

Cyclicity of the oil exchange in the engine in terms of wear process of cylinder liners

The study attempts to correlate the two phenomena occurring in an internal combustion engine during operation. The first is the cyclical replacement of engine oil during its operation process equivalent to the replacement of a structural element of the tribological system piston-piston rings-cylinder liner (TPC). The second phenomenon is the engine cylinder liner wear as TPC part not subject to be exchanged until reaching the boundary condition (SG) of the engine. Changes in physical and chemical properties of oil during operation reflect technical condition of TPC. Degradation and refreshing of oil during operation cause the changes of indicators describing his condition. The proposed indicator of intensity of changes of oil properties C_w brings averaged information about the intensity of the impact of engine on the oil, while long-term trend reflects the observed changes. The calculated value of indicator for oil at the time of the exchange allows you to specify wear of cylinder liners of operated engine. The usefulness of the method was verified during operational research.

Key words: engine wear, engine oil, operational research

Cykliczność wymiany oleju w silniku spalinowym w aspekcie procesu zużywania tulei cylindrowych

W pracy podjęto próbę skorelowania dwóch zjawisk zachodzących w eksploatowanym silniku spalinowym. Pierwsze z nich to cykliczna wymiana oleju silnikowego w procesie eksploatacji równoznaczna z wymianą elementu konstrukcyjnego układu tribologicznego tłok-pierścienie tłokowe-tuleja cylindrowa (TPC). Drugim zjawiskiem jest zużywanie tulei cylindrowej silnika jako elementu TPC nie podlegającego wymianie do osiągnięcia stanu granicznego (SG) przez silnik. Zmiany własności fizykochemicznych oleju w czasie eksploatacji odzwierciedlają m.in. stan techniczny układu TPC. Zjawiska degradacji i odświeżania oleju w czasie eksploatacji powodują zmiany wartości wskaźników opisujących jego stan. Zaproponowany wskaźnik intensywności zmian własności oleju C_w niesie ze sobą uśrednioną informację na temat intensywności oddziaływania silnika na olej, jednocześnie odzwierciedla długotrwałą tendencję obserwowanych zmian. Obliczona wartość wskaźnika dla oleju w chwili jego wymiany pozwala określić zużycie tulei cylindrowych eksploatowanego silnika. Przydatność metody zweryfikowano w badaniach eksploatacyjnych.

Słowa kluczowe: zużycie silnika, olej silnikowy, badania eksploatacyjne

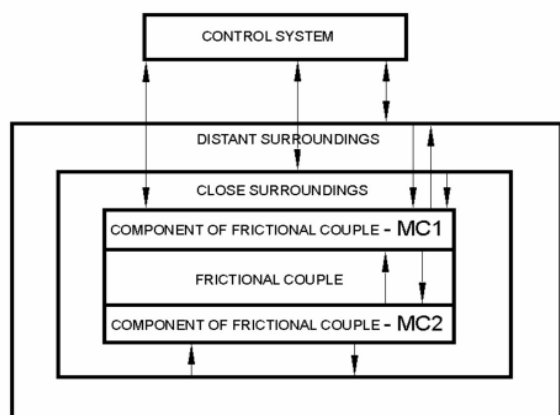
1. Wstęp

Istotnym problemem w praktyce eksploatacyjnej jest ocena stanu technicznego silnika, a co z tym związane, określenie zużycia elementów układu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder (TPC). Stosowane dotychczas powszechnie metody wymagają częściowego demontażu elementów silnika celem dokonania stosownych pomiarów. Do tej grupy metod należy m.in. mikrometraż elementów silnika, a także metody pozwalające pośrednio określić stopień zużycia układu TPC np. pomiar ciśnienia sprężania. W tym przypadku należy zdemontować niektóre elementy układu wtryskowego silnika. 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 w czasie eksploatacji. Wynika to z oddziaływania systemu na olej. Model systemu tribologicznego przedstawiono na rys.1.

Wielkość wymuszeń działających na olej silnikowy związana jest m.in. ze stanem technicznym układu TPC wyrażonym wielkością luzów w tym skojarzeniu. Spowodowany tym luzem wzrost przedmuchów spalin do skrzyni korbowej silnika, ilości oleju przedostającego się do komory spalania, ilości niespalonego paliwa przedostającego się do miski olejowej powodują, że wskaźniki opisujące stan oleju silnikowego ulegają intensywnym zmianom w czasie. Kinetyka tego procesu jest zatem 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.



Rys. 1. Model systemu tribologicznego [2]
Fig. 1. Model of the tribological system [2]

2. Opis metody

Przy opracowywaniu nowej metody oceny zużycia układu TPC szczególny nacisk położono na możliwość jej stosowania przez szerokie grono użytkowników pojazdów. Dodatkowo metoda ta nie powinna wymagać ingerowania w układ tribologiczny czy też silnik pojazdu, a wszelkie badania powinny być wykonywane poza pojazdem. Takie podejście wymagało rozwiązania dwóch zasadniczych problemów.

Pierwszy dotyczył sposobu oceny zużycia układu TPC, drugi zaś metodyki badań eksploataowanego oleju silnikowego.

Pierwsze zagadnienie jest stosunkowo proste do rozwiązania. Przeprowadzona analiza literaturowa wykazała, że zużycie układu TPC utożsamiane jest przede wszystkim ze wzrostem wewnętrznej średnicy tulei cylindrowej. Zgodnie z Normą Branżową [3] zużycie cylindrów oblicza się, zestawiając wyniki pomiarów mikrometrycznych średnicy wewnętrznej cylindra wykonanych po obserwowanym okresie pracy silnika z górnym wymiarem tej średnicy podanym w dokumentacji konstrukcyjnej.

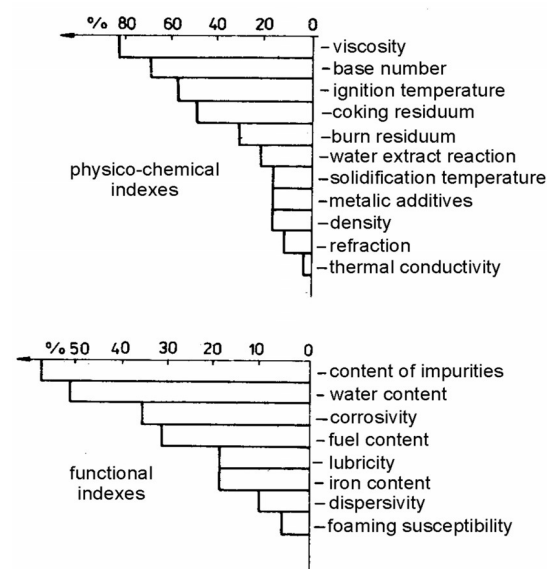
W statystycznych badaniach trwałości silników, zwłaszcza w warunkach eksploatacyjnych, dąży się do uproszczenia pomiarów. Zużycie cylindra traktuje się wtedy jako wskaźnik zużycia całego zespołu TPC [4].

W przypadku metodyki badań oleju silnikowego zagadnienie wymagało głębszej analizy.

Olej silnikowy i opis jego stanu jako środka smarowego nie może być dokonany w oderwaniu od systemu tribologicznego. Stan oleju charakteryzując makroskopowe właściwości układu jak też wielkości związane z wypełnianymi w systemie funkcjami. Opis stanu jest zatem odzwierciedleniem właściwości indywidualnych i funkcjonalnych (zespółowych) środka smarowego. W praktyce najczęściej własności te ocenia się poprzez pomiar konkretnych parametrów – wskaźników ujętych w normach przedmiotowych, dotyczących środków smaro-

wych. Zestawienie najczęściej stosowanych wskaźników przedstawiono na rys.2.

Przyjęta w założeniach dostępność stosowania nowej metody przez szerokie grono użytkowników wyznaczała konieczność wyboru spośród prezentowanych wskaźników 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). Wstępnej selekcji wskaźnika odpowiadającego tym kryteriom dokonano na drodze analizy teoretycznej.



Rys. 2. Częstość stosowania wskaźników oceny zmian jakości oleju w badaniach eksploatacyjnych [2]

Fig. 2. Usage frequency of the evaluation indexes related to the oil quality in operational research [2]

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. 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 [6]. Obserwuje się zatem proces rozcieńczania oleju silnikowego w czasie eksploatacji 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 polepsza 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 [6]. 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 mierzonego wskaźnika oceny stanu oleju dla oleju świeżego

W_k – wartość mierzonego wskaźnika oceny stanu oleju dla oleju pracującego (w chwili wymiany),

t_{ol} – czas pracy oleju w silniku do wymiany,

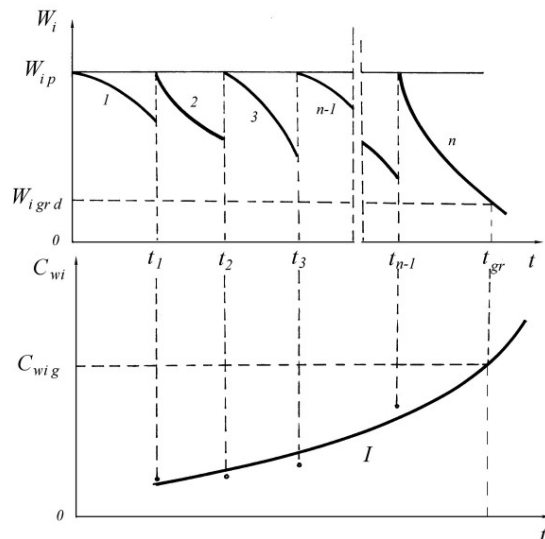
C_w – wskaźnik intensywności zmian własności oleju.

Wskaźnik ten niesie ze sobą uśrednioną informację na temat intensywności oddziaływania silnika na olej. Nie uwzględnia okresowych zmian war-

tości mierzonego parametru oleju, lecz odzwierciedla długotrwałą tendencję obserwowanych zmian. Graficzną jego interpretację przedstawiono na rys.3.

Przeprowadzone badania eksploatacyjne wykazały, że najlepszym dla potrzeb prezentowanej metody jest wskaźnik intensywności zmian lepkości kinematycznej w 100°C – C_{V100} [6].

Ostatnim etapem jest wyrażenie zużycia obserwowanego w układzie TPC przy pomocy rejestrowanego w eksploatacji wskaźnika intensywności zmian lepkości kinematycznej C_{V100} .



Rys. 3. 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

Fig. 3. Changes of the oil condition index as a function of time

W_p – initial value of condition indexes, $W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn}$ – final value of condition index at the moment of 1, 2, ..., n^{th} oil change, t_1, t_2, \dots, t_n – moments of oil change, C_w – index of change intensity of the oil properties

Ponieważ zarówno zużycie z jak i zmiany wskaźnika C_{V100} są funkcją czasu eksploatacji (krzywa I na rys.3) zatem rozwiązując układ równań względem czasu otrzymano poszukiwaną zależność (2):

$$z = f(C_{V100}) \quad (2)$$

Celem określenia analitycznej postaci zależności (2) przeprowadzono badania eksploatacyjne.

3. Badania eksploatacyjne

Badania eksploatacyjne przeprowadzono na grupie 5 – ciu silników 359M eksploatowanych w samochodach STAR 1142. Są to silniki wysoko-

prężne, 6 – cio cylindrowe o rzędownym układzie cylindrów, pojemności skokowej 6,482 [dm³], mocy znamionowej 110 [kW] i momencie obrotowym 440 [Nm] przy prędkości obrotowej 1800 – 2100 [obr/min]. Samochody eksploatowane były w cyklu miejskim oraz pozamiejskim. Badania prowadzono dla przebiegu 0 ÷ 110 [tys.km].

W trakcie prowadzonych badań dokonywano [6]:

- 1) pomiarów zużycia tulei cylindrowych silników,
- 2) oznaczenia własności fizykochemicznych oleju świeżego,
- 3) oznaczenia własności fizykochemicznych oleju przetworzonego w chwili jego wymiany.

Oznaczano następujące wskaźniki stanu oleju:

- lepkość kinematyczną w temperaturze 40⁰C,
- lepkość kinematyczną w temperaturze 100⁰C,
- liczbę zasadową,
- pozostałość po spopieleniu,
- temperaturę zapłonu,
- liczbę koksowania,
- zawartość wapnia, cynku i fosforu
- zawartość żelaza, miedzi i ołowiu (tylko dla oleju przetworzonego).

Analiza statystyczna uzyskanych wyników badań w odniesieniu do zmian własności oleju silnikowego potwierdziła, że jedynie kinetyka zmian lepkości kinematycznej oleju w temperaturze 100⁰C odpowiada zmianom zużyciowym obserwowanym na powierzchni tulei cylindrowych [6].

Na podstawie zebranych danych wyznaczono następujące zależności (3):

$$\bar{z} = (0,000132) \cdot t + 43,961 \quad \text{dla } t > t_d \quad (3a)$$

$$C_{v100} = (3,277) - (2,142) \cdot t^{(0,033)} \quad \text{dla } t > t_d \quad (3b)$$

gdzie:

t – czas pracy silnika wyrażony w [km] przebiegu pojazdu,

t_d – chwila zakończenia procesu docierania [km],

\bar{z} – wartość średnia zużycia tulei cylindrowej [μm],

C_{v100} – wskaźnik intensywności zmian lepkości kinematycznej w temperaturze 100⁰C $\left[\frac{mm^2}{s \cdot km} \right]$,

oraz poszukiwaną zależność $z = f(C_{v100})$ (4):

$$\bar{z} = (0,000132) \cdot \left[\frac{(3,277) - C_{v100}}{(2,142)} \right]^{\frac{1}{0,033}} + (4396) \quad (4)$$

dla $t > t_d$

W ten sposób dla dowolnej chwili czasu $t > t_d$ można określić na podstawie zmian lepkości kinematycznej oleju silnikowego w temperaturze 100⁰C – v_{100} , na poziomie ufności $1 - \alpha = 0,5$, średnią wartość zużycia tulei cylindrowych silnika. Zwiększenie poziomu ufności takiej oceny wymagałoby przeprowadzenia dodatkowych badań na większej populacji obiektów. Badania takie, dosyć kosztowne, byłyby celowe w przypadku perspektywy szerokiego wykorzystania proponowanej metody prognostycznej w praktyce.

4. Wnioski

Warunkiem koniecznym dokonania oceny zużycia tulei cylindrowych silnika na podstawie zmian lepkości oleju jest zebranie następujących informacji:

- 1) wartości lepkości kinematycznej w temperaturze 100⁰C – v_{100} dla oleju świeżego,
- 2) wartości lepkości kinematycznej w temperaturze 100⁰C – v_{100} dla oleju przetworzonego (w chwili jego wymiany),
- 3) czasu pracy oleju – przebiegu pojazdu od chwili ostatniej wymiany.

Przedstawiona metoda pozwala na przyjętym poziomie ufności dokonać oceny dla silnika 359M i silników o zbliżonej konstrukcji. Zależność ta nie jest uniwersalna i zastosowanie jej do silników innego typu wymaga przeprowadzenia dodatkowych badań weryfikujących. Jednak charakter zjawisk zachodzących w oleju silnikowym i ich zależność od stopnia zużycia układu TPC pozwalają przypuszczać, że charakter zależności będzie podobny. Różnice występować będą jedynie w wartościach współczynników krzywej opisującej związek między zużyciem \bar{z} , a wskaźnikiem C_{v100} .

Skróty i oznaczenia

TPC – tłok-pierścienie tłokowe-cylinder

SG – stan graniczny

Literatura

- [1] Łuczak A., Mazur T.: Fizyczne starzenie elementów maszyn. WNT, Warszawa 1981.
- [2] Nadolny K., Chmielewski Z., Nikoniuk J.: Bezinwazyjna metoda oceny zużycia tulei cylindrowych silnika ZS. Eksploatacja i Niezawodność nr 4/2005, Warszawa 2005, s. 30 – 37
- [3] Norma BN-79/1374-04. Silniki samochodowe. Badania stanowiskowe. Badania niezawodności.

-
- [4] Niewczas A.: Trwałość zespołu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder silnika spalinowego. WNT, Warszawa 1998.
- [5] Jakóbiec J., Budzik G.: Czynniki mające wpływ na stopień degradacji oleju silnikowego w okresie eksploatacji. Archiwum Motoryzacji 3/2007, Wydawnictwo Naukowe PTNM..
- [6] Chmielewski Z.: Trwałość tulei cylindrowych silnika spalinowego jako funkcja stanu oleju smarowego podczas eksploatacji. Rozprawa doktorska, Politechnika Radomska, Radom 2001.
- [7] Zhou Y., Ma L., Mathew J., Sun Y., Wolff R.: Prognozowanie trwałości środków technicznych z wykorzystaniem wielu wskaźników degradacji i zdarzeń awaryjnych w ujęciu modelu ciągłej przestrzeni stanów. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 4(44)/2009, s 72-81.

Zbigniew Chmielewski, Dr. – Faculty of Mechanical Engineering at Radom University of Technology.

Dr inż. Zbigniew Chmielewski – adiunkt na Wydziale Mechanicznym Politechniki Radomskiej