

Ewolucja metod oceny szkodliwych osadów silnikowych powodowanych spalaniem benzyn

Evolution of methods applied for assessing harmful engine deposits caused by gasoline combustion

Zbigniew Stępień

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Artykuł dotyczy niekorzystnego wpływu obecności osadów na prawidłowe funkcjonowanie silników ZI (z zapłonem iskrowym). Wskazano obszary silników z pośrednim i bezpośrednim wtryskiem paliwa, gdzie formują się najbardziej niebezpieczne osady. Zebrano i przeanalizowano czynniki mające istotny wpływ na występowanie tego niekorzystnego zjawiska. W konsekwencji dokonano uproszczonej klasyfikacji czynników wpływających na tworzenie się szkodliwych osadów w silnikach ZI z pośrednim i bezpośrednim wtryskiem paliwa. W ramach projektu przeprowadzono badania porównawcze tendencji do tworzenia osadów przez benzyny o różnym składzie i właściwościach fizykochemicznych. Kryterium oceny właściwości detergentowych benzyn były tendencje do tworzenia się osadów na zaworach dolotowych w przypadku silnika z pośrednim wtryskiem paliwa i osadów na wtryskiwaczach w przypadku silnika z bezpośrednim wtryskiem paliwa. Wykorzystano w tym celu szeroko stosowaną dotychczas procedurę badawczą CEC F-05-93, odnoszącą się do osadów tworzących się na zaworach dolotowych w silnikach ZI z pośrednim wtryskiem paliwa, oraz najnowszą procedurę badawczą CEC F-113-KC, odnoszącą się do najbardziej szkodliwych osadów tworzonych we wtryskiwaczach silników DISI (ang. *direct injection spark ignition*). Celem przeprowadzonych badań porównawczych było ustalenie, czy istnieje jakaś względnie prosta, możliwa do określenia zależność pomiędzy ocenami właściwości detergentowych benzyn uzyskanymi na silnikowych stanowiskach badawczych, różniących się generacjami silników badawczych, metodami prowadzenia badań a rodzajem tworzonych osadów silnikowych. W rezultacie stwierdzono, że wyniki badań przeprowadzonych przy wykorzystaniu procedur CEC F-05-93 i CEC F-113-KC nie są zbieżne ani jakkolwiek ze sobą powiązane. Zatem znając ocenę benzyny uzyskaną według jednej z wyżej wymienionych procedur badawczych, nie można przewidywać czy też określać w przybliżeniu oceny, jaką otrzymamy według drugiej procedury badawczej. W rezultacie nie jest możliwa ekstrapolacja wyników oceny benzyny pod względem tendencji do tworzenia szkodliwych osadów silnikowych uzyskanych według jednej z procedur tak, aby uzyskać wynik według drugiej z procedur.

Słowa kluczowe: osady silnikowe, benzyny silnikowe, silniki ZI, pośredni wtrysk paliwa, bezpośredni wtrysk paliwa.

ABSTRACT: The article describes the threat posed by deposits harmful to the proper functioning of spark ignition engines. The areas of indirect and direct injection engines where the most dangerous deposits form are indicated. The factors having significant influence on the occurrence of this unfavourable phenomenon were collected and analyzed. Consequently, a simplified classification of factors influencing the formation of harmful deposits in direct and indirect injection spark ignition engines was made. In the research part of the project, a comparative study of the tendency of gasolines of different composition and physicochemical properties to form deposits was carried out. The criterion for evaluating the detergent properties of gasolines was the tendency to form deposits on intake valves in the case of indirect injection engine and on the injector in the case of direct injection engine. For this purpose, the previously widely used test procedure CEC F-05-93 relating to deposits formed on intake valves in SI indirect injection engines and the latest test procedure CEC F-113-KC relating to the most harmful deposits formed in injectors of DISI (Direct Injection Spark Ignition) engines were used. The purpose of the comparative study conducted was to determine if there was any relatively simple, identifiable relationship between the results of gasoline detergent property evaluations obtained at engine test sites differing in test engine generations, methods of conducting the evaluations, and type of engine deposits formed. As a result, no correlations were found between the testable engine sludge tendency results obtained from tests using the CEC F-05-93 and CEC F-113-KC procedures. Therefore, knowing the evaluation of gasoline conducted according to one of the above mentioned test procedures, one cannot conclude, predict or estimate the evaluation that will be obtained according to the other test procedure. Therefore, the results obtained according to one of the procedures do not allow extrapolation and evaluation of gasoline in terms of tendency to form harmful engine deposits according to the other procedure.

Key words: engine deposits, motor gasoline, SI engines, indirect fuel injection, direct fuel injection.

Autor do korespondencji: Z. Stępień, e-mail: zbigniew.stepien@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji 10.02.2021 r. Zatwierdzono do druku: 12.04.2021 r.

Wstęp

Powszechne dążenie do redukcji zanieczyszczeń z sektora transportu drogowego wymaga wprowadzania zupełnie nowych lub znacznie zmodyfikowanych wykorzystywanych już technologii i rozwiązań konstrukcyjnych. Wymaga to prowadzenia badań w nowych obszarach lub rozszerzenia i pogłębienia badań w obszarach już zdefiniowanych. W przypadku motoryzacji zasadniczym kierunkiem tych przedsięwzięć jest podporządkowanie rozwoju pojazdów samochodowych i stosowanych do nich paliw lub innych źródeł energii nadrzędnemu celowi, jakim jest ograniczenie emisji szkodliwych składników, w tym gazów cieplarnianych (GHG, ang. *greenhouse gas*) do atmosfery. W przypadku konstrukcji silników spalinywych ZI (zapłon iskrowy) stosowanie bezpośredniego wtrysku paliwa – DISI (ang. *direct injection spark ignition*) stało się już powszechne (Harada et al., 1997; Zhao et al., 1999). Obecnie metoda ta stanowi najlepsze rozwiązanie w zakresie dalszego rozwoju silników w trzech podstawowych kierunkach, tj.: zmniejszenia zużycia paliwa, zmniejszenia emisji składników szkodliwych do atmosfery oraz dalszej poprawy parametrów silników. Metodą współdziałającą, a zarazem wspomagającą DISI w osiągnięciu założonych celów jest doładowanie silników – najczęściej turbodoładowanie, jako najbardziej sprawne. Wymienione metody umożliwiły wprowadzenie i rozpowszechnienie silników o zmniejszonej objętości skokowej / masie (ang. *downsizing*) oraz zwiększonej sprawności / mocy jednostkowej przy ograniczonym zużyciu paliwa. Poza bezsprzecznymi zaletami bezpośredniego wtrysku paliwa mają one też pewne wady, co stawia określone wymagania eksploatacyjne i stwarza problemy odmienne od tych, jakimi cechowały się układy z pośrednim wtryskiem paliwa. W zakresie emisji składników szkodliwych silniki DISI charakteryzują się m.in. znacznie większą emisją cząstek stałych w porównaniu do silników ZI z pośrednim wtryskiem paliwa (PFI, ang. *port fuel injection*). Wykazują też większą tendencję do spalania stukowego oraz dużą skłonność do tworzenia szkodliwych osadów silnikowych, zwłaszcza osadów wtryskiwaczy paliwa, co znacznie pogarsza osiągi i parametry użytkowo-eksploatacyjne tych silników. W porównaniu z silnikami PFI wtryskiwacze paliwa silników DISI pracują w dużo bardziej szkodliwym środowisku. Umieszczone w komorze spalania końcówki wtryskiwaczy są bowiem narażone na bezpośredni wpływ wysokiego ciśnienia i temperatury spalanego ładunku, co powoduje szybkie tworzenie się szkodliwych osadów. Nie bez znaczenia jest też chemiczne oddziaływanie spalanego paliwa na silnik (Imoehl et al., 2012; Kalghatgi, 2013; Russell et al., 2013; Arondel et al., 2015; Henkel et al., 2017; Bennett, 2018; Shuai et al., 2018). Stanowi to duży problem dla poprawnego funkcjonowania silnika, ponieważ jakość

mieszanki paliwowo-powietrznej utworzonej w komorach spalania zależy od wtryskiwaczy paliwa, na których funkcjonowanie największy wpływ mają tworzone w nich szkodliwe osady. Problem ten stanowi wyzwanie dla konstruktorów silników oraz producentów paliw i dodatków uszlachetniających.

Powstawanie osadów w silniku zależy od miejsca ich tworzenia i innych czynników. Ilość powstałych osadów jest wypadkową procesów tworzenia i usuwania osadów. Mechanizmy formowania osadów są znane, chociaż procesy ich powstawania nie są do tej pory w pełni zrozumiałe. W przypadku wtryskiwaczy paliwa prekursorzy osadów tworzą się na skutek utleniania, kondensacji i wytrącania niestabilnych węglowodorów aromatycznych i olefin z paliwa (Xu et al., 2015). Prekursorzy te formują osady poprzez dwie odrębne ścieżki reakcji chemicznych, tj. samoutleniania w niskiej temperaturze oraz tworzenia osadów koksowych na skutek pirolizy w wysokiej temperaturze. Jednak do tej pory nie udało się ustalić temperatury granicznej pomiędzy reakcjami zachodzącymi w niskiej i wysokiej temperaturze, tym bardziej że zaobserwowano zakres temperatury, w którym zachodzą zarówno reakcje przypisane do niskiej, jak i wysokiej temperatury (Xu et al., 2015). Stabilność oksydacyjna różni się od stabilności termicznej i odnosi się do szybkości zużywania tlenu podczas formowania produktów utleniania. W reakcjach utleniania rodników alkiowych tworzą się uwodnione nadtlenki i inne produkty utleniania odpowiedzialne za powstawanie osadów (Altin i Eser, 2004). W temperaturze powyżej 350°C osady węglowe tworzą się zazwyczaj w dwojaki sposób, tj. poprzez rozkład węglowodorów do wolnego węgla i wodoru oraz poprzez polimeryzację/kondensację różnych odmian węglowodorów do większych wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych, które tworzą zarodki, a następnie osady węglowe.

Problem powstawania szkodliwych osadów na różnych elementach silników ZI, jak i ZS jest znany już od około 50 lat. Konieczność przeciwdziałania tworzeniu się tych osadów wymusiła stopniowe opracowywanie różnych silnikowych metod badania i oceny osadów oraz przygotowanie skutecznych rozwiązań ograniczających ich tworzenie. Znajduje to odzwierciedlenie w kolejnych edycjach *Światowej Karty Paliw*, w której wskazywane są sukcesywnie weryfikowane procedury badania szkodliwych osadów silnikowych, dostosowywane do wymagań zmieniających się formułacji paliw, ich kategorii i kolejnych generacji silników (Worldwide Fuel Charter, October 2019). W przypadku badań osadów tworzonych w silnikach ZI – WWFCh (Worldwide Fuel Charter, September 2013) wskazuje następujące metody amerykańskie: ASTM D 5500, ASTM D 6201, ASTM D 5598 i ASTM D 6241 i europejskie: CEC F-05-93 (M102E), CEC F-16-96 (VW Boxer) i CEC F-20-98 (M111). Wszystkie metody amerykańskie zakładają prowadzenie badań w samochodach

lub silnikach pochodzących z lat 80. ubiegłego wieku, przy czym są to silniki wyłącznie z pośrednim wtryskiem paliwa. Badania te obejmują ocenę osadów na zaworach dolotowych i we wtryskiwaczach paliwa. Metody europejskie zakładają prowadzenie wszystkich wyżej wymienionych testów w silnikach z pośrednim wtryskiem paliwa typu PFI, pochodzących z lat 90. ubiegłego wieku. Oceny te dotyczą osadów na zaworach dolotowych i w komorach spalania. Zatem żadna z wymienionych metod nie jest reprezentatywna dla najbardziej rozpowszechnionych obecnie – zarówno w USA, jak i w Europie – silników ZI z bezpośrednim wtryskiem paliwa (DISI). Metoda bezpośredniego wtrysku paliwa pozwoliła producentom silników spełnić cele dotyczące ograniczeń w zakresie emisji szkodliwych składników spalin oraz wielkości zużycia paliwa (zwiększenie sprawności silnika) narzucane stopniowo zaostrzonymi przepisami. Jednak zmieniła także potrzeby w zakresie badania i oceny szkodliwych osadów. Okazało się bowiem, że w silnikach tego typu osadami mającymi najbardziej szkodliwy wpływ na poprawne i niezawodne funkcjonowanie silnika są osady wtryskiwaczy paliwa (DuMont et al., 2009; Joedicke et al., 2012; Dearn et al., 2014; Xu et al., 2015; Wang et al., 2017; Badawy et al., 2018). W silnikach ZI z pośrednim wtryskiem paliwa osadami najbardziej szkodliwymi – z punktu widzenia poprawnego funkcjonowania silnika – są osady formowane na zaworach dolotowych (Stępień, 2015).

Motyacją do podjęcia opisanych w artykule badań było porównanie oceny właściwości użytkowo-eksploatacyjnych różnych benzyn silnikowych na podstawie testów prowadzonych w silniku ZI z pośrednim wtryskiem paliwa (Mercedes M102E) i silniku z bezpośrednim wtryskiem paliwa (VW EA111). Kryterium oceny właściwości użytkowo-eksploatacyjnych benzyn były tendencje do tworzenia osadów na zaworach dolotowych w przypadku silnika z pośrednim wtryskiem paliwa i osadów wtryskiwaczy w przypadku silnika z bezpośrednim wtryskiem paliwa. W silniku z pośrednim wtryskiem paliwa ocena osadów na zaworach dolotowych prowadzona jest metodą analizy wagowej. W przypadku pojedynczego zaworu – wynika z różnicy mas zaworu z osadami i zaworu czystego (po usunięciu osadów), podawanej w miligramach. W silniku z bezpośrednim wtryskiem paliwa miarą zawartości wytworzonych, szkodliwych osadów wtryskiwaczy jest zmieniająca się szerokość impulsu elektrycznego, sterującego czasem wtrysku dawki paliwa. Czas ten wydłuża się ze wzrostem ilości osadów gromadzących się na zewnątrz i wewnątrz wtryskiwacza. Wynik testu stanowi różnicę szerokości impulsu elektrycznego sterującego czasem otwarcia wtryskiwaczy paliwa w pojedynczym wtrysku paliwa zmierzonego przed rozpoczęciem testu i po jego zakończeniu. Ponieważ mierzony impuls jest niestabilny i zmienia się z dużą częstotliwością i dużą

amplitudą w czasie, obliczenie przyrostu szerokości impulsu poprzez proste porównanie jego wielkości na początku i na końcu testu byłoby obarczone dużym błędem. Dlatego stosuje się tu metodykę opartą na wykorzystaniu funkcji trendu, ponieważ wartości obliczone na podstawie trendu są bardziej reprezentatywne od opartych na krańcowych punktach pomiaru. W ten sposób wyznacza się średnie obliczeniowe szerokości impulsu elektrycznego sterującego czasem wtrysku na początku i na końcu testu. Różnica pomiędzy nimi stanowi wynik testu, podawany w procentach.

W tabeli 1 zebrano, opisano i sklasyfikowano znaczenie różnic czynników mających największy wpływ na tworzenie osadów w testach według procedur CEC F-05-93 i CEC F-113-KC.

Materiały i metody badań

W ramach projektu testom silnikowym poddano cztery benzyny silnikowe różniące się właściwościami fizykochemicznymi. Przy wyborze benzyn kierowano się potrzebą oceny wpływu ich różnych parametrów fizykochemicznych na tendencje do tworzenia osadów zarówno silnikowych (na zaworach dolotowych silnika M102E), jak i wtryskiwaczy (w przypadku silnika VW EA111 BLG). W celu lepszego rozróżnienia wpływu różnych właściwości fizykochemicznych na tendencje do tworzenia osadów w testach zastosowano paliwa niezawierające pakietów dodatków uszlachetniających typu DCA (ang. *deposit control additives*). Właściwości fizykochemiczne przygotowanych próbek paliw do badań silnikowych przedstawiono w tabeli 2.

Badania tendencji do tworzenia osadów na zaworach dolotowych silnika Mercedes M102E prowadzono zgodnie z wymaganiami znormalizowanej procedury badawczej CEC F-05-93 (Inlet Valve Cleanliness in the MB M 102 E Engine). Badania tendencji do tworzenia osadów na wtryskiwaczach paliwa silnika VW EA111 BLG prowadzono według wymagań znormalizowanej procedury badawczej CEC F-113-KC (VW EA111 DISI Injector Deposit Test).

Wyniki badań i podsumowanie

W tabeli 3 zestawiono wyniki przeprowadzonych ocen wagowych oraz obrazy osadów na zaworach dolotowych silnika Mercedes M102E i osadów na końcówkach wtryskiwaczy silnika VW EA111 BLG, powstałych podczas zasilania silnika badanymi paliwami.

Celem oceny porównawczej było określenie względnie prostej zależności pomiędzy wynikami ocen właściwości

Tabela 1. Klasyfikacja czynników wpływających na tworzenie szkodliwych osadów w silnikach ZI z pośrednim i bezpośrednim wtryskiem paliwa

Table 1. Classification of factors influencing the formation of harmful deposits in direct and indirect injection spark ignition engines


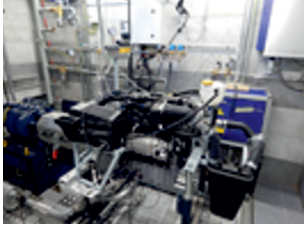
Procedura badawcza oznaczenie / zdjęcie stanowiska badawczego		Znaczenie różnic czynników wpływających na tworzenie osadów na zaworach dolotowych silników badawczych xxx – duże xx – średnie x – małe 0 – bez znaczenia
CEC F-05-93 (Mercedes M102E) 	CEC F-113-KC (VW EA111) 	
WARUNKI PROWADZENIA TESTU		
Warunki pracy silnika w teście		
Silnik pracuje w 4-etapowym powtarzającym cyklu badawczym. W poszczególnych etapach prędkość obrotowa i obciążenie są różne	Silnik przez cały czas pracuje w warunkach ustalonych (stała prędkość obrotowa i obciążenie)	Silniki pracują w zupełnie różnych warunkach xx
Całkowity czas prowadzenia testu		
60 h	48 h	xx
Parametry powietrza dolotowego silnika, chłodziwa, paliwa i oleju smarowego		W obydwu przypadkach wymienione parametry są podobne x
CECHY KONSTRUKCYJNE SILNIKÓW BADAWCZYCH		
Objętość skokowa silnika i liczba zaworów w cylindrze silnika		
2,3 dm ³ , 2VPC (w tym 1 dolot.)	1,4 dm ³ , 4VPC (w tym 2 dolot.) doładowanie mechaniczne + turbodoładowanie	Silnik M102E jest silnikiem wolnossącym, natomiast silnik VW EA111 – silnikiem doładowanym xx
Średnia temperatura powierzchni grzybków zaworów dolotowych w przypadku silnika M102E i końcówek wtryskiwaczy w silniku VW EA111		W obydwu procedurach badawczych temperatura powierzchni elementu silnika, na której tworzą się osady, jest bardzo ważna xxx
Stosowany system wtrysku paliwa		
Pośredni Ciągły, elektromechaniczny BOSCH KE-Jetronic	Bezpośredni Przerywany, elektroniczny BOSCH Motronic MED 9.5.10	Różne rodzaje i parametry pracy układów wtrysku paliwa. Znacznie różniące się warunki pracy wtryskiwaczy paliwa xxx
Olej smarowy stosowany w silnikach Do smarowania obu silników stosowany jest taki sam olej smarowy		W przypadku silnika M102E smarowy olej silnikowy może mieć większy wpływ na tworzone osady, biorąc pod uwagę smarowanie trzonek zaworów i możliwość jego spływania na powierzchnię grzybków zaworowych, gdzie formują się oceniane osady x
PALIWO		
Objętość zużywanego paliwa w teście		
250 dm ³	250 dm ³	0
Skład paliwa		W tworzeniu osadów istotna jest stabilność termiczna paliwa oraz ilość składników o wysokiej temperaturze wrzenia w powiązaniu z temperaturą, do jakiej nagrzewają się powierzchnie, na których odkładają się osady (w tym przypadku zawory dolotowe) xxx

Tabela 2. Właściwości fizykochemiczne próbek benzyn przygotowanych do badań silnikowych
Table 2. Physico-chemical properties of petrol samples prepared for engine testing

Właściwość	Jednostka	BB95-1	BB95-2	BB95-3	BB98	Metoda badania według
		1	2	3	4	
Gęstość w temperaturze 15°C	kg/m ³	762,3 ± 0,4	751,2 ± 0,4	739,3 ± 0,4	742,5 ± 0,4	PN-EN ISO 12185:2002
Liczba oktanowa badawcza (LOB)	–	95,7	97,6	95,3	98,8	PN-EN ISO 5164
Liczba oktanowa motorowa (LOM)	–	85,1	86,0	85,5	87,2	PN-EN ISO 5163
Zawartość siarki	mg/kg	45,6 ± 6,4	4,5 ± 1,2	7,6 ± 1,6	6,8 ± 1,5	PN-EN ISO 20846:2020
Okres indukcyjny	minuty	>360	>360	>360	>360	PN-EN ISO 7536:2011
Zawartość żywic obecnych (po przemyciu rozpuszczalnikiem)	mg/100 ml	3,0 ± 2,5	2,5 ± 2,3	2,5 ± 2,3	1,5 ± 2,0	PN-EN ISO 6246:2017-05
Zawartość węglowodorów typu:						
– olefinowego	% (V/V)	9,8 ± 1,4	8,5 ± 2,1	9,2 ± 2,2	4,0 ± 1,1	PN-EN 15553:2009
– aromatycznego	% (V/V)	40,6 ± 2,8	32,8 ± 2,6	26,2 ± 2,6	30,7 ± 2,6	
Zawartość benzenu	% (V/V)	0,4 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,5 ± 0,1	0,5 ± 0,1	PN-EN 238:2000+A1:2008
Zawartość tlenu	% (m/m)	<0,01	1,81 ± 0,21	0,77	1,96 ± 0,21	PN-EN 1601:2017-09
Zawartość związków organicznych zawierających tlen:						
– metanol	% (V/V)	<0,17	<0,17	<0,17	<0,17	PN-EN 1601:2009
– etanol	% (V/V)	<0,17	<0,17	<0,17	0,2 ± 0,07	
– alkohol izopropylowy	% (V/V)	<0,17	<0,17	<0,17	<0,17	
– alkohol tert-butyłowy	% (V/V)	<0,17	<0,17	<0,17	<0,17	
– alkohol izobutyłowy	% (V/V)	<0,17	<0,17	<0,17	<0,17	
– etery (z 5 lub więcej atomów węgla)	% (V/V)	<0,17	10,1 ± 0,57	4,8 ± 0,28	12,1 ± 0,64	
– inne związki organiczne zawierające tlen	% (V/V)	<0,17	<0,17	<0,17	<0,17	
Prężność par (DVPE)	kPa	54,2 ± 1,1	74,2 ± 1,1	58,9 ± 1,1	69,2 ± 1,1	PN-EN 13016-1:2018-05
Skład frakcyjny:						
– IBP	°C	37,4 ± 3,4	34,8 ± 3,4	37,5 ± 3,4	33,6 ± 4,8	PN-EN ISO 3405:2019
– temperatura końca destylacji	°C	214,9 ± 5,1	196,5 ± 5,1	196,9 ± 5,1	185,0 ± 5,1	
– destyluje	% (V/V)	97,3	97,1	97,5	97,6	
– pozostałość	% (V/V)	1,0	1,2	1,2	1,0	
– straty	% (V/V)	1,7	1,7	1,3	1,4	
– temperatura odparowania 10%, T10	°C	52,3 ± 2,6	48,8 ± 2,6	51,9 ± 2,6	48,8 ± 2,6	
– temperatura odparowania 50%, T50	°C	106,5 ± 3,6	93,4 ± 3,1	88,3 ± 2,9	88,2 ± 2,9	
– temperatura odparowania 90%, T90	°C	172,9 ± 4,0	156,5 ± 4,0	157,8 ± 4,1	148,4 ± 4,0	
Indeks lotności, VLI (VLI = 10DVPE + 7E70)	–	746 ± 36	955 ± 36	830 ± 36	926 ± 36	PN-EN 228 + A1:2017-06

detergentowych benzyn, uzyskanymi na silnikowych stanowiskach badawczych, z silnikami różnej generacji, różnymi metodami prowadzenia ocen i różnym rodzajem tworzonych osadów silnikowych.






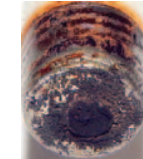
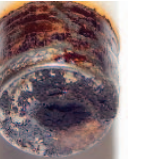
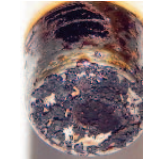




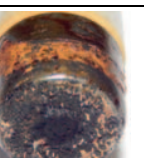
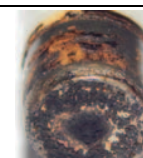














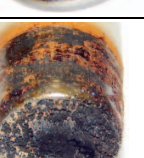



Na rysunku 1 przedstawiono porównanie wyników tendencji do tworzenia osadów tych samych benzyn (tab. 2) uzyskane w testach typu *Keep-Clean* według dwóch różnych, wskazanych wyżej procedur badawczych.

W ocenie wyników należy podkreślić, że przy bezpośrednim wtrysku paliwa każda konstrukcja silnika, strategia organizacji zachodzącego w nim procesu spalania i konstrukcja

wtryskiwaczy ma bardzo duży wpływ na intensywność zjawiska zakoksowywania wtryskiwaczy, a zatem i na końcowy wynik oceny paliwa w rozumieniu progresji tworzenia osadów we wtryskiwaczach, jak i zawartości tych osadów, wytworzonych w określonym czasie. W tym przypadku oceny dokonano w silniku VW EA111 BLG zgodnie z procedurą CEC F-113-KC. Oceny paliw przeprowadzone dotychczas w wielu laboratoriach europejskich według wyżej wymienionej procedury, w ramach prac Grupy Roboczej CEC TDG F-113, pozwoliły określić powtarzalność wyników uzyskiwanych tą metodą za pomocą rozkładu t-Studenta.

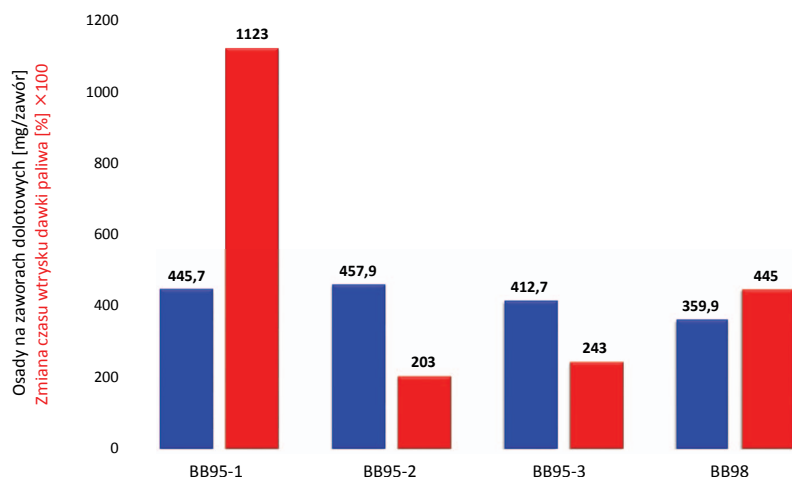
Tabela 3 Zestawienie wyników badań i obrazów osadów powstałych na zaworach dolotowych i na końcówkach wtryskiwaczy silników testowych zasilanych badanymi paliwami

Table 3. Summary of test results and images of deposits formed on inlet valves and injector tips of test engines fuelled with the tested fuels

Paliwo	Metoda badania	Obraz osadów (na zaworach dolotowych / na wtryskiwaczach paliwa)				Ocena średnia
		I – cyl.	II – cyl.	III – cyl.	IV – cyl.	
BB95-1	CEC F-05-93					445,7 mg/zaw.
	CEC F-113-KC					11,23%
BB95-2	CEC F-05-93					457,9 mg/zaw.
	CEC F-113-KC					2,03%
BB95-3	CEC F-05-93					412,7 mg/zaw.
	CEC F-113-KC					2,43%
BB98	CEC F-05-93					359,9 mg/zaw.
	CEC F-113-KC					4,45%

Obliczono, że aby rozróżnić dwa wyniki przy 95-procentowej ufności, wymagana jest bezwzględna ich różnica o wielkości 3,0% zmiany szerokości impulsu elektrycznego sterującego czasem otwarcia wtryskiwaczy paliwa w pojedynczym wtrysku paliwa. Jednak biorąc pod uwagę, że jest to w praktyce duża

zmiana wielkości impulsu, ustalono, że przy ocenie wyników należy posługiwać się mniejszym przedziałem ufności (90%), dla którego wymagana jest bezwzględna różnica pomiędzy wynikami zmiany szerokości impulsu elektrycznego sterującego czasem otwarcia wtryskiwaczy paliwa w pojedynczym



Rys. 1. Porównanie wyników ocen czterech benzyn silnikowych uzyskanych w badaniach według procedur badawczych CEC F-05-93 i CEC F-113-KC

Fig. 1. Comparison of the results of evaluations of four engine gasolines obtained in tests according to CEC F-05-93 and CEC F-113-KC test procedures

wtrysku paliwa wynosząca 1,8%. Pozwala to na wystarczające rozróżnienie i porównanie wyników badanych paliw.

Dokonując analizy wyników przedstawionych na rys. 1, można zauważyć (uwzględniając analizę statystyczną) podobieństwo ocen benzyn BB95-2 i BB95-3 przeprowadzonych według obydwu procedur badawczych. Jednak gdyby założyć dużą powtarzalność uzyskanych wyników, paliwo BB95-2 zostało gorzej ocenione w teście CEC F-05-93 niż paliwo BB95-3 (większe osady na zaworach), natomiast w przypadku testu CEC F-113-KC (osady wtryskiwaczy) ocena tych paliw jest odwrotna. Porównania pozostałych wyników otrzymanych obydwoma metodami pokazują ich znacznie większe rozbieżności i niezgodności. W przypadku paliwa BB95-1 ocena przeprowadzona według procedury CEC F-05-93 dała wynik na poziomie otrzymanym dla paliw BB95-2 i BB95-3. Tymczasem wynik oceny paliwa BB95-1 według oceny zgodnej z CEC F-113-KC jest prawie 5,5-krotnie gorszy od otrzymanego w przypadku paliw BB95-2 i BB95-3. Z kolei wynik oceny paliwa BB98 uzyskany w teście CEC F-05-93 jest wyraźnie lepszy od otrzymanego dla paliw BB95-1, BB95-2 i BB95-3, podczas gdy wynik analogicznej oceny według procedury CEC F-113-KC jest odwrotny. Zaskakuje także gorszy wynik oceny benzyny BB98 w teście CEC F-113-KC w porównaniu z wynikami ocen benzyn BB95-1, BB95-2 i BB95-3. Ponadto zwraca uwagę znaczna rozbieżność wyników ocen paliw BB95-1 i BB98 uzyskanych wskazanymi metodami.

Podsumowując, nie stwierdzono żadnych korelacji pomiędzy wynikami podlegającymi porównaniu. Zatem znając ocenę benzyny przeprowadzoną według jednej z wyżej wymienionych procedur badawczych, nie można wnioskować ani przewidywać czy też szacunkowo określać tej, jaką otrzymamy

według drugiej procedury badawczej. W rezultacie wyniki uzyskane według jednej z procedur nie pozwalają na ekstrapolację i ocenę benzyny pod względem tendencji do tworzenia szkodliwych osadów silnikowych według drugiej z procedur.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Analiza porównawcza właściwości detergentowych benzyn ocenianych za pomocą różnych metod silnikowych* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 0023/TE/2020, nr archiwalny: DK-4100-0011/2020.

Literatura

- Altin O., Eser S., 2004. Carbon Deposit Formation from Thermal Stressing of Petroleum Fuels. *Prepr. Pap.-Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem.*, 49(2): 764–766.
- Aronel M., China P., Gueit J., 2015. Evaluating Injector Fouling in Direct Injection Spark Ignition Engines – A new Engine Test Procedure to Evaluate the Deposit Control Performance of Base Fuels and Additivated Fuels. *TAE Esslingen Fuels Colloquium*.
- Badawy T., Attar M.A., Xu H., Ghafourian A., 2018. Assessment of gasoline direct injector fouling effects on fuel injection, engine performance and emission. *Applied Energy*, 220: 351–374. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.032.
- Bennett J., 2018. Additives for Spark Ignition and Compression Ignition Engine Fuels. *Proc IMechE Part D J Automobile Engineering*, 232: 148–158. DOI: 10.1177/0954407017732265.
- Dearn K., Xu J., Ding H., Xu H., Well A., Kirkby P., Cooper B., Edington I., 2014. An investigation into the characteristics of DISI injector deposits using advanced analytical methods. *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, 7(3): 771–782. DOI: 10.4271/2014-01-2722.
- DuMont R.J., Evans J.A., Feist D.P., Studzinski W.M., Cushing T.J., 2009. Test and Control of Fuel Injector Deposits in Direct Injected Spark Ignition Vehicles. *SAE Technical Paper*, No. 2009-01-2641. DOI: 10.4271/2009-01-2641.
- Harada J., Tomita T., Mizuno H., Mashiki I.Y., 1997. Development of a direct injection gasoline engine. *SAE Technical Paper*, No. 974054. DOI: 10.4271/970540.
- Henkel S., Hardalupas Y., Taylor A., Conifer Ch., Cracknell R., Kit Goh T., Reinicke P.-B., Sens M., Rieß M., 2017. Injector Fouling and Its Impact on Engine Emissions and Spray Characteristics in Gasoline Direct Injection Engines. *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, 10(2). DOI: 10.4271/2017-01-0808.
- Imoehl W., Gestri L., Maragliulo M., Del-Frate L., Klepatsch M., Wildeson R., 2012. A DOE Approach to Engine Deposit Testing used to Optimize the Design of a Gasoline Direct Injector Seat and Orifice. *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, 5(3): 1078–1095. DOI: 10.4271/2012-01-1642.
- Joedicke A., Krueger-Venus J., Bohr P., Cracknell R., Doyle D., 2012. Understanding the Effect of DISI Injector Deposits on Vehicle Performance. *SAE Technical Paper*. DOI: 10.4271/2012-01-0391.
- Kalghatgi G.; 2013. Deposits in Engines and Fuel Additives. Fuel/Engine Interactions. Ch. 3. *SAE International*. ISBN: 978-0-7680-6458-2.
- Russell M., Cummings J., Cushing T., Studzinski W., 2013. Cellulosic Ethanol Fuel Quality Evaluation and its Effects on PFI Intake Valve Deposits and GDI Fuel Injector Plugging Performance. *SAE Technical Paper*. DOI: 10.4271/2013-01-0885.

- Shuai S., Ma X., Li Y., Qi Y., Xu H., 2018. Recent Progress in Automotive Gasoline Direct Injection Engine Technology. *Automotive Innovation*, 1: 95–113. DOI: 10.1007/s42154-018-0020-1.
- Stępień Z., 2015. Deposit in spark ignition engines – formation and threats. *Combustion Engines*, 160(1): 36–48.
- Stępień Z., 2017. Nieporównywalność ocen paliw w europejskich znormalizowanych testach silnikowych. *Nafta-Gaz*, 12: 964–973. DOI: 10.18668/NG.2017.12.08.
- Wang B., Badawy T., Jiang Y., Xu H., Ghafourian A., Hang X., 2017. Investigation of deposit effect on multi-hole injector spray characteristics and air/fuel mixing process. *Fuel*, 191: 10–24. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.11.055.
- Xu H., Wang C., Ma X., Sarangi A.K., Weall A., Krueger-Venus, J., 2015. Fuel injector deposits in direct-injection spark-ignition engines. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 50: 63–80. DOI: 10.1016/j.pecs.2015.02.002.
- Zhao F., Lai M-C., Harrington D.L., 1999. Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 25: 437–562. DOI: 10.1016/S0360-1285(99)00004-0.

Akty prawne i dokumenty normatywne

Worldwide Fuel Charter, September 2013.
Worldwide Fuel Charter, 28 October 2019.



Dr hab. inż. Zbigniew STĘPIEŃ, prof. INiG – PIB
Kierownik Zakładu Oceny Właściwości
Eksploatacyjnych, kierownik Pracowni Badań
Silnikowych i Trybologicznych
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A, 31-503 Kraków
E-mail: zbigniew.stepien@inig.pl

OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU OCENY WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNYCH

- oceny właściwości fizykochemicznych oraz użytkowo-eksploatacyjnych wg najnowszych procedur badawczych, zarówno europejskich, jak i amerykańskich:
 - » paliw ciekłych, biopaliw i biokomponentów,
 - » środków smarnych, w tym: olejów silnikowych, przekładniowych i przemysłowych, zarówno świeżych, jak i przetworzonych;
- oceny kompatybilności dodatków do paliw i olejów smarowych, usługi eksperckie w zakresie rozwiązywania problemów związanych z niekompatybilnością wymienionych produktów w eksploatacji;
- szeroki zakres ocen stanowiskowych właściwości trybologicznych paliw, środków smarnych oraz cieczy hydraulicznych;
- oznaczanie liczb oktanowych i cetanowych w testach silnikowych wg procedur europejskich i amerykańskich;
- jedyne w kraju oceny właściwości użytkowo-eksploatacyjnych paliw silnikowych, prowadzone na silnikowych stanowiskach badawczych, wg ogólnoeuropejskich procedur CEC, wymagane między innymi przez Światową Kartę Paliw;
- pełny zakres usług w zakresie nowoczesnego planowania, monitorowania i oceny zmian właściwości olejów smarowych w eksploatacji, doradztwo i ekspertyzy w zakresie problemów powstałych podczas eksploatacji olejów smarowych;
- usługi eksperckie w zakresie wpływu jakości paliw na możliwość powstania dysfunkcji i uszkodzeń silnikowych układów wtrysku paliwa.



Kierownik: dr inż. hab. Zbigniew Stępień, prof. INiG – PIB Adres: ul. Łukasiewicza 1, 31-429 Kraków
Telefon: 12 617 75 78 Faks: 12 617 75 22 E-mail: zbigniew.stepien@inig.pl

 INSTYTUT NAFTY I GAZU
– Państwowy Instytut Badawczy