

Zbigniew CHMIELEWSKI¹

METODA OCENY EKSPLOATACYJNEJ TRWAŁOŚCI SILNIKA SPALINOWEGO Z UWZGLĘDNIENIEM ZMIAN WŁASNOŚCI OLEJU SILNIKOWEGO

W pracy przedstawiono nową metodę prognozowania trwałości układu tłok-pierścienie-cylinder (TPC) silnika spalinowego w oparciu o obserwowane zmiany własności fizykochemicznych eksploatowanego oleju silnikowego. 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 100⁰C – C_{V100} pozwala oszacować trwałość skojarzenia TPC silnika spalinowego. Uzyskaną wartość trwałości pozytywnie zweryfikowano z wykorzystaniem metody prognostycznej związanej z kryterium technicznym opartym na ocenie intensywności zużycia.

A METHOD OF EVALUATION OF COMBUSTION ENGINE DURABILITY WITH CONSIDERING PROPERTIES CHANGES OF ENGINE OIL

The paper presents a New metod 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. In the proposed method, for the evaluation of durability of engine cylinders information gathered form engine oil is used. Course of changes of the proposed index of change intensity of kinematic viscosity At the temperature of 100⁰C – 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.

1. WSTĘP

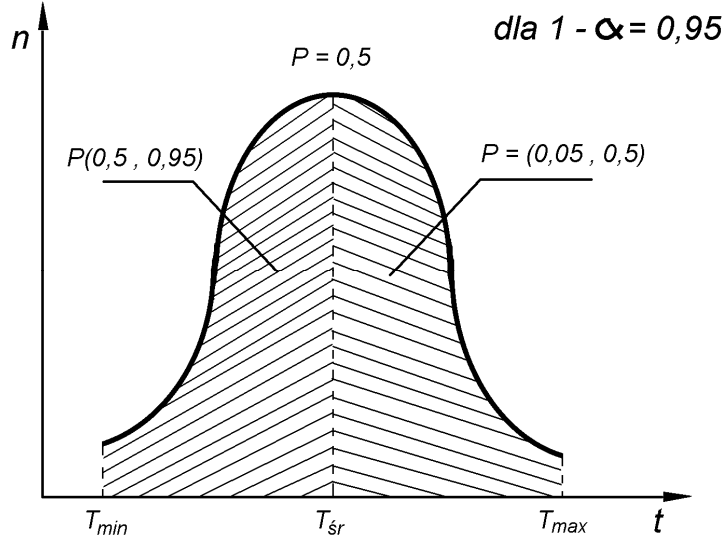
Przy opracowywaniu nowych jednostek napędowych do pojazdów samochodowych coraz większą uwagę zwraca się na ich trwałość w założonych warunkach eksploatacji. Trwałość jako element ogólnie pojętej jakości wyrobu często determinuje decyzję potencjalnego użytkownika o wyborze właśnie tej konstrukcji czy modelu. Istnieje zatem

¹Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny; Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn, 26-600 Radom; ul. Chrobrego 45 tel. +48 48 361-76-68, e-mail: zbigniew.chmielewski@pr.radom.pl

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). 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 [3].

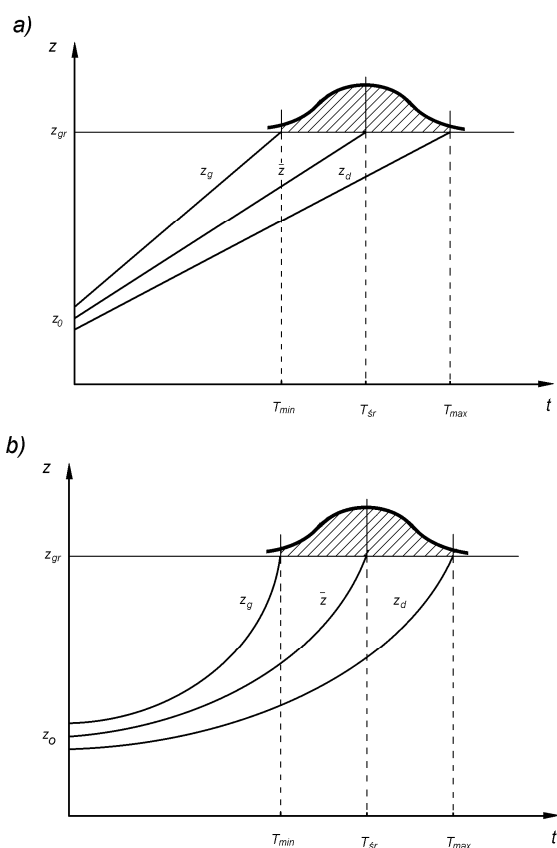
Z punktu widzenia możliwości oceny trwałości skojarzenia tarcowego (obiektu technicznego) rozpatrywane mogą być dwa warianty metodyczne [2]:

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



Rys.1. Sposób wyznaczania trwałości metodą a' posteriori

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 resursu 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.



Rys.2. Ideowy schemat oceny trwałości obiektu metodą a priori

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 rezerwy prawidłowej pracy obiektu np.: mikrometraż, metoda sztucznych baz, metody izotopowe [1]. Przedstawiona poniżej nowa metoda eliminuje te wady.

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. Zmiany własności fizykochemicznych oleju wynikają z oddziaływania systemu i wiążą się nierozwalnie 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):

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

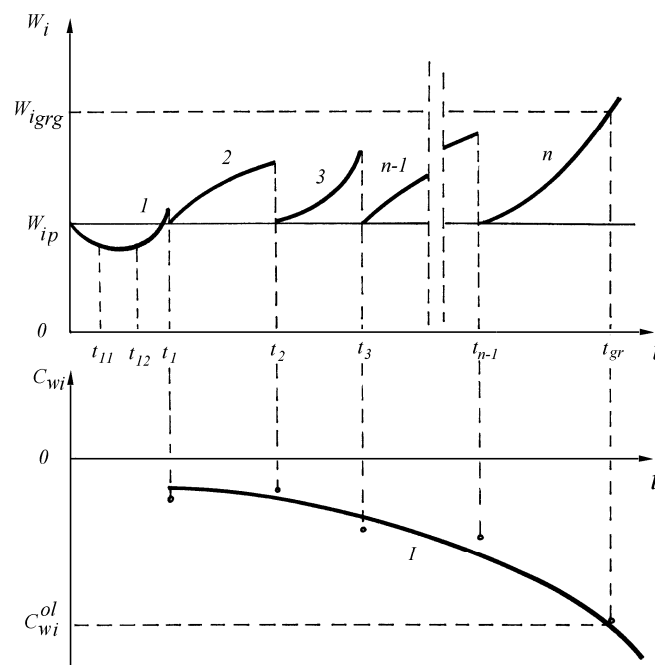
gdzie: W_p – wartość mierzonego wskaźnika oceny stanu oleju dla oleju świeżego

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.



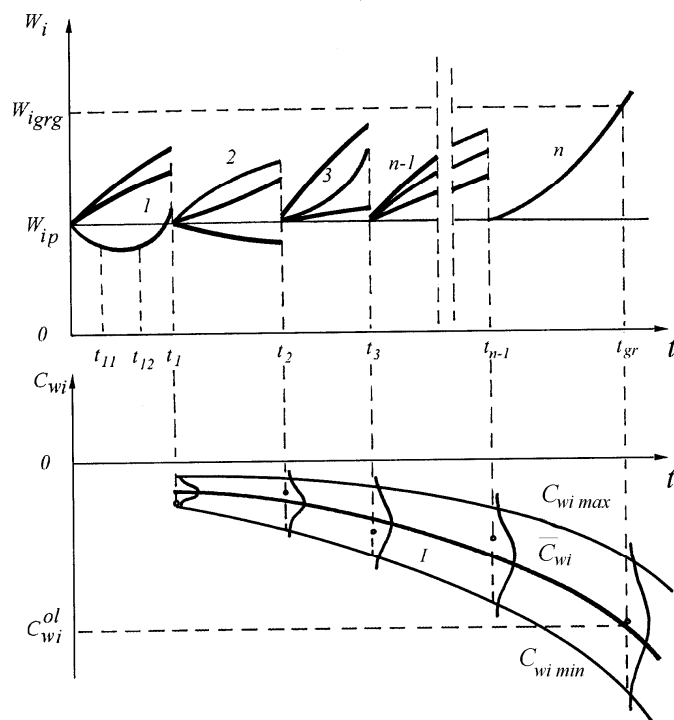
Rys.3 Graficzna interpretacja zmian wskaźnika oceny stanu oleju w czasie

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

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



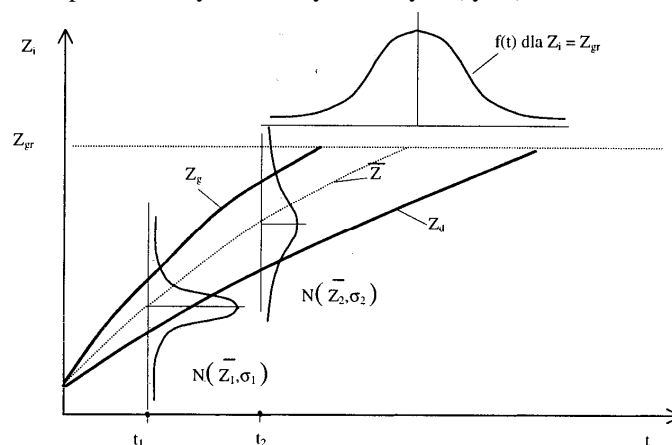
Rys.4. Graficzna interpretacja zmian wskaźnika oceny stanu oleju w czasie dla populacji obiektów

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

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.

Przedstawione na rysunkach 3 i 4 zmiany zachodzące w oleju silnikowym następują równoległe z procesem zużywania tulei cylindrowych silnika. Matematyczny opis tego procesu tworzą trzy krzywe odzwierciedlające wartość oczekiwaną zmian \bar{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

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 eksploatawanego 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 \bar{z} (rys.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 mikrometrąz 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 Rafinerijne w Jaśle. 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):

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

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

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

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 wskaźnik 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.

Tab. 1. Zestawienie prognoz trwałości tulei cylindrowych silnika 359M

L.p.	Źródło danych	Kryterium	Parametr stanu granicznego		Trwałość $\times 10^3$ [km]		
			Opis parametru	Wartość graniczna	T_{min}	T_{sr}	T_{max}
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1.	własne	techniczne	zużycie \bar{z} tulei cylindrowej na głębokościach 20, 35, 50, 95 [mm] w płaszczyźnie A-A i B-B	126 [μm]	516,0	621,5	781,3
2.	własne	olejowe	wskaźnik intensywności zmian lepkości kinematycznej oleju silnikowego w temperaturze 100°C – C_{V100}	-0,066 [mm ² /s km]	---	630,2	---

5. PODSUMOWANIE

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 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 wyłączania 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°C – C_{V100} eksploatowanego oleju (4) i prawidłowego wyboru granicznej wartości tego wskaźnika stosownie do klasy jakościowej i lepkościowej oleju.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] 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.
- [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] Koszałka G.: *Wykorzystanie modelu szczelności układu TPC do oceny eksploatacyjnych zmian natężenia przedmuchów spalin do skrzyni korbowej*. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 4(48)/2010, s. 72-81
- [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*.