

CHMIELEWSKI Zbigniew¹

Kryterium olejowe w ocenie stanu granicznego silnika o ZS – analiza możliwości wykorzystania

Stan graniczny, olej silnikowy,
badania eksploatacyjne

Streszczenie

W artykule dokonano analizy możliwości wykorzystania nowego kryterium do oceny stanu granicznego silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym. Zaproponowane kryterium poszerza możliwości decydenta odnośnie wyboru właściwego – optymalnego kryterium, na etapie oceny stanu granicznego silnika – samochodu. W pracy przedstawiono problemy wynikające z poprawnego doboru wskaźników i ich wartości granicznych dla zaproponowanego kryterium, wskazując jednocześnie metody ich rozwiązania.

OIL-CRITERION IN THE ASSESSMENT OF LIMIT STATE OF DIESEL ENGINE – ANALYZES OF USAGE OPPORTUNITIES

Abstract

This article analyzes the possibilities of using a new criterion to assess the state border of the internal combustion engine. The proposed criterion widens the opportunities of decision maker for choosing the right/ the best criterion for the evaluation of the limit state of engine/car. The paper presents problems of proper selection of indicators and their limit values for the proposed criterion, indicating as well solving methods.

1. WSTĘP

W Polskiej Normie [1] zdefiniowano stan graniczny obiektu jako taki stan fizyczny (techniczny), w którym dalsza eksploatacja obiektu jest niemożliwa lub niewskazana.

Od chwili wyprodukowania do chwili osiągnięcia stanu granicznego silnik znajduje się w klasie stanów zdatności. Po przekroczeniu granicy obszaru zdatności silnik przechodzi do klasy stanów niezdatności. W literaturze zdarzenie takie określa się mianem uszkodzenia parametrycznego. Proces zmian stanu technicznego silnika w obszarze stanów zdatności jest zdeterminowany fizycznymi procesami zużywania elementów silnika. Jest to zależność obiektywna i przebieg zmian stanu technicznego wynika z eksploatacyjnego przebiegu zużycia elementów. Natomiast samo ustalenie granicy między obszarem stanów zdatności, a obszarem stanów niezdatności ma charakter umowny. Kryteria stanu granicznego są uzależnione od przyjętych parametrów jakości stanu technicznego silnika. Uwzględniając, że jakość wyrobów wymiaruje się stopniem spełnienia wymagań nabywcy (stopniem zadowolenia nabywcy), należy stwierdzić, że najważniejszymi kryteriami stanu granicznego silnika samochodowego powinny być kryteria postulowane przez użytkownika tj. [2]:

- kryteria techniczne,
- kryteria ekonomiczne.

Poniżej ograniczono się do rozważań w obszarze kryteriów technicznych ze szczególnym uwzględnieniem oleju silnikowego jako elementu konstrukcyjnego układu tłok-pierścienie tłokowe-cylinder (TPC) silnika spalinowego o zapłonie samoczynnym [3].

2. UWARUNKOWANIA TECHNICZNE DLA KRYTERIUM OLEJOWEGO W OCENIE STANU GRANICZNEGO SILNIKA ZS

Kryteriami technicznymi stanu granicznego silnika są wymagania wg danych nominalnych ustalonych przez producenta lub wg normatywnych warunków technicznych dopuszczenia pojazdów do ruchu. W szczególności są to:

- maksymalna moc silnika przy zadanej prędkości obrotowej,
- maksymalny moment obrotowy przy zadanej prędkości obrotowej,
- minimalne jednostkowe zużycie paliwa,
- zużycie oleju smarującego,
- czas uruchomienia silnika przy zadanej temperaturze otoczenia,
- zawartość toksycznych składników w spalinach.

¹ Politechnika 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

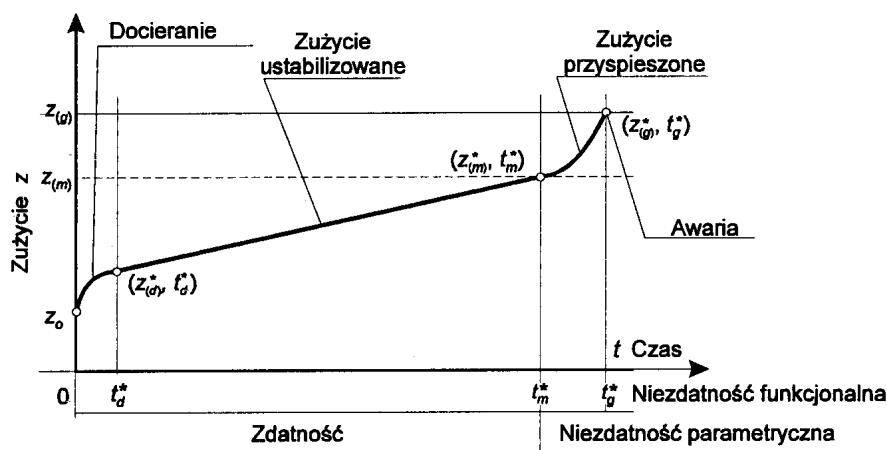
Cechą znaną każdego uszkodzenia zużyciowego, czyli zjawiska rzeczywistej lub umownej utraty zdolności przez elementy silnika na skutek rozwoju procesów zużywania, jest to, że prawdopodobieństwo jego pojawienia się wzrasta wraz z czasem pracy obiektu. Uszkodzenia zużyciowe można oceniać wg zewnętrznych skutków zużywania, tzn. na podstawie widocznych deformacji obiektu, ubytku materiału czy mierzalnych zmian własności użytkowych, albo też na podstawie porównania rozpatrywanej wartości zużycia z wartościami uznanymi wcześniej za maksymalne (dopuszczalne) [2].

Wszystkie ważne elementy konstrukcyjne (pary kinematyczne) w silniku powinny mieć określoną dopuszczalną wartość zużycia lub dopuszczalną wartość luzu. Są to wartości, po przekroczeniu których elementy konstrukcyjne należy wycofać z eksploatacji. Kryterium uznania zużycia elementu konstrukcyjnego za dopuszczalne może wynikać z wymagań [2]:

1. tribologicznych – utrzymania warunków normalnego procesu zużywania (wymagania te odnoszą się bezpośrednio do par kinematycznych),
2. technicznych szczegółowych – pełnej realizacji zadanych funkcji przez zespół silnika, np. utrzymania szczelności przestrzeni nadtłokowej przez zespół TPC,
3. technicznych ogólnych – zdolności pełnej realizacji zadanych funkcji przez silnik jako całość,
4. ekonomicznych – zdolności zrealizowania zadań przez silnik lub cały samochód wg miar finansowych.

Dopuszczalna wartość zużycia ogranicza maksymalny czas pracy (trwałość) elementu. W szczególnym przypadku właściwym dla kryterium (1), tzn. warunku niedopuszczenia do zużywania awaryjnego, wartość dopuszczalną można zastąpić wartością graniczną. Wartość graniczna zużycia jest to taka wartość, po przekroczeniu której występuje istotne zagrożenie awarią [2]. Należy zauważyć, że stan graniczny silnika determinuje decyzję o uznaniu zużycia elementów za niedopuszczalne, a nie za zużycie graniczne.

Graficzną ilustrację pojęć dopuszczalnej oraz granicznej wartości zużycia przedstawia rys.1.



Rys.1. Klasyfikacja stanów niezawodnościowych samochodowego silnika spalinowego na podstawie analizy przebiegu zużycia tribologicznego jego elementów [4]

Zespół TPC stanowi z tribologicznego punktu widzenia wzdłużne łożysko ślizgowe, w którym istnieją warunki powstania klina smarowego, a dzięki temu – warunki tarcia płynnego.

Na podstawie hydrodynamicznej teorii smarowania można stwierdzić, że jeżeli pierścień tłokowy o określonej krzywiznie powierzchni ślizgowej umieszczony jest w cylindrze z pewnym ustalonym luzem, to przy określonym stosunku między luzem, lepkością oleju, obciążeniem i wymiarami konstrukcyjnymi ciśnienie hydrodynamiczne, decydujące o nośności filmu olejowego, będzie zależało jedynie od względnej prędkości współpracujących powierzchni pierścienia i cylindra.

Przy nadmiernych wartościach luzu, pomimo zwiększania prędkości obrotowej silnika oraz lepkości oleju, klin smarowy nie może już powstać. Tarcie płynne przekształca się wówczas w tarcie półpłynne, a następnie graniczne. Wzrasta udział tarcia suchego w punktach zwrotnych tłoka. Powoduje to szybkie zwiększenie intensywności zużywania powierzchni współpracujących. Zwiększenie luzów między elementami zespołu TPC powoduje wzrost obciążeń dynamicznych w układzie, co dodatkowo destabilizuje proces smarowania hydrodynamicznego. Przebieg zużycia w takich warunkach można opisać wykładniczą funkcją czasu. Wartość zużycia (lub wartość luzu) od której rozpoczyna się wykładniczy przyrost zużycia przyjmuje się jako wartość dopuszczalną co stanowi kryterium tribologiczne.

Natomiast istota kryterium technicznego polega na tym, że wartość dopuszczalnego zużycia określona jest na podstawie wymagań stawianych układowi funkcjonalnemu nadrzędnemu (np. podzespołowi konstrukcyjnemu lub całemu silnikowi). Osiągnięcie przez element dopuszczalnego poziomu zużycia uniemożliwia spełnianie przez cały układ założonych funkcji. Kryteria techniczne dotyczą parametrów technicznych zespołu TPC stosownie do zadań tego zespołu w silniku (kryteria techniczne szczegółowe) lub też wymaganych osiągnięć całego silnika zdeterminowanych przez techniczne kryteria stanu granicznego silnika (kryteria techniczne ogólne). Techniczne parametry zespołu TPC to w tym przypadku przede wszystkim szczelność przestrzeni nadtłokowej. Spowodowane nadmiernymi luzami zmniejszenie

szczelności przestrzeni nadtlokowej prowadzi do strat ładunku, obniżenia ciśnienia sprężania, zwiększenia stref niecałkowitego spalania.

Zjawiska te wpływają bezpośrednio na parametry silnika. Następuje zmniejszenie mocy silnika, zwiększenie zużycia paliwa i zawartości węglowodorów w spalinach. Dodatkowo wzrost luzu między tłokiem a cylindrem intensyfikuje zjawisko spalania oleju smarującego. Na skutek tego pogarszają się takie parametry, jak zużycie oleju i zadymienie spalin, również uwzględniane przy ocenie stanu granicznego silnika.

Metody wyznaczania dopuszczalnych wartości zużycia elementów zespołu TPC według kryteriów technicznych mają najczęściej charakter empiryczny. Metody te są oparte na jednolitej zasadzie – za dopuszczalne zużycie elementu uznaje się taką wartość zużycia, która odpowiada chwili osiągnięcia stanu granicznego przez zespół TPC lub silnik. Zatem dopuszczalna wartość zużycia elementu $z_{(m)}$ wynosi:

$$z_{(m)} = z(t_m) \quad (1)$$

gdzie: t_m – chwila osiągnięcia stanu granicznego przez silnik ze względów technicznych,
 $z_{(m)}$ – dopuszczalna wartość zużycia elementu

Wartość $z_{(m)}$ wyznacza się na podstawie pomiarów zużycia wykonanych w chwili t_m lub na podstawie obliczeń zużycia przewidywanego w chwili t_m , jeżeli wcześniej znany jest model przebiegu zużycia oraz określono empirycznie wartości parametrów tego modelu, np. zużycie początkowe z_0 i intensywność zużywania v .

W literaturze można znaleźć przybliżone zależności empiryczne służące do określania dopuszczalnego zużycia tulei cylindrowych [2]. Odnoszą się one do miary zużycia zdefiniowanej wzorem:

$$z^{(1)}(t) = \max_{\varphi \in [0, \pi]} \{d(\varphi, t) - d_{nom}\} \quad (2)$$

gdzie: φ – kąt między osią wału korbowego silnika i kierunkiem pomiaru,
 $z^{(1)}(t)$ – maksymalne odchylenie wartości średnicy w chwili t od wartości nominalnej,
 $d(\varphi, t)$ – wewnętrzna średnica tulei cylindrowej na wysokości progu ogniowego, mierzona w kierunku określonym kątem φ w chwili t .

Funkcje określające wartości dopuszczalne zużycia tulei cylindrowej na progu ogniowym $z_{(m)}$ w sensie miary (2) nie zależą od czasu eksploatacji i mają ogólną postać:

$$z_{(m)} = \alpha \cdot d_{nom} \quad (3)$$

gdzie: α – bezwymiarowy współczynnik proporcjonalności.

W przypadku olejów smarowych istnieją trzy zasadnicze możliwości wyboru wartości granicznych. Ocenę stanu granicznego można przeprowadzić na podstawie [12]:

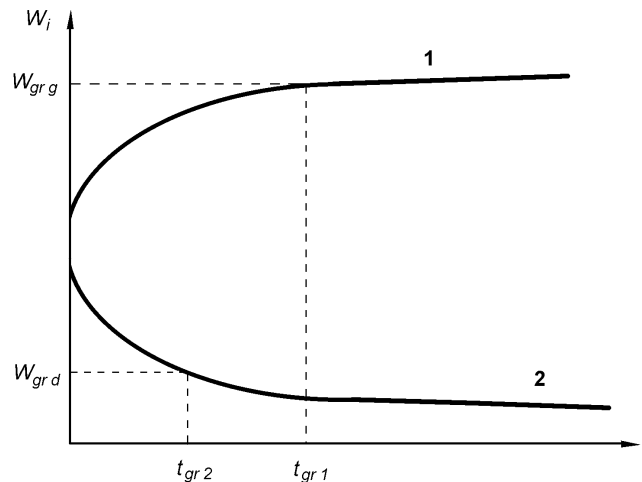
1. wytycznych normatywnych dotyczących różnych rodzajów, grup klasyfikacyjnych olejów,
2. wartości dopuszczalnych zmian niektórych parametrów oleju wynikających z obliczeń węzłów tarciovych z uwzględnieniem różnych teorii smarowania,
3. analizy kinetyki zmian własności.

Wytyczne normatywne mają charakter ogólny odnoszą się do grup, klas olejów stosowanych do smarowania silników (przede wszystkim wysokoprężnych). Nie uwzględniają one specyfiki konstrukcji obiektów, w których olej ma być użytkowany. Z drugiej strony wiadomo, jak zróżnicowanymi konstrukcjami, pod względem wysilenia, sposobów smarowania itp., mogą być silniki zaliczane np. do jednej rodziny silników wysokoprężnych. Stąd tego rodzaju wytyczne należy traktować jako orientacyjne.

Natomiast, jeśli jest to tylko możliwe, należy próbować wartości graniczne indywidualizować w zależności od specyfiki urządzenia, w którym olej jest użytkowany. Takie możliwości stwarzają różne metody obliczeniowe oparte na teoriach smarowania. Metody te jednak pozwalają takie obliczenia prowadzić tylko dla wybranych, konkretnych węzłów tarcia i dotyczą w zasadzie tylko jednej cechy oleju, a mianowicie lepkości. Najbardziej wiarygodne wartości stanów granicznych można uzyskać na podstawie analizy kinetyki zmian własności. Analizowane tendencje są efektem wpływu zarówno samego systemu tribologicznego na olej, jak i odzwierciedlają wpływ warunków eksploatacyjnych. Obecnie metoda ta jest coraz szerzej stosowana.

Z punktu widzenia wypełniania podstawowych funkcji, tj. zapobiegania tarcia suchemu na rzecz tarcia płynnego, podstawowe znaczenie ma lepkość. Jest to cecha najważniejsza z punktu widzenia poprawności działania systemu tribologicznego. Charakterystyczne dla zmiany tej cechy jest to, że może ona w trakcie eksploatacji oleju zarówno poprawiać się jak i pogarszać. Na ogół problem ten nie występuje przy analizowaniu innych własności, z uwagi na jednoznaczne tendencje zmian – wzrostu lub spadku. W przypadku ustalenia stanów granicznych ta cecha jest specyficzna. Należy przy rozpatrywaniu jej zmian dyskutować stany graniczne, zarówno w odniesieniu do zjawiska obniżania się lepkości, jak i jej wzrostu.

Dysponując obrazem kinetyki zmian własności oleju (w formie graficznej bądź analitycznej) można dokonać oszacowania czasu osiągnięcia stanu granicznego przez olej, w odniesieniu do obserwowanej własności, narzucając dopuszczalne (graniczne) wartości zmian tego wskaźnika. Wartości graniczne dla danego wskaźnika mogą wynikać z danych normatywnych bądź też mogą być wynikiem własnych badań lub obserwacji [5, 6, 7]. W przypadku gdy mamy do czynienia z tendencją wzrostową danej własności osiągnięcie stanu granicznego będzie się wiązać z przekroczeniem przez nią górnej wartości granicznej (krzywa 1 na rys.2). W przypadku tendencji spadkowej wartości obserwowanego wskaźnika stan graniczny warunkowany będzie przekroczeniem dolnej wartości granicznej obserwowanego wskaźnika stanu oleju silnikowego (krzywa 2 na rys.2).



Rys.2. Stan graniczny oleju silnikowego

Wykorzystanie oleju silnikowego jako nośnika informacji o stanie technicznym silnika, a także jako podstawy do oceny stanu granicznego i prognozowania jego trwałości wymaga rozwiązania poniższych problemów:

1. Wybór wskaźnika oceny stanu oleju silnikowego.

Stan oleju silnikowego charakteryzowany jest za pomocą wskaźników oceny zmian własności indywidualnych lub zespołowych. Spośród nich do oceny stanu technicznego silnika i prognozowania jego trwałości mogą być wykorzystane tylko te, które spełniają wymagania sygnału diagnostycznego.

2. Sposób oceny zmian własności oleju.

Doświadczenie autora wskazuje na możliwość wykorzystania do tego celu parametru w postaci wskaźnika intensywności zmian własności oleju C_w [3] opisanego zależnością (4):

$$C_w = \frac{W_p - W_k}{t_{ol}} \quad \text{dla } t > 0 \quad (4)$$

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 zafałszowania 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.

3. Wybór kryterium stanu granicznego.

Oceny trwałości tulei cylindrowych silnika, a tym samym układu TPC można dokonać zarówno w oparciu o kryteria dotyczące stanu granicznego oleju jak i silnika.

W przypadku oleju silnikowego jako podstawę do określenia jego stanu granicznego przyjąć wytyczne normatywne dotyczące różnych rodzajów i grup klasyfikacyjnych olejów. W ten sposób na podstawie danych literaturowych przyjmuje się górną W_{grg} i dolną W_{grd} wartość graniczną obserwowanego wskaźnika oceny stanu oleju oraz odpowiadające im wartości dolną C_{wd} i górną C_{wg} wskaźnika intensywności zmian. Osiągnięcie przez wybrany wskaźnik wartości granicznej powoduje zmianę warunków pracy węzła tribologicznego powodując przyspieszone jego zużywanie. Olej nie wypełnia

więc założonych funkcji prowadząc jednocześnie do szybszego osiągnięcia stanu granicznego węzła tribologicznego według kryteriów technicznych.

Uwzględniając powyższe uwarunkowania można stwierdzić, że parametry oleju silnikowego eksploatowanego w silniku spalinowym o zapłonie samoczynnym mogą stanowić podstawę do pośredniej oceny stanu technicznego silnika, w tym jego stanu granicznego. Pełne wykorzystanie tej metody wymaga jeszcze interpretacji i skorelowania zmian zachodzących w oleju silnikowym z procesem zużywania układu TPC silnika. Podjęte w tym kierunku badania [3] roszą na uzyskanie pozytywnych wyników.

3. WNIOSKI

1. Z przeprowadzonej analizy wynika, że istnieją podstawy do wykorzystania właściwości oleju silnikowego, eksploatowanego w silniku spalinowym, jako źródła informacji o stanie granicznym układu TPC.
2. Warunkiem dokonania poprawnej diagnozy jest wybór właściwego wskaźnika opisującego stan oleju. Wskaźnik ten, wybrany spośród wskaźników funkcjonalnych lub fizykochemicznych, powinien spełniać wymogi sygnału diagnostycznego.
3. Dla wybranego wskaźnika stanu oleju należy prawidłowo określić jego wartość graniczną. Wartości graniczne dla danego wskaźnika mogą wynikać z danych normatywnych, bądź też mogą być wynikiem własnych badań lub obserwacji.
4. Prawidłowa ocena chwili osiągnięcia przez układ TPC stanu granicznego możliwa będzie jedynie po skorelowaniu zmian wybranego wskaźnika stanu oleju zachodzących w czasie eksploatacji ze zmianami zużyciowymi zachodzącymi w węzle tłok-pierścienie tłokowe-cylinder silnika spalinowego.

4. BIBLIOGRAFIA

- [1] Norma PN-80/N-04000. *Niezawodność w technice. Terminologia*.
- [2] Niewczas A.: *Trwałość zespołu tłok – pierścienie tłokowe – cylinder silnika spalinowego*. WNT, Warszawa 1998.
- [3] Chmielewski Z.: *Trwałość tulei cylindrowych silnika spalinowego jako funkcja stanu oleju smarowego podczas eksploatacji*. Rozprawa doktorska, Politechnika Radomska, Radom 2001.
- [4] Prac. zb. pod red. A. Niewczas: *Problemy trwałości eksploatacyjnej samochodów ciężarowych*. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 1997.
- [5] Wachal A.: *Starzenie i racjonalne czasy pracy olejów smarowych*. Konf. NOT, Warszawa 1983.
- [6] Krauze H., Schmietz M., Thiede H.: *Langzeitwechselintervolle bei Nutzfahrzeug – Dieselmotoren*. Dokumentation zum Forschungs und Entwicklung programm BMFT. Band 2. Tribologie, Berlin, Springer Verlag, 1982.
- [7] Baczewski K.: *Tribologia i płyny eksploatacyjne. Część II. Płyny eksploatacyjne*. WAT, Warszawa 1994.
- [8] Dąbrowski Z., Madej H.: *Masking mechanical damages in the modern control systems of combustion engines*. J. of KONES, 2006, 13, 3.
- [9] 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.
- [10] Chmielewski Z.: *Badania oleju silnikowego jako źródła informacji o stanie technicznym silnika spalinowego o ZS*. Logistyka nr 2/2010, Logistyka – nauka, s. 142.