

BEZINWAZYJNA METODA OCENY ZUŻYCIA TULEI CYLINDROWYCH SILNIKA ZS

NON-INVASIVE ESTIMATION OF CYLINDER WEAR IN A DIESEL ENGINE

W pracy zaprezentowano nową metodę oceny zużycia tulei cylindrowych silnika ZS wykorzystującą informacje pochodzące z eksploatowanego w silniku oleju. Zmiany własności fizykochemicznych oleju w czasie eksploatacji odzwierciedlają m.in. stan techniczny układu tłok-pierścienie-cylinder. 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

The paper presents a new method of estimation of cylinder liner wear in a diesel engine. The method uses data obtained from lubricating oil used in the investigated engine. Changes of physical and chemical properties of oil during operation reflect technical condition of an piston-ring-cylinder assembly. Effects of degradation and renewing of oil during operation cause changes of index values which describe condition of oil. Proposed index of change intensity of oil properties C_w brings averaged information about the impact intensity of engine on the oil. At the same time it reflects long term tendency of observed changes. Calculated value of index for oil at the moment of its change allows for evaluation of wear of the cylinder liners of the investigated engine. Usability of the method was verified during operational research.

Keywords: engine wear, engine oil, operational research

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

1. Introduction

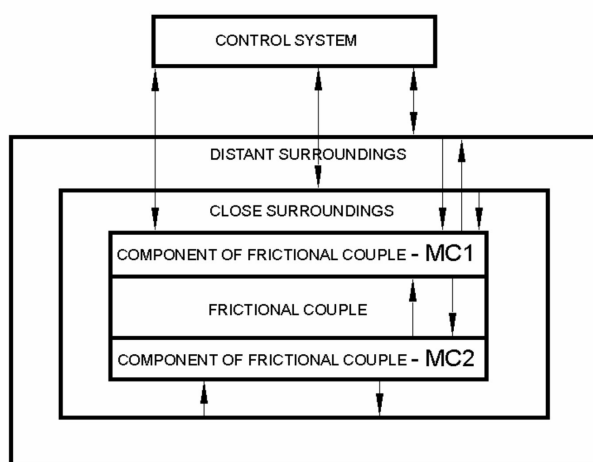
Substantial problem during service practice is related to the evaluation of the technical condition of an engine, and therefore, with determination of wear of piston-ring-cylinder (PRC) components. Methods used commonly so far require partial disassembly of engine in order to perform required measurements. Micrometric measurements of engine components belong to this group of methods, as well as methods which enable indirect determination of wear ratio of PRC assembly, like measurement of compression pressure. In this case some components of engine injection system need to be disassembled. A separate group is created by the methods which enable constant observation of wear processes in components with frictional mating. Methods which are used for such purposes, like isotopic, are expensive and require

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 [2]. Model systemu tribologicznego przedstawiono na rys. 1.

special preparation and equipment. That is why they are not widespread in technical diagnostics.

Analysis of PRC assembly as a tribological system shows, that a lubricating medium can be an important source of information. Among all components of the tribological system [1] engine lubricating oil is subject to the most intense physical and chemical changes during operation. It results from the influence which system exerts on the oil [2]. The model of tribological system is shown on fig. 1.



Rys. 1. Model systemu tribologicznego
Fig. 1. Model of the tribological system

Wielkość wymuszeń działających na olej silnikowy związana jest m.in. ze stanem technicznym układu TPC. Od wielkości luzu w tym skojarzeniu zależy ilość spalin przedostających się do skrzyni korbowej, ilość oleju przedostającego się do komory spalania oraz ilość niespalonego paliwa przedostającego się do miski olejowej. Zjawiska te powodują, że wskaźniki opisujące stan oleju silnikowego ulegają intensywnym zmianom w czasie. Kinetyka tego procesu uzależniona jest od 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 eksploатовanego w nim oleju silnikowego.

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 pomiary powinny być wykonywane poza pojazdem. Takie podejście

Magnitude of input functions which act on engine oil is related to the technical condition of PRC assembly. Clearance in this assembly influences the volume of exhaust gasses entering the crankcase, amount of oil entering the combustion chamber and amount of unburnt fuel entering the oil sump. This effects cause, that parameters describing condition of engine oil change in great intensity within time. Kinetics of the process depends on the tribological phenomena taking place and on the wear of PRC assembly. Therefore there is a possibility to evaluate wear ratio of the PRC assembly on the basis of observation of changes which take place in physical and chemical composition of engine oil used in the investigated engine.

2. Method description

During elaboration of the new method used for evaluation of the PRC assembly wear a particular emphasis was put on the possibility of its employment by wide group of vehicle users. Moreover, this method should not require interference with the tribological system or engine of the vehicle. All the measurements should be done away from the vehicle. Such approach

wymagało rozwiązania dwóch zasadniczych problemów: wyboru sposobu oceny zużycia układu TPC oraz opracowania metodyki badań eksploатовanego 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 badaniach trwałości silników w ujęciu statystycznym, 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 charakteryzują makroskopowe właściwości układu jak też wielkości związane z wypełnianiami w systemie funkcjami. Opis stanu jest zatem odzwierciedleniem właściwości indywidualnych i funkcjonalnych (zespołowych) środka smarowego. W praktyce najczęściej własności te ocenia się poprzez pomiar wartości konkretnych parametrów – wskaźników ujętych w normach przedmiotowych, dotyczących środków smarowych. 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 re-

quired solving two main problems: selection of procedures of wear assessment in a PRC assembly and development of research methodology of the engine lubricating oil.

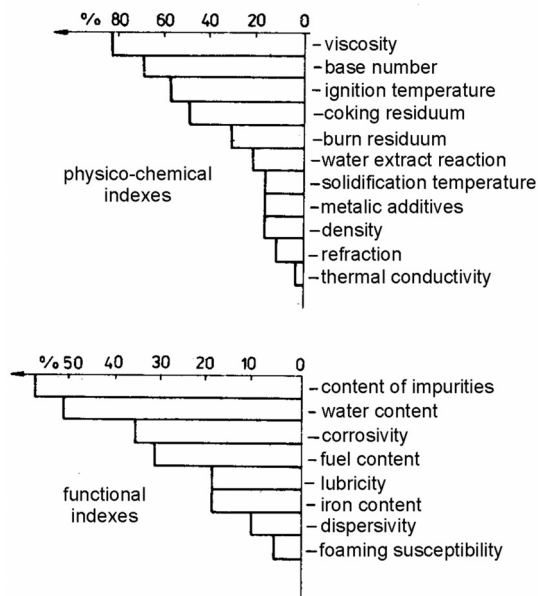
The first question is relatively simple to solve. Analysis of the literature shows, that the wear of the PRC assembly is identified mainly by the increase of the external diameter of the cylinder liner. According to the Branch Norm [3], cylinder wear is calculated on the basis of micrometric measurements of the inner diameter of the cylinder, performed after observed time of engine operation, and matching them with upper dimension of the diameter given in a technical documentation.

In statistical approach to engine durability research, especially in operational conditions, a tendency in reduction of measurements can be observed. Wear of the cylinder is treated as an index of the total wear of the PRC assembly [4].

In case of engine oil research methodology, the problem required more complex approach. Engine lubricating oil and its condition can not be described with separation from the tribological system. Condition of oil can be characterized by macroscopic properties of the system, as well as quantities related to the functions fulfilled in the system. Description of the state is reflected by individual properties and functional (collective) properties of the lubricating medium. In practice, most often these properties are evaluated by measurement of the values related to specific parameters – indexes included in subject norms,

concerning lubricating mediums. Summary of indexes used most commonly is shown on fig. 2.

Availability of the method for wide group of users which was accepted in the general assumptions, required selection of one, best index between all the presented. This also limited costs of evaluation. Moreover, operational changes of the chosen index had to sufficiently correlate with changes taking part in the PRC assembly, i.e. advancing wear of cylinder liners. Intensity of observed changes should increase with recorded engine (vehicle) mileage. Preliminary selection of indexes fulfilling



Rys. 2. Częstość stosowania wskaźników oceny zmian jakości oleju w badaniach eksploatacyjnych [5]
 Fig. 2. Usage frequency of the evaluation indexes related to the oil quality in operational research [5]

jestrowanym przebiegiem silnika (pojazdu). Wstępnej selekcji wskaźnika odpowiadającego tym kryteriom dokonano na drodze analizy teoretycznej.

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

above requirements was done on the theoretical basis.

Conditions of collaboration between piston, piston rings and cylinder liner are mostly determined by viscosity of present lubricating medium. Viscosity determines the type of friction both for the cold and warm engine and is of significance during engine start-up. Moreover, oil viscosity changes during engine operation. It is connected with a phenomena of penetration of unburnt fuel to the crankcase, what is conditioned in high extent by the leaktightness (wear) of PRC group. An increase of clearance between the piston and cylinder liner which can be observed with the increasing mileage fosters penetration of higher amount of fuel and quicker dilution of the engine oil. Simultaneous processes which cause increase of oil viscosity do not neutralize the described tendency, and their intensity is not strictly correlated with the progressive wear of the PRC group. Their presence is connected mostly with oil ageing processes which take place in the high-temperature zones of the engine, i.e. lubricating layer on the cylinder liner surface [6]. So the process of oil dilution during engine operation can be observed, which intensifies with vehicle mileage. Kinetics of viscosity changes is reflected by the decreasing function with absolute increments increasing with vehicle mileage.

However changes taking place in the used oil are not only related to its degradation because of the system's influence, but also the effect of renewing by “topping up”. Physical and chemical condition of oil shortly after “topping up” is strongly distorted. A portion of fresh oil upgrades properties of lubricating medium, making them close to the initial values. Therefore, an important issue is when the analysis should be made.

Real condition of used oil is observed during its change. Observation of user's behaviour show, that they do not renew oil short before planned change, so condition of changed oil reflects a resultant of all affecting inputs.

It should be considered how the process of cylinder wear, which is constant and observed for the given kinematic pair, can be compared to oil degradation process which takes place for consecutive, new portions of oil after every change. Real time of oil usage can be different for consecutive changes, although statistically, with high maintenance culture, its expected value will be close to the producer's recommendations.

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 przeprosowanego (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 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} .

In the described method, a new index of change intensity of oil properties C_w is proposed [6], which can be a good solution to the problem outlined above. The index is given by the following formula (1):

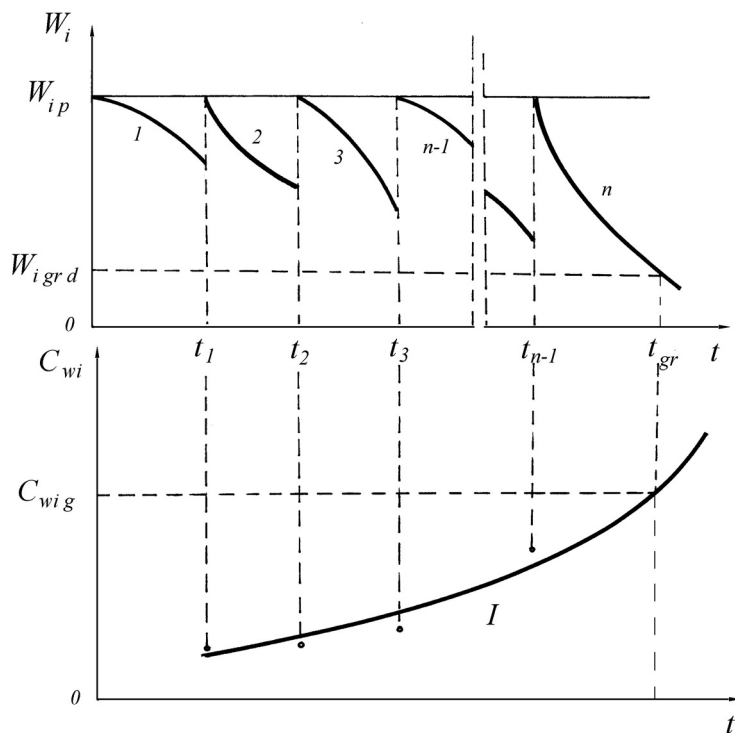
$$C_w = \frac{W_p - W_k}{t_{ol}} \quad \text{for } t > 0 \quad (1)$$

where: W_p – measured index of evaluation of the oil conditions for the fresh oil, W_k – measured index of evaluation of the oil conditions for the used-up oil (at the moment of change), t_{ol} – time of engine operation till the change of oil, C_w – index of change intensity of oil properties.

The index brings averaged information about the intensity of engine impact on the oil and does not take into account periodic changes of measured oil parameters but reflects long term trend of observed changes. Graphic presentation of index C_w is given on fig. 3.

Operational research have shown, that the best index for the presented method is based on the change intensities of the kinematic viscosity at 100°C – C_{V100} [6].

The last phase of the research is to express wear observed in the PRC assembly using the viscosity change intensity index C_{V100} , which is recorded during engine operation.



Rys. 3. Graficzna interpretacja zmian wskaźnika oceny stanu oleju w czasie: W_p – początkowa wartość wskaźnika stanu oleju, W_{k1} , W_{k2} , ..., W_{kn} – końcowa wartość wskaźnika stanu oleju w chwili 1, 2, ..., n wymiany oleju, t_1 , t_2 , ..., 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} , ..., W_{kn} – final value of condition index at the moment of 1, 2, ..., nth oil change, t_1 , t_2 , ..., 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 wysokoprężne, 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 pracowanego w chwili jego wymiany.

Oznaczano następujące wskaźniki stanu oleju:

- lepkość kinematyczną w temperaturze 40°C,
- lepkość kinematyczną w temperaturze 100°C,
- liczbę zasadową,
- pozostałość po spoieleniu,
- temperaturę zapłonu,
- liczbę koksowania,
- zawartość wapnia, cynku i fosforu
- zawartość żelaza, miedzi i ołowiu (tylko dla oleju pracowanego).

Analiza statystyczna uzyskanych wyników badań w odniesieniu do zmian własności oleju silnikowego potwierdziła, że jedynie kinetyka zmian lepkości kinematycznej oleju w temperaturze 100°C odpowiada zmianom zużyciowym obserwowanym na powierzchni tulei cylindrowych [6]. Uwzględniono jednocześnie, że charakter procesów zużyciowych zachodzących w okresie docierania silnika jest nieco odmienny, stąd też w analizie wyodrębniono dwa etapy eksploatacji: pierwszy związany z okresem docierania silnika ($t \leq t_d$) i drugi normalnego zużycia ($t > t_d$) [6]. Z punktu widzenia użytkownika, istotniejszą jest ocena stanu zużycia silnika w drugim okresie eksploatacji dlatego poniżej przedstawiono wyniki badań dla tego etapu użytkowania.

As both wear z and changes of C_{V100} index are functions of operation time (curve I, fig. 3), solving a set of equations relative to time gives desired dependence (2):

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

So as to define analytical form of the dependence (2) experiments during operation were made.

3. Operational research

Operational research was done using 5 engines of 359M type which were used in Star 1142 trucks. That are 6-cylinder in-line diesel engines, with capacity of 6.48 [dm³], rated power 110 [kW] and rotational torque 440 [Nm] at 1800 - 2100 [rpm]. Trucks were used in a city driving conditions and in inter-city distribution. Research covered the mileage from 0 to 110.000 [km]. During the research following tasks were done [6]:

- 1) wear measurements of the cylinder liners,
- 2) determining physical and chemical properties of fresh engine oil,
- 3) determining physical and chemical properties of used-up engine oil during its change.

Following indexes of oil condition were measured:

- kinematic viscosity at 40°C,
- kinematic viscosity at 100°C,
- base number,
- residuum after burn,
- ignition temperature,
- coking number,
- content of Ca, Zn and P
- content of Fe, Cu, Pb (only for used-up oil).

Statistical analysis of gathered results in regard to the changes of properties of engine oil has confirmed, that only kinetics of changes of the kinematic viscosity of at 100 °C correlates well with wear changes observed on the cylinder surface [6]. Because characteristics of wear processes during engine running-in differs from the rest of operation time, analysis consisted of two usage phases: first for to the running-in period ($t \leq t_d$), and second for the normal usage and wear ($t > t_d$) [6]. From the user's point of view, evaluation of engine wear in the second phase is more important, therefore only results for this period of operation are presented below.

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 100°C [$\text{mm}^2/\text{s} \cdot \text{km}$],

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

$$\bar{z} = (0,000132) \cdot \left[\frac{(3,277) - C_{v100}}{(2,142)} \right]^{\frac{1}{0,033}} + (43,961) \quad (4)$$

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 $100^\circ\text{C} - v_{100}$, 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 $100^\circ\text{C} - v_{100}$ dla oleju świeżego,
- 2) wartości lepkości kinematycznej w temperaturze $100^\circ\text{C} - v_{100}$ dla oleju przepracowanego (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} .

On the basis of gathered data following formulas were determined (3):

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

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

where: t – engine operation time in [km] of vehicle mileage, t_d – end of running-in phase [km], \bar{z} – mean value of cylinder wear [μm], C_{v100} – index of change intensity of kinematic viscosity at 100°C [$\text{mm}^2/\text{s} \cdot \text{km}$],

and desired dependence $z = f(C_{v100})$ (4):

$$\bar{z} = (0,000132) \cdot \left[\frac{(3,277) - C_{v100}}{(2,142)} \right]^{\frac{1}{0,033}} + (43,961) \quad (4)$$

for $t > t_d$

In such a way, for the desired time $t > t_d$ with the confidence level of $1 - \alpha = 0,5$, a mean value of wear of the cylinder can be estimated on the basis of changes in kinematic viscosity v_{100} of engine oil at 100°C . Increase of confidence level of such evaluation would require research of greater number of engines. Such investigations – rather costly – would be desirable only with wider perspective of usage of the prognostic method.

4. Conclusions

Gathering of following data is a necessary condition for the evaluation of cylinder wear on the basis of viscosity changes of engine oil:

- 1) value of kinematic viscosity at 100°C for the fresh oil,
- 2) value of kinematic viscosity at 100°C for the used oil (at the moment of change)
- 3) time of oil usage – vehicle mileage from the last oil change.

Described method allows for, at a given confidence level, evaluation of wear for the 359M engines and similar constructions. The derived dependence is not universal and its application for the engines of other types would require more detailed verification research. However, character of the effects which take place in the engine oils and their dependence on the wear of PRC group, allows for assumption that general type of the dependence would remain the same. Differences can be expected in regard to the values of fitting coefficients of the curve describing the relation between wear z and C_{v100} index.

4. References

- [1] Łuczak A., Mazur T.: *Fizyczne starzenie elementów maszyn*, WNT, Warszawa 1981.
- [2] Nadolny K.: *Niezawodnościowe problemy eksploatacyjnych zmian jakości silnikowych olejów smarowych*, Politechnika Poznańska, Rozprawy nr 164, Poznań 1985.
- [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] Nadolny K., Zwierzycki W.: *Cele i sposoby prowadzenia eksploatacyjnych badań olejów*, II Sesja Naukowa Wydziału Maszyn Roboczych i Pojazdów PP, Politechnika Poznańska, Poznań 1979.
- [6] Chmielewski Z.: *Trwałość tulei cylindrowych silnika spalinowego jako funkcja stanu oleju smarowego podczas eksploatacji*, Rozprawa doktorska, Politechnika Radomska, Radom 2001.

Dr hab. inż. Karol NADOLNY, prof. PP

Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań
e-mail: karol.nadolny@put.poznan.pl

Dr inż. Zbigniew CHMIELEWSKI

Politechnika Radomska
ul. Chrobrego 45, 26-600 Radom
e-mail: zbigniew.chmielewski@pr.radom.pl

Mgr inż. Jan NIKONIUK

ppup Poczta Polska
Oddział Regionalny Centrum Usług
Transportowych w Łodzi
ul. Obywatelska 121/129, 94-104 Łódź
e-mail: dyrektor@zts.lodz.pl
