest zgarniana przez pierścienie i przedostaje

się do oleju silnikowego. Cząstki sadzy mogą też pochodzić z przedmuchiów do skrzyni korbowej, jak i powstawać podczas destrukcji oleju. Część cząstek stałych wychwytywana jest przez filtry oleju, a pozostała krąży w obiegu oleju silnikowego (Mruk, 2008).

Wysoka temperatura oraz skład przedmuchiowanych gazów, zawierających: tlenki azotu, tlenki siarki, tlen, wysokoreaktywne wodoronadtlenki (zmieszane z niespalonym lub częściowo spalonym, chemicznie niestabilnym paliwem i sadzą) to czynniki, które oddziałując na cienką warstwę oleju silnikowego prowadzą do niepożądanych następstw, takich jak powstawanie prekursorów osadów, żywic i laków. To one ulegając aglomeracji i flokulacji, mogą wypadać z oleju, zarówno w niskiej, jak i wysokiej temperaturze. Ponadto, współczesne oleje silnikowe zawierają dużą ilość dodatków uszlachetniających, w tym przeciwutleniających. Dodatki te narażone na oddziaływanie bardzo rozgrzanych i niestabilnych chemicznie gazów spalinowych przedmuchiowanych do skrzyni korbowej ulegają rozkładowi, a zwiększona ilość produktów rozkładu dodatkowo obciąża olej bazowy, powodując jego zagęszczanie, a następnie sprzyja wypadaniu sadów (Jakóbiec i Budzik, 2007).

Stosowanie niewłaściwego oleju do smarowania silnika powoduje jego przyspieszone zużycie, co może też mieć wpływ na tworzenie osadów w postaci żeli lub czarnych szlamów (Jakóbiec, 1997, 2003).

Zastosowanie w nowoczesnych silnikach oleju smarującego o zbyt dużej lepkości powoduje jego opóźnione docieranie do wielu miejsc wymagających intensywnego smarowania.

Zbyt długie zaleganie oleju, prowadzi do jego przegrzewania, przedwczesnego utleniania i w konsekwencji wytworzenia szlamów, a następnie tzw. „korków szlamowych” blokujących przepływ przez kanały olejowe. Powolny przepływ oleju przez kanały układu smarowania silnika powoduje też zmniejszenie odprowadzenia ciepła z silnika, co prowadzi do jego przegrzewania, a to z kolei do przyspieszonego utleniania i degradacji składników oleju inicjujących lub zwiększających powstawanie czarnych szlamów, a nawet żeli (Jakóbiec i Budzik, 2007).

Sadza w oleju silnikowym

Sadza w olejach silnikowych jest zanieczyszczeniem niepożądanym, którego wzrastająca zawartość powoduje znaczące zmiany właściwości oleju smarującego. Zawartość sadzy w oleju silnikowym jest jednym z ważnych czynników określających przydatność oleju do dalszej eksploatacji, ze względu na to, że wzrost stężenia sadzy prowadzi do wzrostu lepkości oleju silnikowego (Sam et al., 2007).

Sadza i pośrednie produkty spalania paliw mają charakter kwaśny i nie tylko zwiększają zużycie elementów silnika, lecz powodują również znaczące zmiany w pakietach dodatków uszlachetniających olejów silnikowych, dlatego tak ważne jest usuwanie sadzy z oleju silnikowego (Krasodomski, 2009).

Gromadzenie się cząstek sadzy w oleju silnikowym

Nierozpuszczalne cząstki sadzy, które nagromadziły się na pierścieniach tłoka, a potem znalazły się w oleju mogą również zwiększać lepkość oleju smarowego. W olejach silnikowych stosowanych w silnikach wyskopreżnych poziom osadów nierozpuszczalnych zwykle waha się w granicach od 1 do 3%, ale może również sięgać do wartości 7%. Wyniki przeprowadzonych badań metodami analizy spektralnej w podczerwieni IR i termograwimetrycznej pokazują, że od 60 do 70% masy tego typu osadów to sadza. Pozostałą część stanowią węglowodory i popiół, a także produkty procesów utleniania (Mc Geehan et al., 1984).

Źródłem popiołów są metale obecne w komponentach dodatków oraz metale obecne w oleju na skutek zużycia materiałów w silniku. Osady nierozpuszczalne nie wpływają znacząco na wzrost lepkości oleju, jeśli cząstki osadów są rozproszone (izolowane), ponieważ mają niewielkie średnice. Niemniej jednak, osady nierozpuszczalne mają tendencje do grupowania się. Takie skupiska cząstek wywołują wzrost lepkości w daleko większym stopniu niż by to wynikało z sumy rozmiarów poszczególnych cząstek. Dzieje się tak, ponieważ zgromadzone cząstki „łapią” olej w swoje struktury i wpływają na lepkość oleju tak, jakby były dużo większymi pojedynczymi cząstkami. W szczególnych przypadkach cząstki sadzy mogą utworzyć rozwiniętą sieć tworzącą bardzo mocną żelową strukturę.

W silnikach, w których tworzy się bardzo dużo osadów nierozpuszczalnych, zgromadzone cząstki sadzy mogą być główną przyczyną wzrostu lepkości. Przeprowadzone badania przez R. Caprottiego (Caprotti, 1998) mające na celu określenie wpływu osadów nierozpuszczalnych na wzrost lepkości w różnych silnikach czterosurowych stosowanych w lokomotywach wskazują, że po przeprowadzeniu szybkoobrotowego odwirowania próbek olejów przepracowanych tak, by całkowicie usunąć osady nierozpuszczalne, lepkość uległa znacznemu zmniejszeniu. Znaczące zmniejszenie lepkości zanotowano dla olejów, w których zawartość osadów wynosiła powyżej 2%. Zależność ta może ulegać zmianom w zależności od warunków pracy silnika i jakości oleju silnikowego.

Przy procesach utleniania, nadmierna ilość osadów nierozpuszczalnych, z jednej strony powoduje wzrost lepkości, natomiast z drugiej strony zatyka filtr olejowy, gromadzi osady na tłokach oraz na innych elementach silnika, co może być przyczyną jego większego zużycia.

Oleje silnikowe zwykle zawierają dodatki dyspergujące, których zadaniem jest zminimalizowanie problemu osadów nierozpuszczalnych. Cząsteczki dyspergatora działają w ten sposób, że osadzają się na powierzchni cząstek osadów utrzymując je w ten sposób w rozproszeniu i zapobiegając ich aglomeracji. Z przeprowadzonych badań stanowiskowych na silnikach stacjonarnych wynika, że zarówno typ dyspergatora, jak i jego stężenie wpływają na poziom wzrostu lepkości. Poprzez zminimalizowanie procesu gromadzenia się cząstek sadzy dyspergator może mieć ogromny wpływ na poziom wzrostu lepkości (Mc Geehan et al., 1984).

Wzrost lepkości i żelowania oleju na skutek obecności sadzy

Obecność sadzy w oleju jest jedną z możliwych przyczyn wzrostu lepkości. Tak więc wzrost lepkości zależy m.in. od ilości sadzy w oleju, bowiem cząstki sadzy mają tendencję do łączenia się ze sobą. Powstające w ten sposób aglomeraty mogą być jedną z przyczyn zjawiska żelowania. Spostrzeżenia te oparto na wynikach badań przepracowanych olejów silnikowych (Mc Geehan et al., 1984). Na podstawie tych badań autorzy doszli do wniosku, że wzrost lepkości zależy od obecności sadzy w oleju smarowym, bowiem (Mc Geehan et al., 1984):

- lepkość oleju przepracowanego może być zmniejszona do początkowej wartości poprzez odwirowanie. Usunięcie w ten sposób nierozpuszczalne osady zawierające cząstki sadzy obniżyły lepkość kinematyczną oleju;
- po usunięciu osadów nierozpuszczalnych liczba utleniania oleju była bardzo niska. Świadczy to, że wzrost lepkości nie był spowodowany utlenianiem oleju;
- pomiar zawartości sadzy metodą IR wskazuje że osady nierozpuszczalne składają się głównie z cząstek sadzy. Analiza termograwimetryczna osadów całkowitych wykazała, że składają się one z 76% sadzy, 19% żywicy i 5% popiołów;
- lepkość oleju wzrasta w zakresie od 14 do 70 cSt wraz ze wzrostem poziomu osadów nierozpuszczalnych w zakresie tylko od 2 do 4%. Fakt, że stosunkowo niewielki wzrost osadów nierozpuszczalnych wywołuje tak duży wzrost lepkości sugeruje, że cząstki sadzy łączą się tworząc formę żelu i że zjawisko to ma większy wpływ na wzrost lepkości, niż poziom osadów nierozpuszczalnych.

W trakcie badań zaobserwowano również, że zjawisko skupiania się sadzy ma miejsce w całej objętości oleju. Powstające aglomeraty przyczyniły się do powstania żelu. Żel powstały z sadzy jest niestabilną strukturą (Gaynor et al., 1998). Świadczy o tym że:

- forma żelowa łatwo ulegała ścinaniu podczas przechodzenia przez łożysko i filtr,
- dodatek oleju w ilości około 10% w stosunku do oleju w misce olejowej może częściowo zapobiec wzrostowi

lepkości. Dodatek niewielkiej ilości świeżego oleju oraz dodanie dyspergatora lokującego się w sieci łańcuchów sadzy, powoduje rozrywanie wielu węzłów sieci, co w konsekwencji prowadzi do niszczenia struktury żelu. W rozrywanych węzłach sieci powstają swobodne końce łańcuchów, do których może się przyłączyć dyspergator.

Żel powstały z sadzy jest substancją tiksotropową. To znaczy, że może być płynny już przy umiarkowanych ruchach mechanicznych i powracać do stanu stałego przy braku ruchu. Pomimo tego, że takie tiksotropowe żele różnią się znacznie pod względem sztywności w zależności od składu, to w każdym przypadku wydaje się, że siły w punktach wiążących są stosunkowo słabe fizycznie (Caprotti, 1998; Gaynor et al., 1998). Zatem, w pompie olejowej, filtry olejowym i łożyskach następuje ścinanie oleju do początkowej lepkości (nie-żelowej), zanim w wyniku żelowania postanie opór przepływu. Problemy spowodowane grupowaniem się sadzy występują głównie podczas rozruchu silnika, zanim olej zacznie krążyć w układzie olejowym i zniszczyć powstający żel (Gaynor et al., 1998). Słabe siły ścinające w oleju w misce olejowej przed pompą olejową nie są na tyle skuteczne, aby zniszczyć żel w gwałtownie gęstniejącym oleju. Zatem, nie ma żadnych symptomów wywołanych powstawaniem żelu aż do momentu, kiedy olej nie może wpływać do pompy olejowej podczas rozruchu. Tworzą się przy tym nadmierne ilości szlamów, a wzrost lepkości spowodowany jest m.in. aglomeracją sadzy w oleju silnikowym. Łańcuchy cząstek sadzy łączą się tworząc formę dużej otwartej struktury, co wywołuje gwałtowny wzrost lepkości. Zdolność zagęszczania oleju przez sadzę prawdopodobnie wynika z jej tendencji do gromadzenia się w wielkie struktury z bardzo długimi łańcuchami (Caprotti, 1998).

Sadza wytworzona w silnikach wysokoprężnych pracujących przy wysokich momentach obrotowych, wytwarza podobną strukturę żelową, jak w mniejszych silnikach z bezpośrednim wtryskiem. Taki żel może być przyczyną powstawania nadmiernej ilości szlamów i blokować przepływ oleju podczas rozruchu silnika.

Z gazami spalinowymi sadza przedostaje się częściowo do oleju silnikowego, w którym zostaje zdyspergowana. Zdyspergowane, małe cząstki sadzy nie wpływają na wzrost lepkości kinematycznej oleju silnikowego. Cząstki sadzy wykazują jednak tendencję do aglomeracji, w wyniku czego powstają skupiska sadzy, prowadzące do gwałtownego wzrostu lepkości, a nawet żelu.

Oleje silnikowe zawierają w swoim składzie dodatki dyspergujące. To dzięki nim osady nie kumulują się, nie aglomerują i nie osadzają na elementach silnika.

Skłonność sadzy do aglomeracji w znacznym stopniu zależy od efektywności działania dyspergatora w oleju silnikowym.

Efektywnie działające dyspergatory zapobiegają aglomeracji sadzy i nie dopuszczają do żelowania oleju. Najmniejszą efektywnością działania w stosunku do sadzy charakteryzują się dyspergatory aminowe. Tak więc oleje silnikowe zawierające w swoim składzie dyspergatory aminowe wykazują największą tendencję do aglomeracji sadzy, co w konsekwencji może być przyczyną żelowania.

Badanie zawartości sadzy w olejach silnikowych

Wykonane w instytucie badania wykazały, że zżelowane oleje, oprócz wzrostu lepkości kinematycznej, podstawowe parametry właściwości fizykochemicznych miały na poziomie olejów świeżych. Jediną różnicą były ogromne ilości sadzy w tych olejach, której zawartość wynosiła od 17 do 25% (m/m).

Badania wykonano techniką termogravimetryczną (TG), która polega na ogrzewaniu próbki i jednoczesnym rejestrowaniu jej masy.

Badania termogravimetryczne można prowadzić:

- 1) metodą izotermiczną, rejestrując zmianę masy próbki w funkcji czasu (t) ogrzewania w stałej temperaturze (T), $m = f(t)_T = \text{const}$;
- 2) metodą dynamiczną, rejestrując zmianę masy próbki jako funkcję temperatury (T), przy określonej szybkości ogrzewania, $m = f(T)$;
- 3) metodą izotermiczno-dynamiczną, składającą się z segmentów izotermicznych i dynamicznych.

Pomiary termogravimetryczne prowadzone są w aparatach – termowagach, które wyposażone są w mikrowagę rejestrującą zmiany masy badanej próbki, piec, układ do programowania i kontrolowania temperatury oraz rejestrator.

Aparaty te umożliwiają prowadzenie pomiarów w atmosferze dowolnego gazu (głównie gazu obojętnego lub w powietrzu), przy szybkości ogrzewania 0–200 deg/min, tzn. w warunkach izotermicznych lub przy określonej stałej szybkości ogrzewania. Masa próbek zależy od rodzaju aparatu, przeważnie wynosi od kilku do 100 mg. W czasie badania w ciągły sposób rejestrowana jest zmiana masy próbki w postaci krzywych termogravimetrycznych TG – ubytku masy.

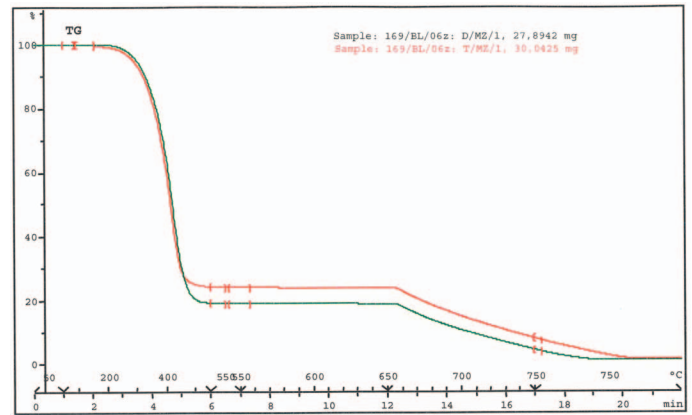
Metoda polega na umieszczeniu badanej próbki w odpowiednim tyglu w atmosferze obojętnej (azot) i ogrzewaniu jej w zakresie temperatury od pokojowej do 650°C. W tej temperaturze ulegają rozkładowi termicznemu organiczne składniki próbki oleju z wydzieleniem lotnych produktów rozkładu. Nie ulegają natomiast rozkładowi części węglowe próbki (sadza). Po wymianie atmosfery obojętnej na powietrze i kontynuowaniu ogrzewania sadza zawarta w próbce ulega termooksydacji z tworzeniem tlenków węgla. Różnica między masą pozostałości próbki po rozkładzie w atmosferze azotu, a masą pozostałości po rozkładzie w atmosferze powietrza stanowi zawartość sadzy (części węglowych) w próbce.

Badanie zawartości sadzy wykonano zgodnie z załącznikiem A4, procedury B normy ASTM D 5967-05. Badanie polegało na wykonaniu pomiarów termograwimetrycznych TG – ubytku masy wcześniej ujednorodnionych próbek podczas ich ogrzewania w następujących warunkach:

- w atmosferze azotu izotermicznie w temperaturze 50°C w czasie 1 minuty;
- w atmosferze azotu z szybkością ogrzewania 100°C/min od 50 do 550°C;
- w atmosferze azotu izotermicznie w temperaturze 550°C w czasie 1 minuty;
- w atmosferze azotu z szybkością ogrzewania 20°C/min od 550 do 650°C;
- zmiany atmosfery z azotu na powietrze (na atmosferę tlenową) i kontynuowanie ogrzewania z szybkością 20°C/min od 650 do 750°C;
- w atmosferze powietrza izotermicznie w temperaturze 750°C do uzyskania stałej masy nierozłożonej pozostałości próbki (około 5–10 minut).

Zawartość sadzy obliczono jako różnicę ubytku masy próbki w procentach masowych po rozkładzie jej w atmosferze azotu i powietrza (między etapem ogrzewania 4 i 6). Wykonano po dwa pomiary dla każdej próbki oleju. Wynik zawartości sadzy stanowi średnią arytmetyczną z kolejnych wyników.

Do badań zostały wytypowane oleje silnikowe, który uległy zżelowaniu pod wpływem sadzy:



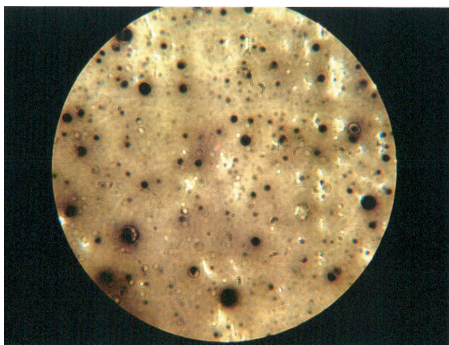
Rys. 1. Krzywe termograwimetryczne TG próbek olejów D/MZ/1 i T/MZ/1

Fig. 1. Thermogravimetric curves TG oil samples D/MZ/1 and T/MZ/1

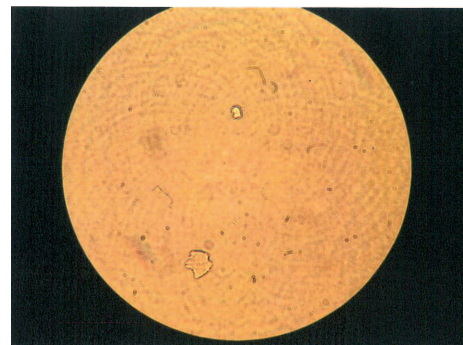
- olej silnikowy 1 – SAE 15W/40, API CG-4 oznaczony symbolem D/MZ/1;
- olej silnikowy 2 – SAE 10W/40, API CF oznaczony symbolem T/MZ/1.

Na rysunku 1 przedstawiono krzywą termograwimetryczną dla dwóch olejów zżelowanych, które zawierają sadzę.

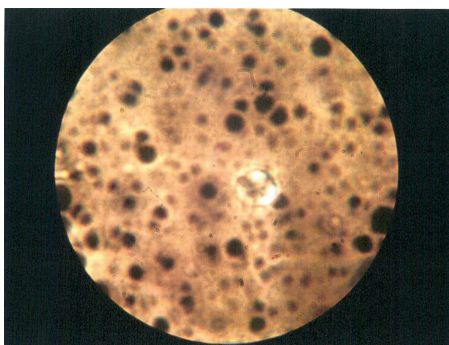
Na podstawie krzywych termograwimetrycznych zostały obliczone zawartości sadzy jako różnica ubytku masy próbki w procentach masowych po rozkładzie jej w atmosferze azotu i powietrza (Ziółkowska, 2009).



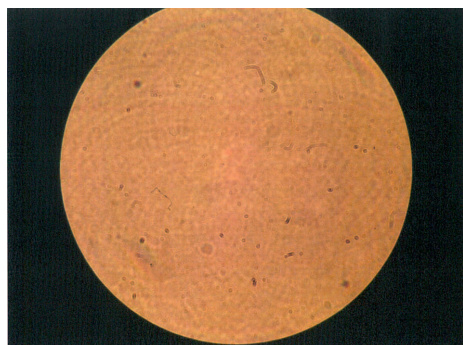
Fot. 1. Aglomeraty sadzy w oleju silnikowym SAE 15W/40 API CG-4
Phot. 1. Soot agglomerates in engine oil SAE 15W/40 API CG-4



Fot. 2. Olej świeży SAE 15W/40 API CG-4 niezawierający sadzy
Phot. 2. Fresh oil without soot SAE 15W/40 API CG-4



Fot. 3. Aglomeraty sadzy w oleju silnikowym SAE 10W/40 API CF
Phot. 3. Soot agglomerates in engine oil SAE 10W/40 API CF



Fot. 4. Olej świeży SAE 10W/40 API CF niezawierający sadzy
Phot. 4. Fresh oil without soot SAE 10W/40 API CF

Tabela 1. Właściwości fizykochemiczne oleju silnikowego zżelowanego SAE 15W/40 API CG-4
Table 1. Physicochemical properties of the gelled engine oil SAE 15W/40 API CG-4

Badane parametry	Jednostka miary	Uzyskany wynik	Olej świeży
Wygląd zewnętrzny	–	Ciemny, gęsty w postaci galarety. Pod palcami wyczuwalne drobiny obcej substancji, np. sadzy	Jasny, klarowny, bez widocznych osadów i zanieczyszczeń
Lepkość kinematyczna – w temperaturze 40°C – w temperaturze 100°C	mm ² /s	2374,5 1888,3	106,2 14,07

W próbkach oznaczonych:

- D/MZ/1 (SAE 15W/40, API CG-4) stwierdzono 17,6% (*m/m*);
- T/MZ/1 (SAE 10W/40, API CF) stwierdzono 22,2% (*m/m*).

Dla w/w próbek olejów wykonano zdjęcia pod mikroskopem elektronowym w celu stwierdzenia, czy zawarta sadza tworzy aglomeraty w całej objętości oleju.

Czarne, kuliste plamy widoczne na fotografiach 1 i 3 świadczą, że sadza w oleju skumulowała się w postaci aglomeratów. Natomiast na fotografiach 2 i 4 przedstawiono olej świeży, niezawierający sadzy.

Zaobserwowano, że problem żelowania występuje przy zasilaniu silników paliwem o niskiej zawartości sadzy i WWA. Z gazami spalinowymi sadza przedostaje się częściowo do oleju silnikowego, w którym zostaje zdyspergowana.

Zdyspergowane, małe cząstki sadzy nie wpływają na wzrost lepkości kinematycznej oleju silnikowego. Cząstki sadzy wykazują jednak tendencję do aglomeracji, w wyniku czego powstają skupiska sadzy, prowadzące do gwałtownego wzrostu lepkości, a nawet tworzenia się żelu. Cechą charakterystyczną żelu powstałego na skutek aglomeracji sadzy w oleju silnikowym jest znaczny wzrost lepkości oleju w temperaturze 40°C i 100°C.

W tabeli 1 i 2 przedstawiono wyniki badań lepkości kinematycznej olejów silnikowych:

- SAE 15W/40 API CG-4;
- SAE 10W/40 API CF.

Na fotografiach 5 i 6 przedstawiono zżelowany olej silnikowy zawierający duże ilości sadzy [11].

Tabela 2: Właściwości fizykochemiczne oleju silnikowego zżelowanego SAE 10W/40 API CF
Table 2: Physicochemical properties of the gelled engine oil SAE 10W/40 API CF

Badane parametry	Jednostka miary	Uzyskany wynik	Olej świeży
Wygląd zewnętrzny	–	Ciemny, gęsty w postaci galarety. Pod palcami wyczuwalne drobiny obcej substancji, np. sadzy	Jasny, klarowny, bez widocznych osadów i zanieczyszczeń
Lepkość kinematyczna – w temperaturze 40°C – w temperaturze 100°C	mm ² /s	264,4 167,8	90,26 13,14



Fot. 5. Zżelowany olej SAE 15W/40 API CG-4 zawierający sadzę
Phot. 5. Gelled oil SAE 15W/40 API CG-4 containing soot



Fot. 6. Zżelowany olej SAE 10W/40 API CF zawierający sadzę
Phot. 6. Gelled oil SAE 10W/40 API CF containing soot

Podsumowanie

Z danych literaturowych wynika, że sadza ma bardzo duży wpływ na proces żelowania olejów silnikowych, co zostało potwierdzone w badaniach laboratoryjnych. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że przyczyną procesu żelowania oleju silnikowego w czasie eksploatacji w wysokiej temperaturze prawdopodobnie jest aglomeracja sadzy.

Podczas eksploatacji pojazdu, w jego silniku tworzy się bardzo dużo osadów nierozpuszczalnych, a zgromadzone cząstki sadzy mogą być główną przyczyną wzrostu lepkości. Wzrost lepkości może też nastąpić przy procesach utleniania, a nadmierna ilość osadów nierozpuszczalnych powoduje zatykanie filtra olejowego powodując zwiększone zużycie materiałów silnika z powodu nadmiernego tarcia. Zminimalizowanie procesu gromadzenia się cząstek sadzy może być ograniczone poprzez odpowiedni dobór typu, jak i stężenia dyspergatora w oleju silnikowym.

Większości problemów związanych z gęstnieniem oleju silnikowego można uniknąć poprzez monitorowanie stopnia zanieczyszczenia w trakcie eksploatacji oleju silnikowego (zwłaszcza osadami, cząstkami stałymi i sadzą). Rutynowa analiza oleju może pomóc wykryć problemy związane z żelowaniem oleju, zanim nastąpi znaczące uszkodzenie silnika.

Literatura

- Caprotti R., 1998. Harm Free Use of Diesel Additives. SAE Technical Paper Series 982569.
- Gaynor M., Kavanagh, Simon B., Ross-Murphy, 1998. Rheological Characterisation of Polymer Gels. Biopolimer Group, Division of Life Sciences, King's College London. Prog. Polym. Sci., 23: 533–562.

- Jakóbiec J., 1997. Dobór oleju silnikowego układu wewnętrzniego chłodzenia tłoka silnika spalinowego. *Technika Transportu Szynowego*, 7/8: 18–22.
- Jakóbiec J., 2003. Dwugłos w sprawie doboru oleju silnikowego. *Taksówkarz Polski*, 5: 11–12.
- Jakóbiec J., Budzik G., 2007. Czynniki mające wpływ na stopień degradacji oleju silnikowego w okresie eksploatacji. *Archiwum Motoryzacji*, 3: 209–216.
- Krasodomski M., Krasodomski W., 2009. Wydzielanie sadzy z olejów przepracowanych. *Nafta-Gaz*, 5: 419–427.
- Mc Geehan J.A., Rynbrandt J.D., Hansel T.J., 1984. Effect of Oil Formulations in Minimizing Viscosity Increase and Sludge Due to Diesel Engine Soot. SAE Technical Paper Series 841370.
- Merkisz J., 1999. Ekologiczne problemy silników spalinowych. Tom 1 i Tom 2. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- Mruk A., 2008. Wpływ obecności sadzy w oleju silnikowym na jego własności tribologiczne. *Czasopismo Techniczne. Mechanika*, 105(7-M): 275–285.
- Sam G., Santhosh B., Gautam Vishal G., Mridul G., 2007. Effect of diesel soot on lubricant oil viscosity. *Tribology international*, 40(5): 809–818.
- Ziółkowska M., 2009. Proces żelowania olejów silnikowych w czasie eksploatacji pojazdów zasilanych olejem napędowym. *Przemysł Chemiczny*, 88(3): 268–271.



Mgr Monika ZIÓLKOWSKA
 Starszy specjalista badawczo-techniczny
 Kierownik Jednostki Certyfikującej Systemy
 Zarządzania
 Przemysłowy Instytut Motoryzacji
 ul. Jagiellońska 55, 03-301 Warszawa
 E-mail: m.ziolkowska@pimot.eu