

Karol NADOLNY
Zbigniew CHMIELEWSKI
Jan NIKONIUK

PROGNOZOWANIE TRWAŁOŚCI SILNIKA SPALINOWEGO NA PODSTAWIE ZMIAN WŁASNOŚCI FIZYKOCHEMICZNYCH OLEJU SILNIKOWEGO

FORCASTING DURABILITY OF IC ENGINE ON THE BASIS OF CHANGES OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF ENGINE OIL

W pracy przedstawiono nową metodę prognozowania trwałości układu tłok-pierścienie-cylinder (TPC) silnika spalinowego w oparciu o obserwowane zmiany własności fizykochemicznych eksploatowanego oleju silnikowego. Dotychczas stosowane metody oceny trwałości skojarzenia TPC wymagały zebrania informacji o chwilach osiągnięcia stanu granicznego układu bądź wykorzystywały modele kinetyki zużycia opracowane na podstawie badań przyspieszonych obiektów rzeczywistych. W zaproponowanej metodzie do oceny trwałości tulei cylindrowych silnika wykorzystuje się informacje pochodzące z badań eksploatowanego w silniku oleju. Przebieg zmian zaproponowanego wskaźnika intensywności zmian lepkości kinematycznej oleju w temperaturze $100^{\circ}\text{C} - C_{v100}$ pozwala oszacować trwałość skojarzenia TPC silnika spalinowego. Uzyskaną wartość pozytywnie zweryfikowano z wykorzystaniem metody prognostycznej związanej z kryterium technicznym opartym na ocenie intensywności zużycia.

Słowa kluczowe: trwałość silnika, prognozowanie, badania eksploatacyjne

The paper presents a new method of forecasting the durability of piston-rings-cylinder (PRC) liner assembly of the internal combustion engine on the basis of observed changes of physical and chemical properties of engine oil. Methods used so far for the durability evaluation of the PRC group required collecting information about the moments when the assembly reached its boundary state or used kinetic models of wear designed using accelerated research of real objects. In the proposed method, for the evaluation of durability of engine cylinders information gathered from engine oil is used. Course of changes of the proposed index of change intensity of kinematic viscosity at the temperature of $100^{\circ}\text{C} - C_{v100}$ allows for evaluation of the durability of PRC assembly of an IC engine. Obtained value was positively verified using forecasting method related to the technical criteria based on the assessment of the wear intensity.

Keywords: engine durability, forecasting, operational research

1. Wstęp

Przy opracowywaniu nowych jednostek napędowych do pojazdów samochodowych coraz większą uwagę zwraca się na ich trwałość w założonych warunkach eksploatacji. Trwałość jako element ogólnie pojętej jakości wyrobu często determinuje decyzję

1. Introduction

During automotive engine design phase more and more attention is paid to its durability in complex conditions of operation. Durability as a component of generally understood quality of the product, very often determines decision of the future owner regarding se-

potencjalnego użytkownika o wyborze właśnie tej konstrukcji czy modelu. Istnieje zatem potrzeba oceny trwałości wyrobu – pojazdu, silnika lub innych elementów – by rzetelnie przedstawić jego zalety. W przypadku pojazdu samochodowego elementem istotnym z punktu widzenia jego trwałości jest układ tłok-pierścienie-cylinder (TPC) silnika napędowego. Zużycie tego układu decyduje o osiągnięciu przez silnik stanu granicznego (SG) [1]. Zużycie układu TPC utożsamiane jest przede wszystkim ze wzrostem wewnętrznej średnicy tulei cylindrowej. W miarę jej wzrostu następuje nie tylko utrudniony rozruch czy spadek możliwej do uzyskania mocy silnika – kryteria techniczne SG – ale także wzrost zużycia paliwa i oleju silnikowego. Wzrost zużycia oleju, przy surowych normach dotyczących toksyczności spalin, powoduje, że dany silnik (pomimo spełnienia innych kryteriów) nie nadaje się już do dalszego użytkowania – kryteria ekonomiczne i ekologiczne SG.

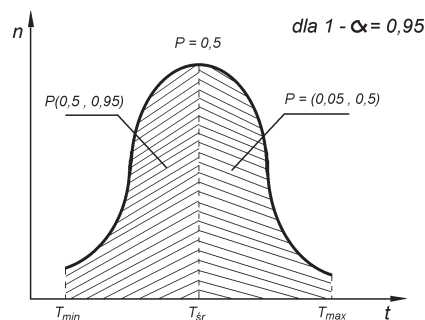
Z punktu widzenia możliwości oceny trwałości skojarzenia tarciowego (obiektu technicznego) rozpatrywane mogą być dwa warianty metodyczne [2]:

1. Dokonuje się analizy czasu pracy obiektu (np. układu TPC) do osiągnięcia stanu granicznego. Dysponując wynikami badań dla dostatecznie dużej, jednorodnej populacji obiektów można wyznaczyć dla dowolnej chwili czasu t rozkład zużycia z uwzględnieniem zużycia średniego, maksymalnego i minimalnego. Szczególnym czasem eksploatacji jest chwila osiągnięcia przez układ zużycia dopuszczalnego warunkującego osiągnięcie stanu granicznego, odpowiadającemu trwałości obiektu. Rejestracja chwil osiągania stanu granicznego pozwala na wyznaczenie trwałości średniej T_{sr} , minimalnej T_{min} i maksymalnej T_{max} dla danej populacji. Tego typu metoda (a’posteriori) w przypadku układu TPC jest trudna do zastosowania. Badania te pozwalają na ustalenie charakterystyk funkcyjnych i liczbowych (punktowych i przedziałowych) z określonym prawdopodobieństwem. Są one jednak kosztowne i długotrwałe, a uzyskane wyniki badań dają się przenosić na podobnej klasy

lection of given construction or model. There is also a need to assess durability of the product – vehicle, engine and other components – so as to reliably present its advantages. In case of an automotive vehicle, a component very important taking into account car’s durability is a piston-rings-cylinder (PRC) assembly. Wear of this assembly directly influences reaching by the engine its boundary state (SG) [1]. Wear of the PRC group is mostly identified with the increase of the internal diameter of the cylinder liner. As the diameter increases, engine start becomes more difficult and engine delivers less power – these are technical criteria of boundary state SG. Moreover, engine consumes more fuel and lubricating oil. Increase in oil consumption, with severe regulations concerning exhaust emissions, results in the fact, that the engine (even fulfilling other criteria) can not be used any longer – these are economic and ecologic criteria of SG.

Considering possibilities of durability evaluation of the frictional couple (of the technical object), two methodical variants can be considered [2]:

1. An analysis of object’s operation time (e.g. PRC assembly) till reaching boundary state. Having results of research for sufficiently high, homogenous population of objects, it is possible to estimate for any time moment t wear distribution taking into account average, maximum and minimum wear. A particular time of operation is the moment when the system reaches boundary wear, conditioning boundary state which corresponds to the durability of the object. Recording the particular moments of reaching boundary state allows for establishing the average durability T_{sr} , minimum T_{min} and maximum T_{max} for the given population. This method (a’posteriori) in case of PRC assembly is difficult to realize. Such type of research allows for determination of numerical and functional characteristics (point and range) with given probability. This method is however costly and time consuming, and obtained results can be transferred on objects of similar class only with certain approximation. Fig. 1 presents



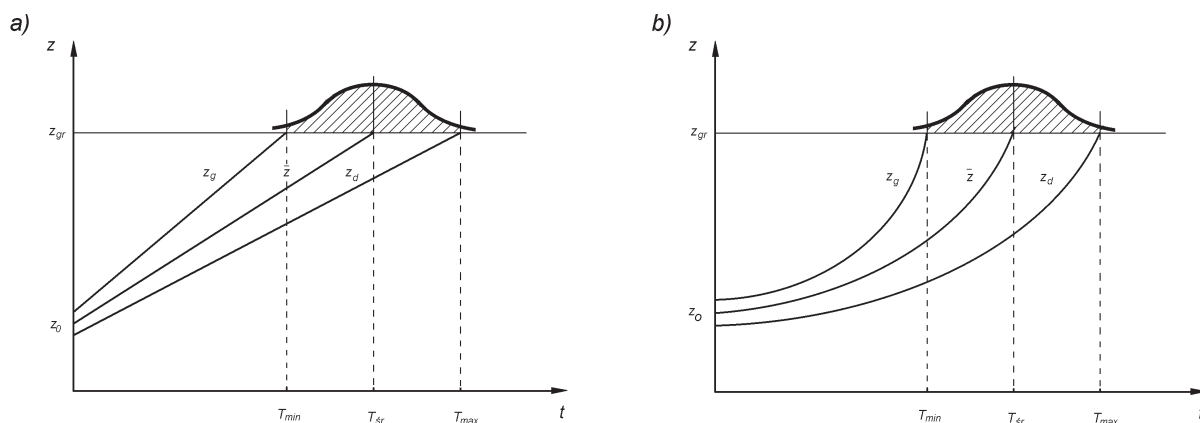
Rys. 1. Sposób wyznaczania trwałości metodą a’posteriori
 Fig. 1. Determination of durability using a’posteriori method

obiekty tylko z pewnym przybliżeniem. Sposób określania trwałości obiektu z wykorzystaniem tej metody przedstawia rys.1.

2. Druga z metod pozwala na znaczne skrócenie badań oraz stwarza możliwości prognozowania trwałości a'priori. W przypadku tej metody badania prowadzone są w czasie krótszym od ресурсu danego obiektu. Na podstawie analizy kinetyki indywidualnych realizacji procesu zużycia dokonywana jest ocena tendencji przebiegu zjawiska (otrzymujemy modele teoretyczne). Wykorzystując informacje dotyczące stanu granicznego, dokonuje się oceny trwałości obiektu. Warunkiem poprawności przeprowadzonej oceny jest wyznaczenie tendencji wartości średniej zużycia jak też możliwych w rzeczywistości realizacji minimalnej i maksymalnej procesu dla wybranego poziomu istotności lub ufności. Tego typu doświadczalnie – teoretyczne metody oceny trwałości należą do metod badań przyspieszonych, gdyż z założenia nie wymagają prowadzenia prób do czasu osiągnięcia przez obiekt stanu granicznego. Uzyskane informacje o kinetyce zmian charakterystyk zużycia (modele kinetyki zużycia) pozwalają je wykorzystać do prognozowania trwałości na podstawie teoretycznych modeli niezawodnościowych rozkładu czasu poprawnej pracy. Ideę prowadzenia tego typu oceny przedstawiono na rys.2a, 2b.

the determination of object's durability using the method described above.

2. Second of methods allows for significant shortening of research time and creates possibility to forecast durability a'priori. In case of this method, research is done in a shorter time than object's service life. It includes an analysis of individual realizations of wear process and estimation of tendencies in the course of phenomena (theoretical models are obtained). Having information regarding boundary state, an assessment of object's durability can be done. The condition of correctness of the estimation is the calculation of tendencies of average wear and possible minimum and maximum values for the given confidence level. This theoretically-experimental methods of durability estimation belong to the group of accelerated research, as – from the assumption – they do not require any tests till the object reaches its boundary state. Gathered information about the kinetics of changes of wear characteristics (models of wear kinetics) allow for forecasting durability on the basis of theoretical reliability models of the distribution of correct time of operation. The idea of such type of assessment is shown on figs. 2a, 2b.



Rys. 2. Ideowy schemat oceny trwałości obiektu metodą a'priori
 Fig. 2. Schematic presentation of durability assessment using a'priori method

2. Istota metody

Stosowane dotychczas metody oceny trwałości skojarzenia TPC wymagają prowadzenia badań aż do chwili osiągnięcia stanu granicznego obiektu (metody a'posteriori), bądź też wymagają ingerencji w układ tribologiczny celem oszacowania ресурсu prawidłowej pracy obiektu np.: mikrometraż, metoda sztucznych baz, metody izotopowe. Przedstawiona poniżej nowa metoda eliminuje te wady.

2. Essence of the method

For the evaluation of the durability of the PRC assembly, methods used so far require research till the object reaches its boundary state (methods a'posteriori), or require intervention in the tribological system so as to determine object's regular service time, e.g. micro measurements, method of artificial bases, isotopic methods. A new method described below eliminates these disadvantages.

Do oceny trwałości tulei cylindrowych silnika wykorzystuje bowiem informacje pochodzące z badań eksploatowanego w silniku oleju. Spełnia on ważne funkcje tworząc z silnikiem system tribologiczny [3]. Zmiany własności fizykochemicznych oleju wynikają z oddziaływania systemu i wiążą się nierozdzielnie z jego stanem technicznym tj. zużyciem tulei cylindrowych. Spośród elementów systemu tribologicznego TPC olej silnikowy podlega najszybszym zmianom na poziomie makroskopowym, a jego wybrane wskaźniki fizykochemiczne spełniają wymogi sygnału diagnostycznego. Prezentowana metoda oceny trwałości tulei cylindrowych silnika w swych założeniach przeznaczona jest do wykorzystania przez szerokie grono użytkowników nie dysponujących bogatym zapleczem technicznym i diagnostycznym. Wykorzystuje zatem okresową wymianę oleju w silniku, prowadzoną w ramach obsługi technicznych, do zebrania informacji o:

- 1) parametrach oleju świeżego,
- 2) parametrach oleju przepracowanego,
- 3) czasu eksploatacji oleju w silniku.

Na podstawie tych danych można określić wartość wskaźnika intensywności zmian własności oleju C_w (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 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 mierzonego parametru oleju, lecz odzwierciedla długotrwałą tendencję obserwowanych zmian. Okresowe zmiany kontrolowanego wskaźnika mogą wynikać m.in. z faktu stosowania dolewek na skutek ubytków oleju (wycieki, spalanie). Szczegółowa analiza zmian wartości wskaźnika w takim przypadku wprowadzałaby zafałszowanie w uzyskiwanej informacji diagnostycznej. Długotrwała obserwacja wartości wskaźnika oceny stanu oleju i zaobserwowane w ten sposób jego zmiany pozwalają sądzić, że przyczyną takich zmian są procesy zużyciowe zachodzące w silniku. Graficzną interpretację tych zjawisk przedstawiono na rys. 3.

Krzywe 1, 2, 3, ..., n obrazują zmiany obserwowanego wskaźnika oceny stanu oleju W_{ol} w czasie między wymianami $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ oleju. Szczegółowa analiza chwilowych wartości wskaźnika dla czasów $t_{11}, t_{12}, t_{21}, t_{22}, \dots, t_{n1}, t_{n2}, \dots, t_{ni}$ i wyliczone na tej podstawie chwilowe wartości wskaźnika intensywności zmian własności

For the durability evaluation of cylinder liners information gathered from engine oil is used. Engine oil has important function forming with the engine a tribological system [3]. Changes in physical and chemical properties of oil result from the influence of the system and are strictly related to its technical condition, i.e. wear of cylinder liners. Components of the tribological system PRC influence engine oil, which is subject to most rapid changes on the macroscopic level, and its chosen physical and chemical indexes fulfill requirements for diagnostic signals. The method of durability evaluation of engine cylinders presented here, in general assumption is designed for the use by a wide group of users who do not have sufficient technical and diagnostic resources. Therefore oil exchange service can be used to gather information about:

- 1) parameters of new oil,
- 2) parameters of used oil,
- 3) oil operation time in an engine

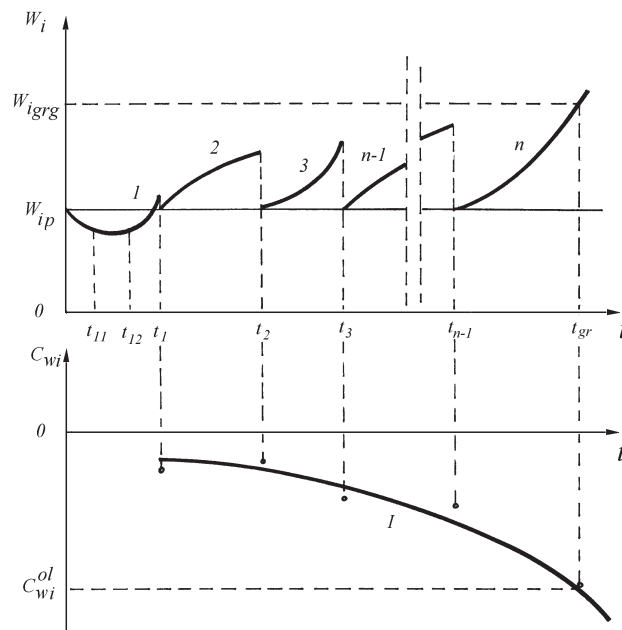
On the basis of above data it is possible to determine value of index of change intensity of oil properties C_w (1):

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

where: W_p – value of the measured index of oil technical condition for the new oil, W_k – value of the measured index of oil technical condition for the used oil (at exchange), t_{ol} – oil operation time in the engine (till exchange), C_w – index of change intensity of oil properties.

This index brings averaged information about intensity of engine impact on the oil. It does not take into account periodic changes in the value of measured oil parameter, and reflects long term tendency in observed changes. Periodic changes of measured index can result from, among others, the fact of topping up oil as a effect of oil loss (leaks, combustion). Detailed analysis of index changes in such case would lead to erratic evaluation of diagnostic information. Long term observation of index of change intensity of oil properties and observed its changes allow to conclude, that the reason of these variations are wear processes occurring in the engine. Graphic interpretation of described phenomena is shown on fig. 3.

Curves 1, 2, 3, ..., n represent changes of observed index of oil technical condition W_{ol} in the time between oil changes $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$. Detailed analysis of momentary index values for the time points $t_{11}, t_{12}, t_{21}, t_{22}, \dots, t_{n1}$ and calculated on this basis momentary values of index of change intensity of oil properties C_{wch} do not carry any important diagnostic information in the sense of technical condition – engine wear. They result from



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. Graphic interpretation of changes in the index of change intensity of oil properties: W_p – preliminary index value, $W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn}$ – end value of index of oil technical condition at the moment 1, 2, ..., n of oil change, t_1, t_2, \dots, t_n – moments of oil change in the engine, C_w – index of change intensity of oil properties

oleju C_{wch} nie niosą ze sobą ważnych informacji diagnostycznych w aspekcie stanu technicznego – zużycia silnika. Są bowiem wynikiem oddziaływania wymuszeń chwilowych bądź krótkotrwałych na silnik (zwiększenie obciążenia, przeprowadzona obsługa techniczna, itp.) lub bezpośrednio na olej (dolewka świeżej porcji, zanieczyszczenia z zewnątrz na skutek uszkodzenia filtra, itp.). Jednak analiza zmian własności w dłuższym cyklu badawczym (tj. od wymiany do wymiany oleju) pozwala zaobserwować długotrwałą tendencję zmian – krzywa I. Wartości wskaźników $C_{w1}, C_{w2}, C_{w3}, \dots, C_{wn}$ wykazują tendencję malejącą (wynikającą ze wzrostu wartości końcowej obserwowanej własności oleju względem jej wartości początkowej $W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn} > W_p$) co wskazuje na intensyfikację zmian zobrazonej własności oleju wraz z przebiegiem silnika. Tego typu zmiany mogą być tylko wynikiem zużycia układu TPC i wynikającego stąd większego oddziaływania silnika na olej. Konsekwencją tego jest szybsza zmiana jego własności fizycznych i chemicznych odzwierciedlona w zmianie wartości wskaźnika C_w . Na rys. 6.3. oznaczono też chwilę osiągnięcia granicznej wartości obserwowanego wskaźnika. Stanowi ona punkt przecięcia krzywej I z wartością odpowiadającą dolnej dopuszczalnej wartości wskaźnika intensywności zmian własności oleju C_w . W tym przypadku wartość ta związana jest z osiągnię-

the influence of momentary or short term inputs acting on the engine (increase of load, technical service) or directly on the engine oil (topping up new oil, outside impurities resulting from filter damage). However analysis of changes in the longer research period (between oil changes) permits to observe long term tendency of changes – curve I. Values of indexes $C_{w1}, C_{w2}, C_{w3}, \dots, C_{wn}$ show decreasing tendency (resulting from the increase of end value of observed value of the measured index of oil technical condition in comparison to its initial value $W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn} > W_p$) what indicates intensification of changes of a given oil property along the engine mileage. Changes of this type can be only result of PRC assembly wear and higher influence of the engine on the oil. In consequence, more rapid changes of oil physical and chemical properties which take place are reflected in changes of C_w index. Fig. 3 shows also marked position of index boundary value. It is a intersection of curve I with the value corresponding to the lower permissible value of index of change intensity of oil properties C_w . In this case, it is related to the reaching of the upper permissible value of observed index of oil condition W – value resulting from accepted criteria of boundary state. In situation, when value of the observed index of oil condition decreases ($W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn} < W_p$), reaching boundary state will result from crossing

ciem górnej dopuszczalnej wartości obserwowanego wskaźnika oceny stanu oleju W – wartość wynikająca z przyjętych kryteriów stanu granicznego. W sytuacji gdy wartość obserwowanego wskaźnika oceny stanu oleju maleje ($W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn} < W_p$) osiągnięcie stanu granicznego wynikać będzie z przekroczenia górnej wartości granicznej wskaźnika C_w związanej z dolną dopuszczalną wartością dla obserwowanego wskaźnika oceny stanu oleju W .

Na rysunku 3 przedstawiono hipotetyczną realizację (zmiany wartości wskaźnika oceny własności oleju) odnoszącą się do pojedynczego eksploatawanego obiektu (silnika).

W rzeczywistości dla każdego indywidualnego obiektu z badanej próby z populacji otrzymuje się wyniki rozproszone. Stąd zależność opisująca zmienność wskaźnika intensywności zmian własności w populacji może być tylko zależnością stochastyczną – korelacyjną.

Obszar rozproszenia ograniczają funkcje regresji $C_{wi\ max}$ i $C_{wi\ min}$ odpowiadające górnej i dolnej granicy przedziału ufności. Konkretnie wartości zależą od arbitralnego przyjęcia poziomów ufności (dla celów technicznych 0,9; 0,95; 0,99) – rysunek 4.

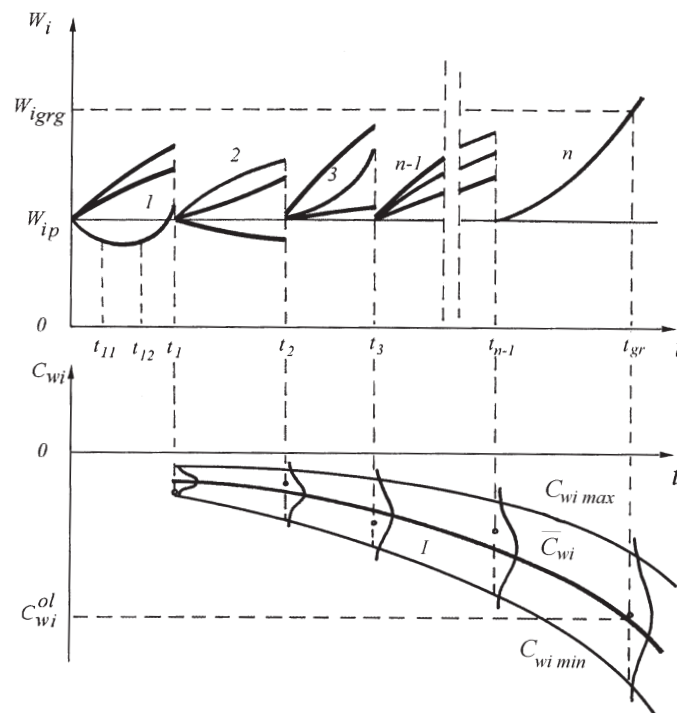
upper boundary value of index C_w , related to lower permissible value of the index of oil condition W .

Fig. 3 shows hypothetical realization (changes of values of oil properties index) related to the single object (engine) under operation.

In reality, for every individual object from the investigated sample from the population obtained results are scattered. Therefore the dependence describing variability of the index of change intensity of oil properties can be only of stochastic value – correlative.

The dispersion area is limited by regression curves $C_{wi\ max}$ and $C_{wi\ min}$ corresponding to the upper and lower border of confidence interval. Specific values depend from the arbitrary assumption of confidence interval (for technical purposes 0.9; 0.95; 0.99) – fig. 4.

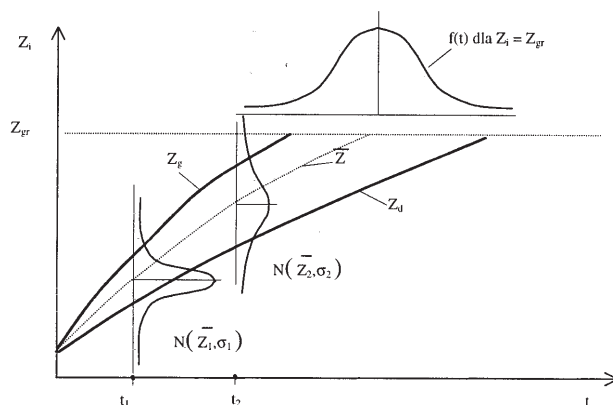
Changes in engine oil presented on figs. 3 and 4 take place parallel to the wear of cylinder liners of the engine. Mathematical description of this phenomena is created by three curves reflecting expected value of changes Z (calculated on the basis of operational research), upper border of realization of the stochastic wear z_g and lower border of the wear course z_d . These three equations all together create statistic model of wear process of cylinder liners (fig. 5).



Rys. 4. Graficzna interpretacja zmian wskaźnika oceny stanu oleju w czasie dla populacji obiektów: 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. 4. Graphic interpretation of changes in the index of change intensity of oil properties for the population of objects: W_p – preliminary index value, $W_{k1}, W_{k2}, \dots, W_{kn}$ – end value of index of oil technical condition at the moment 1, 2, ..., n of oil change, t_1, t_2, \dots, t_n – moments of oil change in the engine, C_w – index of change intensity of oil properties

Przedstawione na rysunkach 3 i 4 zmiany zachodzące w oleju silnikowym następują równoległe z procesem zużycia tulei cylindrowych silnika. Matematyczny opis tego procesu tworzą trzy krzywe odzwierciedlające wartość oczekiwaną zmian Z (wyznaczoną na podstawie badań eksploatacyjnych), górną granicę realizacji procesu losowego zużycia z_g oraz dolną granicę przebiegu procesu zużycia z_d . Te trzy równania łącznie tworzą statystyczny model procesu zużycia tulei cylindrowych (rys.5).



Rys. 5. Graficzna interpretacja matematycznego modelu procesu zużycia tulei cylindrowych
 Fig. 5. Graphic interpretation of mathematical model of wear process of the cylinder liners

Taki opis procesu zużycia pozwala dla dowolnej chwili czasu t określić szerokość przedziału ufności na poziomie ufności β , w którym znajdują się rzeczywiste realizacje procesu losowego. Wybór poziomu ufności jest zagadnieniem decyzyjnym. Granice przedziału ufności dla wyników odnoszących się do czasu prowadzenia obserwacji t_1 można zapisać w postaci:

$$z_1^g = \bar{z}_1 + q_\beta \cdot \sigma_1 \quad (2a)$$

$$z_1^d = \bar{z}_1 - q_\beta \cdot \sigma_1 \quad (2b)$$

gdzie: q_β – współczynnik proporcjonalności.

Wartość współczynnika q_β należy ustalić (w zależności od liczności rozpatrywanej próby wyników) zgodnie z zasadami budowy estymatorów przedziałowych.

Wykorzystanie oleju silnikowego jako źródła informacji do prognozowania trwałości silnika jest możliwe jedynie wtedy, gdy wykaże się, że kinetyka zmian wybranych własności fizykochemicznych eksploатовanego oleju silnikowego odzwierciedla zmiany zużyciowe występujące w obserwowanej parze kinematycznej TPC. Potwierdzeniem takiej korelacji jest m.in. uzyskanie porównywalnych wartości szacowanej trwałości tulei cylindrowych silnika z wykorzystaniem metody zużyciowej jak i „olejowej”. W tym celu należy przeprowadzić badania eksploatacyjne, celem wyznaczenia przebiegu krzywych I . (rys.4) oraz Z (rys.5)

Such description of wear process permits – for any time moment t – to determine width of confidence interval on the confidence level β , where real realizations of the stochastic process are located. Choice of confidence interval is a matter of decision. Boundaries of the confidence interval for the results related to the time of observation t_1 can be written as follows:

$$z_1^g = \bar{z}_1 + q_\beta \cdot \sigma_1 \quad (2a)$$

$$z_1^d = \bar{z}_1 - q_\beta \cdot \sigma_1 \quad (2b)$$

where: q_β – proportionality coefficient.

Value of the coefficient q_β should be determined (in relation to the batch size of the results set) according to the rules of building the range estimators.

Making use of engine oil as a source of information for forecasting engine durability is possible only when it can be proved, that the kinetics of changes of chosen physical and chemical properties of the oil reflects wear changes taking place in the analyzed PRC assembly. Confirmation of such correlation can be done on the basis of comparable values of estimated durability of the cylinder liner with the use of “wear” as well as “oil” method. Operational research should be done, so as to determine course of curves I (fig.4) and Z (fig. 5).

3. Badania eksploatacyjne

Weryfikacji metody dokonano na populacji 5-ciu silników 359M eksploatowanych w samochodach STAR 1142. Są to silniki o zapłonie samoczynnym, wtrysku bezpośrednim, rzędowym układzie cylindrów i mocy 110 [kW]. Samochody użytkowane były przez Zakład Transportu Samochodowego Poczty Polskiej w Lublinie. Przebiegi dzienne samochodów wynosiły od 240 do 350 [km]. Samochody eksploatowano w warunkach jazdy miejskiej i na trasach pozamiejskich. Wszystkie obsługi techniczne wykonywane były zgodnie z zaleceniami producenta.

Dla wyznaczenia przebiegu krzywej \bar{z} w eksploatowanych silnikach wykonywano okresowo mikrometraż tulei cylindrowych zgodnie z zaleceniami Normy Branżowej [4]. Dodatkowo w trakcie wykonywania okresowych obsług technicznych połączonych z wymianą oleju w silniku pobierano próbki oleju poddając je analizie fizykochemicznej. Oznaczano podstawowe wskaźniki fizykochemiczne i funkcjonalne oleju przepracowanego. Analiza przeprowadzana była w Centralnym Laboratorium Naftowym w Warszawie. Podobnej analizie poddano olej świeży eksploatowany w silnikach. W całym okresie prowadzonych badań we wszystkich silnikach używano tego samego oleju silnikowego tj. JASOL 9 produkowanego przez Podkarpackie Zakłady Rafineryjne w Jasle. Zebrane informacje posłużyły do wyznaczenia przebiegu krzywej I (rys.4). Szczegółowe informacje dotyczące metodyki, warunków oraz zakresu badań zawiera praca [5].

4. Wyniki badań

Na podstawie zebranych informacji wyznaczono równania wartości oczekiwanej oraz dolnej i górnej granicy realizacji procesu zużycia. Pełny matematyczny opis procesu zużycia tulei cylindrowych dla okresu eksploatacji $t > t_d$ (t_d – okres docierania) przedstawia układ równań (3):

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

$$z_d = \min\{(0,000105) \cdot t + 43,961, (0,000132) \cdot t + 38,466\} \quad (3b)$$

$$z_g = \max\{(0,000159) \cdot t + 43,961, (0,000132) \cdot t + 49,456\} \quad (3c)$$

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

Podobnej analizie poddano wyniki badań oleju przepracowanego. Stwierdzono [5], na podstawie analizy teoretycznej jak też analizy statystycznej wyników badań, że najlepszym wskaźnikiem oceny zmian własności oleju jest lepkość kinematyczna w temperaturze 100°C i odpowiadający jej wskaź-

3. Research during operation

Verification of the method was done using five 359M engines used in STAR 1142 medium trucks. These are diesel engines, with direct injection, 6 cylinders in-line and rated power 110 [kW]. Trucks were used by Transport Department of Polish Postal Services in Lublin. Daily mileages of vehicles were between 240 and 350 [km]. Trucks were used in conditions of urban and extra-urban driving. Technical maintenance was done according to the manufacturer's instructions.

So as to determine course of the curve \bar{z} in used engines, periodically micro-measurements of cylinder liners was done, according to the standard recommendation of the branch norm [4]. Additionally during obligatory technical inspections united with oil change service, oil samples were taken from the engine and put under physical and chemical analysis. Basic physical, chemical and functional indexes of the used oil were determined. The analysis was done in the Central Oil Laboratory in Warsaw. Similar analysis was done for the new oil used in these engines. During the whole period of research, in all engines the same oil type was used, i.e. JASOL 9, manufactured by Podkarpackie Zakłady Rafineryjne in Jaslo. Gathered information was later used for the determination of the curve I (fig.4). Detailed information regarding methodology, conditions and scope of the research can be found in [5].

4. Results of experiments

On the basis of gathered information it was possible to obtain equations for the expected value and for the lower and upper boundaries of the wear process realization. Full mathematical description of the wear process of the cylinder liners for the period of operation $t > t_d$ (t_d – running-in) is shown by the set of equations (3):

where: t – engine operation time (mileage) [km].

Similar analysis was made in case of research results obtained for the used oil. It was concluded [5] – on the basis of theoretical analysis and statistical analysis of research results, that the best index for the evaluation of changes in oil properties is kinematic viscosity at the temperature of 100 °C and correspon-

nik intensywności zmian lepkości kinematycznej w temperaturze 100°C – C_{v100} (wzór (1)). Przebieg zmian wskaźnika C_{v100} względem czasu eksploatacji przedstawia zależność (4):

$$C_{v100} = (3,277) - (2,142) \cdot t^{(0,033)} \left[\frac{mm^2}{s \cdot km} \right] \quad (4)$$

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

Na podstawie zależności (3) i (4) oszacowano trwałość skojarzenia TPC silnika 359M. W przypadku kryterium technicznego trwałość układu wynika z osiągnięcia dopuszczalnej wartości zużycia tulei cylindrowej. Wartość tę przyjęto na podstawie pracy [6]. W przypadku kryterium „olejowego” wartości graniczne lepkości kinematycznej v_{100} przyjęto na podstawie normy BN-77/0535-46 [7]. Na tej podstawie wyliczono graniczną wartość wskaźnika C_{v100gr} , która posłużyła do wyznaczenia trwałości tulei cylindrowych silnika w oparciu o kryterium olejowe. Wyniki obliczeń zawiera tabela 1.

Tabela 1. Zestawienie prognoz trwałości tulei cylindrowych silnika 359M

Table 1. Comparison of forecasts of cylinder liners durability of the 359M engines

L.p. No.	Źródło danych Data source	Rodzaj kry- terium Criterion type	Parametr stanu granicznego Parameter of technical condition		Trwałość $\times 10^3$ [km] Durability $\times 10^3$ [km]		
			Opis parametru Description	Wartość graniczna Boundary value	T_{min}	T_{sr}	T_{max}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1.	własne own	techniczne technical	zużycie \bar{z} tulei cylindrowej na głęboko- ściach 20, 35, 50, 95 [mm] w płaszczyż- nie A-A i B-B wear \bar{z} of the cylinder liner on the depth of 20, 35, 50, 95 [mm] in the pla- ne A-A i B-B	126 [μm]	516,0	621,5	781,3
2.	własne own	olejowe oil	wskaźnik intensywności zmian lepkości kinematycznej oleju silnikowego w tem- peraturze 100°C – C_{v100} index of change intensity of the kinematic viscosity of engine oil at 100 °C – C_{v100}	-0,066 [$mm^2/s \cdot km$]	—	630,2	—

5. Wnioski

Przedstawione kryterium olejowe uwzględnia możliwość prawidłowej oceny współpracy elementów złożenia TPC ze względu na rodzaj występującego tarcia. Warunkiem występowania tarcia płynnego jest m.in. zachowanie odpowiedniej szczeliny między trącymi elementami w stosunku do lepkości stosowanego środka smarowego. Wzrost luzu między elementami układu TPC powoduje intensyfikację procesów degradacji zachodzących w oleju, a tym samym szybszą zmianę jego lepkości. Zaproponowana metoda prognozowania trwałości tribologicznej z wykorzystaniem wyników bieżącej (w sensie kinetycznym) oceny

ding index of change intensity of kinematic viscosity at 100 °C – C_{v100} (equation (1)). Course of C_{v100} changes in a function of operation time is given by the dependence (4):

$$C_{v100} = (3,277) - (2,142) \cdot t^{(0,033)} \left[\frac{mm^2}{s \cdot km} \right] \quad (4)$$

where: t – engine operation time (mileage) [km].

Using equations (3) and (4) durability of PRC assembly for the 359M engine was determined. In case of technical criterion, durability of the system results from reaching permissible value of cylinder liner wear. This value was accepted on the basis of work [6]. In case of “oil” criterion, boundary values of kinematic viscosity v_{100} were accepted using the norm BN-77/0535-46 [7]. Then boundary value of C_{v100gr} index was calculated, which was later used for the determination of cylinder liners durability on the basis of oil criterion. Results of calculations are presented in table 1.

5. Conclusions

Presented oil criterion takes into account possibilities of correct evaluation of mating of components in the PRC assembly with regard to the type of friction. One of conditions of fluid friction is, for instance, existence of appropriate crevice between mating components in relation to the viscosity of used lubricant. Increase of clearance between components of PRC assembly intensifies degradation processes taking place in engine oil, and thus, faster change of its viscosity. Proposed method of forecasting tribological durability using results of current (in kinetic sense) assessment of oil properties, gives

zmian własności oleju daje porównywalne (zgodne) wyniki co do trwałości średniej oszacowanej według założeń metody prognostycznej związanej z kryterium technicznym (opartym na ocenie intensywności zużycia). Średnie wartości trwałości prognozowanej wynoszą $621,5 \cdot 10^3$ km przy wykorzystaniu kryterium technicznego i $630,2 \cdot 10^3$ km dla przypadku stosowania kryterium olejowego. Zatem opierając się na informacjach opisujących stan eksploatowanego środka smarowego można bez konieczności ingerencji w monitorowany układ tłok-pierścienie-cylinder, za pomocą nieskomplikowanych metod pomiarowych prowadzonych poza obiektem technicznym, bez wyłączenia go z eksploatacji, (na przyjętym poziomie ufności) dokonać oceny trwałości tulei cylindrowych eksploatowanego silnika.

Opracowana metoda ma charakter uniwersalny i może być wykorzystywana do oceny trwałości tribologicznej tulei cylindrowych eksploatowanych silników spalinowych z zapłonem samoczynnym. Wymaga jedynie wyznaczenia przebiegu krzywej opisującej zmiany wskaźnika intensywności lepkości kinematycznej w $100^{\circ}\text{C} - C_{v100}$ eksploatowanego oleju (4) i prawidłowego wyboru granicznej wartości tego wskaźnika stosownie do klasy jakościowej i lepkościowej oleju.

6. Literatura

- [1] Niewczas A.: *Trwałość zespołu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder silnika spalinowego*. WNT, Warszawa 1998.
- [2] Nadolny K.: *Modele kinetyczne procesu zużywania*. W: *Wybrane zagadnienia zużywania się materiałów w ślizgowych węzłach maszyn*. pod red. W. Zwierzyckiego, PWN, Warszawa – Poznań 1990.
- [3] Łuczak A., Mazur T.: *Fizyczne starzenie elementów maszyn*. WNT, Warszawa 1981.
- [4] Norma BN-79/1374-04. *Silniki samochodowe. Badania stanowiskowe. Badania niezawodności*.
- [5] Chmielewski Z.: *Trwałość tulei cylindrowych silnika spalinowego jako funkcja stanu oleju smarowego podczas eksploatacji*. Rozprawa doktorska, Politechnika Radomska, Radom 2001.
- [6] Niewczas A., Chmielewski R., Chmielewski Z., Wronka G.: *Analiza przebiegów do naprawy głównej oraz zużycia granicznego tulei cylindrowych samochodów STAR 200*. Raport wykonany dla ZS STAR S.A.
- [7] Norma BN-77/0536-46. *Ocena stopnia przepracowania olejów do silników z zapłonem samoczynnym*.

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
