

STANISŁAW OLEKSIAK, ZBIGNIEW STĘPIEŃ*

ZAGADNIENIA SMARNOŚCI CIEKŁYCH PALIW SILNIKOWYCH

LUBRICITY OF ENGINE LIQUID FUELS

Streszczenie

Zmiany technologii produkcji ciekłych paliw do silników o zapłonie samoczynnym, mające na celu obniżanie poziomu zawartości siarki, prowadziły do pogorszenia właściwości smarnych tych paliw. Równoczesny rozwój silników ZS, a zwłaszcza ich aparatury wtryskowej sprawił, że zagadnienie smarności paliw nabrało szczególnego znaczenia. W ostatnich latach dużo wysiłku włożono w badania właściwości smarnych niskosiarkowych olejów napędowych i rozwój dodatków smarnościowych, uwzględniając zmieniające się i wzrastające oczekiwania. W artykule przedstawiono wymagania stawiane współczesnym paliwom silnikowym odnośnie do poziomu smarności oraz omówiono wpływ niedostatecznej smarności paliw na możliwe uszkodzenia aparatury wtryskowej i ich konsekwencje w postaci pogorszenia jakości spalania, wzrostu emisji i uszkodzeń silnika. Przybliżono najbardziej rozpowszechnione metody badania właściwości smarnych w aparatach HFRR i BOCLE oraz przedstawiono wymagania i wyniki oceny smarności dla różnych paliw benzynowych i dieslowskich z uwzględnieniem biopaliw i paliw syntetycznych.

Słowa kluczowe: smarność, paliwa, silniki, HFRR

Abstract

The drive towards lower sulphur in automotive gasoils has led to a reduction in fuel lubricity. Simultaneous development of engine constructions, especially of injection equipment, caused that lubricity matter has particular meaning. Recently considerable efforts has been expended in investigating the lubricity of low sulphur diesel fuels and development of lubricity additives, giving consideration to changing and increasing expectations. The paper shows current fuel lubricity requirements and discusses impact on possible injection equipment failures and its consequences in form of combustion disturbances, increasing emissions and engine failures caused by fuel with insufficient lubricity. The paper overviews two most popular laboratory test methods to evaluate lubricity characteristics of diesel fuels High Frequency Reciprocating Rig (HFRR) and Ball-on-Cylinder Lubricity Evaluator (BOCLE) and presents the limits and results of gasoline and diesel fuels lubricity evaluation giving consideration to biofuels and synthetic fuels.

Keywords: lubricity, fuels, engines, HFRR

*Dr inż. Stanisław Oleksiak, dr inż. Zbigniew Stępień, Zakład Oceny Właściwości Eksploatacyjnych, Instytut Nafty i Gazu.

1. Wstęp

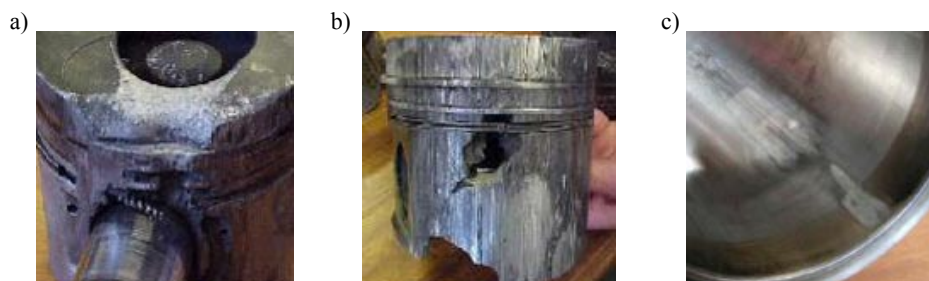
Spełnienie coraz ostrzejszych, obecnych i przyszłościowych, wymagań dotyczących emisji szkodliwych składników spalin silników wymaga obok stałego rozwoju konstrukcji i technologii silników również stosowania nowych, lepszych jakościowo paliw, optymalizowanych pod kątem umożliwiania dalszego ograniczenia emisji, poprawy osiągnięć silnika, zwiększenia jego trwałości oraz niezawodności, zmniejszenia zużycia paliwa i obniżenia poziomu hałasu. W dziedzinie olejów napędowych działania legislacyjne w wielu krajach europejskich i USA zmierzają do radykalnego zmniejszenia zawartości związków siarki i węglowodorów aromatycznych, a także, w miarę możliwości, do obniżenia końcowej temperatury wrzenia tych paliw oraz podwyższenia ich liczby cetanowej. Wymienione zmiany składu i właściwości fizykochemicznych olejów napędowych, obok pozytywnego wpływu na emisję spalin i wyraźnej poprawy własności niskotemperaturowych, mają również skutki negatywne. Jak wiadomo, związki siarki i węglowodory aromatyczne charakteryzują się dobrymi właściwościami przeciwzużyciowymi i usunięcie ich z olejów napędowych wyraźnie pogarsza smarność tych paliw.

Pogorszenie przeciwzużyciowych właściwości niskosiarkowych olejów napędowych było w wielu krajach przyczyną uszkodzenia rotacyjnych (rozdzielaczowych) pomp wtryskowych stanowiących osprzęt mniejszych silników wysokoprężnych stosowanych powszechnie w samochodach osobowych i dostawczych. Negatywny wpływ radykalnego obniżenia zawartości siarki w olejach napędowych nowej formuły na trwałość pomp wtryskowych zaobserwowano w Szwecji, a także w USA. Pogorszenie właściwości smarnych olejów napędowego City spowodowało poważne uszkodzenia pomp wtryskowych paliwa, a zwłaszcza rotacyjnych pomp wtryskowych nowej generacji.

Obecne zmiany konstrukcji i technologii produkcji silników Diesla ukierunkowane są przede wszystkim na rozwój technologii wtrysku paliwa, systemu turbodoładowania i technologii obróbki spalin. Nowoczesne układy wtryskowe tych silników pracują przy coraz wyższych ciśnieniach roboczych, a małe tolerancje wymiarowe są wynikiem coraz bardziej precyzyjnego wykonywania elementów i zmniejszania luzów pomiędzy współpracującymi parami precyzyjnymi. Na podstawie obserwacji uszkodzeń silników w warsztatach serwisowych stwierdzono, że duża część uszkodzeń obejmuje tłok i tuleję cylindrową. Niektóre uszkodzenia polegały na nadtopieniu korony tłoka, prowadzącego nawet do przepalenia denka tłoka. Analiza przyczyn tych uszkodzeń pozwoliła stwierdzić, że w większości przypadków powodem awarii było niewłaściwe rozpylenie paliwa w wyniku mechanicznych dysfunkcji elementów układu wtrysku, głównie rozpylaczy, związanych z różnymi formami przyspieszonego lub nawet awaryjnego zużycia trybologicznego.

2. Uszkodzenia silników

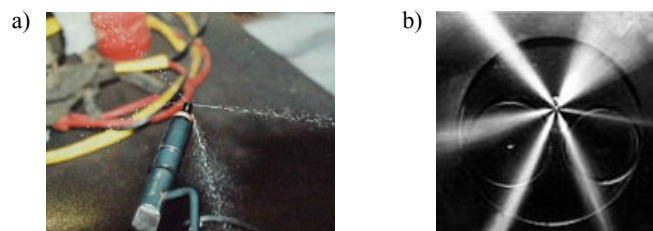
Od około 50 do 75% uszkodzeń nowoczesnych silników Diesla spowodowanych jest bezpośrednio awariami układu wtryskowego [1]. Niewłaściwe rozpylenie paliwa jest przyczyną zaburzeń procesu spalania, co prowadzi może do uszkodzeń korony tłoka, jego płaszczki i tulei cylindrowej. Na fotografii 1 pokazano typowe uszkodzenia tłoka spowodowane niewłaściwym spalaniem. Głównymi przyczynami uszkodzeń rozpylaczy paliwa są zbyt niski poziom właściwości smarnych paliwa oraz podwyższona zawartość zanieczyszczeń stałych.



Fot. 1. Przykłady (a), (b) uszkodzeń tłoków i (c) tulei cylindrowej [1]
Photo 1. Examples (a), (b) of piston failures and of (c) cylinder sleeve [1]

W nowoczesnych silnikach ciśnienia wtrysku przekraczają 180 MPa, co przy ciśnieniu spalania rzędu 18 MPa i luzach pomiędzy elementami rozpylacza rzędu 1–2 mikrometrów stwarza krytyczne warunki pracy precyzyjnych złożeń roboczych elementów wysokociśnieniowego układu wtryskowego. Podczas prostego sprawdzenia rozpylacza można stwierdzić, że przy delikatnym pompowaniu następuje przeciekanie, a nie właściwe rozpylenie paliwa, jak pokazano na fot. 2.

Po demontażu rozpylacza zwykle widać, że końcówka iglicy jest przebarwiona lub czarna, a obserwacja pod mikroskopem wskazuje na zużycie ściernie. Zacieranie (*scuffing*) jest wskaźnikiem niedostatecznych właściwości smarnych paliwa. Zanieczyszczenia stałe w paliwie mogą przyspieszyć ten proces.



Fot. 2. Przykład niewłaściwej (a) i prawidłowej (b) pracy rozpylacza paliwa [1]
Photo 2. Examples of improper (a) and correct (b) operation of a fuel spray nozzle [1]



Fot. 3. Przykłady przebarwień i uszkodzeń iglicy rozpylacza [1]
Photo 3. Examples of nozzle needle chromatosis and failures

Przebarwienia iglicy są efektem niedomykania się iglicy w gnieździe, co powoduje, że gorące gazy mają dostęp do wnętrza przez otwory rozpylacza. Końcowym efektem może

być całkowite unieruchomienie iglicy. Przykłady przebarwień i uszkodzeń iglicy rozpylacza pokazano na fot. 3.

Konsekwencją niewłaściwego rozpylenia paliwa może być zmywanie filmu smarowego z powierzchni tulei cylindra, prowadzące do zwiększenia tarcia i przyspieszonego zużycia tłoka i cylindra oraz przegrzewanie powierzchni tłoka prowadzące do jego nadtopienia, a nawet przepalenia.

3. Badania właściwości smarnych olejów napędowych

Smarność została zdefiniowana przez Appeldorna i Dukeka w 1966 r. [2]: „jeżeli z dwóch cieczy o tej samej lepkości jedna powoduje niższe tarcie, zużycie lub wykazuje większą odporność na zacieranie, mówi się, że ma lepszą smarność”. Bardziej współczesną, odniesioną do olejów napędowych definicję smarności można przedstawić za [3]: „zdolność paliwa do zapobiegania lub minimalizacji zużycia elementów aparatury wtryskowej silnika Diesla”.

Do oceny właściwości smarnych paliwa stosowane są trzy metodyki badań:

- badania drogowe,
- testy stanowiskowe,
- badania laboratoryjne.

Najkosztowniejsze i najbardziej czasochłonne są badania eksploatacyjne, prowadzone zwykle na dystansie kilkudziesięciu tysięcy kilometrów, co wymaga kilkunastu miesięcy eksploatacji pojazdu, poprzedzonej zwykle demontażem i pomiarami elementów silnika przed i po zakończeniu przebiegu badawczego. Znacznie mniej kosztowne są symulacyjne badania na stanowiskach, gdzie pompa wtryskowa, napędzana przez silnik spalinowy lub elektryczny, pracuje w czasie 500–1000 godzin. Po zakończeniu badania dokonuje się demontażu pompy wtryskowej na elementy składowe, a następnie przeprowadza ich ocenę. Na fotografii 4 pokazano elementy pompy wtryskowej Bosch po 1000-godzinnej próbie przeprowadzonej zgodnie z metodyką CEC (M 32 Code of Practice).

Najtańsze i najszybsze są badania laboratoryjne. Obecnie na świecie do oceny właściwości smarnych olejów napędowych stosowane są najczęściej dwie metody badawcze:

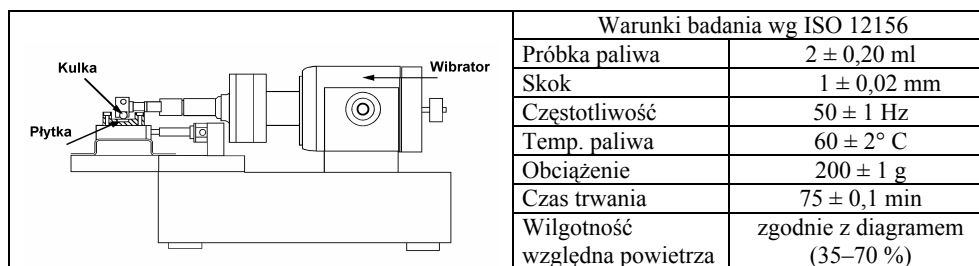
1. ISO DIS 12156-1 (opracowana przez CEC metoda CEC F-06 na stanowisku badawczym HFRR – *High Frequency Reciprocating Rig* – w temperaturze 60°C, równoważna ASTM D 6079). Test polega na wymuszaniu z częstotliwością 50 Hz poziomych, harmonicznym drgań stalowej, obciążonej od góry kulki o średnicy 6 mm po nieruchomej stalowej płycie zanurzonej w badanym paliwie – rys. 1. Miarą właściwości smarnych paliwa jest średnica śladu zużycia powstałego na kulce [4].
2. ASTM D6078 – rekomendowany przez EMA (*Engine Manufacturer Association*) test SLBOCLE (*Scuffing Load Ball-on-Cylinder Lubricity Evaluator*) stosowany wcześniej do badań paliw lotniczych, zmodyfikowany przez Southwest Research Institute. Metoda opracowana w latach 60. polegała na pomiarze średnicy skazy powstającej podczas współpracy obciążonej kulki z obracającym się pierścieniem, częściowo zanurzonym w badanym paliwie. Do badań olejów napędowych w teście BOCLE zwiększono obciążenie oraz podwyższono prędkość obrotową wałka. Miarą właściwości smarnych paliwa jest najwyższe obciążenie, przy którym występuje *scuffing*, powodujący zużycie powierzchni kulki w dopuszczalnych granicach [5].



Fot. 4. Widok zestawu wybranych elementów pompy wtryskowej poddawanych ocenie (a) oraz śladów zużycia powstałych na: (b), (c) wale pompy, (d) tarczy krzywkowej, (e) pierścieniu rolek, (f) sworzniach rolek i (g) rolkach [15]

Photo 4. View of a set of selected injection pump elements subject to assessment (a) and of wear traces on: (b), (c) pump shaft, (d) cam disc, (e) roller ring, (f) roller pins and (g) rollers

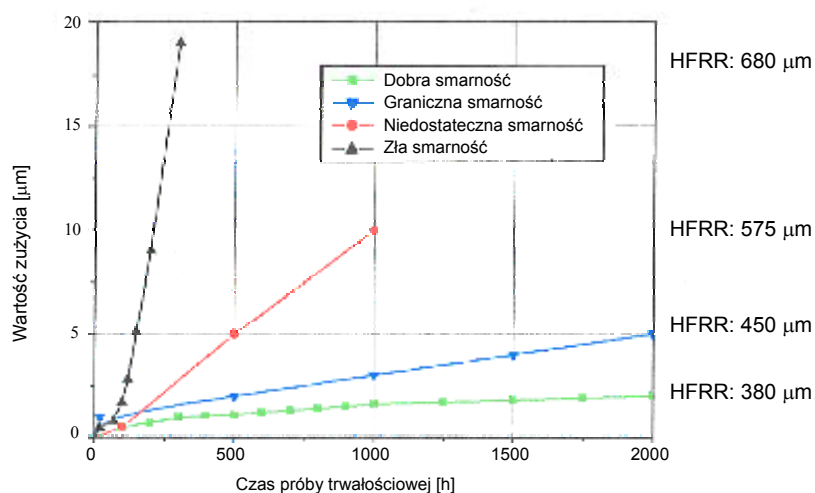
Średnica śladu zużycia w teście HFRR w temperaturze 60°C wynosząca 400 μm jest równoważna wynikowi testu BOCLE równemu 3100 g. Według oceny EMA wynik testu



Rys. 1. Schemat aparatu HFRR i warunki badania
Fig 1. Scheme of HFRR and test conditions

BOCLE na poziomie 3150 g zapewnia akceptowalny poziom właściwości smarnych paliwa. Im wyższy wynik testu BOCLE, tym lepsza smarność paliwa.

Żeby chronić użytkowników samochodów z silnikiem o zapłonie samoczynnym przed przyspieszonym zużyciem rozdzielaczowych pomp wtryskowych, producenci aparatury wtryskowej (m.in. Lucas, Stanadyne i Bosch) zażądali granicznej wartości testu HFRR, w temp. 60°C, na poziomie $\leq 400 \mu\text{m}$. Obecnie norma ISO 12156, w arkuszu 2, dotyczącym wartości granicznej testu HFRR (w temp. 60°C) dla olejów napędowych, podaje, że średnica śladu zużycia, skorygowana do wartości w warunkach normalnego ciśnienia pary wodnej 1,4 kPa, nie powinna być większa niż 460 μm . Skutki niedostosowania się do tych wymagań smarności w postaci szybkości i wartości zużycia pompy wtryskowej pokazano na rys. 2 [6].



Rys. 2. Zużycie pompy wtryskowej zależne od smarności paliwa
Fig. 2. Injection pump wear dependent on fuel lubricity

W Światowej Karcie Paliw [7], zawierającej uzgodnienia europejskich, amerykańskich i japońskich producentów samochodów i silników, graniczna, maksymalna średnica śladu zużycia, będąca miarą smarności w teście HFRR (w temp. 60°C) dla olejów napędowych wynosi maksymalnie 400 μm .

Średnica śladu zużycia w teście HFRR w temperaturze 60°C wynosząca 400 μm jest równoważna z wynikiem testu BOCLE równym 3100 g. Według oceny EMA wynik testu BOCLE na poziomie 3150 g zapewnia akceptowalny poziom właściwości smarnych paliwa. Im wyższy wynik testu BOCLE, tym lepsza smarność paliwa.

Nową grupę paliw stanowią tzw. biopaliwa drugiej generacji, do których należą m.in. syntetyczne paliwa otrzymywane z biomasy – BTL (*Biomass To Liquid*). Są to wysokiej jakości paliwa węglowodorowe, praktycznie niezawierające siarki i węglowodorów aromatycznych, ale niemające wystarczającego poziomu właściwości smarnych. W ramach projektu RENEW (*Renewable Fuels for Advanced Powertrain*), na podstawie wyników badań przeprowadzonych w ITN, po dyskusjach producentów silników i paliw, we wstępnej specyfikacji dla tego typu paliw o zakresie destylacji odpowiedniej do silników Diesla

przyjęto wymagany poziom smarności taki jak w normie EN 590 dla konwencjonalnych olejów napędowych.

W tabeli 1 zestawiono wymagania dotyczące smarności dla wybranych specyfikacji europejskich i amerykańskich paliw do silników Diesla.

Tabela 1

Wymagania dotyczące smarności wybranych paliw do silników Diesla

Olej napędowy wymagania wg	Smarność		
	metoda	jednostki	wymagania
PN-EN 590 Paliwa do pojazdów samochodowych. Oleje napędowe	EN ISO 12156 ¹	[μm]	n.w. 460
WWFC Diesel Fuel Category 1, 2, 3, 4	HFRR	[μm]	n.w. 400
ASTM D 975 Standard for #2 Diesel	ASTM D 6078 ²	[μm]	n.w. 520
AFG #1 Diesel ³	ASTM D 6078/ASTM D 6079	[g/ μm]	n.n. 3100/n.w. 450
AFG #2 Diesel	ASTM D 6078/ASTM D 6079	[g/ μm]	n.n. 3100/n.w. 450
BTL ⁴ Diesel	EN ISO 12156	[μm]	n.w. 460

¹EN ISO 12156-1/CEC F-06-96/ASTM D7078 (HFRR) skorygowana średnica śladu zużycia (WS 1,4) w temperaturze 60°C [μm].

²ASTM 6078 (SLBOCLE) obciążenie [g].

³AFG – Alternative Fuel Group (USA).

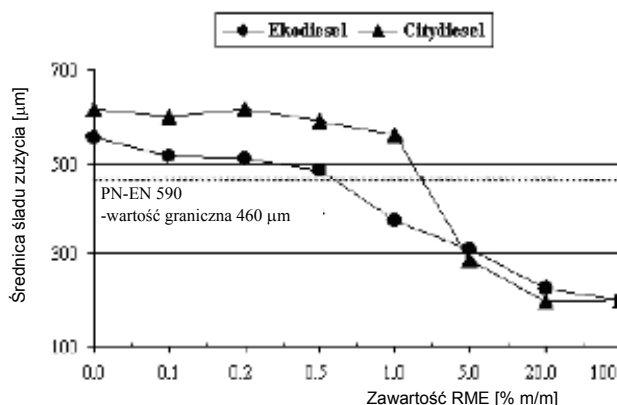
⁴BTL (*Biomass To Liquid*) Diesel – syntetyczne paliwo z biomasy przeznaczone do konwencjonalnych silników Diesla.

4. Dodatki poprawiające smarność paliw do silników Diesla

W celu skompensowania niezadawalającego poziomu właściwości smarnych hydroodsiarczanych olejów napędowych od kilkunastu lat stosowane są odpowiednie dodatki. Zawierają one grupy polarne, tworzące film smarowy na powierzchniach metalowych, zabezpieczający przed zużyciem w warunkach tarcia granicznego. Dodatki do olejów napędowych nie mogą zawierać siarki, fosforu i innych pierwiastków, tworzących toksyczne produkty spalania lub szkodliwych dla pracy konwerterów katalitycznych i filtrów cząstek stałych. Dodatki smarnościowe do olejów napędowych muszą być również bezpopiołowe i wykazywać kompatybilność z innymi dodatkami w paliwie oraz z olejem smarującym. Do najpopularniejszych bezpopiołowych dodatków smarnościowych należą kwasy tłuszczowe i estry, alkohole, amidy kwasów karboksylowych oraz mieszaniny kwasów karboksylowych z trzeciorzędowymi aminami. Typowy poziom dozowania kwasów tłuszczowych

wynosi od 10 do 50 ppm. Estry, jako mniej polarne, wymagają wyższego poziomu dozowania od 50 do 250 ppm. [7]. Estry są biodegradowalnymi produktami, nieszkodliwymi dla środowiska. Stosuje się je jako syntetyczną bazę olejów smarowych, dodatki smarnościowe do olejów napędowych oraz jako paliwa dieslowskie pochodzenia naturalnego, tzw. biodiesel (*Fatty Acid Methyl Esters* – FAME; *Rapeseed Methyl Esters* – RME). Obecna norma dotycząca olejów napędowych PN-EN 590:2006 dopuszcza zawartość estrów metylowych kwasów tłuszczowych do 5% (V/V). Najnowsze wydanie Światowej Karty Paliw dopuszcza zawartość FAME do 5% (V/V) dla trzech, z czterech opisywanych, kategorii olejów napędowych. Badania właściwości smarnych olejów bazowych napędowych pochodzenia mineralnego zawierających biodiesel wykazały, że już 1% zawartości estrów zapewnia w większości przypadków wystarczający poziom właściwości smarnych paliwa. Firma Stanadyne, producent aparatury wtryskowej, uważa, że dodanie 2% biodiesla do dzisiejszych konwencjonalnych olejów napędowych zapewnia akceptowalny poziom właściwości smarnych paliwa. Podobne badania przeprowadził Instytut Technologii Nafty (obecnie Instytut Nafty i Gazu) w ramach współpracy z AGH. Oceniono wpływ zawartości estru oleju rzepakowego (RME) produkowanego przez Rafinerię Nafty Trzebinia S.A. na zmianę właściwości smarnych dwóch bazowych olejów napędowych Ekodiesel (zawartość siarki 26 mg/kg, HFRR = 555 μm) i Citydiesel (zawartość siarki 8 mg/kg, HFRR= 617 μm) produkowanych przez PKN ORLEN S.A.

Poniżej, na rysunku 3, przedstawiono wyniki tych badań dla paliw zawierających 0,1%, 0,2%, 0,5%, 1%, 5% i 20% (m/m) RME w oleju napędowym Ekodiesel i Citydiesel [9]

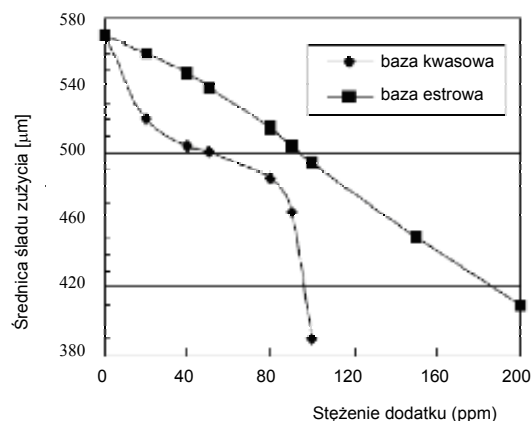


Rys. 3. Wpływ zawartości estru oleju rzepakowego (RME) na właściwości smarne HFRR bazowego oleju napędowego Ekodiesel i Citydiesel

Fig. 3. Impact of the rapeseed methyl ester (RME) content on the HFRR lubricity of the Ecodiesel and Citydiesel diesel fuels

Paliwa syntetyczne typu BTL Diesel, a także inne otrzymywane na drodze syntezy Fischer–Tropscha (GTL, CTL) w większości przypadków spełniają wymagania odnośnie do poziomu smarności HFFR wyłącznie po zastosowaniu odpowiednich dodatków. Na podstawie badań ITN prowadzonych w ramach projektu RENEW stwierdzono, że paliwa BTL wykazują zróżnicowaną czułość na działanie dodatków smarnościowych, często odmienną od konwencjonalnych olejów napędowych bazowych. Na rysunku 4 pokazano przykład reakcji syntetycznego paliwa produkcji Sasol na dodatki smarnościowe różnego typu, jed-

nego na bazie kwasowej (nienasycone kwasy tłuszczowe), drugiego na bazie estrów kwasów karboksylowych. Informacje patentowe wymieniają obecnie wiele typowych dodatków handlowych przeznaczonych do paliw BTL, są to m.in. EC 832, Hitec E580, Lubrizol 539C, Octel OLI 9000. Dodatki te aplikowane są w stężeniu od 50 do 1000 ppm.



Rys. 4. Poprawa smarności paliwa syntetycznego przy zastosowaniu dwóch przykładowych dodatków o innej budowie chemicznej [11]

Fig. 4. Improvement of lubricity of synthetic fuel with the addition of two exemplary additives, with different chemistry [11]

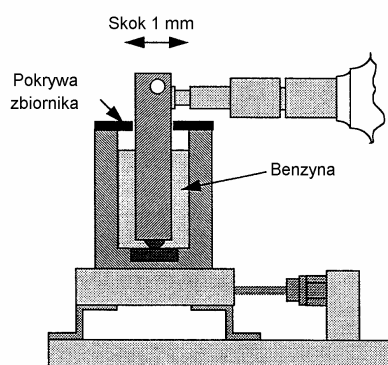
5. Właściwości smarne paliw do silników ZI

Zagadnienie właściwości smarnych benzyn silnikowych stosowanych do zasilania silników z zapłonem iskrowym (ZI) należy rozpatrywać inaczej niż olejów napędowych zasilających silniki z zapłonem samoczynnym (ZS). Wynika to z zasadniczych odmienności konstrukcyjnych obecnie powszechnie stosowanych systemów wtrysku paliwa w silnikach z ZI i ZS. Systemy wtrysku benzyny (zwłaszcza pośredniego do kanałów dolotowych, jakie w dalszym ciągu dominuje) są z mechanicznego punktu widzenia znacznie prostsze, a wtrysk paliwa zachodzi pod ciśnieniem znacznie niższym w stosunku do systemów wtrysku paliwa znanych z silników z ZS. W związku z powyższymi właściwościami smarnymi benzyn stawiane są znacznie niższe wymagania niż olejom napędowym i zazwyczaj nie stanowią problemu. Sytuacja taka może ulec zmianie w ciągu najbliższych kilku lat w miarę rozpowszechniania się w silnikach ZI bezpośredniego wtrysku paliwa drugiej generacji (obecnie systemy takie stosują już w niektórych silnikach BMW – system HPI i Mercedes – system CGI). Wymienione systemy są konstrukcyjnie bardzo zbliżone do obecnych układów *Common Rail* znanych z silników ZS i pracują pod ciśnieniem ok. 20 MPa, co może doprowadzić do zwiększenia wymagań w zakresie właściwości smarnych stawianych benzynom.

Jednym z czynników utrudniających pomiar smarności benzyn jest ich wysoka lotność, uniemożliwiająca ocenę z użyciem konwencjonalnej aparatury. Jedyne publikowane wyniki badań smarności benzyn uzyskano z zastosowaniem aparatu HFRR, tak zmodyfikowanego, aby możliwe było ograniczenie stopnia odparowania paliwa i utrzymanie odpo-

wiedniej ilości reprezentatywnej próbki przez cały okres trwania testu. Niezbędne modyfikacje (rys. 5), obejmowały [12]:

- podniesienie wibratora o ok. 30 mm,
- wydłużenie uchwytu kulki testowej,
- wykonanie głębszego uchwytu płytki testowej, zdolnego pomieścić 6 ml paliwa,
- wyposażenie dolnego uchwytu w pokrywę uszczelniającą,
- zamknięcie aparatu szczelną przezroczystą obudową.



Rys. 5. Modyfikacje aparatu HFRR umożliwiające ocenę smarności benzyn silnikowych

Fig. 5. Modifications of HRFH enabling measurement of gasoline lubricity

Badania prowadzono w warunkach określonych dla olejów napędowych w temperaturze 25°C, przy wilgotności względnej powietrza od 25 do 95%. Przykładowe wyniki badań benzyn niezawierających dodatków zestawiono w tab. 2.

Tabela 2

Wyniki HFRR (temp. 25°C) dla różnych typów benzyn bez dodatków [12]

	Średnia średnica śladu zużycia [μm]	Średni wsp. tarcia	Skład
Benzyna A (europejska, konwencjonalna)	799	0,35	80 ppm S, 38% węglowodorów aromatycznych, 7% olefinowych, bez związków tlenowych
Benzyna B (CaRFG2)	872	0,47	30–40 ppm S, 22–25% węglowodorów aromatycznych, 12–14% olefinowych, 10,8–11,2% MTBE
Benzyna C (CEC RF-83-A-91)	711	0,32	137 ppm S, 35% węglowodorów aromatycznych, 19% olefinowych, bez związków tlenowych
Benzyna E (fińska, typu City)	861	0,53	27 ppm S, 26% węglowodorów aromatycznych, 11% olefinowych, 11% związków tlenowych

Zamieszczone w tabeli 2 wyniki wyraźnie potwierdzają niższy poziom właściwości smarnych benzyn niż olejów napędowych. Na przykład dla szwedzkiego lekkiego oleju napędowego (Swedish Class 1), paliwa o wyjątkowo niskiej smarności, średnica skazy HFRR podczas badania w temperaturze 25°C wynosiła 680 μm , a współczynnik tarcia 0,48.

Można także zauważyć, że skład benzyn ma istotny wpływ na poziom właściwości smarnych. Benzyny zawierające związki tlenowe i jednocześnie mające najwyższy stopień odsiarczenia powodują największe zużycie kulki testowej (średnice śladu zużycia powyżej 850 μm).

Odrębnym zagadnieniem związanym z właściwościami smarnymi benzyn silnikowych jest zjawisko przedwczesnego zużywania się gniazd zaworowych, zaobserwowane po wycofaniu z benzyn związków ołowiu (wykorzystywanych do podwyższania liczby oktanowej benzyn), które po spaleniu benzyny pełniły rolę czynnika smarnego i amortyzującego siadanie zaworów wylotowych w gniazdach. Obecnie stosowane są już odpowiednie materiały (lub ich ciepło-chemiczne utwardzanie) na gniazda zaworowe zapobiegające temu zjawisku, jednak podczas rozpowszechniania benzyn zawierających w swym składzie bioetanol ponownie zauważono występowanie zjawiska przedwczesnego zużywania się gniazd zaworowych. Obszerne badania przeprowadzone m.in. przez firmy FORD i General Motors [13, 14] podczas konstruowania silników przeznaczonych do zasilania benzynami etanолоwymi E85 doprowadziły do wyjaśnienia przedmiotowego zjawiska. Udział bioetanolu w benzynach powoduje „czystszy”, pełniejszy proces spalania, w wyniku którego wytwarzana jest dużo mniejsza ilość sadzy, stanowiącej czynnik smarny (istotny szczególnie dla gniazd zaworów wydechowych). Ponadto chemiczne oddziaływania etanolu powodują znaczne zmniejszenie, a nawet zupełne uniemożliwiają tworzenie się na zaworach dolotowych (w tym na ich przyłgniach) warstwy ochronnych tlenków, co w połączeniu z większymi średnimi ciśnieniami przebiegu procesu spalania benzyny zawierającej etanol przyczynia się do przedwczesnego zużycia gniazd zaworowych. Nie bez znaczenia jest tu też efekt termiczny polegający na znaczącym chłodzeniu zaworów dolotowych, a wynikający ze zwiększonego ładunku paliwa i efektu odparowania etanolu. Opisane zjawisko ściernego zużycia narasta w miarę wzrostu udziału bioetanolu w benzynie.

Nie ulega jednak wątpliwości, że przewidywane kierunki rozwoju silników ZI oraz stosowanych w nich paliw alternatywnych, w tym zawierających bioetanol, mogą spowodować istotne zwiększenie znaczenia właściwości smarnych benzyn silnikowych nie tylko w aspekcie trwałości aparatury wtryskowej.

6. Podsumowanie

Obecne i prognozowane na przyszłość tendencje rozwoju konstrukcji tłokowych silników spalinowych, a w szczególności ich układów wtrysku paliwa, skłaniają do stwierdzenia, że właściwości smarne paliwa będą miały coraz większe znaczenie. Wzrastająca precyzja wykonania złożonych przedmiotowych układów, nierozdzielnie związana z możliwością uzyskiwania coraz wyższych ciśnień wtrysku paliwa, w znacznym stopniu wpływających na proces jakościowego przygotowania mieszaniny palnej w komorach spalania silnika, a następnie przebieg samego procesu spalania stawia niezwykle wysokie wymagania względem paliwa jako czynnika smarnego w układach wtrysku paliwa. Dodatkowo, rozwój silników zgodnie z filozofią tzw. downsizingu, a zatem uzyskiwanie tych samych parametrów użytkowych przy ograniczaniu pojemności skokowej prowadzi do zwiększania obciążeń ciepło-mechanicznych silników, a to dodatkowo zaostrza wymagania stawiane paliwom w zakresie zapewnienia co najmniej dostatecznych właściwości smarnych. Na fotografii 5 przedstawiono przykład, jak trudno jest zapewnić odpowiednie właściwości smarne, aby zapobiec procesom zużycia szczególnie obciążonym elementom

coraz powszechniej stosowanego układu wysokociśnieniowego wtrysku paliwa typu *Common Rail*.



Fot. 5. Obraz wielkości zużycia krzywki napędzającej sekcje wysokociśnieniowe pompy wtryskowej układu *Common Rail*

Photo 5. Image of wear size of a cam driving high-pressure sections of injection pump in a *Common Rail* system

Powyższe rozważania i przykłady dowodzą, że właściwości smarne paliw silnikowych muszą być bezwzględnie dostosowywane do wymagań stawianych przez nieustannie rozwijane konstrukcje silników spalinowych, w tym układów wtrysku paliwa, co wiąże się z opracowywaniem nowych technologii paliw. W przeciwnym razie przyspieszone bądź awaryjnie przebiegające procesy zużycia kluczowych, precyzyjnych elementów silnika mogą stanowić jedno z podstawowych zagrożeń w zakresie ich niezawodności i trwałości.

Literatura

- [1] http://www.ifleet.co.za/pages/injector_failure.htm, *Combat Injector failure*.
- [2] Appeldorn J.K., Dukek W.G., *Lubricity of Jet Fuel*, SAE Paper 660712, 1966.
- [3] Mitchell K., *The Lubricity of Winter Diesel Fuels*, SAE Paper 952370, 1995.
- [4] CEC F-06-A-96 *Measurement of Diesel Fuel Lubricity*.
- [5] Jenkins S.R., Landells R.G.M., Hadley J.W., *Diesel fuel lubricity development of a Constant Load Scuffing Test using the Ball on Cylinder Lubricity Evaluator (BOCLE)*, SAE Technical Paper Series 932691.
- [6] Meyer K., Livingston T., *Diesel Fuel Lubricity Requirements for Light Duty Fuel Injection Equipment*, CARB Fuels Workshop, Sacramento, CA February 20, 2003.
- [7] World Wide Fuel Charter – September 2006.
- [8] http://www.biodiesel.org.au/Documents/Chevron_Diesel_Fuel_Review.pdf.
- [9] PN EN 590:2006 Paliwa do pojazdów samochodowych. Oleje napędowe. Wymagania i metody badań.
- [10] Wolszczak J., Stępień Z., Brzoza M., Maj M., *The Impact of Bioesters on Lubricity of Diesel Fuels*, Journal of KONES 2005.
- [11] Sasol Oil Ltd, *An Overview of the Production, Properties and Exhaust Emissions Performance of Sasol Slurry Phase Distillate Diesel Fuel*.
- [12] Ping W.D., Korček S., Spikes H., *Comparison of the Lubricity of Gasoline and Diesel Fuels*, SAE 962010.

- [13] Bergstroem K., Sven-Anders M., Coleman J., *The New ECOTEC Turbo Power Engine from GM powertrain – Utilizing the Power of Nature's Resources*, 28, Internationales Wiener Motorensymposium 2007.
- [14] Talauskas D., *Motor Fuels & Engine Technology*, Biofuels and the Automotive Industry Workshop, Bangkok, October 2007.
- [15] Niepublikowane wyniki badań ITN.