

Dr inż. Zbigniew Stępień

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

BADANIE CZYNNIKÓW WPLYWAJĄCYCH NA TWORZENIE SZKODLIWYCH OSADÓW WTRYSKIWACZY PALIWA SILNIKÓW Z ZAPŁONEM SAMOCZYNNYM

A STUDY OF FACTORS INFLUENCING THE FORMATION OF HARMFUL DEPOSITS IN THE DIESEL ENGINE INJECTORS

Streszczenie

W artykule opisano różne typy osadów wtryskiwaczy silników ZS z pośrednim i bezpośrednim wtryskiem paliwa. Określono różnorodne czynniki mające wpływ na tworzenie i zmiany wielkości osadów. Dokonano też klasyfikacji i oceny znaczenia przedmiotowych czynników na powstawanie prekursorów osadów oraz dalsze zmiany osadów w czasie eksploatacji silnika. W zakresie opisu przeprowadzonych badań przedstawiono wyniki procesów tworzenia osadów w warunkach testów silnikowych. Utworzone w ten sposób osady zewnętrzne i wewnętrzne wtryskiwaczy układu wysokociśnieniowego wtrysku paliwa typu common rail były następnie udokumentowane fotograficznie, oraz opisane. Szeroko omówiono też wyniki oceny wpływu wytworzonych osadów wtryskiwaczy na zmiany ich parametrów diagnostycznych, określających zakres dysfunkcji wtryskiwaczy i decydujących o możliwości ich dalszego stosowania.

Słowa kluczowe: silniki z zapłonem samoczynnym, wtryskiwacze paliwa, osady zewnętrzne wtryskiwaczy, osady wewnętrzne wtryskiwaczy, zagrożenia powodowane osadami

1. Wstęp

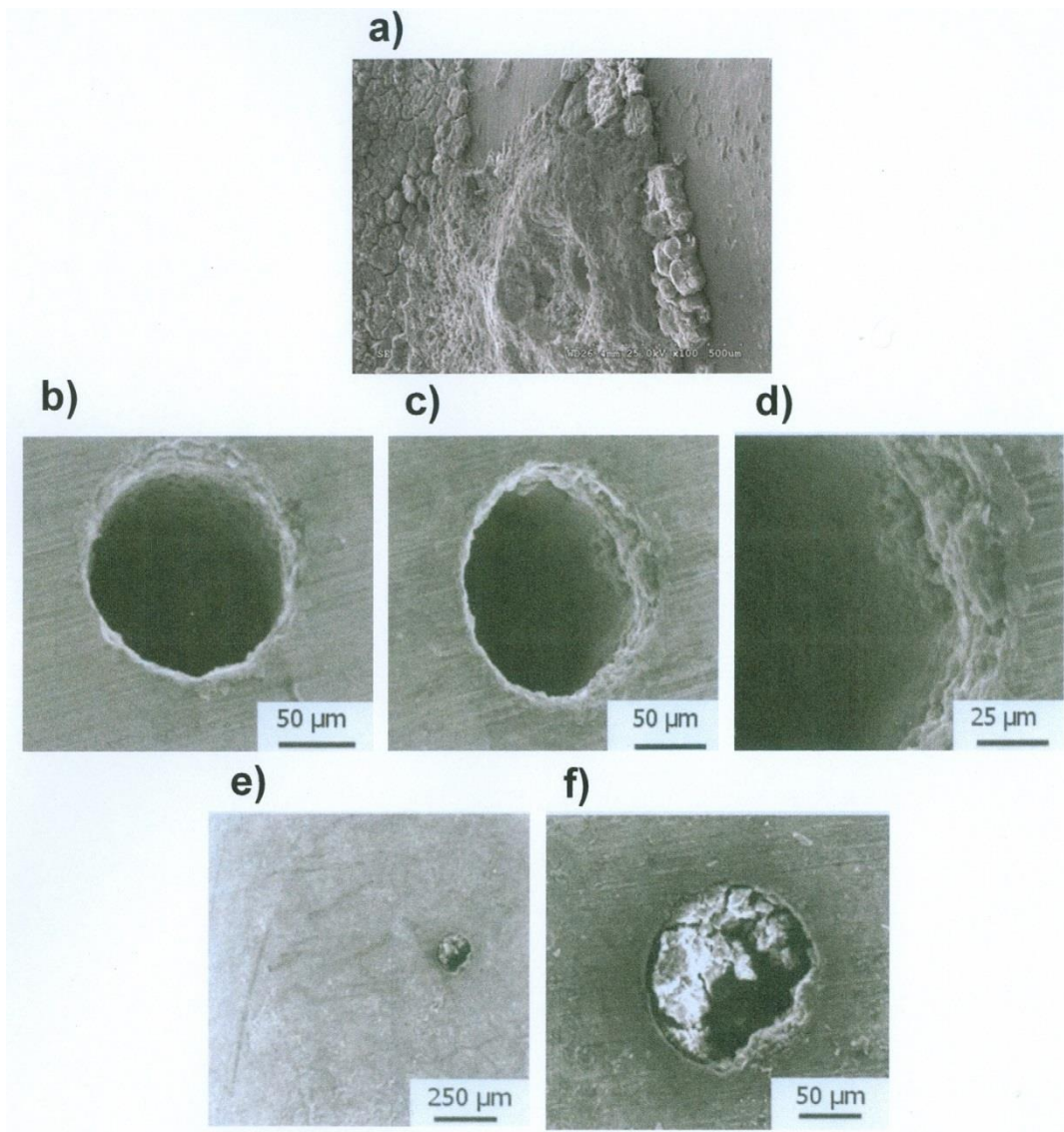
Od kilkunastu lat prowadzone są na całym świecie szerokie badania w zakresie mechanizmów powstawania i przeciwdziałania osadom tworzonym na elementach układów wtrysku paliwa silników ZS (z zapłonem samoczynnym) jak i ZI (z zapłonem iskrowym). Zagrożenia wynikające z tworzenia osadów zewnętrznych (koksowych) wtryskiwaczy czopikowych silników ZS, z wtryskiem pośrednim, stwierdzono już w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku. Zanieczyszczenie osadami koksowymi rozpylaczy wtryskiwaczy czopikowych obejmuje zarówno kanał wypływu paliwa jak i obszar wokół krawędzi pierścieniowego otworka wylotowego paliwa oraz walcowej części czopika współdziałającego z otworkiem wtrysku paliwa. W przypadku tego typu wtryskiwaczy i silników ZS z pośrednim wtryskiem paliwa, na wielkość i szybkość zakokosowania rozpylaczy wtryskiwaczy większy wpływ ma typ (konstrukcja) zastosowanego rozpylacza, aniżeli paliwo. Sam proces tworzenia koksowych osadów organicznych jest wynikiem termicznego rozkładu paliwa podczas procesu spalania, a wielkość tworzonych osadów może być w pewnym stopniu kontrolowana przez dodawane do paliwa dodatki detergentowo-dyspergujące. Zagadnienia te szeroko opisali między innymi: Barker, Snape i Scurr [2], Quigeley, Barbour, Arters i Bush [11], Lacey, Gail, Kientz, Milanovic i Gris [9], oraz Żak, Ziemiański, Stępień i Wojtasil [19]. Z kolei we wtryskiwaczach układów wtrysku paliwa typu HPCR (High Pressure Common Rail), osady koksowe tworzą się wokół i na obrzeżach otworków wylotowych paliwa, ale także na ściankach wewnątrz kanałików paliwowych rozpylaczy wtryskiwaczy. Stanowią zazwyczaj mieszaninę osadów organicznych i

nieorganicznych. Biorąc pod uwagę, że często średnica wewnętrzna kanalika paliwa jest mniejsza niż 0,1 mm, przedmiotowe osady powodują zniekształcenie strugi rozpylanego paliwa oraz zmianę jej zasięgu, co niekorzystnie wpływa na procesy rozdrobnienia i mieszania paliwa z powietrzem w komorach spalania silnika jak podaje: Birgel i inni [3, 4], Caprotti i inni [5, 6], Quigeley i inni [10] oraz Stępień [14]. Zmieniający się w sposób niekontrolowany współczynnik nadmiaru powietrza mieszanki paliwowo-powietrznej, w połączeniu z niedostatecznym rozdrobnieniem strug rozpylanego paliwa i dodatkowym zmieszaniem w niewłaściwej proporcji z gazami wylotowymi poprzez układ EGR prowadzi do niecałkowitego i niepełnego spalania. Powoduje to zmniejszenie osiągow silnika, jego nierównomierną pracę, podwyższoną emisję gazów spalinowych oraz zużycie paliwa. Zwiększony zasięg strugi może powodować omywania ścianek komór spalania ciekłym paliwem, a to na skutek niepełnego odparowania paliwa w ładunku powietrza prowadzi do niepełnego spalania i zwiększenia emisji składników szkodliwych do atmosfery, a w szczególności HC. Wyniki badań przeprowadzonych przez Stępień [15] wykazały, że w skrajnym przypadku, osady tworzone wewnątrz kanalików paliwowych mogą doprowadzić do całkowitego zablokowania otworka, zwłaszcza gdy silnik jest często zatrzymywany i wychładzany podczas eksploatacji co pozwala na stabilizację tworzonych osadów – rys. 1.

Bardzo wysokie, obecnie sięgające nawet 300 MPa, ciśnienie wtrysku paliwa w układach typu HPCR pozwala na jego bardzo dobre rozdrobnienie we wtryskiwanej do komory spalania strudze, ale równocześnie powoduje znaczny wzrost temperatury paliwa podczas gwałtownego obniżanie jego ciśnienia po przeciśnięciu się (przeciekaniu) przez nieszczelności złożeń par roboczych wtryskiwacza. To w połączeniu z zanieczyszczeniami przedostającymi się do paliwa w procesach jego produkcji, dystrybucji i przechowywania (w szczególności pierwiastkami metalicznymi o właściwościach katalitycznych), reakcjami chemicznymi zachodzącymi między niektórymi dodatkami stanowiącymi składniki pakietu uszlachetniającego paliwo i zawartymi w nim biokomponentami (FAME), przyczyniającymi się do obniżenia stabilności oksydacyjnej paliwa powoduje powstawanie osadów wewnętrznych (IDID – Internal Diesel Injector Deposit).

Osady tego rodzaju dzielą się na różne typy i są klasyfikowane wg różnych kryteriów, a najczęściej składu analizowanego metodą spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera (FT-IR - Fourier Transform Infrared Spectroscopy) – Tabl. 1. Niekiedy analizę składu osadów IDID prowadzi się też innymi technikami, np. SEM (Scanning Electron Microscopy) i EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy), i w oparciu o wyniki tych badań dokonuje się ich podziału na typy jak to uczynili: Yamada i inni [18], Tanaka i inni [16], oraz Fang i McCormick [7]. Dlatego też w różnych publikacjach występują różnice zarówno w nazwach samych typów osadów jak i ilości typów na jakie dzieli się osady rodzaju IDID jednak zawsze mowa jest o tych samych osadach z punktu widzenia ich składu i mechanizmów oraz czynników które powodują ich powstawanie [2, 14, 16]. Stanowiło to motywację do podjęcia próby usystematyzowania typów osadów i czynników mających wpływ na ich zainicjowanie i powstawania.







W tablicy 1 zestawiono różne typy osadów w powiązaniu z czynnikami mającymi wpływ na tworzenie i zmiany ich wielkości. Dokonano też oceny znaczenia przedmiotowych czynników na powstawanie prekursorów osadów oraz dalsze zmiany osadów w czasie eksploatacji silnika.



Rys. 1 Widok zewnętrznych osadów koksowych wtryskiwacza układu HPCR
 a) osady koksowe utworzone wokół otworka wylotowego paliwa
 b, c, d) osady koksowe na krawędzi otworka i wewnątrz kanalika
 e, f) osady koksowe zatykające wylot otworka

Analiza tablicy 1 wskazuje na dużą ilość zróżnicowanych czynników które mogą wpływać w mniej lub bardziej znaczący sposób na tworzenie osadów i zmiany ich wielkości w czasie. Niektóre z tych czynników mają przeciwstawny wpływ na różne osady w różnych układach wtrysku paliwa. Dla przykładu, szeroko stosowane w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku dodatki detergentowe oparte na poliizobutylenowym imidzie kwasu bursztynowego (PIBSI – Polyisobutylene Succinimide) przeciwdziałały tworzeniu się zewnętrznych osadów koksowych we wtryskiwaczach czopikowych silników z pośrednim wtryskiem paliwa. Równocześnie, tego typu dodatki, nie zawsze są skuteczne w przypadku zapobiegania tworzeniu osadów zewnętrznych wtryskiwaczy nowoczesnych układów typu HPCR, a we współdziałaniu z dodatkami smarowniczymi mogą powodować tworzenie polimerowych osadów amidowych typu IDID, zwłaszcza w przypadku PIBSI o małej masie cząsteczkowej, na co wskazuje Reid i Barker [12].

Tablica 1. Klasyfikacja czynników wpływających na tworzenie osadów we wtryskiwaczach paliwa silników ZS

Typy osadów i miejsce ich tworzenia			Osady zewnętrzne wtryskiwaczy		Osady wewnętrzne wtryskiwaczy			
			Silniki z pośrednim wtryskiem paliwa	Silniki z bezpośrednim wtryskiem paliwa	Silniki z bezpośrednim wtryskiem paliwa			
			Osady koksowe (organiczne)	Osady koksowe (organiczne i nieorganiczne)	Karboksylany (o dużej masie cząsteczkowej)	Amidy	Estrowe (typu FAME)	Estrowe (typu CFI – Cold Flow Improver)
								
Czynniki wpływające na tworzenie osadów			Znaczenie czynników dla tworzenia i zmian wielkości osadów (xxx – duże / xx – średnie / x – małe / 0 – bez znaczenia / - - nie dotyczy)					
Paliwo	Skład paliwa bazowego	Zawartość O ₂ , N ₂ i S	XX	XXX	XX	XX	X	X
	Dodatki uszlachetniające	Detergentowe (oparte na PIBSI)	XX	XXX	0	XXX	0	0
		Smarnościowe	0	X	XXX	XXX	XX	X
		Inhibitory korozji	0	X	XXX	0	X	X
		Podwyższające liczbę cetanową CFI	X	X	0	0	XX	X
	Zanieczyszczenia	Zn, Cu, Na, K, Ca, Cl, Mg	0	0	0	0	0	XXX
	Biokomponenty	FAME	XX	XX	0	0	XXX	0
Silnik i układ wtrysku paliwa	Wtrysk paliwa	Konstrukcja wtryskiwaczy	XXX	X	XX	XX	XX	XX
		Parametry pracy (HPCR)	-	XX	X	XX	XX	XX
	Systemy	EGR, Blow-by	X	XX	0	0	0	0
Warunki eksploat.	obciążenie silnika	Małe	XX	X	XX	X	X	X
		Duże	X	XX	X	XX	XX	XX
		Dynamiczne zmiany	X	X	X	X	X	X
		Długie przestoje	X	XXX	XX	XX	XX	XX

Jednym z najistotniejszych czynników powodujących powstawanie osadów we wtryskiwaczach układu paliwowego jest utlenianie paliwa. Na pogorszenie stabilności oksydacyjnej paliwa duży wpływ ma ilość zawartego w nim FAME. W rezultacie, stabilność oksydacyjna czystego FAME jest inna od jego mieszanin z olejem napędowym w różnych proporcjach. W przypadku silników z pośrednim wtryskiem paliwa, gdzie temperatura pracy wtryskiwaczy jest znacznie niższa w porównaniu do układów typu HPCR silników HSDI [High Speed Direct Injection], zawarte w paliwie FAME, jako polarny rozpuszczalnik, może powodować wymywanie osadów koksowych z wtryskiwaczy paliwa zwłaszcza przy małych obciążeniach silnika [11]. Inne zachowanie FAME występuje w przypadku nowoczesnych silników z układami wtrysku paliwa typu HPCR, w których występują bardzo wysokie temperatury i ciśnienia podczas pracy, a rozgrzane do temperatury często powyżej 60 °C paliwo wielokrotnie wraca do zbiornika paliwa z przelewów układu wtrysku paliwa, podgrzewając cały układ paliwowy. Takie warunki znacznie przyspieszają procesy degradacji FAME poprzez utlenianie nienasyconych wiązań FAME do struktur nadtlenkowych, które ulegają przekształceniu na kwasy i aldehydy. Struktury nadtlenków mogą także reagować z innymi cząsteczkami FAME tworząc dimery. Procesy te mogą prowadzić do powstawania oligomerów, które stanowią prekursory tworzenia osadów jeśli ich masa cząsteczkowa i polarność są dostatecznie wysokie. Dodatkowo, Fang i McCormick w swoich badaniach stwierdzili, że największe osady tworzone są w przypadku mieszanin zawierających 20% (v/v) do 30% (v/v) FAME w oleju napędowym [7]. Wynika to z tego, że powstałe z oligomerów osady są wysoko polarne i łatwiej rozpuszczalne w polarnych FAME, a słabo w węglowodorach. Gdy paliwo zawiera powyżej 50% (v/v) FAME staje się dostatecznie polarne, aby rozpuszczać tworzone w układzie wtrysku paliwa osady. Jeśli stężenie FAME w paliwie jest zbyt niskie (< 5% (v/v)) nie powstaje dostateczna ilość oligomerów tworzących osady. W przypadku paliwa zawierającego 20% (v/v) do 30% (v/v) FAME, nie jest ono wystarczająco polarne, a powstające oligomery wytrącają się tworząc osady [7, 11].

Przeprowadzone dotychczas badania nie pozostawiają wątpliwości, że śladowe zawartości niektórych pierwiastków, w większości metalicznych przyspieszają procesy tworzenia osadów zarówno zewnętrznych jak i wewnętrznych (IDID) wtryskiwaczy, przy czym pierwiastki takie jak Zn, Cu w większym stopniu intensyfikują powstawanie osadów zewnętrznych, a pierwiastki Na, Cl, K, Ca i Mg osadów typu IDID na co wskazują wyniki badań Iida [8], Lacey i inni [9] oraz Shiotani i Goto [13].

Duże znaczenie w utrzymywaniu osadów na powierzchni gdzie się wytworzyły mają siły oddziaływań powierzchniowych między materiałem powierzchni i osadem czyli adhezja. Dotyczy to w szczególności osadów typu IDID, których szkodliwe oddziaływanie wiąże się z pokrywaniem powierzchni elementów roboczych wtryskiwaczy ślizgowo współpracujących ze sobą. Tak umiejscowione osady wpływają na spowolnienie czasów przesterowania wtryskiwaczy, a zatem mogą powodować nie tylko zmiany wielkości całkowitej dawki paliwa dozowanej w pojedynczym wtrysku paliwa, ale także zmieniać w sposób niekontrolowany ilość i czas rozpoczęcia, zakończenia oraz trwania wtrysku poszczególnych faz we wtrysku wielokrotnym. Powoduje to zróżnicowanie ilości paliwa wtryskiwanego do poszczególnych cylindrów silnika oraz jakości tworzenia mieszanki paliwowo-powietrznej w komorach spalania cylindrów. W przypadku osadów typu karboksylany, amidy i polimery typu CFI (Cold Flow Improver) przyleganie osadów do powierzchni jest spowodowane fizycznym wiązaniem na skutek działania sił międzycząsteczkowych, a w przypadku osadów związanych z degradacją FAME działają wiązania chemiczne, jak to opisał Yamada [19].

Istotne dla tworzenia osadów są też warunki eksploatacji silnika, przekładające się na parametry pracy silnika w cyklu testu na stanowisku badawczym do odtwarzania i badania osadów. Warunki te są ściśle związane ze składem paliwa, rodzajem i typem osadów, a zatem różne w zależności od rodzaju i typu osadów jakie chcemy odtworzyć i zbadać.

Wyżej opisane problemy eksploatacyjne związane z tworzeniem osadów na i wewnątrz wtryskiwaczy paliwa silnika ZS stanowiły motywację przeprowadzenia pracy, której wyniki przedstawiono poniżej. Celem było odtworzenie, a następnie ocena wpływu, na funkcjonowanie wtryskiwaczy, osadów zewnętrznych (koksowych) oraz wewnętrznych typu organicznego (amidowego), charakterystycznych dla paliw europejskich. Innowacyjność badań polegała na opracowaniu symulacyjnego testu silnikowego, który w połączeniu z odpowiednio przygotowanymi paliwami pozwalał na odtworzenie na stanowisku silnikowym, w krótkim czasie, różnego typu osadów wtryskiwaczy. Przygotowując paliwa kierowano się zarówno wcześniejszymi doświadczeniami własnymi [14, 16, 18] jak i określonym przez inne ośrodki badawcze składem osadów powstałych podczas rzeczywistej eksploatacji pojazdów [12, 17, 19]. Po wytworzeniu osadów we wtryskiwaczach układu wtrysku paliwa typu HPCR oceniano, między innymi, ich parametry diagnostyczne na profesjonalnym stanowisku diagnostyczno-testowym w celu określenia wpływu przedmiotowych osadów na zmiany parametrów użytkowo-eksploatacyjnych wtryskiwaczy.

2. Materiały stosowane w badaniach

W celu przyspieszenia procesu tworzenia osadów wtryskiwaczy (zwłaszcza typu IDID), do zasilania silnika używano starzonego w warunkach naturalnych, handlowego oleju napędowego zawierającego 4,78 % (v/v) FAME – Tablica 2. Ponadto, do paliwa dodawano przygotowane w postaci 1 – litrowych przedmieszek w badanym paliwie, mieszaniny związków chemicznych które, jak sugerują dostępne wyniki dotychczas przeprowadzonych badań w różnych laboratoriach na świecie, mają największy wpływ na zainicjowanie i tworzenie różnego typu IDID [1, 2, 6, 9, 10, 11, 12, 14, 16]. Przedmiotowe związki chemiczne stanowiły zestawienia składników występujących w dodatkach detergentowych, smarowościowych, inhibitorach korozji, dodatkach podwyższających liczbę cetanową i przedostające się do paliwa jako zanieczyszczenia. W rezultacie do prowadzenia symulacyjnych badań tworzenia osadów w dwóch testach silnikowych przygotowano dwa opisane niżej paliwa.

W teście nr. 1 ocenie skłonności do tworzenia osadów zewnętrznych jak i wewnętrznych wtryskiwaczy poddano starzony, handlowy olej napędowy o właściwościach fizykochemicznych podanych w tablicy 2 do którego dodano 120 ppm PIBSI (poliizobutylenowy imid kwasu bursztynowego) + 100 ppm uwodornionego dimeru kwasu oleinowego + 1 ppm kwasu mrówkowego. Miało to na celu przyspieszenie procesu tworzenia osadów typu amidowego, poprzez dodanie PIBSI na którym oparte są dodatki detergentowe w olejach napędowych i substancji kwasowych stanowiących składniki dodatków smarowościowych.

W teście nr. 2 ocenie skłonności do tworzenia osadów zewnętrznych jak i wewnętrznych wtryskiwaczy poddano, tak jak w teście nr. 1, starzony, handlowy olej napędowy (tablica 2), w którym zawartość biokomponentów (4,78% (v/v) FAME) zwiększono do 10% (v/v) poprzez dodanie starzonego B100 o właściwościach podanych w tablicy 2. Ponadto do paliwa dodano 500 ppm azotanu 2-etyloheksylu (2-EHN) + 120 ppm PIBSI (o małej masie cząsteczkowej). Miało to na celu przyspieszenie procesu tworzenia osadów typu amidowego (polimerowego), poprzez dodanie PIBSI na którym oparte są dodatki detergentowe w olejach napędowych i osadów typu estrowego powstałych ze starzonego FAME we współdziałaniu z dodatkiem podwyższającym liczbę cetanową w postaci azotanu 2-etyloheksylu (2-EHN).

Tablica 2 Wybrane właściwości fizykochemiczne paliw stosowanych w badaniach silnikowych

Badany parametr	Metoda badawcza	Jednostka	Olej napędowy	B100
Stabilność oksydacyjna	PN-EN 15751:2014	h	19,8	4,9
Odporność na utlenianie	PN-EN ISO 12205:2011+Ap1:2011	g/m ³	5	32
Stabilność oksydacyjna	ASTM D 7545-14	minuta	39	23
Właściwości korozyjne wobec stali: - temp. 38 °C, czas badania 5 h - temp. 50 °C, czas badania 3 h	ASTM D 665-14 Procedura A (woda destylowana)	-	brak -	- brak
Zawartość zanieczyszczeń	PN-EN 12662:2014 PN-EN 12662:2009	mg/kg	6,0 -	- 182,5
Lepkość kinematyczna w temperaturze 40 °C	PN-EN ISO 3104:2004	mm ² /s	3,113	4,540
Rozkład zanieczyszczeń: - 4, 6 i 14 µm - 2 i 5 µm	ISO 11500:2008 wraz z PN-ISO 4406:2005	-	18/16/14 18/16	23/23/23 23/23
Skład frakcyjny: - do temp. 250 °C destyluje - do temp. 350 °C destyluje - 95 % (V/V) destyluje do temp.	PN-EN ISO 3405:2012	%(V/V) °C °C	29,6 92,6 358,8	-
Gęstość w temperaturze 15 °C	PN-EN ISO 12185:2002	kg/m ³	838,8	-
Zawartość siarki	PN-EN ISO 20846:2012	mg/kg	7,7	-
Zawartość wody	PN-EN ISO 12937:2005	mg/kg	65	-
Temperatura zapłonu	PN-EN ISO 2719:2007	°C	69	-
Liczba cetanowa	PN-EN 5165:2014	-	52,8	-
Indeks cetanowy	PN-EN ISO 4264:2010+A1:2013-07	-	54,1	-
Temperatura zablokowania zimnego filtra (CFPP)	PN-EN 116:2015	°C	-6	-
Pozostałość po koksowaniu z 10 % pozostałości destylacyjnej	PN-EN ISO 10370:2014	%(m/m)	0,048	-
Pozostałość po spopieleniu	PN-EN ISO 6245:2008	%(m/m)	<0,001	-

3. Metodyka prowadzenia badań

Do prowadzenia symulacyjnych testów silnikowych tworzenia osadów wykorzystano uniwersalne, silnikowe stanowisko badawczo-testowe wyposażone w nowoczesny, szeroko stosowany silnik wysokoprężny HSDI (High Speed Direct Injection) marki FORD 2.0i 16V Duratorq TDCi połączony z hamulcem elektrowirowym typu Alpha 160 AF, produkcji firmy AVL z modułem sterującym umożliwiającym programowanie parametrów pracy silnika (prędkości obrotowej i wielkości obciążenia) w czasie. W tablicy 3 zestawiono podstawowe parametry techniczne silnika FORD 2.0i 16V Duratorq TDCi.

Tablica 3 Wybrane parametry techniczne silnika FORD 2.0i 16V Duratorq TDCi

Obieg pracy	czterosuwowy, o zapłonie samoczynnym
Typ wtrysku paliwa	Bezpośredni wtrysk paliwa typu common rail (Delphi) sterowany elektronicznie, współpracujący z układem sterowania pracą silnika Levanta
Układ cylindrów	rzędowy, pionowy
Liczba cylindrów	4
Kolejność wtrysku paliwa do cyl.	1-3-4-2
Typ układu rozrządu	DOHC/4 VPC
Srednica cylindra	86,0 mm
Skok tłoka	86,0 mm
Pojemność skokowa	1998 cm ³
Moc maksymalna	130 KM (96 kW) przy 3800 obr./min.
Max. moment obrotowy	330 Nm przy 1800 obr./min.
Maksymalna chwilowa prędkość obrotowa	4800 obr/min
Prędkość obr. biegu jałowego	750±20 obr./min.
Stopień sprężania	18,2
Napełnianie	turbodoładowany z chłodzeniem powietrza doładowującego i funkcją „overboost”
Luz zaworowy	Regulacja hydrauliczna
Pojemność układu smarowania z filtrem	6,0 dm ³
Spełniana norma w zakresie wielkości emisji składników szkodliwych do atmosfery	Euro IV

Do prowadzenia badań silnikowych przyjęto 4 – fazowy, powtarzalny cykl badawczy, składający się na test silnikowy mający odzwierciedlać przeciętne warunki pracy silnika podczas eksploatacji pojazdu w ruchu miejskim o małym natężeniu. Ustalone parametry 4 – fazowego cyklu testu silnikowego podano w tablicy 4.

Tablica 4. Parametry 4 – fazowego cyklu silnikowego

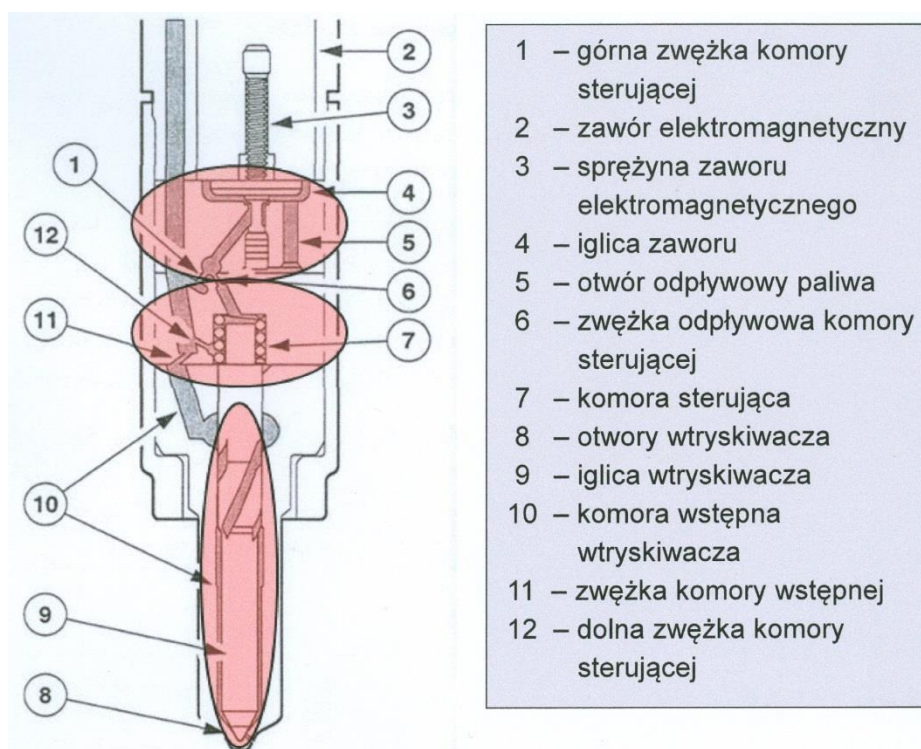
Nr fazy	Czas [s]	Prędkość obr. silnika [obr/min]	Obciążenie silnika [Nm]
1	30	1000	~0
2	150	1800	100
3	60	3000	70
4	60	1500	50

Czas prowadzenia testu wynosił 100 godzin rzeczywistej pracy silnika realizowanej w 8 godzinnych okresach pracy silnika stanowiących powtarzanie 4 – fazowego cyklu (tablica 4) przedzielonych 16 godzinnymi przerwami w czasie których następowało stabilizowanie się wytworzonych osadów.

Po przeprowadzonym teście i wymontowaniu z silnika wtryskiwaczy, dwa z nich były przekazywane do pełnej, profesjonalnej oceny parametrów diagnostycznych, a dwa były pozostawiane do wykonania dokumentacji fotograficznej powstałych osadów wewnętrznych. Konieczność przyjęcia takiej procedury wynikała z tego, że podczas oceny diagnostycznej wtryskiwaczy, powstałe w nich osady mogą ulegać mechanicznym i chemicznym uszkodzeniom / zmianom, a w ostatniej fazie podlegają usunięciu dla oceny parametrów „wymytych” wtryskiwaczy i możliwości ich regulacji. Z kolei przed przekazaniem do powyższej oceny, wtryskiwacze nie mogą być rozmontowane w celu np. sfotografowania i oceny osadów ponieważ wpłynęłoby to (zniekształciło) na parametry diagnostyczne wtryskiwaczy po przeprowadzonym teście.

Oceniając wtryskiwacze po teście brano pod uwagę zarówno zewnętrzne osady koksowe, jak i osady wewnętrzne typu IDID. W zakresie IDID obligatoryjnej ocenie podlegała, iglica rozpylacza, tłoczek sterujący zaworu elektromagnetycznego, korpus tłoczka sterującego zaworu elektromagnetycznego i korpus komory sterującej jako elementy mające zasadniczy wpływ dla prawidłowego działania wtryskiwacza, a ponadto najczęściej podlegające uszkodzeniom. Jeżeli zaistniałaby taka konieczność, ocena mogła zostać rozszerzona na inne elementy.

Na rys. 2 przedstawiono elementy wtryskiwaczy układu HPCR, które podlegały ocenie z punktu widzenia ich zanieczyszczenia osadami typu IDID.



Rys. 2 Przekrój podłużny dolnej części wtryskiwacza z zaznaczonymi elementami podlegającymi wycenie

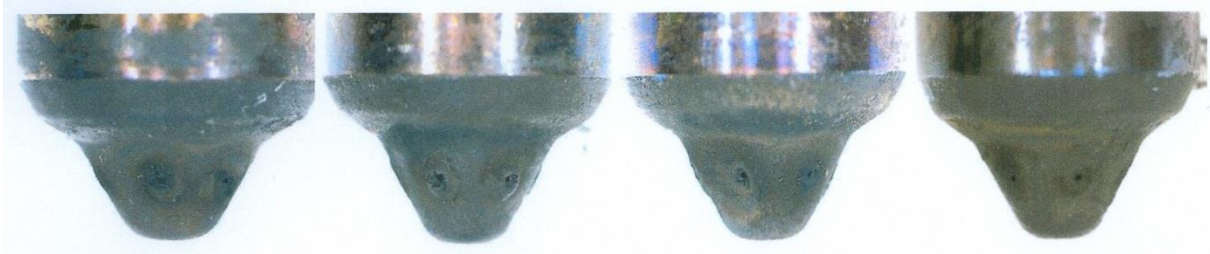
Pomiary oraz oceny wybranych parametrów diagnostycznych i użytkowych wtryskiwaczy po teście prowadzone były na urządzeniu diagnostycznym „Zapp CRU.2i”. Oceny każdego z parametrów diagnostycznych stanowią średnią wielkość z trzech pomiarów.

Test każdego wtryskiwacza polegał na pomiarze kilkunastu różnych parametrów, a następnie przeprowadzeniu ich oceny w odniesieniu do typowych dla w pełni sprawnego wtryskiwacza odchyłek dopuszczalnych i granicznych, oraz dopuszczalnych odchyłek dla wtryskiwacza eksploatowanego, określonych przez normy producenta wtryskiwaczy. Na rys. 5 podano zestawienie ocen sześciu, wybranych parametrów testowanych wtryskiwaczy. Każda ocena jest dodatkowo przedstawiona graficznie na małym wykresie przebiegu określonego parametru testowanego wtryskiwacza odniesionego do dopuszczalnych odchyłek w pełni sprawnego wtryskiwacza (linie przerywane) i granicznych, dopuszczalnych odchyłek wtryskiwacza eksploatowanego (linie ciągłe). Ponadto, przebiegi parametrów w pełni sprawnych wtryskiwaczy zobrazowano kolorem niebieskim, przebiegi parametrów wtryskiwaczy wykraczające poza dopuszczalne granice w pełni sprawnych wtryskiwaczy, ale nie wykluczające ich z dalszej eksploatacji i nie wymagające naprawy przedstawiono w kolorze zielonym, natomiast przebiegi w kolorze czerwonym obrazują parametry wtryskiwaczy, które nie mieszczą się w granicach dopuszczalnych tolerancji dla

wtryskiwaczy używanych. Takie wtryskiwacze muszą podlegać czyszczeniu i/lub naprawie, a następnie ponownej regulacji.

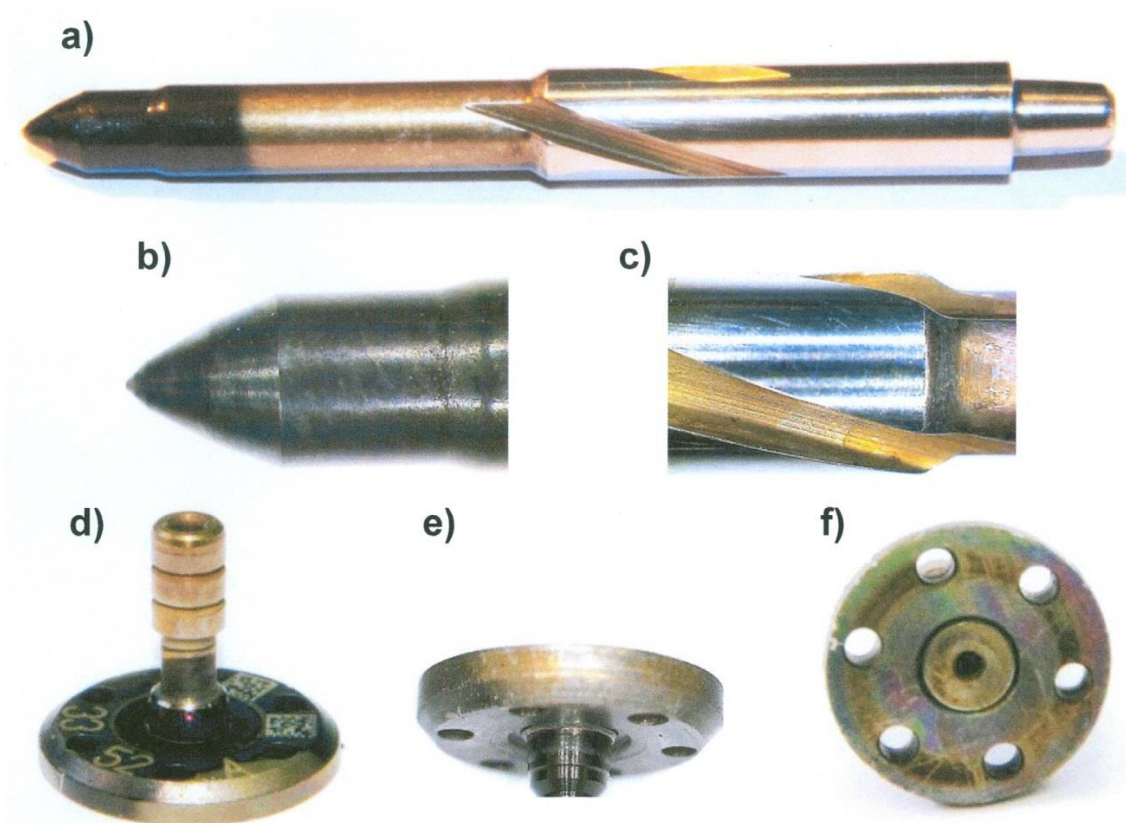
4. Wyniki badań

Na rys. 3 przedstawiono zdjęcia końcówek wtryskiwaczy po przeprowadzonym teście nr. 1.



Rys. 3 Zdjęcia końcówek wtryskiwaczy silnika FORD Duratorq 2.0 TDCi po teście nr. 1

Na końcówkach wtryskiwaczy wytworzyły się dość grube warstwy jednolitych, matowych, suchych osadów o kolorze ciemno brunatnym. Wokół otworków wylotowych paliwa powstały zgrubienia osadów. W niektórych miejscach osady łuszczą się warstwowo – rys. 3. Wielkość i sposób rozłożenia osadów na ocenianych powierzchniach jest podobny. Na rys. 4 przedstawiono wybrane elementy wewnętrzne wtryskiwaczy paliwa po teście nr. 1.

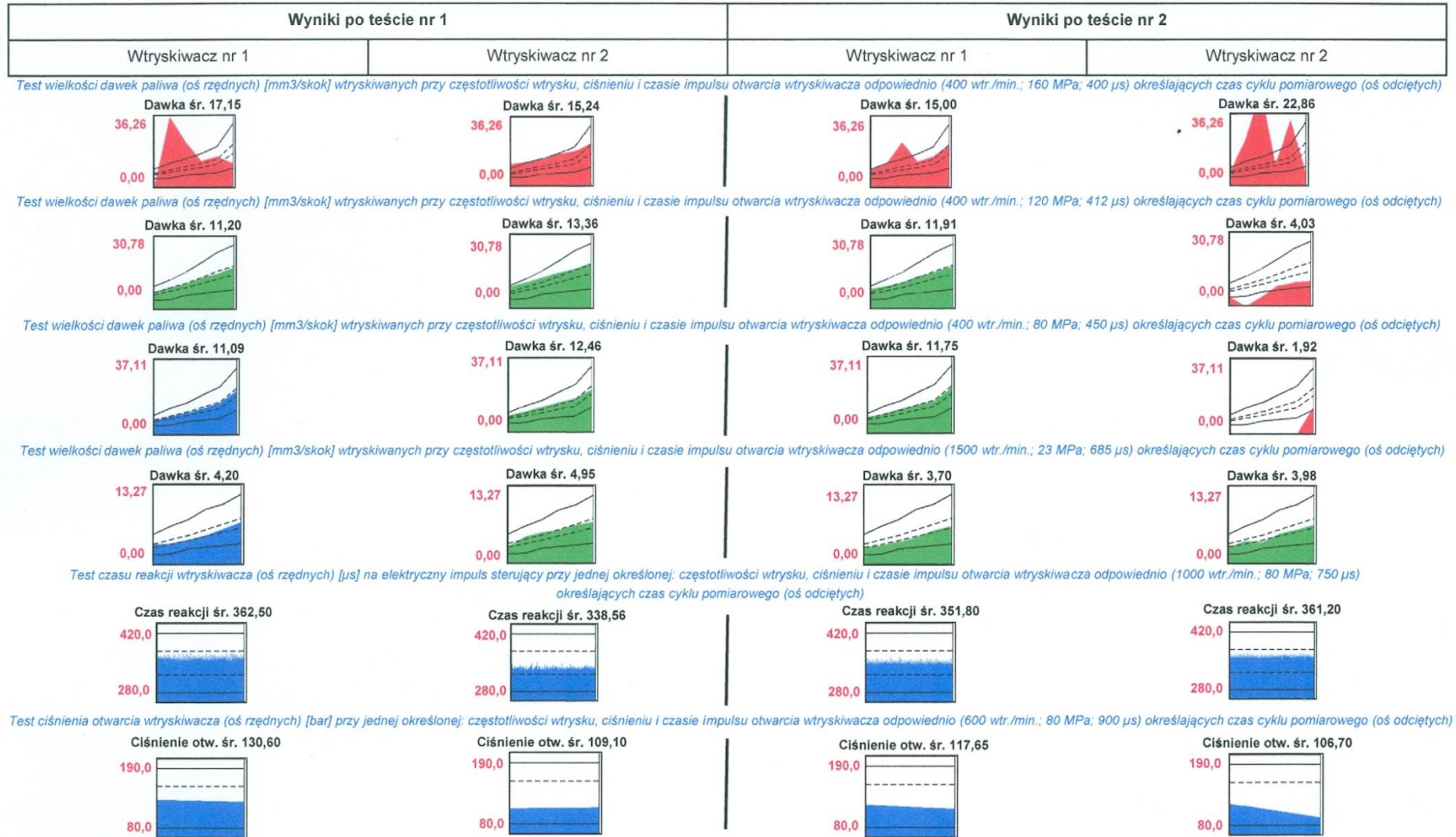


Rys. 4 Widok wybranych powierzchni elementów wewnętrznych wtryskiwaczy paliwa układu HPCR a) iglica wtryskiwacza, b) stożkowa końcówka iglicy wtryskiwacza, c) prowadząca część iglicy wtryskiwacza d, e, f) tłoczek zaworka sterującego przepływem paliwa

Szczególnie intensywne osady, pokrywające w sposób nieregularny powierzchnie na których się uformowały, stwierdzono na stożkowych zakończeniach iglic wtryskiwaczy, oraz na walcowej części iglic bezpośrednio za częścią stożkową – rys. 4 a, b. Bardziej równomierne osady amidowe, choć o zróżnicowanej grubości, pokrywały wewnętrzne powierzchnie rowków walcowej części prowadzącej iglicy oraz nurniki i grzybki tłoczków zaworków sterujących przepływem paliwa we wtryskiwaczach – rys. 4. c, d, e, f.

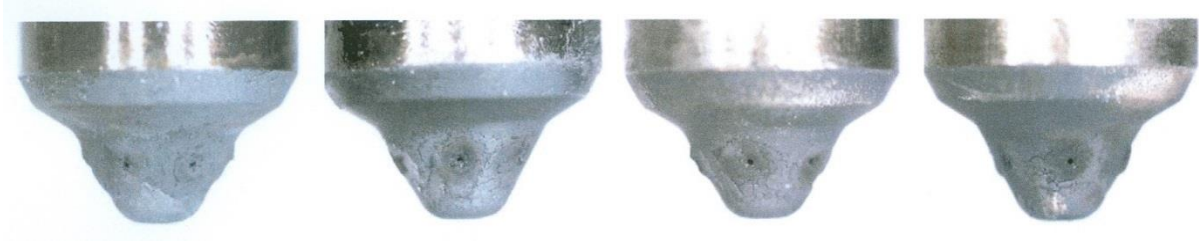
W dalszej części oceny dokonano pomiarów wybranych parametrów diagnostycznych i użytkowych dwóch wtryskiwaczy po teście nr. 1.

Przedstawione graficznie na zbiorczym rys. 5 ocen wtryskiwaczy z obu testów wyniki oceny diagnostycznej wtryskiwaczy po teście nr. 1 wykazały, dla obydwóch wtryskiwaczy, znaczne przekroczenie górnych, granicznych wartości dopuszczalnych dawek dozowanego paliwa przy ciśnieniu 160 MPa i czasie otwarcia wtryskiwacza 400 μ s. W rezultacie, z punktu widzenia parametrów użytkowo-eksploatacyjnych, wtryskiwacze nie nadawały się do dalszej eksploatacji bez przeprowadzenia czynności obsługowo-naprawczych obejmujących procesy ich mycia, regulacji, a być może i wymiany niektórych elementów wewnętrznych. Ponadto, stwierdzono też mniejsze, dopuszczalne odstępstwa dawek paliwa w zakresach pomiarów prowadzonych przy innych ciśnieniach i czasach otwarcia wtryskiwaczy. Dotyczyło to jednego zakresu pomiarowego w przypadku wtryskiwacza nr. 1 i wszystkich zakresów pomiarowych w przypadku wtryskiwacza nr. 2 – rys. 5. Najbardziej prawdopodobną przyczyną takiego pogorszenia parametrów diagnostycznych wtryskiwaczy były osady wewnętrzne wytworzone na części roboczej iglicy, ślizgowo współpracującej z korpusem wtryskiwacza, oraz na nurniku tłoczka sterującego przepływem paliwa wewnątrz wtryskiwacza. Spowodowało to zmiany czasu przesterowania wtryskiwacza na skutek opóźnionej lub spowolnionej reakcji iglicy na elektryczny impuls sterujący wtryskiwaczem, a nawet możliwości zawieszania się iglicy w korpusie wtryskiwacza.



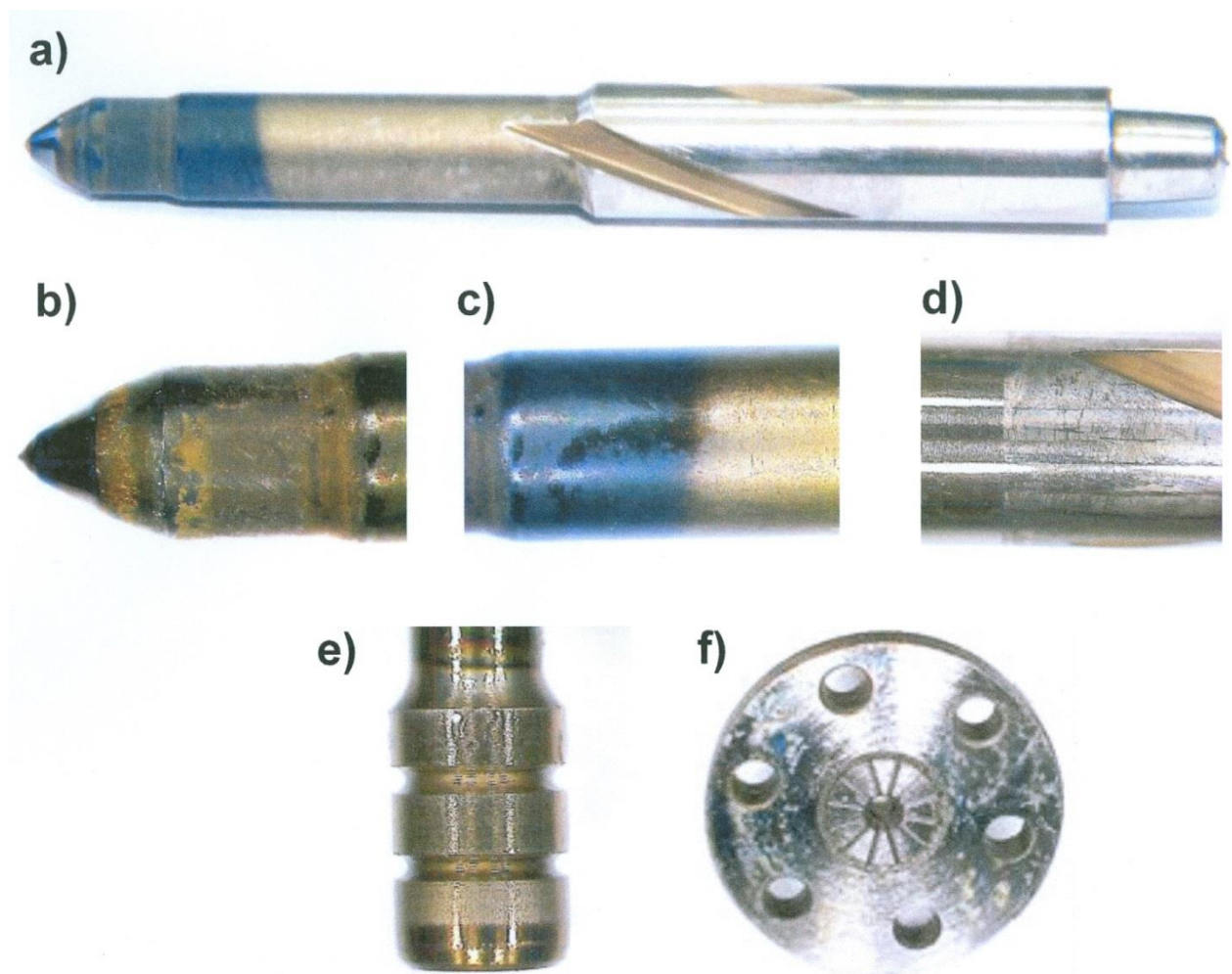
Rys. 5 Wyniki oceny diagnostycznej wtryskiwaczy silnika FORD Duratorq 2.0 TDCi po teście nr. 1 i 2

Na rys. 6 przedstawiono zdjęcia końcówek wtryskiwaczy po przeprowadzonym teście nr. 2.



Rys. 6 Zdjęcia końcówek wtryskiwaczy silnika FORD Duratorq 2.0 TDCi po teście nr. 2

Na końcówkach wtryskiwaczy wytworzyły się matowe, ciemno popielate, łuszczące się osady o zróżnicowanej grubości. Wokół otworków wylotowych paliwa powstały niewielkie zgrubienia osadów. Wielkość osadów na poszczególnych końcówkach wtryskiwaczy była podobna – rys. 6. Na rys. 7 przedstawiono wybrane elementy wewnętrzne wtryskiwaczy paliwa po teście nr. 2.



Rys. 7 Widok wybranych powierzchni elementów wewnętrznych wtryskiwaczy paliwa układu HPCR a) iglica wtryskiwacza, b) stożkowa końcówka iglicy wtryskiwacza, c) walcowa część iglicy wtryskiwacza omywana paliwem, d) prowadząca część iglicy wtryskiwacza, e, f) tłoczek zaworka sterującego przepływem paliwa

Na powierzchniach wewnętrznych elementów wtryskiwaczy powstały intensywne osady typu amidowego (polimerowego) w połączeniu z osadami estrowymi. Szczególnie dużo osadów można było zaobserwować na stożkowych końcówkach iglic wtryskiwaczy oraz na walcowych powierzchniach iglic, powyżej części stożkowej. Osady te miały nieregularny kształt, różną grubość i barwę zmieniającą się od żółtej poprzez pomarańczową, brązową, aż po brunatną – rys. 7 b. Intensywne, polimerowe osady widoczne były na walcowych częściach iglic omywanych przez paliwo i w rowkach walcowych części prowadzących iglic, a także w rowkach nurników tłoczków sterujących przepływem paliwa – rys. 7 c, d, e. Na pracujących ślizgowo walcowych powierzchniach roboczych iglic, jak i nurników tłoczków sterujących przepływem paliwa widoczne są obszary gdzie osady były mechanicznie ścierane podczas pracy wtryskiwaczy – rys. 7 d, e.

Graficznie wyniki oceny diagnostycznej wtryskiwaczy silnika FORD Duratorq 2.0 TDCi po teście nr. 2 przedstawiono na zbiorczym, porównawczym rys. 5.

Podobnie jak po teście nr. 1 obydwa wtryskiwacze wykazały, znaczne przekroczenie górnych, granicznych wartości dopuszczalnych dawek dozowanego paliwa przy ciśnieniu 160 MPa i czasie otwarcia wtryskiwacza 400 μ s – rys. 8.

W przypadku wtryskiwacza nr. 2 nastąpiły też niedopuszczalne przekroczenia dolnych granicznych wartości dopuszczalnych dawek dozowanego paliwa przy ciśnieniu 120 MPa i czasie otwarcia wtryskiwacza 412 μ s, oraz przy ciśnieniu 80 MPa i czasie otwarcia wtryskiwacza 450 μ s – rys. 5. Dla analogicznych parametrów prowadzenia pomiarów, we wtryskiwaczu nr. 1 stwierdzono mniejsze, dopuszczalne odstępstwa dawek paliwa. Jednak sumaryczna ocena wykazała, że obydwa wtryskiwacze nie nadawały się do dalszej eksploatacji bez przeprowadzenia czynności obsługowo-naprawczych obejmujących procesy ich mycia, regulacji, a być może i wymiany niektórych elementów wewnętrznych.

Tak jak w teście nr. 1, najbardziej prawdopodobną przyczyną takiego pogorszenia parametrów diagnostycznych wtryskiwaczy były osady wewnętrzne wytworzone na części roboczej iglicy, ślizgowo współpracującej z korpusem wtryskiwacza, oraz na nurniku tłoczka sterującego przepływem paliwa wewnątrz wtryskiwacza. Spowodowało to zmiany czasu przesterowania wtryskiwacza na skutek opóźnionej lub spowolnionej reakcji iglicy na elektryczny impuls sterujący wtryskiwaczem, a nawet możliwości zawieszania się iglicy w korpusie wtryskiwacza.

5. Wnioski

- Na powstawanie osadów wtryskiwaczy paliwa silników ZS ma wpływ wiele różnorodnych czynników równocześnie współdziałających ze sobą. W wielu przypadkach określone czynniki przeciwnie oddziałują na różne grupy (typy) osadów inicjując, a następnie intensyfikując powstawanie niektórych z nich, a równocześnie ograniczając tworzenie innych.
- Ilość i złożoność czynników inicjujących powstawanie i przyrost wewnętrznych osadów typu IDID we wtryskiwaczach układów HPCR silników ZS wciąż wymaga prowadzenia badań ustalających ich znaczenie oraz mechanizmy współdziałania.
- Wytworzone w symulacyjnych testach silnikowych osady typu IDID spowodowały charakterystyczne, występujące podczas rzeczywistej eksploatacji pojazdów, dysfunkcje wtryskiwaczy układów wtrysku paliwa typu HPCR, często uniemożliwiające ich funkcjonowanie
- Postępujący rozwój konstrukcyjny i technologiczny tłokowych silników spalinowych oraz stosowanych do nich układów wtrysku paliwa, a także zmieniające się technologie produkowanych paliw będą wymagały opracowywania i stosowania coraz bardziej skutecznych dodatków detergentowych o wielokierunkowym działaniu.

Dodatki tego typu są, poza zmianami konstrukcyjnymi wtryskiwaczy, najbardziej skutecznym środkiem przeciwdziałania tworzeniu zarówno zewnętrznych jak i wewnętrznych osadów wtryskiwaczy

- Oceny parametrów diagnostycznych wtryskiwaczy układów HPCR, pozwoliły na rozszerzone, precyzyjne określenie dysfunkcji wtryskiwaczy powstałych na skutek wytworzonych osadów

Literatura

1. Baker J, Cook S. Sodium Contamination of Diesel Fuel, its Interaction with Fuel Additives and the Resultant Effects on Filter Plugging and Injector Fouling. 2013; SAE 2013-01-2687
2. Baker J, Snape C, Scurr D. Diesel Deposits. 2013; 9th International Colloquium Fuels Conventional and Future Energy for Automobiles. 15-17 January 2013
3. Brigel A, Ladommatos N, Aleiferis P, Zülch S, et al. Deposit Formation in the Holes of Diesel Injector Nozzles: A Critical Review. 2008; SAE Technical Paper No. 2008-01-2383
4. Birgel A, Ladommatos N, Aleiferis P, Milovanovic N, Lacy P, Richards P. Investigations on Deposit Formation in the Holes of Diesel Injector Nozzles. 2011; SAE 2011-01-1924
5. Caprotti R, Breakspear A, Graupner O, Klaua T. Diesel Injector Deposits Potential on Future Fuelling Systems. 2006; SAE Technical Paper No. 2006-01-3359
6. Caprotti R, Bhatti N, Balfour G. Deposit Control in Modern Diesel Fuel Injection Systems. 2010; SAE Technical Paper No 2010-01-2250
7. Fang H L, McCormick R L. Spectroscopic Study of Biodiesel Degradation Pathways. 2006; SAE Technical Paper No.2006-01-3300
8. Iida Y. Biodiesel Studies in Japan. 2012; CEN/TC19/WG24, 22 May 2012
9. Lacey P, Gail S, Kientz J M, Milanovic N, Gris C. Internal Injector Deposits. 2011; SAE Technical Paper No. 2011-01-1925
10. Quigley R, Barbour R, Fahey E, Arters D, Wetzel W, Ray J. A Study of The Internal Diesel Injector Deposit Phenomenon. 2009; TAE Fuels 7th Annual Colloquium – 2009
11. Quigley R, Barbour R, Arters D, Bush J. Understanding the Spectrum of Diesel Injector Deposits. 2013; 9th International Colloquium Fuels Conventional and Future Energy for Automobiles. 15-17 January 2013
12. Reid J, Barker J. Understanding Polyisobutylene Succinimides (PIBSI) and Internal Diesel Injector Deposits. 2013; SAE Technical Paper No. 2013-01-2682
13. Shiotani H, Goto S. Studies of Fuel Properties and Oxidation Stability of Biodiesel Fuel. 2007; SAE Technical Paper No. 2007-01-0073
14. Stępień Z. The reasons and adverse effect of internal diesel injector deposits formation – Przyczyny powstawania i szkodliwy wpływ wewnętrznych osadów we wtryskiwaczach silników o zapłonie samoczynnym. 2014; Combustion Engines (Silniki Spalinowe), No 1/2014 (156) : 20 – 29

15. Stępień Z. Investigations of injector deposits in modern diesel engines - Badanie osadów wtryskiwaczy nowoczesnych silników z zapłonem samoczynnym. Combustion Engines (Silniki Spalinowe), No 2/2016 (165) : 9 – 20
16. Stępień Z. Ewolucja metodyki oceny zanieczyszczenia rozpylaczy silników o zapłonie samoczynnym. Nafta-Gaz, Kwiecień 2014, 10/2014 : 707 – 716.
17. Tanaka A, Yamada K, Omori T, Bunne S, Hosokawa K. Inner Diesel Injector Deposit Formation Mechanism. 2013; SAE 2013-01-2661
18. Urzędowska W, Stępień Z. Prediction of threats caused by high FAME diesel fuel blend stability for engine injector operation – FUEL PROCESSING TECHNOLOGY, 142 (2016) : 403-410
19. Yamada K, Bunne S, Omori T. Diesel Injector Deposit. 2015 Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting TWS2 2nd, September, 2015
20. Żak G, Ziemiański L, Stępień Z, Wojtasik M. Problemy związane z tworzeniem się osadów na elementach układów wtryskowych nowoczesnych silników Diesla – przyczyny, metody badań, przeciwdziałanie. Nafta-Gaz, Wrzesień 2013, 9/2013: 702 – 708.

Abbreviations / Wykaz skrótów

- CFI** Cold Flow Improver / dodatek poprawiający przepływ w niskiej temperaturze
- EDS** Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy / spektroskopia dyspersji energii promieniowania rentgenowskiego
- 2-EHN** 2- Ethyl-Hexyl Nitrate / 2-etyloheksyl
- FAME** Fatty Acid Methyl Esters / estry metylowe kwasów tłuszczowych
- FT-IR** Fourier Transform Infrared Spectroscopy / spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera
- GDI** Gasoline Direct Injection / bezpośredni wtrysk benzyny
- HPCR** High Pressure Common Rail / wysokociśnieniowy układ wtryskowy Common Rail
- HSDI** High Speed Direct Injection / szybki wtrysk bezpośredni
- IDID** Internal Diesel Injector Deposit / osady wewnętrzne we wtryskiwaczach silników ZS
- MPFI** Multi Port Fuel Injection / wielopunktowy wtrysk paliwa
- PAH** Polynuclear Aromatic Hydrocarbons / wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne
- EGR** Exhaust Gas Recirculation / recyrkulacja spalin
- PIBSI** Polyisobutylene Succinimide / poliizobutylenowy imid kwasu bursztynowego
- SEM** Scanning Electron Microscopy / skaningowy mikroskop elektronowy
- SPI** Single Point Injection / jednopunktowy wtrysk

PCV Positive Crankcase Ventilation / przewietrzanie skrzyni korbowej

EDM Electrical Discharge Machining / obróbka elektroiskrowa

ZI Zapłon Iskrowy

ZS Zapłon Samoczynny