

Zbigniew CHMIELEWSKI¹

BADANIA OLEJU SILNIKOWEGO JAKO ŹRÓDŁA INFORMACJI O STANIE TECHNICZNYM SILNIKA SPALINOWEGO O ZS

W artykule przedstawiono nową metodę oceny stanu technicznego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym ZS. Podstawą oceny jest analiza zmian własności fizykochemicznych eksploatowanego oleju silnikowego, ze szczególnym uwzględnieniem lepkości kinematycznej w 100⁰C w chwili wymiany oleju w silniku. Przydatność nowej metody zweryfikowano w badaniach eksploatacyjnych 5-ciu silników typu 359M.

TESTING OF MOTOR OIL AS A SOURCE OF INFORMATION OF TECHNICAL CONDITION OF COMBUSTION ENGINE WITH COMPRESSION IGNITION

This paper presents a new method of technical condition evaluation of combustion engine (compression ignition). The basis for evaluation is analysis of changes in physico-chemical properties of in-use motor oil, with particular emphasis on the kinematic viscosity at 100 C deg when the engine oil replacement. Usefulness of the new method was verified during in-operation researches of 5 engines type 359M.

1. WSTĘP

Istotnym problemem w praktyce eksploatacyjnej jest ocena stanu technicznego silnika, a co z tym związane, zużycia elementów układu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder (TPC). Stosowane dotychczas powszechnie metody wymagają częściowego demontażu elementów silnika celem dokonania stosownych pomiarów (np. mikrometraż, pomiar ciśnienia sprężania). Odrębną grupę stanowią metody pozwalające na ciągłą obserwację procesu zużywania elementów współpracujących tarciowo. Stosowane w tym przypadku np. metody izotopowe są kosztowne i wymagają specjalistycznego przygotowania, jak też oprzyrządowania, stąd nie są powszechnie wykorzystywane w diagnostyce technicznej.

Analiza układu tłok - pierścienie tłokowe - cylinder jako systemu tribologicznego wskazuje, że istotnym źródłem informacji może być znajdujący się w nim środek smarowy. Spośród wszystkich elementów systemu tribologicznego [1] olej silnikowy podlega najintensywniejszym zmianom fizycznym i chemicznym podczas eksploatacji. Wynika to z oddziaływania systemu na olej. Wielkość wymuszeń działających na olej silnikowy związana jest m.in. ze stanem technicznym układu TPC wyrażonym wielkością luzów

¹ Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny; 26-600 Radom; ul. Chrobrego 45.
Tel: + 48 48 361-76-68, E-mail: zbigniew.chmielewski@pr.radom.pl

w tym skojarzeniu. Spowodowany tym luzem wzrost przedmuchów spalin do skrzyni korbowej silnika, jak też wzrost ilości oleju przedostającego się do komory spalania oraz niespalonego paliwa przedostającego się do miski olejowej powodują, że wskaźniki opisujące stan oleju silnikowego ulegają intensywnym zmianom w czasie. Kinetyka tego procesu jest wypadkową występujących zjawisk tribologicznych oraz zużycia układu TPC. Istnieje zatem możliwość dokonania oceny stanu zużycia układu TPC silnika na podstawie obserwacji zmian zachodzących w składzie fizycznym i chemicznym eksploatowanego w nim oleju silnikowego.

2. METODA BADAŃ

Stosowane dotychczas metody diagnostyki stanu technicznego silników spalinowych, z wykorzystaniem oleju silnikowego, opierają się na systematycznych pomiarach zawartości substancji zanieczyszczających olej smarny. Najczęściej spotykanymi zanieczyszczeniami oleju są: żelazo, aluminium, chrom, miedź i ołów. Dla oceny zużywania tulei cylindrowej oraz pierścieni tłokowych istotnym jest koncentracja żelaza. Stwierdzenie nadmiernej koncentracji żelaza w badanej próbce przeprowadzonego oleju świadczy o nieprawidłowym zużyciu tych elementów. Analizując tylko poziom koncentracji domieszek można dojść do błędnego wniosku o nieprawidłowym stanie silnika spalinowego. Jedynie analiza przyrostu koncentracji pozwala prawidłowo określić stan techniczny zużywających się części [2].

Spośród wskaźników fizykochemicznych i funkcjonalnych, charakteryzujących stan oleju smarowego, w badaniach eksploatacyjnych najczęściej wykorzystuje się (oprócz zawartości zanieczyszczeń) lepkość kinematyczną. Ze względu na powszechność pomiaru tego wskaźnika wydaje się być celowym podjęcie próby wykorzystania go jako źródła informacji o stanie technicznym układu TPC. Istnieją teoretyczne podstawy do podjęcia poszukiwań w tym kierunku [4].

2.1. Opis metody

Przyjęta w założeniach dostępność stosowania nowej metody przez szerokie grono użytkowników wyznaczała konieczność wyboru spośród wskaźników charakteryzujących stan oleju jednego, najlepszego. Ograniczono w ten sposób koszty dokonywanej oceny. Ponadto zmiany eksploatacyjne wybranego wskaźnika musiały zadowalająco korelować ze zmianami zachodzącymi w układzie TPC, tj. postępującym zużyciem tulei cylindrowych. Inaczej intensywność obserwowanych zmian powinna wzrastać wraz z rejestrowanym przebiegiem silnika (pojazdu). Kryteria te powinny być zgodne z teoretyczną analizą zjawisk zachodzących w obrębie skojarzenia TPC i ich wpływem na wybrany wskaźnik stanu oleju. Na podstawie tak przyjętych założeń szczegółowej analizie poddano lepkość kinematyczną oleju silnikowego.

Warunki współpracy elementów tłok, pierścienie tłokowe, tuleja cylindrowa determinowane są przede wszystkim lepkością znajdującego się między nimi środka smarowego. Decyduje ona o charakterze tarcia, zarówno w zimnym jak i ciepłym silniku. Ma też znaczenie w czasie rozruchu silnika [6]. Ponadto lepkość oleju silnikowego ulega znacznym zmianom w czasie jego eksploatacji. Związane jest to m.in. ze zjawiskiem przedostawania się niespalonego paliwa do miski olejowej silnika, co z kolei warunkowane

jest w dużym stopniu szczelnością (zużyciem) skojarzenia TPC. Obserwowany wraz z przebiegiem pojazdu – silnika wzrost luzu między tłokiem, a tuleją cylindrową sprzyja przedostawaniu się coraz większych ilości paliwa i szybszemu rozcieńczaniu oleju silnikowego. Występujące jednocześnie procesy powodujące wzrost lepkości oleju nie neutralizują powyższej tendencji, a ponadto ich intensywność nie jest ściśle skorelowana z postępującym zużyciem układu TPC. Ich występowanie związane jest przede wszystkim z procesami starzeniowymi oleju zachodzącymi w strefie wysokotemperaturowej silnika tj. warstwie smarowej na gładzi tulei cylindrowej. Obserwuje się zatem proces rozcieńczania oleju silnikowego w czasie eksploatacji [7], przy czym intensyfikuje się on wraz z przebiegiem pojazdu. Kinetykę zmian lepkości oleju odzwierciedla zatem funkcja malejąca o przyrostach bezwzględnych rosnących wraz z przebiegiem pojazdu.

Jednak zmiany zachodzące w eksploatowanym oleju to nie tylko jego degradacja, na skutek oddziaływania systemu, ale także zjawisko odświeżania poprzez „dolewki”. Obraz stanu fizykochemicznego eksploatowanego oleju tuż po dolewce jest mocno zniekształcony. Porcja świeżego oleju poprawia własności środka smarowego, zbliżając je do wartości początkowych. Stąd też ważnym zagadnieniem jest chwila dokonywanej analizy.

Rzeczywisty stan eksploatowanego oleju obserwujemy w chwili jego wymiany. Obserwacje zachowania użytkowników wskazują, że nie dokonują oni dolewek oleju przed planowaną wkrótce jego wymianą. Zatem stan oleju silnikowego w chwili jego wymiany dobrze odzwierciedla wypadkową wymuszeń nań działających.

Rozważenia wymaga jeszcze kwestia sposobu porównania procesu zużywania tulei cylindrowych, będącego procesem ciągłym i obserwowanym dla tej samej pary kinematycznej, z procesem degradacji oleju odbywającym się dla kolejnych, nowych porcji oleju po każdej jego wymianie. Ponadto rzeczywisty czas eksploatacji oleju może być różny dla kolejnych wymian, choć statystycznie, przy wysokiej kulturze obsługi, jego wartość oczekiwana będzie zbliżona do zalecanej przez producenta.

Rozwiązaniem jest zastosowanie w prezentowanej metodzie nowego wskaźnika intensywności zmian własności oleju C_w [5]. Scharakteryzowany jest on zależnością (1):

$$C_w = \frac{W_p - W_k}{t_{ol}} \quad \text{dla } t > 0 \quad (1)$$

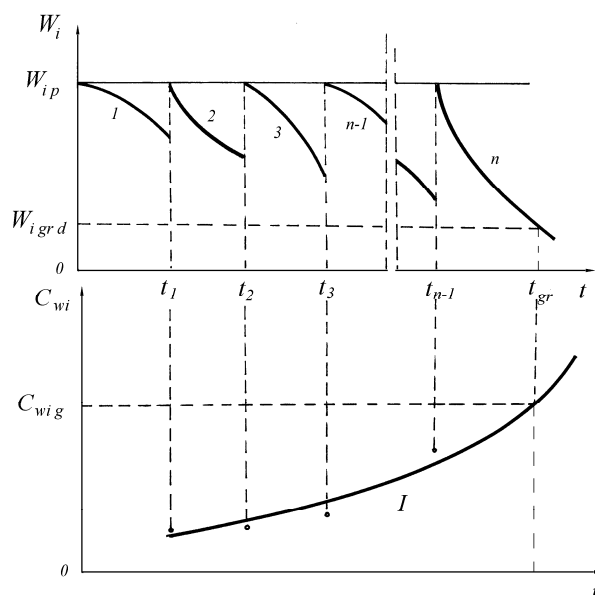
gdzie: W_p - wartość mierzzonego wskaźnika oceny stanu oleju dla oleju świeżego

W_k - wartość mierzzonego wskaźnika oceny stanu oleju dla oleju przepracowanego (w chwili wymiany)

t_{ol} - czas pracy oleju w silniku do wymiany

C_w - wskaźnik intensywności zmian własności oleju.

Wskaźnik ten niesie ze sobą uśrednioną informację na temat intensywności oddziaływania silnika na olej. Nie uwzględnia okresowych zmian wartości mierzzonego parametru oleju, lecz odzwierciedla długotrwałą tendencję obserwowanych zmian. Graficzną jego interpretację przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Graficzna interpretacja zmian wskaźnika oceny stanu oleju w czasie
 W_p – początkowa wartość wskaźnika stanu oleju, $W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn}$ – końcowa wartość wskaźnika stanu oleju w chwili 1, 2, ..., n wymiany oleju, t_1, t_2, \dots, t_n – chwile wymiany oleju w silniku, C_w – wskaźnik intensywności zmian własności

Przeprowadzone badania eksploatacyjne wykazały, że najlepszym dla potrzeb prezentowanej metody jest wskaźnik intensywności zmian lepkości kinematycznej w 100°C – C_{V100} [5].

Ostatnim etapem jest zweryfikowanie hipotezy o korelacji między obserwowanymi zmianami lepkości kinematycznej eksploataowanego oleju silnikowego, wyrażonymi za pomocą wskaźnika intensywności zmian lepkości kinematycznej C_{V100} , a przebiegiem silnika – pojazdu.

3. BADANIA EKSPLOATACYJNE

3.1 Obiekt i metodyka badań

Obiektem badań eksploatacyjnych były silniki typu 359M zamontowane w 5-ciu samochodach ciężarowych STAR 1142. Silnik 359M to silnik o zapłonie samoczynnym, o mocy 110 [kW], czterosuwowy, górnozaworowy. Układ cylindrów rzędowy, pionowy. Silnik ten posiada bezpośredni wtrysk paliwa do komory otwartej, znajdującej się w denku tłoka. Wyposażony jest w obiegowy układ smarowania, mieszany (panewki wału korbowego i panewki wału rozrządu są smarowane olejem pod ciśnieniem, zaś gładź tulei cylindrowej smarowana jest rozbryzgowo. Badano 5 silników 359M o znanym stanie początkowym (fabrycznie nowych). Silniki eksploatowane były przez Zakład Transportu Samochodowego Poczty Polskiej w Lublinie. Średnie obciążenie skrzyni ładunkowej

wynosiło 5 000 [kg] i nigdy nie przekraczało dopuszczalnej ładowności pojazdu. Przebiegi dzienne samochodów wynosiły od 240 do 350 [km]. Samochody eksploatowano w warunkach jazdy miejskiej i na trasach pozamiejskich. Układ smarowania każdego z silników zalany był olejem mineralnym JASOL 9 klasy jakościowej wg API CE/SF i klasy lepkościowej wg SAE 15W/40 produkowany przez Podkarpackie Zakłady Rafineryjne w Jaśle. Olej ten był używany w ciągu całego okresu badań i pochodził z jednej partii produkcyjnej. Wszystkie obsługi techniczne silników wykonywane były zgodnie z zaleceniami producenta. Okresowe przeglądy techniczne wykonywane były w Dziale Silników Zakładu Konstrukcyjno-Badawczego Samochodów Ciężarowych w Starachowicach i połączone były z badaniami diagnostycznymi stanu technicznego silników.

Do oceny zmian własności oleju wykorzystano metodę oceny wskaźników fizykochemicznych i funkcjonalnych oleju. Analizę chemiczną oleju świeżego przeprowadzono w Centralnym Laboratorium Naftowym w Warszawie. Oznaczone właściwości oleju świeżego przedstawiono w tabeli 1

Tab. 1. Właściwości fizykochemiczne oleju JASOL 9

Badany parametr		Jm	Wartość
Lepkość kinematyczna w temperaturze 40 ⁰ C		mm ² /s	99,52
Lepkość kinematyczna w temperaturze 100 ⁰ C		mm ² /s	14,21
Liczba zasadowa		mg KOH/g	10,84
Pozostałość po koksovaniu wg Conradsona		%	1,38
Popiół siarczanowy		%	1,10
Temperatura zapłonu w tyglu zamkniętym		⁰ C	190
Zawartość pierwiastków poch. z dod. uszlachetniających		-	-
1.	wapń – Ca	%	0,33
2.	cynk – Zn	%	0,13
3.	fosfor – P	%	0,12

Zakładano wymianę oleju co ok. 12 000 [km] zgodnie z zaleceniami producenta. Rzeczywiste przebiegi między wymianami wynosiły 10 000÷16 500 [km]. Podczas wymiany pobierano próbkę oleju przepracowanego (około 1 [dm³]), celem dokonania jej analizy fizykochemicznej. Dodatkowo dla oleju przepracowanego oznaczano zawartość pierwiastków pochodzących z elementów konstrukcyjnych silnika (żelazo – Fe, miedź – Cu, ołów – Pb). Analiza przeprowadzana była w Centralnym Laboratorium Naftowym w Warszawie. Pozwoliło to zachować powtarzalność stosowanych metod pomiarowych, a tym samym zwiększyć wiarygodność uzyskanych wyników badań.

3.2 Wyniki badań

Analizę zmian stanu oleju w eksploatacji przeprowadzono jako ocenę kinetyki zmian wybranego wskaźnika oleju. Podstawą były informacje dotyczące:

- wartości wybranego wskaźnika oceny stanu dla oleju świeżego,

- wartości wybranego wskaźnika oceny stanu dla oleju przepracowanego (w chwili wymiany),
- czasu pracy oleju (przebieg samochodu między wymianami oleju).

Informacje te wiąże w sobie wskaźnik intensywności zmian własności oleju C_w (1). Ocenie pod kątem zmian zachodzących w czasie eksploatacji poddano następujące wskaźniki stanu oleju:

- 1) spośród wskaźników fizykochemicznych:
 - lepkość kinematyczna w temperaturze $40^{\circ}\text{C} - \nu_{40}$,
 - lepkość kinematyczna w temperaturze $100^{\circ}\text{C} - \nu_{100}$,
 - liczba zasadowa – LZ,
 - pozostałość po koksowaniu wg Conradsona,
 - popiół siarczanowy,
 - temperatura zapłonu w tyglu zamkniętym,
 - zawartość pierwiastków pochodzących z dodatków uszlachet.: Ca, Zn, P,
- 2) spośród wskaźników funkcjonalnych:
 - zawartość pierwiastków metalicznych pochodzących z elementów konstrukcyjnych silnika: Cu, Fe, Pb.

Obliczone wartości wskaźnika intensywności zmian własności oleju C_{wi} ($i = 1, 2, \dots, n$, gdzie n – numer kolejnej wymiany oleju) dla każdego z w/w wskaźników stanu oleju odniesiono do przebiegu pojazdu, odpowiadającego chwili wykonania pomiaru (przebieg pojazdu w chwili wymiany oleju). Korzystając z programu STATISTICA[®] określono korelacje między wskaźnikiem C_{wi} dla każdego z obserwowanych wskaźników oceny stanu oleju, a przebiegiem pojazdu. Do wstępnego oszacowania poszukiwanych zależności wykorzystano proste regresji drugiego rodzaju. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 2 (wyznaczone korelacje są istotne na poziomie ufności $1 - \alpha = 0,95$).

Tab. 2. Zestawienie współczynników korelacji liniowej wskaźników oceny zmian stanu oleju względem przebiegu pojazdu

Wskaźniki oceny zmiany stanu oleju - C_{wi}	Wartość współczynnika korelacji R
Lepkość kinematyczna w temperaturze $40^{\circ}\text{C} - \nu_{40}$,	-0,71
Lepkość kinematyczna w temperaturze $100^{\circ}\text{C} - \nu_{100}$,	-0,81
Liczba zasadowa – LZ,	korelacja nieistotna
Pozostałość po koksowaniu wg Conradsona,	0,46
Popiół siarczanowy,	korelacja nieistotna
Temperatura zapłonu w tyglu zamkniętym,	korelacja nieistotna
Zawartość Ca	korelacja nieistotna
Zawartość Zn	korelacja nieistotna
Zawartość P	korelacja nieistotna
Zawartość Fe	korelacja nieistotna
Zawartość Cu	korelacja nieistotna
Zawartość Pb	korelacja nieistotna

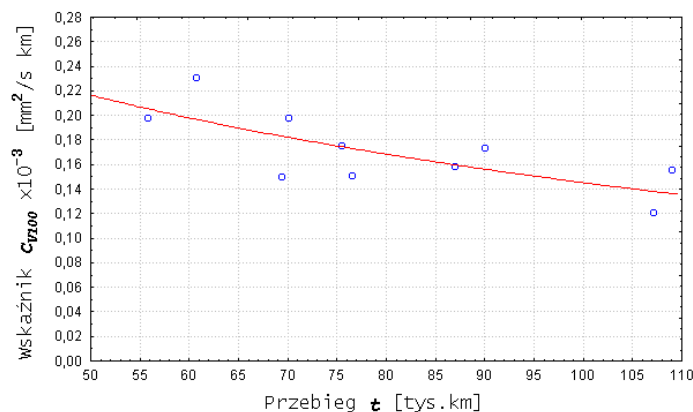
Zatem spośród obserwowanych w eksploatacji wskaźników stanu oleju najwyższą wartość współczynnika korelacji liniowej względem przebiegu pojazdu uzyskano dla wskaźnika intensywności zmian lepkości kinematycznej w 100°C C_{V100} . Wynik ten potwierdza słuszność przeprowadzonej analizy teoretycznej. Ograniczając się tylko do tego parametru oleju silnikowego wyznaczono krzywe regresji wskaźnika C_{V100} względem czasu eksploatacji. Najwyższą wartość współczynnika korelacji krzywoliniowej, na poziomie $R = 0,741$, uzyskano dla linii regresji opisanej funkcją potęgową. Zatem przebieg zmian wskaźnika C_{V100} względem czasu eksploatacji można opisać zależnością (2):

$$C_{V100} = (3,277) - (2,142) \cdot t^{(0,033)} \left[\frac{mm^2}{s \cdot km} \right] \quad (2)$$

gdzie: t – czas pracy silnika (przebieg) [km].

Zależność ta, oprócz najwyższej wartości współczynnika korelacji, dobrze odzwierciedla fizyczną interpretację obserwowanego zjawiska. Zmiany własności oleju silnikowego dążą do pewnej granicy lecz jej nie osiągają, co doskonale koreluje z przebiegiem funkcji potęgowej.

Przebieg wyznaczonej zależności przedstawiono na rys.2.



Rys.2. Model regresji potęgowej wskaźnika C_{V100} względem przebiegu pojazdu

4. WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania eksploatacyjne potwierdzają słuszność dokonanej analizy teoretycznej i wskazują, że zmiany zachodzące w eksploатовanym oleju silnikowym są m.in. efektem zużycia elementów układu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder. Wartość tego zużycia może być, w sensie ogólnym, wyrażona przebiegiem pojazdu. W takim ujęciu spośród wskaźników fizykochemicznych i funkcjonalnych charakteryzujących stan eksploатовanego oleju smarowego jedynie lepkość kinematyczna w 100°C dostatecznie odzwierciedla procesy degradacji zachodzące w tym skojarzeniu. Wykazano również, że

istnieje ścisła zależność między zmianami lepkości kinematycznej eksploatowanego oleju silnikowego, wyrażonymi za pomocą wskaźnika intensywności zmian lepkości kinematycznej w 100°C C_{V100} , a przebiegiem pojazdu – silnika. Zależność tę opisuje funkcja potęgowa (2).

2. W wyniku przeprowadzonych badań nie stwierdzono zależności między przebiegiem pojazdu, a zawartością pierwiastków pochodzących z elementów konstrukcyjnych silnika w badanym oleju silnikowym. Potwierdza to przydatność metod analizy spektroskopowej zawartości pierwiastków metalicznych w oleju silnikowym jedynie jako środka pomocniczego do oceny stanu silnika.

3. Uzyskane wyniki badań wskazują na konieczność podjęcia dalszych badań zmierzających do wyznaczenia zależności pomiędzy kinetyką zmian lepkości kinematycznej eksploatowanego oleju silnikowego, a zmierzonymi w eksploatacji wartościami zużycia układu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Łuczak A., Mazur T.: *Fizyczne starzenie elementów maszyn*, Warszawa, WNT 1981.
- [2] Lotko W.: *Silniki spalinowe pojazdów szynowych*, Radom, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej 2001.
- [3] Hebda M.: *Eksploatacja samochodów*, Radom, Instytut Technologii Eksploatacji – PIB 2006.
- [4] Nadolny K.: *Niezawodnościowe problemy eksploatacyjnych zmian jakości silnikowych olejów smarowych*, Rozprawy nr 164, Poznań, Politechnika Poznańska 1985.
- [5] Chmielewski Z.: *Trwałość tulei cylindrowych silnika spalinowego jako funkcja stanu oleju smarowego podczas eksploatacji*, Rozprawa doktorska, Radom, Politechnika Radomska 2001.
- [6] Drożdziel P., Ignaciuk P.: *Ocena zmian własności oleju silnikowego w trakcie stanowiskowych rozruchów silnika spalinowego*, Tribologia 2/2004, Radom, Wydawnictwo ITE.
- [7] Jakóbiec J., Budzik G.: *Czynniki mające wpływ na stopień degradacji oleju silnikowego w okresie eksploatacji*, Archiwum Motoryzacji 3/2007, Wydawnictwo Naukowe PTNM.