

Zbigniew Stępień
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

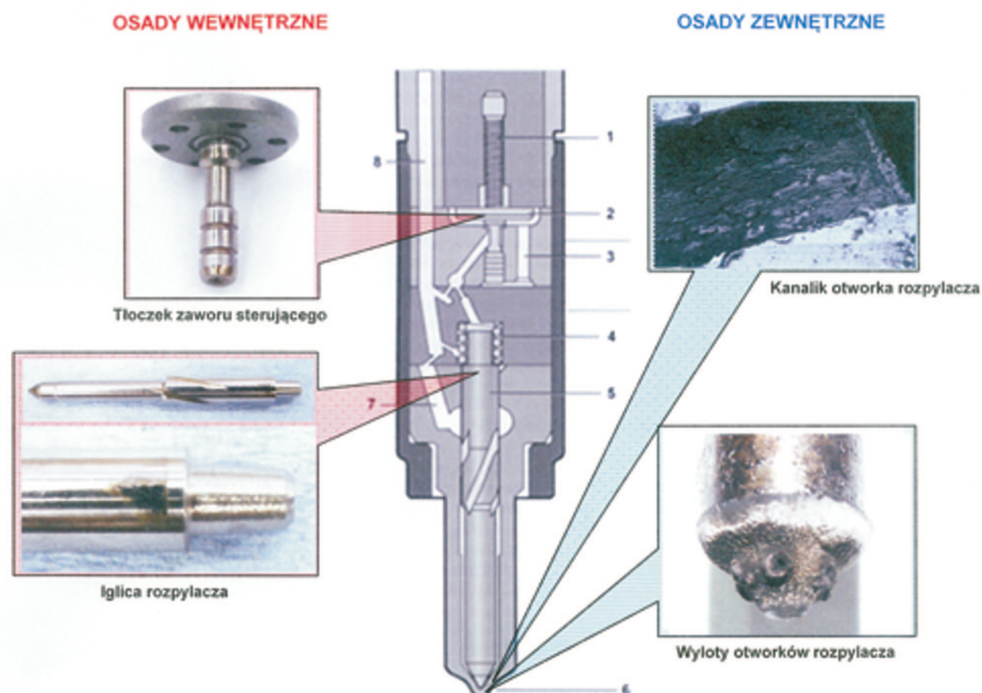
Przyczyny i skutki tworzenia wewnętrznych osadów we wtryskiwaczach silnikowych układów wysokociśnieniowego wtrysku paliwa

Wstęp

Rozpowszechnienie w drugiej połowie lat 90. ubiegłego wieku silników z bezpośrednim wtryskiem paliwa spowodowało gwałtowny rozwój wysokociśnieniowych układów wtrysku paliwa, spośród których w kolejnych latach największą popularność zyskał układ typu HPCR (*high pressure common rail*). Jednak w przypadku tych układów, podobnie jak we wcześniejszych typach układów wtrysku paliwa, powstał problem zewnętrznych osadów koksowych gromadzących się w kanalikach i wokół otworków wylotowych wielootworkowych rozpylaczy. Należy podkreślić, że o ile w silnikach z pośrednim wtryskiem paliwa na wielkość i szybkość zakoksowania rozpylaczy we wtryskiwaczach duży wpływ ma typ zastosowanego rozpylacza, to w przypadku silników z bezpośrednim wtryskiem paliwa właśnie paliwo odgrywa kluczową rolę w tworzeniu przedmiotowych osadów koksowych.

Równocześnie, od około 2008 r., zaczęto obserwować na całym świecie niepokojąco zwiększającą się liczbę awarii układów HPCR, a w konsekwencji silników, związanych, jak się okazało, z powstawaniem osadów na wewnętrznych elementach przedmiotowych układów. Przeprowadzone analizy chemiczne wykazały, że osady te mają odmienny skład od dotychczas badanych, zewnętrznych osadów koksowych w kanalikach i wokół otworków wylotowych rozpylaczy [5, 6, 8, 9]. Stwierdzono też, że czynniki powodujące powstawanie tej nowej grupy osadów, nazwanych osadami wewnętrznymi układów wtryskowych silników Diesla (IDID – *internal diesel injector deposit*), i warunki sprzyjające ich przyrostowi są zupełnie inne aniżeli w przypadku zewnętrznych osadów koksowych (rysunek 1).

W obecnie stosowanych układach typu HPCR ciśnienie wtrysku paliwa sięga 200 MPa, a nawet 220 MPa, a ilość odmierzanego, a następnie wtryskiwanego paliwa, w przypadku silnika do samochodu osobowego, mieści się w zakresie od 1 mm³ (dawka wstępna – pilotująca) do 40 mm³ (dawka przy pełnym obciążeniu silnika). Równocześnie czas wtrysku przedmiotowej dawki paliwa to 1÷2 milisekundy, co w przypadku strategii wtrysku wielokrotnego (wielofazowego) oznacza wykonanie do 10 000 wtrysków na minutę [9]. Najszybsze stosowane obecnie wtryskiwacze elektromagnetyczne uzyskują czas otwarcia równy 0,303 ms, a coraz szerzej wykorzystywane wtryskiwacze piezoelektryczne – do 0,1 ms [9]. Biorąc pod uwagę powyższe parametry użytkowe wtryskiwaczy i wymaganą, bardzo wysoką dokładność wykonania (luz pomiędzy obudową rozpylacza i poruszającą się w nim walcową, prowadzącą częścią iglicy wynosi około 1 μm), związaną z bardzo wysokimi ciśnieniami wtrysku paliwa, wszelkie osady wewnętrzne na powierzchniach współpracujących elementów roboczych mają szkodliwy wpływ na działanie całego zespołu. Rozpylacze muszą gwarantować odpowiedni moment i czas otwierania oraz wtrysku paliwa do komór spalania. W stanie zamkniętym nie mogą wykazywać przecieków, które mogłyby niekorzystnie wpływać na emisję szkodliwych składników spalin z silnika, zwiększenie zużycia paliwa i prowadzić do zakoksowania oraz zniekształcenia wpływu strug paliwa z otworów ich końcówek, co zaburzałoby proces rozpylania paliwa. IDID spowalniają szybkość działania wtryskiwaczy (tzw. czas przesterowania)



Rys. 1. Przekrój wtryskiwacza układu wtrysku paliwa typu *common rail* z zaznaczonymi obszarami występowania osadów wewnętrznych i zewnętrznych

1 – sprężyna zaworu elektromagnetycznego, 2 – zawór sterujący, 3 – kanał odpływowy paliwa, 4 – komora sterująca rozdziałem paliwa, 5 – igllica rozpylacza, 6 – otworek rozpylacza, 7 – komora wstępna

i sklejają (unieruchamiają) współpracujące ze sobą ich elementy robocze, co prowadzi do utraty kontroli nie tylko w zakresie ilościowego i jakościowego tworzenia dawki paliwa, ale także jej podziału i momentu wtryskiwania. IDID wpływają też na niekontrolowane zaburzenia profilu zmian ciśnienia wielofazowego wtrysku paliwa, poprzez osadzanie się na zworach i kotwicach elektromagnesów sterujących przepływem paliwa we wtryskiwaczach. W praktyce powoduje to: utrudniony rozruch silnika, nierównomierną jego pracę – zarówno na biegu

jałowym, jak i podczas jazdy pojazdu, niekontrolowane zmiany mocy i momentu obrotowego silnika oraz jego nieoczekiwane zatrzymanie. W konsekwencji ma to też wpływ na wielkość zużycia paliwa i zwiększoną emisję składników szkodliwych do atmosfery. Zatem zagrożenia związane z powstawaniem IDID dla poprawnej pracy układu HPCR wynikają z ograniczania dynamiki pracy wewnętrznych elementów roboczych wtryskiwaczy lub ich całkowitego sklejania, co powoduje hydrauliczną dysfunkcję działania tych ważnych podzespołów.

Typy wewnętrznych osadów wtryskiwaczy (IDID)

Dotychczas przeprowadzone badania IDID pozwoliły hipotetycznie założyć kilka mechanizmów ich tworzenia, jednak każdy z tych mechanizmów wymaga prowadzenia dalszych badań w celu zweryfikowania i/lub ostatecznego potwierdzenia. Bierze się to z dużej złożoności czynników i warunków mogących mieć wpływ na inicjowanie powstawania, a następnie na tworzenie się przedmiotowych osadów. Najważniejsze czynniki to: skład paliwa i uszlachetniających go dodatków, ale także zawartość różnych zanieczyszczeń przedostających się zarówno podczas produkcji paliw, jak i ich transportu (nawet w ilościach poniżej 1 mg/kg), ilość i jakość zawartego w pali-

wie FAME, warunki pracy silnika itp. Ponadto charakter fizyczny przedmiotowych osadów może być różny, jako że mogą to być sole metali lub bezpopiołowe materiały polimeryczne [5, 6, 8, 9, 10]. Dodatkowo nie są znane graniczne warunki, w których mogą powstawać IDID.

We współczesnych układach wtrysku paliwa do ich smarowania wykorzystywane jest przepływające przez paliwo. Wytwarzane obecnie oleje napędowe zawierają rozmaite komponenty kwasowe. W różnym stopniu nienasycone kwasy tłuszczowe są powszechnie używane jako dodatki smarowościowe. Jak wykazano, takie kwasy łatwo reagują z jonami metali stanowiącymi zanieczysz-

czenia paliwa, formując mydła i osady. Przykładowo, mydła kwasów tłuszczowych zawierające cynk powodują odkładanie się osadów zakoksujących otwory wylotowe rozpylaczy wtryskiwaczy. Od dłuższego czasu wiadomo, że sole karboksylowe i polarne związki o niskiej masie cząsteczkowej znacznie słabiej rozpuszczają się w niskosiarkowych olejach napędowych aniżeli w dawniej stosowanych wysokosiarkowych. To w połączeniu z warunkami panującymi wewnątrz wtryskiwaczy układów HPCR sprzyja tworzeniu osadów wewnętrznych. Dla przykładu: sodowe mydła kwasów tłuszczowych są słabo rozpuszczalne w oleju napędowym, a zatem mogą wzmagać tendencje do tworzenia wewnętrznych osadów we wtryskiwaczach. Coraz większa zawartość FAME w olejach napędowych wpływa na wzrost zawartości sodu w paliwie, ponieważ metal ten jest składnikiem typowych katalizatorów stosowanych w reakcjach transestryfikacji. Znajdujące się w oleju napędowym FAME mogą dodatkowo sprzyjać tworzeniu osadów typu IDID poprzez zawarte w nich kwasowe zanieczyszczenia, powstałe podczas produkcji FAME oraz te uformowane poprzez autokatalityczny podział estrów tłuszczowych z udziałem jonów metali [4]. Powstałe w ten sposób osady mogą powodować sklepanie powierzchni ruchowo współpracujących ze sobą elementów [5, 6, 8, 9, 10] i intensyfikować procesy korozyjne. W USA, Danii i Francji zaobserwowano, że sole sodowe, zazwyczaj w postaci azotynów (NaNO_2), używane jako inhibitory korozji w rurociągach do przesyłu paliw już przy zawartości $> 0,1$ mg/kg w paliwie mogą wchodzić w reakcje z kwasami tłuszczowymi, stanowiącymi dodatki smarnościowe, tworząc sodowe mydła kwasów tłuszczowych [10]. Jako słabo rozpuszczalne w oleju napędowym, łatwo wydzielają się z niego i przywierają do wewnętrznych powierzchni elementów roboczych podzespołów układu wtrysku paliwa w postaci osadów o jasnej, białoszarej barwie.

W krajach europejskich częściej obserwowane są IDID tworzone z polimerów organicznych. Osady te mają postać lepkich, brązowych laków pokrywających wewnętrzne powierzchnie elementów układów HPCR, a ich skład chemiczny jest zupełnie odmienny od wyżej opisanych mydeł z jonem metalicznym. Osady te nie zawierają w swym składzie jonów metalicznych. Powstają na skutek reakcji powszechnie stosowanych dodatków detergentowych do olejów napędowych w postaci poliizobutylenowego imidu kwasu bursztynowego (PIBSI – *polyisobutylene succinimide*) z kwasem mrówkowym, inhibitorami korozji lub dodatkami smarnościowymi, stanowiącymi monomery bądź dimery kwasów tłuszczowych. Szczególnie podat-

ne na tworzenie przedmiotowych osadów są PIBSI z wysoką zawartością aminy pierwszorzędowej w interakcji z dimerami karboksylowych kwasów tłuszczowych. Powstałe osady są nierozpuszczalne w ogólnie stosowanych rozpuszczalnikach organicznych, co bardzo utrudnia ich analizę i określenie budowy chemicznej.

Dotychczas przeprowadzone badania wskazują też na możliwość powstawania IDID z produktów utleniania paliw. Produkty takie mogą występować zwłaszcza w przypadku niestabilnych olejów napędowych zawierających FAME lub pochodzić ze starzenia estrowych kwasów tłuszczowych wstępujących w dodatkach smarnościowych [1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10].

Podsumowując, wyżej opisane IDID, występujące w układach wtrysku paliwa HPCR, można podzielić na trzy typy:

Typ I

Określane są jako: mydła zawierające jon metaliczny (w większości sodowe mydła kwasów tłuszczowych) lub osady „woskowe” albo mydła karboksylowe, bądź sole karboksylowe.

Powstają na skutek współdziałania:

- inhibitorów korozji z monomerami kwasów tłuszczowych wykorzystywanych w dodatkach smarnościowych,
- inhibitorów korozji z dimerami kwasów tłuszczowych wykorzystywanych w dodatkach smarnościowych,
- inhibitorów korozji z kwasami alkenylo-bursztynowymi, jak DDS (*dodecenył succinic*) acid i HDS (*hexadecenył succinic*) acid, wykorzystywanymi w dodatkach smarnościowych.

Typ II

Określane są jako: lepkie, lakowe osady lub osady polimerowo organiczne albo osady amidowe.

Powstają na skutek współdziałania:

- dodatków detergentowych, jak PIBSI (*polyisobutylene succinimide*), z kwasem mrówkowym,
- dodatków detergentowych, jak PIBSI, z kwasem tłuszczowym wykorzystywanym w dodatkach smarnościowych (w szczególności z dimerów kwasów tłuszczowych).

Typ III

Określane są jako: produkty utleniania paliwa.

Powstają na skutek starzenia FAME zawartego w ON i/lub jako produkty starzenia kwasów tłuszczowych pochodzących z dodatków smarnościowych.

Założenia dotyczące prowadzenia badań własnych

Celem badań było wytworzenie IDID w warunkach symulowanych testów silnikowych oraz określenie wpływu przedmiotowych osadów na kluczowe parametry pracy układu wtrysku paliwa typu HPCR.

Badania w projekcie przeprowadzono przy wykorzystaniu uniwersalnego silnikowego stanowiska badawczo-testowego skonstruowanego w INiG. Zasadniczym elementem stanowiska jest nowoczesny silnik wysokoprężny typu HSDI marki Ford noszący oznaczenie fabryczne 2.0i 16V Duratorq TDCi. Silnik jest zasilany bezpośrednim, wysokociśnieniowym układem wtrysku paliwa typu HPCR.

Jak stwierdzono w dotychczasowych badaniach, wysoka temperatura sprzyja tworzeniu IDID. Podczas pracy silnika podawane do wtryskiwaczy z dużym nadmiarem paliwo stale je chłodzi (jego większa część jest odprowadzana za pomocą przelewów z powrotem do zbiornika paliwa), natomiast po zatrzymaniu silnika powstają, w początkowym okresie jego chłodzenia, warunki jeszcze większego nagrzania końcówek wtryskiwaczy. Wychodząc z tego założenia i biorąc pod uwagę, że silnik na stanowisku badawczym nie będzie mógł być eksploatowany bez przerwy, co wynika ze specyfiki pracy hamowni, założono, że test będzie prowadzony z przerwami o różnej długości. Jest to zresztą zgodne ze sposobem eksploatacji pojazdów, które też nie są używane bez przerwy, a czasowe przerwy pomiędzy kolejnymi uruchomieniami silnika są różne. W konsekwencji ustalono, że najbardziej sprzyjające warunki do powstawania osadów typu IDID zostaną stworzone podczas pracy silnika na stałych parametrach przez cały czas prowadzenia testu, tj. przy prędkości obrotowej 3000 obr./min i obciążeniu 160 Nm, co odpowiada temperaturze zmierzonej w bezpośredniej bliskości końcówki wtryskiwacza w granicach 365÷380°C (w zależności od cylindra, w którym prowadzono pomiary przy użyciu wtryskiwacza z wbudowanym czujnikiem termoelektrycznym). Przyjęto, że w teście silnik uruchamiany jest cyklicznie, na 2 godziny, po czym zostaje wyłączony na okres od 2 do 16 godzin, następnie zostaje uruchomiony na kolejne 2 godziny, potem wyłączony itd., aż do osiągnięcia 60 godzin rzeczywistej pracy silnika (tj. 30 cykli po 2 godziny). Test może być zakończony wcześniej w przypadku powstania dysfunkcji wtryskiwaczy uniemożliwiających uruchomienie i dalszą pracę silnika. Do każdego testu stosowany jest nowy komplet wtryskiwaczy po przeprowadzeniu jego wstępnej diagnostycznej oceny w autoryzowanym serwisie. W czasie pracy silnika jego

parametry utrzymywane są na stałym poziomie w zakresie wielkości otwarcia pompy wtryskowej i prędkości obrotowej, a monitorowaniu podlegają następujące parametry: prędkość obrotowa, moc i moment obrotowy silnika, temperatura spalin w układzie wylotowym, wielkość zużycia paliwa i wielkość zadymienia spalin.

Do zasilania silnika używano handlowego oleju napędowego Ekodiesel Ultra F 4,8, do którego dodawano (przygotowane w postaci 1-litrowych przedmieszek) mieszaniny związków chemicznych rozpuszczonych w przedmiotowym ON, które, jak sugerują dostępne wyniki dotychczas przeprowadzonych badań w różnych laboratoriach na świecie, mają największy wpływ na zainicjowanie i tworzenie IDID [1, 2, 3, 4, 8].

Poniżej opisano pierwszy pakiet mieszaniny substancji mających doprowadzić do wytworzenia pierwszego typu IDID, tzn. mydeł zawierających jon metaliczny. Skład mieszaniny został opracowany w oparciu o dane literaturowe [2, 4, 9, 10].

Przygotowano dwie partie dodatku, każda na 300 l paliwa, przy założeniu dozowania substancji aktywnych na poziomie 150 mg/kg. Pojedyncza partia zestawiona została z 37,5 g kwasu dodecylobursztynowego i 7,5 g azotynu sodu (stosunek wagowy 5:1) oraz 50,0 g Shellsolu A. Mieszaninę ujednorodniono poprzez ogrzanie do temperatury 40°C i poddanie działaniu ultradźwięków przez ok. 1 godz. Azotyn sodu w czasie mieszania z kwasem w łaźni ultradźwiękowej reagował z wydzieleniem tlenków azotu. Otrzymany produkt był praktycznie roztworem soli sodowej kwasu dodecylobursztynowego (mydło) nasyconym tlenkami azotu. Z tak otrzymanego pakietu sporządzono przedmieszkę przez rozcieńczenie paliwem do objętości 1 dm³.

Z kolei drugi pakiet mieszaniny substancji, mających doprowadzić do wytworzenia drugiego typu IDID, tzn. zawierających lepkie, lakowe osady polimerowo organiczne, wykonano jak niżej.

Przygotowano dwie partie dodatku, każda na 300 l paliwa, przy założeniu dozowania substancji aktywnych na poziomie 200 mg/kg. Pojedyncza partia zestawiona została z 46,7 g imidu kwasu bursztynowego zawierającego wolne I-rzędowe grupy aminowe i 13,3 g kwasu neodekanowego (stosunek wagowy 3:1) oraz 50,0 g Shellsolu A. Mieszaninę ujednorodniono poprzez ogrzanie do temperatury 40°C i poddanie działaniu ultradźwięków przez ok. 1 godz. Z tak otrzymanego pakietu sporządzono przedmieszkę przez rozcieńczenie paliwem do objętości 1 dm³.

Wyniki testów silnikowych

W pierwszym, symulacyjnym teście silnikowym oceniany był wpływ na tworzenie IDID dla oleju napędowego zawierającego pierwszy pakiet wyżej opisanych substancji. Podczas testu obserwowano istotne, zwiększające się w miarę upływu czasu zmiany (wahania) w zakresie trzech głównych parametrów pracy silnika, tj.: momentu obrotowego, mocy i temperatury spalin. Jak ustalono, zmiany te były wynikiem stopniowego tworzenia się osadów na powierzchniach wewnętrznych roboczych elementów wtryskiwaczy. Powodowało to zaburzenia dynamiki ich pracy, a w czasie przerw w pracy silnika – sklejanie elementów odpowiedzialnych za regulację przepływu paliwa i jego dozowanie, skutkujące co najmniej czasowym unieruchomieniem tłoczka sterującego zaworu elektromagnetycznego i/lub iglicy sterującej otwieraniem i zamykaniem wtryskiwacza. W konsekwencji, jeśli założymy, że iglica wtryskiwacza zawiesiła (sklepiła) się w pozycji otwarcia wtryskiwacza lub czas zamykania wtryskiwacza został znacznie spowolniony (wydłużony) na skutek utrudnionego przesuwu iglicy poprzez powstałe na powierzchniach roboczych IDID, prowadziło to do zwiększenia maksymalnej dawki paliwa powyżej zakładanej przez producenta silnika. Skutkowało to wzrostem mocy powyżej maksymalnej dla danego otwarcia pompy wtryskowej. Z kolei gdyby założyć unieruchomienie tłoczka sterującego zaworu elektromagnetycznego w pozycji ograniczającej dopływ wymaganej ilości paliwa do kanałika przed otworkami wtryskowymi rozpylacza lub zakleszczenie iglicy rozpylacza w pozycji częściowo zamkniętego wtryskiwacza, niedobór paliwa będzie wpływał na niekontrolowane zmniejszenie mocy silnika. Oczywiście wyżej opisane zjawiska mogą przebiegać z różną intensywnością we wtryskiwaczach poszczególnych cylindrów silnika, tym niemniej będą one zaburzały płynny przebieg mocy, momentu obrotowego, temperatury spalin silnika i innych, poprzez niekontrolowane zmia-

ny ilościowe (współczynnika nadmiaru powietrza λ) i jakościowe tworzenia mieszanki palnej.

Po zakończeniu testu wtryskiwacze były przekazywane do oceny diagnostycznej w autoryzowanej stacji kontroli, regulacji i naprawy układów wtryskowych firmy Delphi. Potwierdziła ona wyżej opisane obserwacje i hipotezy. W przypadku każdego z ocenianych wtryskiwaczy po teście silnikowym nastąpił znaczący spadek wielkości dawki dozowanego paliwa w odniesieniu do określonej szerokości impulsu elektrycznego, decydującego o czasie otwarcia wtryskiwacza, niezależnie od założonego ciśnienia. W zakresie czasu impulsu od około 200 μ s do 400 μ s (początek wtrysku) jednoznacznie stwierdzono czasowe



Rys. 2. Osady (typ I) na wewnętrznych elementach wtryskiwaczy układu HPCR
a) korpus komory sterującej przepływem paliwa, b) korpus komory i tłoczek sterującego zaworu elektromagnetycznego, c) iglica rozpylacza

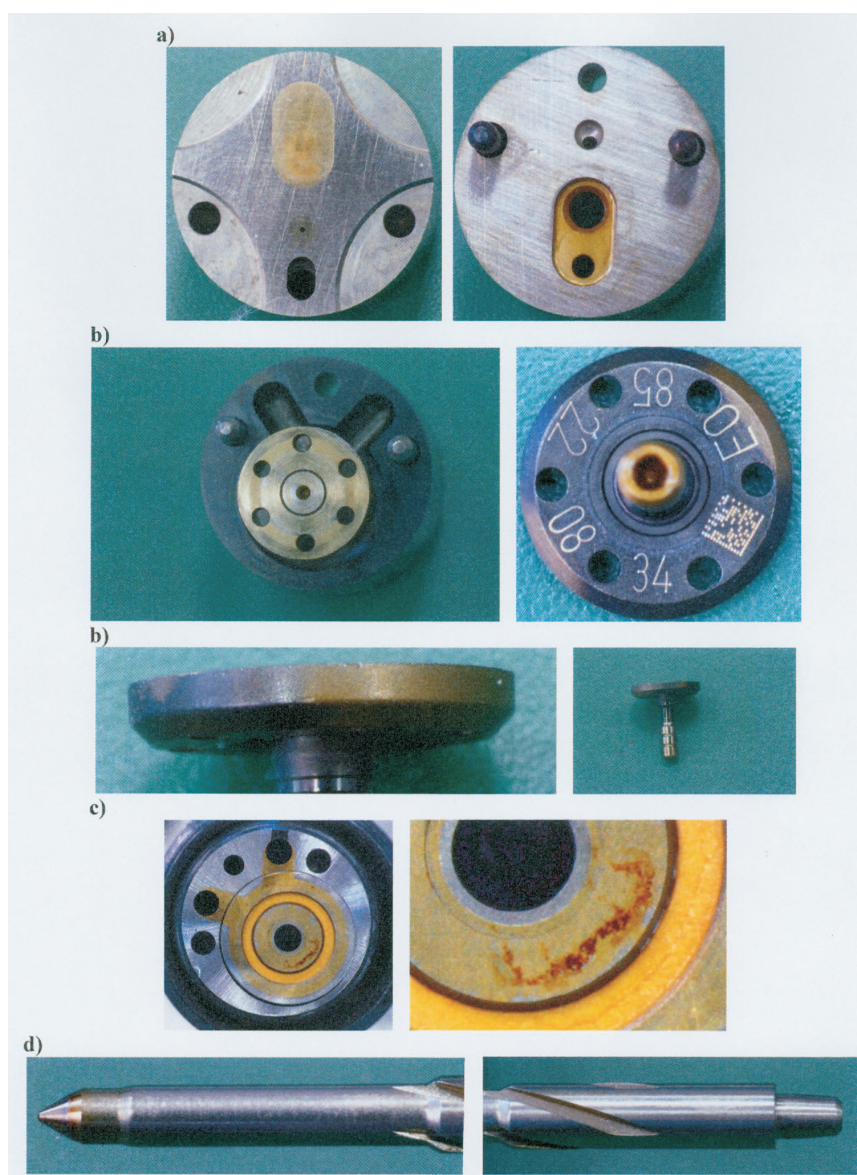
i ilościowe zaburzenia w stabilizowaniu się dawki paliwa, będące następstwem zmian (pogarszania się) dynamiki pracy wewnętrznych elementów roboczych wtryskiwacza, odpowiedzialnych za sterowanie przepływem paliwa nadmiarowego i sam wtrysk paliwa. Nie ulega zatem wątpliwości, że osady typu IDID wytworzone we wtryskiwaczach miały jednoznacznie negatywny wpływ na ich funkcjonowanie.

Demontaż wtryskiwaczy po przeprowadzonej próbie ujawnił osady, które powstały na omywanych przez paliwo powierzchniach wewnętrznych elementów wtryskiwacza (rysunek 2). Osady miały białoszare zabarwienie, w przypadku grubszych warstw ich powierzchnia była popękana, a ponadto wykazywały tendencje do łuszczenia się i wykruszania. Podczas przesuwania iglicy w korpusie rozpylacza wykazywały wyraźne opory i szorstkość współpracujących powierzchni. Podobnie utrudnione było poruszanie się tłoczka sterującego zaworu elektromagnetycznego. Biorąc pod uwagę duże dokładności i małe tolerancje wykonawcze elementów wtryskiwaczy, wytworzone osady o bardzo małej grubości doprowadziły do zaburzeń w pracy wtryskiwaczy, które wykluczały możliwość ich dalszego bezpiecznego stosowania w warunkach rzeczywistej eksploatacji.

Podczas prowadzenia drugiego testu silnikowego (paliwo zawierało drugi pakiet substancji podejrzewanych o tworzenie IDID) stwierdzono jeszcze większe zmiany (wahania) kluczowych parametrów pracy silnika, tj.: momentu obrotowego, mocy i temperatury spalin, niż w przypadku testu pierwszego. Pod koniec testu obserwowano znaczny spadek mocy i momentu obrotowego silnika, będący wynikiem, jak się potem okazało (po rozmontowaniu jednego z wtryskiwaczy), całkowitego sklejania się iglicy z korpusem rozpylacza. W tym miejscu jeszcze raz należy podkreślić, że już bardzo cienka (niekiedy trudna do fotograficznego zarejestrowania metodami konwencjonalnej fotografii) warstwa osadów typu IDID

może doprowadzić do dysfunkcji wtryskiwacza – nie tylko utrudniającej, ale nawet uniemożliwiającej jego funkcjonowanie. Podczas tego testu obserwowano też znaczne różnice w zakresie monitorowanej wielkości zadymienia spalin, co potwierdza duże zaburzenia w zakresie jakościowego i ilościowego tworzenia mieszanki palnej w komorach silnika. Pozostałe obserwacje i hipotezy były analogiczne do tych wysuniętych i opisanych podczas prowadzenia pierwszego testu.

Wyniki porównawczej oceny diagnostycznej wtryskiwaczy przed i po przeprowadzonym teście silnikowym były podobne do tych po pierwszym teście. W przypadku



Rys. 3. Osady (typ II) na wewnętrznych elementach wtryskiwaczy układu HPCR

- a) korpus komory sterującej przepływem paliwa i korpus komory zaworu sterującego, b) korpus komory zaworu sterującego i tłoczek sterującego zaworu elektromagnetycznego, c) elektromagnes sterujący, d) iglica rozpylacza

ku każdego z ocenianych wtryskiwaczy nastąpił znaczący spadek wielkości dawki dozowanego paliwa w odniesieniu do określonej szerokości impulsu elektrycznego, decydującego o czasie otwarcia wtryskiwacza, niezależnie od wielkości ciśnienia podawanego paliwa. W zakresie czasu impulsu od około 200 μ s do 400 μ s (początek wtrysku) widać wyraźnie czasowe i ilościowe zaburzenia w stabilizowaniu się dawki paliwa, będące następstwem zmian (pogarszania się) dynamiki pracy wewnętrznych elementów roboczych wtryskiwacza odpowiedzialnych za sterowanie przepływem paliwa nadmiarowego i sam wtrysk paliwa.

Po rozmontowaniu jednego z wtryskiwaczy po zakoń-

czonym teście stwierdzono, jak już wcześniej wspomiano, sklejenie iglicy z korpusem rozpylacza oraz znaczne utrudnienia ruchu nurnika, tłoczka sterującego zaworu elektromagnetycznego w cylinderku. Powstałe na powierzchniach wewnętrznych elementów wtryskiwaczy osady były koloru miodowobrazowego i miały charakter laków (rysunek 3). Zatem były one wizualnie zupełnie odmienne od tych, jakie obserwowano podczas pierwszego testu. Stwierdzona tendencja do szybkiego i dość trwałego sklejenia elementów roboczych wtryskiwaczy pozwala przypuszczać, że wytworzone w drugim teście osady były bardziej lepkie, a nie zacierające, jak te powstałe w pierwszym teście.

Podsumowanie – wnioski

1. Problem uszkodzeń układów wtrysku paliwa typu HPCR przez tworzące się w nich osady wewnętrzne (IDID) nabiera coraz większego, globalnego znaczenia, natomiast wiedza dotycząca mechanizmów ich powstawania oraz składu jest w dalszym ciągu niewystarczająca, o czym świadczy m.in. bardzo mała liczba publikacji na ten temat.
2. Nie ulega wątpliwości, że wytworzone we wtryskiwaczach w ramach przeprowadzonych testów silnikowych osady typu IDID miały jednoznacznie negatywny wpływ na funkcjonowanie układu wtrysku paliwa.
3. Pomimo bardzo małej grubości osadów typu IDID (często około 1 μ m) mogą one prowadzić do zaburzeń lub całkowitej dysfunkcji zwłaszcza wtryskiwaczy układów HPCR. Wynika to m.in. z niezwykle dużej precyzji wykonania kluczowych elementów funkcjonalnych wtryskiwaczy oraz bardzo dużej dynamiki pracy ich ruchomych elementów roboczych.

Literatura

- [1] Barker J., Richards P., Goodwin M., Wooler J.: *Influence of High Injection Pressure on Diesel Fuel Stability: A Study of Resultant Deposits*. SAE Technical Paper No. 2009-01-1877.
- [2] Caprotti R., Bhatti N., Balfour G.: *Deposit Control in Modern Diesel Fuel Injection Systems*. SAE Technical Paper No. 2010-01-2250.
- [3] Caprotti R., Breakspear A., Graupner O., Klaua T., Kohonen O.: *Diesel Injector Deposits Potential in Future Fueling Systems*. SAE Technical Paper No. 2006-01-3359.
- [4] Caprotti R., Breakspear A., Klaua T., Weiland P., Graupner O., Bittner M.: *RME Behaviour in Current and Future Diesel Fuel FIE's*. SAE Technical Paper No. 2007-01-3982.
- [5] CEN/TC 19/WG 24; Report of the Ad-hoc Injector Sticking Task Force – 2 August 2011.
- [6] Chapman L.: *Diesel Soap – Formation and Related Problems*. National Tanks Conference, Boston, MA September 21, 2010.
- [7] Graupner O., Klaua T., Caprotti R., Schik A.: *Injector Deposit Test For Modern Diesel Engines*. APL Automobil Prueftechnik Landau GmbH. TAE Symposium, 2005.
- [8] Quigley R., Barbour R., Fahey E., Arters D., Wetzell W., Ray J.: *A Study of the Internal Diesel Injector Deposit Phenomenon*. TAE Fuels 7th Annual Colloquium, January 2009.
- [9] Ullmann J., Geduldung M., Stutzenberger H., Caprotti R., Balfour G.: *Effects of Fuel Impurities and Additive Interactions on the Formation of Internal Diesel Injector Deposits*. TAE Fuels 8th Annual Colloquium, January 2011.
- [10] Ullmann J., Geduldung M., Stutzenberger H., Caprotti R., Balfour G.: *Investigation into the Formation and Prevention of Internal Diesel Injector Deposits*. SAE Technical Paper No. 2008-01-0926.



Dr inż. Zbigniew STEPIEŃ – kierownik Pracowni Badań Silnikowych i Trybologicznych Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Specjalista m.in. w zakresie zjawisk będących wynikiem współdziałania silników z paliwami i olejami smarowymi. Kierownik i uczestnik wielu projektów badawczych. Autor i współautor opracowań, dokumentacji badawczych, projektów oraz patentów.