

Wiesława Urzędowska, Zbigniew Stępień
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Badania wpływu jakości oleju napędowego na uszkodzenia układu wysokociśnieniowego wtrysku paliwa

Systemy wysokociśnieniowego wtrysku paliwa (FIS – *Fuel Injection System*) mają istotny wpływ na „surową” emisję składników szkodliwych z nowoczesnych, wysokoobrotowych silników diesla. Od czasu szerokiego rozpowszechnienia zaawansowanych systemów zasilania silników z zapłonem samoczynnym, jak *Common Rail* i pompowtryskiwacze, zwłaszcza w lekkich pojazdach samochodowych obserwuje się występowanie ich licznych awarii – związanych z jakością stosowanego paliwa. Często płyny eksploatacyjne, w tym paliwa, są zanieczyszczone np. nierozpuszczalnymi cząstkami stałymi – pochodzącymi z procesu produkcji lub przedostającymi się do paliw podczas ich transportu i magazynowania. Innym źródłem zanieczyszczenia są przewody odpowietrzające zbiorniki paliwa, przez które przedostają się różnego rodzaju zanieczyszczenia oraz woda zawarta w powietrzu. Wymienione czynniki podnoszą ryzyko przyspieszonego zużycia elementów roboczych układów wtrysku paliwa. Różne formy zużycia materiałów powierzchni skracają okresy eksploatacji przedmiotowych układów i mogą powodować zmiany obrazu rozpylanej strugi paliwa i stopień jego rozdrobnienia. Dodatkowo niebezpieczeństwo stwarzają biokomponenty zawarte w paliwach, z uwagi na ich niską odporność na utlenianie, która intensyfikuje procesy zakoksywywania rozpylaczy wtryskiwaczy i inicjuje procesy tworzenia polimerycznych osadów na wielu wewnętrznych powierzchniach ważnych elementów składowych FIS. Skutkami powyższych zjawisk jest sklejanie ruchomych części wtryskiwaczy oraz pomp wysokiego ciśnienia i pogorszenie jakości rozpylania paliwa, czego wynikiem jest podwyższenie emisji składników szkodliwych do atmosfery przez silnik. Przedstawione w tym artykule badania zostały podjęte w celu rozpoznania mechanizmów przyspieszonego zużycia kluczowych elementów roboczych FIS lub awarii spowodowanych przede wszystkim podwyższoną zawartością zanieczyszczeń stałych, wody i FAME w paliwie. Wyżej wymienione szkodliwe zjawiska są czasem wzmocniane – poprzez ich niekorzystne interakcje z procesami mechanicznej degradacji elementów FIS i warunkami eksploatacji tych układów.

Study of diesel fuel quality influence for high pressure injection system failures

The high pressure fuel injection system (FIS) has essential influence on the raw emissions of modern high speed direct injection diesel engine. Since the advanced diesel injection systems like Common Rail (CR) or Unit Injector System (UIS) were wide spreading, especially in passenger cars, has been observed a lot of failures connected with the fuel quality. The service fluids as fuels usually are carefully checked for contamination by particles which get into it during the production process, transportation or storage. Further contamination occurs as a result of particles and water entering by the way of the fuel tank vent pipe. Mentioned factors increase risk for precipitated wear of injection systems components. Surface failures decrease the service interval and can result in substantial changes in spray skew, spray symmetry and droplet-size distribution. Extra threatens creates bio-components contained in diesel fuels, as they have low oxidation stability and increase nozzle coking and ageing polymer depositions at many very important parts of FIS. The effects of injector deposits are manifested in sticking moving parts, degradation in spray quality and adversely influences on exhaust gas composition. Presented in this paper study has been undertaken in order to establish the mechanisms of injection systems components wear or failures causes especially by particles, water and FAME contained in diesel fuel, sometimes strengthen by interactions with mechanical degradation of FIS components and its service conditions.

Wstęp

W ostatnich kilkunastu latach nastąpił szczególnie duży postęp w rozwoju – nieustannie zyskujących na popularności – silników z zapłonem samoczynnym (ZS), przejawiając się generalnie w innej organizacji i sterowaniu procesem spalania, przede wszystkim dzięki zastosowaniu nowoczesnych, wysokociśnieniowych układów wtrysku paliwa, w połączeniu z turbodoładowaniem i wykorzystaniem efektywnych, zintegrowanych ze sterowaniem silnika systemów oczyszczania spalin. Powszechnie uważa się,

że wprowadzenie w drugiej połowie lat 90. do szerokiego zastosowania układów wtryskowych typu *Common Rail* (CR) w silnikach Diesla, zapoczątkowało ich gwałtowny rozwój i zmieniło stereotypy odnoszące się do jakości ich pracy oraz osiąągów. Jednak równoczesne wdrożenie wielu bardzo zaawansowanych rozwiązań technicznych w konstruowanych silnikach i układach stanowiących ich osprzęt, cechujących się wysokim wyężeniem materiałów, w połączeniu z zastosowaniem paliw produkowanych

według szybko modyfikowanych technologii, prowadzi w wielu przypadkach do występowania niekorzystnych zjawisk, powodujących ograniczenie trwałości kluczowych elementów roboczych tych urządzeń [1, 2, 3, 4]. Stałe dążenie do uzyskiwania coraz lepszych parametrów – tak w zakresie mocy jednostkowej, jak i zużycia paliwa – wymusza znaczący postęp techniczny w aspekcie podnoszenia osiągnięć energetycznych silników, równocześnie często ujawniając opóźnienia w równoległym rozwoju technologii wytwarzania oraz materiałoznawstwa,

a w szczególności metaloznawstwa i towarzyszących mu badań metalograficznych. Prowadzi to do obniżenia trwałości węzłowych elementów silnika, wynikającej zarówno z przyczyn konstrukcyjnych, jak i eksploatacyjnych. Sytuację dodatkowo komplikuje brak korelacji rozwoju technologii produkcji paliw z wymaganiami nowoczesnych jednostek napędowych i występowanie na rynku tzw. „fałszowanych” olejów napędowych, a zatem niezgodnych z wymaganiami określonymi normą PN-EN 590:2009 [3, 4, 5, 6, 7].



Fot. 1. Widok elementów składowych całkowicie zniszczonej pompy wtryskowej układu *Common Rail*. Uszkodzenia zostały zapoczątkowane zanieczyszczeniami stałymi w paliwie

W konsekwencji, coraz częściej producenci silników, producenci układów wtryskowych oraz serwisy samochodowe wskazują na właściwości paliwa, jako bezpośrednią lub pośrednią przyczynę powstających awarii nowoczesnych układów wtrysku paliwa – tym bardziej, że często dotyczą one nowych samochodów (w okresie gwarancyjnym) [8]. Na duży wpływ jakości paliwa na możliwość powstawania opisanych problemów wskazuje też rozszerzenie przez Światową Kartę Paliw (wydanie – wrzesień 2006 [10]) wymagań w stosunku do olejów napędowych kategorii 2, 3 i 4, o określenie rozkładu wielkości cząstek stałych w klasach: $> 4 \mu\text{m}$, $> 6 \mu\text{m}$ i $> 14 \mu\text{m}$, w oparciu o procedurę ISO 4406. Jednak wymagania te ograniczają się jedynie do rozpatrzenia kwestii zanieczyszczeń mechanicznych w paliwie, a zatem można tu mówić tylko o wybiórczej próbie rozeznania tej części problemu.

Rozpatrywane awarie są kojarzone przede wszystkim z funkcjonalnym uszkodzeniem pomp wysokociśnieniowych lub zespołów wtryskiwaczy przedmiotowych układów paliwowych, na skutek zaistnienia niesprawności związanych w większości przypadków z procesem tarcia (prowadzącym do przyspieszonego zużycia) lub zatarcia współpracujących par elementów ruchomych. Opisany problem występuje obecnie nie tylko w Polsce, ale również w innych krajach, jednak trudno jest uzyskać szersze informacje na ten temat, z uwagi na brak pełnego rozpoznania mechanizmów umożliwiających wskazanie powodów i genezy powstawania takich procesów awaryjnych.

Dotychczas przeprowadzone badania i obserwacje wykazały między innymi, że rodzaj i podwyższony poziom

niektórych zanieczyszczeń (zwłaszcza twardych cząstek stałych, wody oraz biokomponentów), nie stanowiących jeszcze zagrożenia dla wcześniej stosowanych (niskociśnieniowych) układów wtryskowych, może prowadzić do poważnych uszkodzeń, dysfunkcji, a nawet zniszczenia kluczowych podzespołów układów wtrysku paliwa typu *Common Rail* lub pompowtryskiwaczy (fotografia 1). Należy podkreślić, że związki przyczynowo-skutkowe pomiędzy interakcjami różnych zanieczyszczeń stałych, wody i biokomponentów oraz uszkodzeniami podzespołów układów typu *Common Rail* – prowadzącymi do ich przedwczesnego zużycia, a następnie zniszczenia – nie zostały do końca wyjaśnione. Konstrukcja, dokładność wykonania i sposób działania kluczowych podzespołów opisywanych układów zasilania sugeruje występowanie procesów zużycia trybologicznego materiału, w tym zużycia: ściernego, ścierno-adhezyjnego, zmęczeniowego, cierno-korozyjnego, dyfuzyjnego, gruzełkowego i erozyjnego, co daje pogląd o złożoności zarówno mechanizmów powstawania uszkodzeń, jak i czynników na nie wpływających. Interesujące wydaje się równocześnie określenie wpływu progresywnie postępujących uszkodzeń układu wtryskowego – powstałych i rozwijających się w wyżej opisanych okolicznościach – na wielkość masowej emisji cząstek stałych (PM); zarówno ze względu na ich powszechnie znane zagrożenia dla zdrowia człowieka, ale również ze względu na możliwość wykorzystania zmian tej emisji, jako parametru diagnostycznego stanu technicznego całego układu *Common Rail* oraz przebiegu procesów spalania w silniku [7, 8].

Badania symulacyjne

W zrealizowanym w INiG projekcie badano związki przyczynowo-skutkowe pomiędzy zanieczyszczeniami oleju napędowego, uszkodzeniami układu wtrysku paliwa typu *Common Rail* i emisją cząstek stałych (PM), mając na celu:

- Określenie wpływu różnych zanieczyszczeń paliwa, w tym zanieczyszczeń stałych oraz wody, a także podwyższonej zawartości biokomponentów, na możliwość zainicjowania i rozwoju niekorzystnych zjawisk w nowoczesnym, wysokociśnieniowym układzie wtryskowym – skutkujących powstaniem przyspieszonego zużycia jego kluczowych elementów.
- Rozeznanie związków przyczynowo-skutkowych pomiędzy wybranymi właściwościami (różnymi zanieczyszczeniami) paliwa, warunkami eksploatacji i uszkodzeniami układu wtrysku paliwa typu *Common*

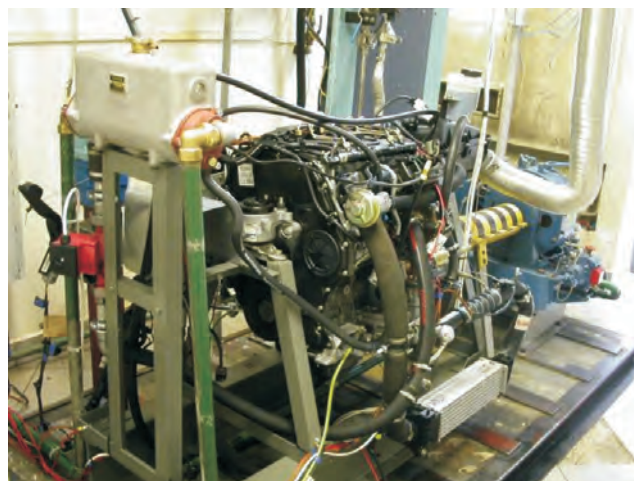
Rail, przejawiającymi się różnorodnymi formami jego zużycia.

- Rozpoznanie typowych form zużycia krytycznych elementów układu wysokociśnieniowego wtrysku paliwa, charakterystycznych dla określonych zanieczyszczeń paliwa, w oparciu o oceny rodzaju i stopnia degradacji materiału elementów roboczych przedmiotowego układu.
- Skojarzenie postępujących procesów zużycia kluczowych elementów układu wtrysku paliwa typu *Common Rail*, powodowanych przez różne zanieczyszczenia paliwa, ze zmianami w zakresie masowej emisji cząstek stałych w gazach spalinowych silnika ZS, zasilanego paliwem o rozpatrywanych właściwościach.

Założono prowadzenie stanowiskowych badań symulacyjnych, które pozwoliły na wykorzystanie silnika

i jego osprzętu jako obiektu diagnostyki, pozwalającego na zainicjowanie i rozwój procesów przyspieszonego zużycia układu CR w warunkach bardzo zbliżonych do tych, jakie występują w czasie rzeczywistej eksploatacji pojazdu, a następnie na wiarygodną ocenę ilościową i jakościową zaistniałych procesów niszczących. Ustalając warunki i przebieg prowadzenia badań symulacyjnych dążono do stworzenia możliwości dokonania analizy przyczynowo-skutkowej zachodzących w układzie wtryskowym niszczących procesów – co stanowiło zasadniczy cel projektu. Jako istotne parametry diagnostyczne, podlegające monitorowaniu podczas prowadzenia testów silnikowych i stanowiące o jakości działania układu CR, przyjęto pomiary zadymienia spalin oraz wielkości masowej emisji cząstek stałych. Do prowadzenia badań wykorzystywano uniwersalne, silnikowe stanowiska badawczo-testowe skonstruowane w INiG (fotografia 2).

W skład stanowiska wchodzi nowoczesny silnik wysokoprężny FORD 2.0i 16V Duratorq TDCi. Do zasilania sil-



Fot. 2. Stanowisko badawczo-testowe z silnikiem FORD 2.0i 16V Duratorq TDCi [INiG]

nika zastosowano bezpośredni, wysokociśnieniowy wtrysk paliwa typu *Common Rail*, wymagany do realizacji przyjętych w ramach projektu prac badawczo-poznawczych.

Procedura prowadzenia badań

W ramach realizacji projektu opracowano procedurę badawczą pozwalającą na monitorowaną symulację procesów uszkodzenia kluczowych elementów funkcjonalnych układu wtrysku paliwa typu *Common Rail*, powodowanych zanieczyszczeniami oleju napędowego. Poniżej w skrócie podano kolejne etapy przygotowania i prowadzenia testu według przedmiotowej procedury:

- Zamontowanie do silnika nowego kompletu wtryskiwaczy i pompy wtryskowej oraz filtra paliwa.
- Hydrauliczna (przepływowa) kontrola działania układu CR w oparciu o pomiar przelewu z poszczególnych wtryskiwaczy.
- Przygotowanie paliwa do testu.
- Przeprowadzenie wstępnej, 10 godzinnej części testu silnikowego w warunkach podanych w tablicy 1, w celu ustabilizowania parametrów działania układu wtrysku paliwa typu *Common Rail*.
- Wykonanie początkowych pomiarów wielkości zadymienia i masowej emisji cząstek stałych zgodnie z wymaganiami procedury badawczej ISO-8178-1, w poniżej podanych, dwóch (różniących się parametrami) warunkach (fazach pomiarowych) pracy silnika, scharakteryzowanych jego obciążeniem i prędkością obrotową: I faza pomiarowa (20 Nm, 3800 obr/min), II faza pomiarowa (120 Nm, 1000 obr/min).
- Przeprowadzenie (o ile układ wtryskowy nie ulegnie wcześniej awarii) pełnego, 200-godzinnego testu silni-

kowego (wliczając w ten czas 10-godzinną stabilizację parametrów pracy układu wtrysku paliwa) w warunkach cyklicznego testu 4-fazowego (tablica 1).

Tablica 1. Parametry 4-fazowego cyklu silnikowego

Nr fazy	Czas [s]	Prędkość obrotowa silnika [obr/min]	Obciążenie silnika [Nm]
1	30	800	~0
2	300	1850	100
3	120	3000	70
4	120	1500	50

- **Pierwsza faza** – symuluje pracę nieobciążonego silnika na niskiej prędkości obrotowej (bieg jałowy),
- **Druga faza** – przejście z pierwszej do drugiej oraz druga faza odzwierciedlają pracę silnika przy przyspieszaniu i średnim obciążeniu (warunki ruszania i rozpędzania pojazdu),
- **Trzecia faza** – symuluje wydłużoną pracę średnio obciążonego silnika, pracującego z dość dużą prędkością obrotową (warunki swobodnego poruszania się pojazdu po ulicach miasta),
- **Czwarta faza** – symuluje warunki pracy średnio obciążonego silnika, pracującego z małą prędkością obrotową (warunki poruszania się pojazdu po zatłoczonych ulicach miasta).

- Wykonywanie, podczas prowadzenia testu, okresowych pomiarów masowej emisji cząstek stałych (w wyżej opisanych warunkach) i wielkości zadymienia w trzech odmiennych stanach obciążenia silnika, odzwierciedlających typowe warunki jego pracy podczas eksploatacji pojazdu zaopatrzonego w taki silnik w mieście; scharakteryzowane prędkością obrotową silnika oraz wielkością otwarcia (wydatku) pompy wtryskowej w sposób następujący: I – (1000 obr/min i 15%), II – (1800 obr/min i 20%), III – (3800 obr/min i 30%) i dodatkowo na biegu jałowym. Pomiary powinny być wykonywane po każdym 50 godzinach testu, za wyjątkiem drugiego pomiaru, który wypada po 40 godzinach, z uwagi na przesunięcie pomiaru wstępnego o 10 godzin.
- Po zakończeniu testu, zdemontowanie z silnika podzespołów układu *Common Rail*, którego elementy podlegają ocenie, oraz filtra paliwa.
- Przeprowadzenie oceny filtra paliwa na przepływowym stanowisku testowym.
- Ocena mikroskopowa elementów wtryskiwaczy i pompy wtryskowej oraz wykonanie analizy typowych form degradacji materiału.

Bardzo wysokie koszty przeprowadzenia pojedynczego testu, związane w pierwszym rzędzie z każdorazowym, trwałym uszkodzeniem kluczowych podzespołów układu wtrysku paliwa typu *Common Rail* (i koniecznością ich wymiany) oraz przewidziane środki na realizację projektu wymusiły ograniczenie liczby wykonanych testów symulacyjno-poznawczych do czterech. W związku z powyższym, przyjmując założenia prowadzenia każdego z testów brano pod uwagę przede wszystkim najczęściej występujące zagrożenia, skutkujące przedwczesnym uszkodzeniem badanego układu i powodujące jego dysfunkcję. Dążąc do odtworzenia możliwych, niekorzystnych interakcji, jakie mogą zachodzić pomiędzy czynnikami drastycznie przyspieszającymi procesy zużycia lub powodującymi dysfunkcje układu *Common Rail*, kierowano się spostrzeżeniami i wynikami ocen uszkodzeń powstałych w warunkach rzeczywistej eksploatacji przedmiotowych układów. W konsekwencji wykonano następujące testy:

Test nr I – wpływ zanieczyszczeń stałych o drobnej granulacji (pomiędzy 4 a 14 μm), zawartych w oleju napędowym, na możliwość uszkodzenia układu wtryskowego typu CR

Początkowe pomiary wielkości masowej emisji cząstek stałych, wykonywane zgodnie z przyjętą procedurą badania, dla fazy pomiarowej I dały następujące wyniki: emisja masowa PM: 2,08 mg, emisja jednostkowa:

0,521 g/kWh, a dla fazy pomiarowej II: emisja masowa PM: 3,80 mg, emisja jednostkowa: 0,245 g/kWh.

Wyniki pomiarów zadymienia w warunkach pracy silnika, oznaczonych jako I: 15,2%, II: 14,4%, III: 9,2%, dodatkowo na biegu jałowym: 4,2%.

Po przepracowaniu zaledwie 26 godzin w teście, wystąpiły trudności w ponownym uruchomieniu silnika. Po uruchomieniu, próby jego obciążania powodowały nierównomierną pracę i w konsekwencji silnik zatrzymywał się. W związku z powyższym test został zakończony. Wyżej opisane przyczyny nie pozwoliły na wykonanie drugiego pomiaru wielkości emisji PM oraz dymienia silnika.

Test nr II – wpływ zanieczyszczeń stałych o średniej granulacji (powyżej 14 μm), zawartych w oleju napędowym, na możliwość uszkodzenia układu wtryskowego typu CR

Wykonane zgodnie z przyjętą procedurą; na początku (po 10 godzinach) i w czasie prowadzenia testu, pomiary wielkości masowej emisji cząstek stałych oraz zadymienia dały wyniki przedstawione w tablicy 2.

Test trwał 164 godziny, po czym wystąpiły trudności w ponownym uruchomieniu silnika. Po uruchomieniu, próby jego obciążania powodowały nierównomierną pracę i w konsekwencji silnik zatrzymywał się. W związku z powyższym test został zakończony.

Test nr III – wpływ biopaliwa (oleju napędowego zawierającego 10% (V/V) FAME) na możliwość uszkodzenia układu wtryskowego typu CR

Wykonane zgodnie z założoną procedurą; na początku (po 10 godzinach) i w czasie prowadzenia testu, pomiary wielkości masowej emisji cząstek stałych i zadymienia dały wyniki przedstawione w tablicy 3.

Po 252 godzinach prowadzenia testu zaczęto obserwować nierównomierną pracę silnika przy dużych obciążeniach. Występowały też przypadki „gaśnięcia” silnika podczas jego pracy pod dużym obciążeniem. Zmierzone po 250 godzinach wielkości emisji PM oraz zadymienia wykazały ich znaczący przyrost w stosunku do wcześniejszych pomiarów (tablica 3). W związku z powyższym test został zakończony.

Test nr IV – wpływ podwyższonej zawartości wody w oleju napędowym na możliwość uszkodzenia układu CR

Wykonane zgodnie z założoną procedurą; na początku (po 10 godzinach) i w czasie prowadzenia testu, pomiary wielkości masowej emisji cząstek stałych i zadymienia dały wyniki przedstawione w tablicy 4.

Po przepracowaniu 76 godzin w teście silnik zatrzymał

Tablica 2. Wyniki pomiarów emisji PM oraz wielkości zadymienia w czasie prowadzenia testu symulacyjnego nr II

Czas testu [h]	Wielkość emisji PM				Wielkość zadymienia			
	I faza pomiaru		II faza pomiaru		Warunki pracy silnika			
	[mg]	[g/kWh]	[mg]	[g/kWh]	I	II	III	bieg jałowy
10	2,02	0,503	3,65	0,227	15,8	14,2	9,5	4,6
50	2,14	0,572	3,88	0,285	16,3	15,1	9,8	4,8
100	2,38	0,612	4,02	0,304	16,8	16,2	10,7	5,9
150	2,85	0,680	4,68	0,372	18,4	19,5	14,8	8,5

Tablica 3. Wyniki pomiarów emisji PM oraz wielkości zadymienia w czasie prowadzenia testu symulacyjnego nr III

Czas testu [h]	Wielkość emisji PM				Wielkość zadymienia			
	I faza pomiaru		II faza pomiaru		Warunki pracy silnika			
	[mg]	[g/kWh]	[mg]	[g/kWh]	I	II	III	bieg jałowy
10	1,70	0,410	2,72	0,204	12,7	11,2	9,5	4,3
50	1,72	0,411	2,70	0,207	12,1	11,6	9,4	4,4
100	1,74	0,415	2,71	0,206	12,2	11,6	9,5	4,7
150	1,77	0,427	2,83	0,210	12,7	11,8	9,8	4,8
200	1,82	0,437	3,90	0,227	13,0	11,9	9,9	4,9
250	2,18	0,544	3,81	0,319	14,8	13,4	11,5	6,7

Tablica 4. Wyniki pomiarów emisji PM oraz wielkości zadymienia w czasie prowadzenia testu symulacyjnego nr IV

Czas testu [h]	Wielkość emisji PM				Wielkość zadymienia			
	I faza pomiaru		II faza pomiaru		Warunki pracy silnika			
	[mg]	[g/kWh]	[mg]	[g/kWh]	I	II	III	bieg jałowy
10	2,40	0,570	3,72	0,258	14,7	13,2	9,9	4,3
50	2,82	0,627	4,38	0,389	15,1	14,6	10,7	6,4

się, a jego próby ponownego uruchomienia kończyły się krótkotrwałą pracą (kilka sekund) w trybie awaryjnym, po czym silnik ponownie zatrzymywał się. W związku z powyższym test został przerwany, z powodu niemożności jego kontynuowania.

Po każdym z przeprowadzonych testów dokonywano szczegółowej oceny uszkodzeń elementów układów wtrysku paliwa, określając formy zużycia i miejsca, gdzie zostały stwierdzone. Ponadto oceniano zmiany średniej wielkości oporów przepływu przez filtr paliwa.

Uzyskane wyniki – podsumowanie

W ramach realizacji projektu przeprowadzono szerokie, wstępne analizy poznawcze uszkodzeń elementów różnych typów układów wtrysku paliwa CR, pochodzących z pojazdów wielu producentów, eksploatowanych w warunkach rzeczywistych. Analizy te obejmowały również określenie wpływu wielu czynników, w tym: konstrukcyjnych, materiałowych i eksploatacyjnych, na podatność układów na różnego rodzaju uszkodzenia. Szczególny nacisk położono na zapoznanie się z uszkodzeniami, do powstania których przyczyniła się nieodpowiednia jakość paliwa – określana między innymi wymaganiami normy PN-EN 590

i Światowej Karty Paliw. Wykonano testy symulacyjne na stanowisku silnikowym w celu zainicjowania wcześniej zaobserwowanych zjawisk i procesów przyspieszonego zużycia, skutkujących powstawaniem oczekiwanych form zużycia, spowodowanych zawartymi w oleju napędowym zanieczyszczeniami lub dodanym biokomponentem. Badania te miały na celu weryfikację wcześniej postawionych hipotez i bardziej szczegółowe zapoznanie się z mechanizmami, przebiegiem, formą powstałego zużycia i czasem, po jakim może wystąpić ewentualne uszkodzenie w warunkach prowadzenia testu, i przy zastosowaniu

wcześniej przygotowanego paliwa o ściśle określonych właściwościach. Poniżej w tablicy 5 zebrano uzyskane wyniki testów w postaci poczynionych obserwacji, określając równocześnie, jakie potencjalne zagrożenia stwarzają zanieczyszczenia lub biokomponenty zawarte w paliwach, dla poprawnego funkcjonowania układów wtrysku paliwa typu *Common Rail*, a także wskazując hipotetyczne czynniki sprzyjające powstawaniu, bądź przyspieszające rozwój

zaistniałych uszkodzeń. Owe hipotetyczne czynniki zostały podane w oparciu o wcześniejszą analizę wielu uszkodzonych w rzeczywistej eksploatacji układów *Common Rail*, pozyskanych lub ocenianych na zlecenie serwisów samochodowych, reprezentujących różnych producentów pojazdów. Analiza wyników przeprowadzonych testów doprowadziła do potwierdzenia wcześniej wysuniętych hipotez, że określone właściwości paliwa – w tym między

Tablica 5. Rodzaje uszkodzeń, formy zużycia i przyczyny ich zaistnienia w układach CR

Nr testu symulacyjnego	Rodzaj zanieczyszczenia lub dodatku do oleju napędowego	Stwierdzone uszkodzenia (niesprawności)	Formy zużycia materiału	Hipotetyczne czynniki sprzyjające powstaniu uszkodzenia
I	zanieczyszczenia stałe o drobnej granulacji	– zużycie trybologiczne	– zużycie ściernie – zużycie adhezyjne – scuffing	– stały lub okresowy brak czynnika smarnego pomiędzy współpracującymi powierzchniami
II	zanieczyszczenia stałe o średniej granulacji	– koksowe osady na rozpylaczach wtryskiwaczy	– zużycie przez utlenianie – zużycie zmęczeniowe • powierzchniowe • objętościowe – zużycie przez łuszczenie – pitting – fretting	– niedostateczne właściwości smarne paliwa – niedokładna obróbka mechaniczna współpracujących powierzchni materiału – niewłaściwa obróbka cieplnochemiczna współpracujących powierzchni materiału – siarka zawarta w paliwie – skład paliwa – właściwości detergentowe paliwa – wysoka temperatura
III	10% (I/T) FAME	– zużycie trybologiczne – koksowe osady na rozpylaczach wtryskiwaczy – osady lakowe i/lub żywiczne na wewnętrznych elementach składowych podzespołów mechanicznych	– zużycie ściernie – zużycie adhezyjne – zużycie przez utlenianie – fretting	– stały lub okresowy brak czynnika smarnego pomiędzy współpracującymi powierzchniami – zanieczyszczenia stałe w paliwie – niedokładna obróbka mechaniczna współpracujących powierzchni materiału – niewłaściwa obróbka cieplnochemiczna współpracujących powierzchni materiału – siarka zawarta w paliwie – skład paliwa – właściwości detergentowe paliwa – wysoka temperatura
IV	woda	– korozja chemiczna – zużycie trybologiczne – koksowe osady na rozpylaczach wtryskiwaczy	– zużycie korozyjne – korozja powierzchniowa – korozja punktowa – korozja plamowa – wżery korozyjne – korozja międzykrystaliczna – zużycie ściernie – zużycie adhezyjne – scuffing – zużycie przez utlenianie – zużycie zmęczeniowe • powierzchniowe • objętościowe – zużycie przez łuszczenie – pitting – fretting	– korozyjne właściwości paliwa – siarka zawarta w paliwie – kwaśny lub zasadowy odczyn wyciągu wodnego paliwa – stały lub okresowy brak czynnika smarnego pomiędzy współpracującymi powierzchniami – niedostateczne właściwości smarne paliwa – niedokładna obróbka mechaniczna współpracujących powierzchni materiału – niewłaściwa obróbka cieplnochemiczna współpracujących powierzchni materiału – siarka zawarta w paliwie – skład paliwa – właściwości detergentowe paliwa – wysoka temperatura

innymi: zawartość zanieczyszczeń stałych, zawartość wody i zawartość biokomponentów – mogą mieć istotny, a w niektórych przypadkach decydujący wpływ na powstawanie i rozwój różnych form zużycia kluczowych, funkcjonalnych elementów układu wtrysku paliwa typu CR, co prowadzi do ich uszkodzenia i/lub przedwczesnego zużycia.

Okresowe pomiary wielkości masowej emisji cząstek stałych oraz dymienia podczas prowadzonych testów pozwoliły stwierdzić, że postępujące procesy zużycia (zanieczyszczenia) elementów roboczych układów *Common Rail* znacząco pogarszają emisję masową PM i wielkość zadymienia – tablice 2, 3 i 4. Na podstawie przeprowadzonych obserwacji można wysunąć hipotezę, że progresywny przyrost wielkości emisji PM oraz dymienia (poprzedzający awarię układu wtrysku paliwa) jest związany z ilościowym i jakościowym pogarszaniem procesu rozpylania paliwa (zaburzenia kształtu rozpylanej strugi, ograniczenia ilości wypływającego paliwa, obniżanie ciśnienia wypływu

rozpylanego paliwa, zawieszanie się lub zacieranie iglic rozpylaczy – bądź iglic sterujących przepływem paliwa przez wtryskiwacze – degradacja wysokociśnieniowej pompy wtryskowej itp.).

Wykonane po każdym teście symulacyjnym oceny przepływowe filtrów paliwa pozwoliły stwierdzić szybki wzrost oporów przepływu, jaki ma miejsce zwłaszcza w przypadku zasilania silnika biopaliwem, oraz nieco mniejszy przy stosowaniu olejów napędowych zawierających zanieczyszczenia stałe – co wskazuje na konieczność skrócenia okresów między wymianami filtrów, aby nie dopuścić do dysfunkcji układu wtrysku paliwa. Podwyższona zawartość wody w paliwie bezpośrednio nie powoduje wzrostu oporów przepływu przez filtr paliwa, jednak stwarza konieczność częstego opróżniania odstoju wody, stanowiącego część obudowy filtra – co w znacznej mierze ogranicza przedostawanie się wody do układu *Common Rail* i powstawania związanych z tym uszkodzeń.

Recenzent: doc. dr Michał Krasodowski

Literatura

- [1] Philip J.G., Dingle and Ming-Chia D.Lai.: *Diesel Common Rail and Advanced Fuel Injection Systems*. SAE International, 2005.
- [2] Richter K., Gotre W., Barbour R., Kudlich W., Knittel S.: *Fuel Detergent Benefits In Modern Heavy Duty Diesel Vehicles Operating on S-Free Diesel*. FUELS, 5th International Colloquium, 2005.
- [3] Farooq K.: *High Efficiency Diesel Fuel Filtration – A Case Study*. SAE 952554.
- [4] Durst M., Klein G.-M., Moser N.: *Automotive Filtration*. Verlag Moderne Industries, 2002.
- [5] *Fuel Filter Test Methods*; SAE J905 Jan-87 Test Procedure.
- [6] Mayer K., Livingston T.C.: *Diesel Fuel Lubricity – Requirements for Light Duty Fuel Injection Equipment*. CARB Fuels Workshop, Sacramento, CA Feb. 20, 2005.
- [7] Stępień Z., Urzędowska W.: *Badanie wpływu oleju smarującego silnik o zapłonie samoczynnym na emisję cząstek stałych w spalinach przy zasilaniu silnika paliwem z biokomponentami*. Dokumentacja ITN nr 3836, 2004.
- [8] Stępień Z., Urzędowska W., Roźniatowski K.: *Influence of Fuel Quality on Advanced Diesel Injection Systems Failures*. 8th International Congress, Engine Combustion Processes, Monachium 15-16.03.2007.
- [9] Urzędowska W., Stępień Z.: *Badanie wpływu oleju smarującego silnik o zapłonie samoczynnym na emisję cząstek stałych w spalinach*. Dokumentacja ITN nr 3633/2002 i 3741/2003.
- [10] Worldwide Fuel Charter, September 2006.



Mgr inż. Wiesława URZĘDOWSKA – z-ca kierownika Zakładu Oceny Właściwości Eksploatacyjnych INiG w Krakowie. Specjalista w zakresie oceny właściwości użytkowych paliw i środków smarowych. Kierownik i uczestnik licznych projektów badawczych na rzecz przemysłu rafineryjnego. Autor i współautor dokumentacji badawczych, projektów oraz patentów.



Dr inż. Zbigniew STĘPIEŃ – kierownik Pracowni Badań Silnikowych i Trybologicznych INiG 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.