

Dr inż. Tomasz Osipowicz

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych
Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin, Polska

E-mail: Tomasz.Osipowicz@zut.edu.pl

Dr inż. Karol Franciszek Abramek

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych
Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin, Polska

E-mail: Karol.Abramek@zut.edu.pl

Katalityczna obróbka paliwa we wtryskiwaczach silnika o zapłonie samoczynnym

Słowa kluczowe: *silnik spalinowy, emisja substancji toksycznych, obróbka paliwa, wtryskiwacze, modelowanie wtrysku paliwa*

Streszczenie: Celem zaproponowanych i przeprowadzonych przez autorów badań była ocena wpływu zastosowania nośnika katalitycznego w postaci platyny we wtryskiwaczu paliwowym silnika z zapłonem samoczynnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa na emisję substancji toksycznych w gazach wylotowych do atmosfery oraz jednostkowe zużycie paliwa. Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone na stanowisku hamownianym wyposażonym w silnik 359 oraz hamulec hydrauliczny z kompletną aparaturą pomiarową. Podczas badań silnik pracował według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej. Analiza przeprowadzonych badań wykazała, że istnieje możliwość ograniczenia emisji związków toksycznych do otoczenia oraz zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa poprzez zastosowanie powłoki katalitycznej we wtryskiwaczu paliwowym silnika ZS.

1. Wstęp

Rozwój tłokowych silników spalinowych w ostatnich latach kierowany jest na poprawę ekologicznych i ekonomicznych parametrów roboczych. Ekologiczne parametry pracy silnika dotyczą emisji substancji toksycznych do atmosfery w gazach wylotowych, natomiast ekonomiczne zużycia paliwa. Wymagania związane z obniżeniem emisji substancji toksycznych do atmosfery oraz obniżeniem zużycia paliwa stają się coraz bardziej rygorystyczne [1]. Aby je spełnić zastosowano elektroniczne układy sterujące przebiegiem charakterystyki wtryskiwania paliwa oraz urządzenia służące do oczyszczania spalin w postaci reaktorów katalitycznych w układach wylotowych. Prowadzone są również badania nad wykorzystaniem katalizatorów w komorach spalania silników. Rozwiązania te stosowane są w elementach silnika, które bezpośrednio związane są ze spalaniem i redukcją powstałych związków toksycznych, czyli w aparaturze wtryskowej, komorze spalania i układach wydechowych [2, 5]. Proces roboczy silnika wiąże się z procesem spalania mieszaniny paliwowo – powietrznej. Cykl ten składa się z: przygotowania mieszaniny do spalania,

spalania oraz oczyszczania spalin. Najważniejszym etapem w wymienionym łańcuchu zdarzeń jest przygotowanie mieszaniny do spalania.

Proces spalania mieszaniny paliwowo – powietrznej w komorze spalania silnika o zapłonie samoczynnym składa się z kilku etapów. Analiza podjętej tematyki w pracy dotyczy pierwszego i zarazem najważniejszego, jakim jest okres opóźnienia samozapłonu. Jest to czas, który obejmuje moment pojawienia się pierwszych kropeł paliwa w komorze spalania do momentu ich samozapłonu. Ma on bezpośredni wpływ na moment w którym dochodzi do spalania kinetycznego. Dąży się do tego, aby okres opóźnienia samozapłonu był jak najkrótszy. Im dłużej trwa, tym więcej paliwa gromadzi się w cylindrze, a to powoduje, że spalanie w drugim okresie odbywa się gwałtownie, wywołując dużą szybkość narastania ciśnienia [25].

Główne parametry fizyczne paliwa w silnikach o to: gęstość, lepkość i napięcie powierzchniowe. Wpływają one bezpośrednio na średnicę kropli, kształt i zasięg strugi rozpylonego paliwa i związane są z okresem opóźnienia samozapłonu. Parametry chemiczne paliwa natomiast zależą od składu strukturalnego węglowodorów, spośród których najbardziej liczną grupę przedstawiają węglowodory parafinowe C_nH_{2n+2} .

Właściwości chemiczne paliwa można zmienić dzięki odwodornieniu parafin, a mianowicie w obecności katalizatora mogą zachodzić reakcje, w wyniku których parafiny przekształcają się w węglowodory grupy olefinowej C_nH_{2n} z wydzieleniem cząsteczki wodoru. Z kolei wodór dzięki dużemu współczynnikowi dyfuzji w powietrzu, dużej zdolności do zapłonu i szybkości spalania oraz szerokim granicom palności mieszanki skraca okres opóźnienia samozapłonu w warunkach panujących w komorze spalania. Biorąc pod uwagę te fakty, można stwierdzić, że odpowiednie przygotowanie paliwa w postaci zmiany jego parametrów fizykochemicznych może poprawić zarówno ekonomiczne, jak i ekologiczne wskaźniki pracy silników z zapłonem samoczynnym [9].

Korzystna zmiana parametrów chemicznych paliwa możliwa jest przez wstępną obróbkę przeprowadzoną bezpośrednio przed jego wtrysnięciem do komory spalania przy kontakcie paliwa z materiałem o działaniu katalitycznym w korpusie wtryskiwacza. Stąd podjęta przez Autorów próba oceny wpływu nośnika katalitycznego, którą stanowi platyna, zastosowana w układzie zasilania silnika na przebieg procesu spalania w silniku o zapłonie samoczynnym, co ma bezpośredni wpływ na zużycie paliwa i emisję substancji toksycznych. Zagadnienie to nie jest obecnie stosowane w silnikach.

2. Analiza literatury dotycząca tematyki artykułu

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury można stwierdzić, że katalizatory znalazły zastosowanie głównie w układach wydechowych silników spalinowych, natomiast prowadzone są badania nad zastosowaniem ich w komorze spalania oraz w układach wtryskowych [3, 4, 6, 7, 10, 14, 15, 16, 17, 20, 21, 22, 24].

Analiza literatury naukowo – badawczej wskazuje, że sposobem na zmianę parametrów fizycznych paliwa przed jego rozpylaniem do komory spalania jest metoda termiczna, która polega na jego podgrzaniu. Spalanie podgrzanego paliwa umożliwia sterowanie początkowym okresem spalania, a tym samym pozwala na obniżenie maksymalnych ciśnień w komorze spalania oraz prędkości ich narastania, ponadto powoduje obniżenie hałaśliwości oraz wzrost trwałości silnika. Wyniki badań reprezentują pogląd, że podgrzanie paliwa do temperatury 503 K zmniejsza szybkości narastania ciśnienia w cylindrze, obniża zadymienie spalin oraz jednostkowe zużycia paliwa [12]. Podwyższenie temperatury paliwa przyspiesza reakcje krakingowania paliwa w komorze spalania z uwagi na skrócenie czasu nagrzewania się jego powoduje skrócenie okresu opóźnienia samozapłonu [9]. Wtryskiwanie wstępnie podgrzanego paliwa do temperatury około 503 K do komory spalania silnika powoduje także

znaczące zmniejszenie nierównomierności maksymalnego ciśnienia spalania w cylindrach co wpływa na jego pracę.

Jednym ze sposobów na podgrzanie paliwa w układzie wtryskowym silników ZS jest instalacja podgrzewaczy elektrycznych w zbiorniku [9]. Taki sposób umożliwia uzyskanie prawie każdej temperatury, ale para tłoczona będzie pracowała w innych warunkach przy zmienionej gęstości i lepkości paliwa. Takie rozwiązanie wpływa negatywnie na eksploatację pomp wtryskowych. Inną metodą zmiany temperatury oleju napędowego jest zastosowanie elementu grzewczego w przewodach wysokiego ciśnienia. Z kolei to rozwiązanie powoduje zmiany ciśnienia co wpływa na charakterystyki wtrysku [11]. Kolejną metodą na zwiększenie temperatury wtryskiwanego paliwa jest zastosowanie układu podgrzewania paliwa we wtryskiwaczu czopikowym poprzez wykonanie w nim dodatkowego kanału pierścieniowego doprowadzającego paliwo do komory spalania [6]. Kanał ten powoduje, że ciecz dodatkowo opływa końcówkę wtryskiwacza nagrzewając się od niej. Proces ten nie wpływa na zjawiska falowe w przewodach wysokiego ciśnienia, ani na pracę pompy wtryskowej. Dodatkowo istnieje możliwość zastosowania katalizatorów w kanałach doprowadzających ciecz we wtryskiwaczach czopikowych, których działanie może zmienić parametry chemiczne paliwa poprzez reakcję odwodornienia węglowodorów [13].

Katalityczna obróbka paliwa w kombinacji z termiczną może być realizowana we wtryskiwaczach czopikowych przy usytuowaniu katalizatora w układzie chłodzenia rozpylacza, natomiast we wtryskiwaczach wielootworowych na nieprecyzyjnej części iglicy.

3. Cele badawcze

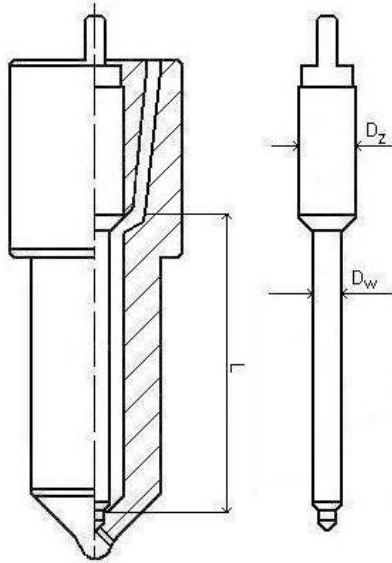
Celem przeprowadzonych przez Autorów badań było określenie wpływu powłoki katalitycznej we wtryskiwaczu silnika o zapłonie samoczynnym z bezpośrednim wtryskiem paliwa na emisję substancji toksycznych do atmosfery oraz jednostkowe zużycie paliwa. Niniejszy artykuł dotyczy badań emisji tlenków azotu, tlenku węgla, zadymienia spalin oraz emisji dwutlenku węgla silnika ZS poprzez wprowadzenie katalizatora w postaci platyny na niepracującą część iglicy wtryskiwacza. Badania silnikowe zostały przeprowadzone na hamowni silnikowej. Podczas badań silnik pracował według zewnętrznej charakterystyki prędkościowej w zakresie częstotliwości obrotowej 1200 – 2700 min⁻¹. Badania hamowniane zostały przeprowadzone przy następujących ustawieniach silnika: kąt wyprzedzenia wtrysku 18,5° przed GMP (górnym martwym punktem), ciśnienie wtrysku 22 MPa (ciśnienie fabryczne). Pomiarów dokonano w ustalonych warunkach pracy, przy wybranych wartościach częstotliwości obrotowej. Obiektami badań były wtryskiwacze paliwowe fabryczne oraz z powłoką katalityczną nałożoną na niepracującą część iglicy.

4. Określenie temperatury panującej w końcówce wtryskiwacza wielootworowego

W celu określenia temperatury paliwa podczas przepływu we wtryskiwaczu wielootworowym (rys. 1) wykorzystano wzory na wymianę ciepła i przepływu cieczy przez kanał rurowy i ustalono wymianę ciepła poprzez przenikanie [18, 23].

Dane dotyczące paliwa:

- Masa właściwa paliwa $\gamma = 840 \text{ kg/m}^3$
- Ciepło właściwe $c = 2140 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- Przewodność cieplna $k = 0,1433 \text{ J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$
- Współczynnik przenikania ciepła $\lambda = 165 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$



Rys. 1. Schemat wtryskiwacza wielootworowego

Dane wtryskiwacza:

$$D_z = 0,005 \text{ [m]}$$

$$D_w = 0,0045 \text{ [m]}$$

$$L = 0,0275 \text{ [m]}$$

$$g_v = 0,0000094 \text{ [m}^3\text{/s]}$$

Matematyczny model wielootworowego wtryskiwacza paliwowego zaproponowany przez autorów:

Czas jednego cyklu:

$$T_w = \frac{120}{n} \text{ [s]} \quad (1)$$

Objętość paliwa wtryskiwana podczas jednego wtrysku:

$$V_0 = T_w \cdot g_v \text{ [m}^3\text{]} \quad (2)$$

Paliwo, które opływa iglicę wtryskiwacza tworzy wokół niej pierścien (w przekroju). W celu ułatwienia obliczeń wymiany ciepła pomiędzy ściankami końcówki wtryskiwacza a paliwem konieczna jest zamiana przekroju pierścieniowego na przekrój kołowy [18].

Pole przekroju słupka paliwa:

$$P_1 = \frac{\pi}{4} (D_z^2 - D_w^2) \text{ [m}^2\text{]} \quad (3)$$

Średnica kanału zastępczego:

$$D_1 = \sqrt{\frac{\pi}{4} P_1} \text{ [m]} \quad (4)$$

Objętość kanału zastępczego:

$$V_1 = P_1 \cdot L \text{ [m}^3\text{]} \quad (5)$$

Ilość dawek paliwa przypadająca na objętość kanału końcówki wtryskiwacza:

$$j = \frac{V_0}{V_1} \quad (6)$$

Czas wtrysku paliwa:

$$\tau_w = \frac{\varphi}{720} T_w \text{ [s]} \quad (7)$$

gdzie φ – kąt obrotu wału korbowego

Długość odcinka odpowiadająca dawce paliwa o określonej objętości l :

$$l = \frac{L}{j} \text{ [m]} \quad (8)$$

Pole powierzchni bocznej słupka cieczy o długości l wypełniającej kanał f :

$$f = \pi \cdot D_1 \cdot l \text{ [m}^2\text{]} \quad (9)$$

Objętość słupka paliwa na długości l :

$$V_s = l \cdot P_1 \text{ [m}^3\text{]} \quad (10)$$

Masa dawki paliwa odnosząca się do długości l :

$$m = V_s \cdot \gamma \text{ [kg]} \quad (11)$$

Prędkość paliwa w kanale:

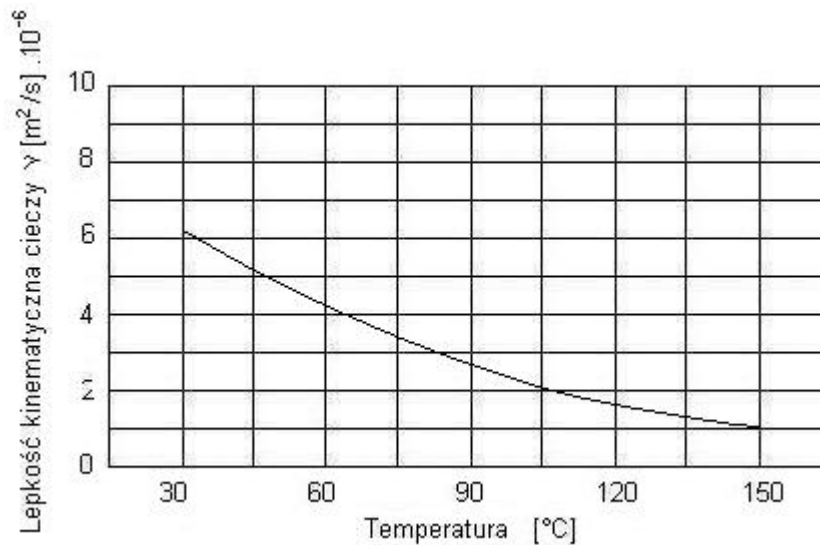
$$u = \frac{l}{\tau} \text{ [m/s]} \quad (12)$$

Liczba Reynoldsa:

$$Re = \frac{2D_1 u}{\nu} \quad (13)$$

Do odczytania wartości lepkości kinematycznej z wykresu rys. 2 potrzebna jest temperatura paliwa T_0 :

$$T_0 = \frac{T_{pi} + T_{sci}}{2} \text{ [K]} \quad (14)$$



Rys. 2. Zmiana lepkości paliwa w zależności od temperatury

Liczba Prandtla dla paliwa wpływającego do odcinka kanału liczonego przy średniej arytmetycznej temperatury ścianki i płynu:

$$Pr = \frac{\nu \cdot c \cdot \gamma}{\lambda} \quad (15)$$

Współczynnik oddawania ciepła przy przepływie przez kanał:

$$\alpha_i = 0,023 \frac{\lambda}{2D_1} Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (16)$$

Współczynnik uwzględniający geometrię kanału:

$$\eta = \frac{2}{D_1} \quad (17)$$

Współczynnik uwzględniający właściwości fizyczne paliwa przy przepływie:

$$\beta_i = \frac{\alpha_i}{c \cdot \lambda \cdot u} \quad (18)$$

Współczynnik uwzględniający wymianę ciepła między ścianką rozpylacza i paliwem wpływającym do kanału:

$$\Theta = 0,9993 \cdot e^{-2\eta\beta_i} \quad (19)$$

Temperatura paliwa po przepływie przez i – ty odcinek kanału:

$$T_{dyni} = T_{sci} - \Theta \cdot (T_{sci} - T_{pi}) \text{ [K]} \quad (20)$$

Ilość ciepła dostarczonego do paliwa podczas jego postoju w kanale rozpylacza:

$$Q = k \cdot f \cdot (T_{sci} - T_{pi}) \cdot (T_w - \tau_w) \text{ [J]} \quad (21)$$

Przyrost temperatury paliwa podczas przestoju na i – tym odcinku kanału:

$$\Delta T_i = \frac{Q_i}{m \cdot c} \text{ [K]} \quad (22)$$

Temperatura końcowa paliwa na wyjściu z i – tego odcinka kanału T_{ki} :

$$T_{ki} = T_{dyni} + \Delta T_i \text{ [K]} \quad (23)$$

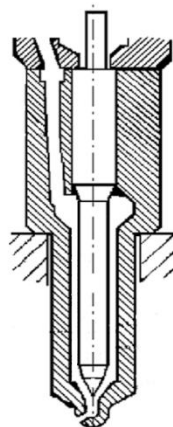
Przyrost temperatury paliwa na całej długości kanału:

$$\Delta T_k = T_{ki} - T_{pi} \text{ [K]} \quad (24)$$

Celem badań analitycznych było określenie temperatury wewnątrz wtryskiwacza paliwowego, ponieważ należało dobrać odpowiedni materiał o działaniu katalitycznym. Obliczenia wykazały, że temperatura paliwa opływającego iglicę w rozpylaczu wynosi około 343 K. Na podstawie analizy literatury istnieje możliwość zastosowania platyny jako materiału o działaniu katalitycznym, który działa poprawnie jako katalizator w warunkach temperaturowych we wtryskiwaczu paliwowym [19].

5. Charakterystyka obiektu badań

Obiektem badań były wtryskiwacze wielootworowe silnika 359 z zapłonem samoczynnym i bezpośrednim wtryskiem paliwa przedstawione na rys. 3 i 4 [7].



Rys. 3. Schemat końcówki wtryskiwacza wielootworowego silnika 359

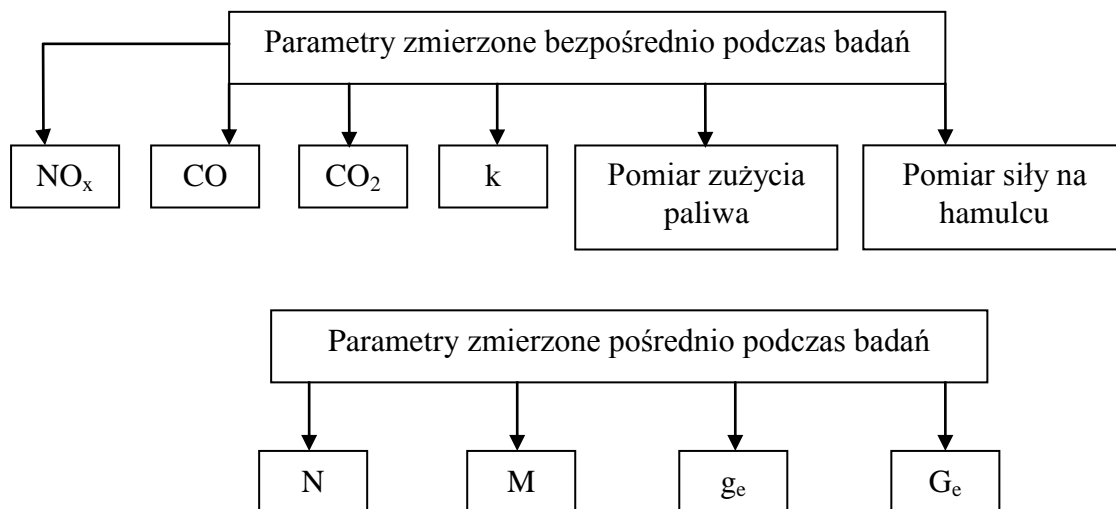
Na podstawie analizy literatury stwierdzono, że najodpowiedniejszym katalizatorem ze względu na temperaturę panującą w końcówce wtryskiwacza jest platyna [9]. Z tego powodu, niepracującą część iglicy wtryskiwacza pokryto powłoką katalityczną w postaci platyny, co przedstawiono na rys. 4 [8].



Rys. 4. Iglica z naniesioną powłoką katalityczną na niepracującej części [8]

6. Metodyka przeprowadzania badań

Badania prowadzone były według schematu:



Moc silnika obliczono z zależności:

$$N = \frac{n \cdot P}{1160} [kW] \quad (23)$$

Moment obrotowy silnika obliczono z zależności:

$$M = 8,231 \cdot P [Nm] \quad (24)$$

Jednostkowe zużycie paliwa obliczono z zależności:

$$g_e = \frac{3600 \cdot 103}{t \cdot N} \left[\frac{g}{kWh} \right] \quad (26)$$

Gdzie:

NO_x – tlenki azotu,

CO – tlenek węgla,

k – współczynnik zadymienia spalin,

N – moc silnika,
M – moment obrotowy,
 g_e – jednostkowe zużycie paliwa,
n – prędkość obrotowa,
P – siła na hamulcu,
t – czas przepływu paliwa w miernicy,
103 – masa paliwa w miernicy potrzebna do pomiaru [g].

Badania silnikowe przeprowadzono na stanowisku hamownianym z silnikiem 359. Pomiary toksyczności spalin przeprowadzono za pomocą dymomierza MDO oraz analizatora spalin IMR1500.

7. Opis przeprowadzonych badań

Badania laboratoryjne przeprowadzono na wtryskiwaczach Bosch CRIN o nr katalogowym 0445120219.

Celem badań laboratoryjnych była rejestracja strugi wtryskiwanego paliwa przy pomocy lampy stroboskopowej. Na rys. 5 i 6 przedstawiono obraz strugi wtryskiwanego paliwa do komory spalania.



Rys. 5. Struga wtryskiwanego paliwa we wtryskiwaczu fabrycznym

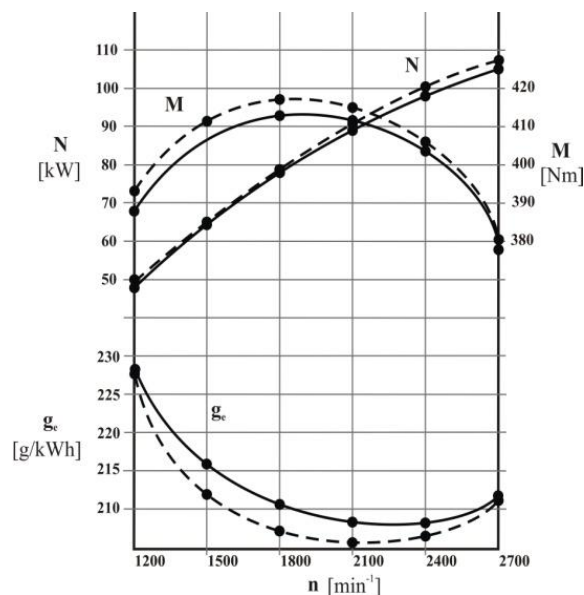


Rys. 6. Struga wtryskiwanego paliwa we wtryskiwaczu z naniesioną powłoką katalityczną

Badania laboratoryjne umożliwiły rejestrację struktury strugi wtryskiwanego paliwa. Jak widać na rys. 6 struktura strugi wtryskiwanego paliwa we wtryskiwaczu z naniesioną powłoką katalityczną uległa rozproszeniu. Poprzez katalityczną obróbkę paliwa ingerujemy we właściwości chemiczne paliwa, a nie fizyczne. Wtryskiwacz pracował przy ciśnieniu wtrysku 135 MPa oraz czasie wtrysku 1000 μs . Dawka dla wtryskiwacza fabrycznego wynosiła 364,12 mm^3/H , a dla wtryskiwacza z naniesioną powłoką katalityczną 366,24 mm^3/H . Przedział poprawnej pracy wtryskiwacza dla ciśnienia wtrysku 135 MPa i czasu wtrysku 1000 μs wynosi 370,5 +/- 11,5 mm^3/H . Dzięki temu istnieje możliwość poprawienia procesu powstawania mieszaniny palnej poprzez dokładniejsze wymieszanie się paliwa z powietrzem.

Celem badań silnikowych była analiza przebiegu charakterystyki mocy i momentu silnika oraz jego ekonomicznych i ekologicznych parametrów roboczych przy zastosowaniu wtryskiwaczy klasycznych i wtryskiwaczy z powłoką katalityczną naniesioną na niepracującą część iglicy.

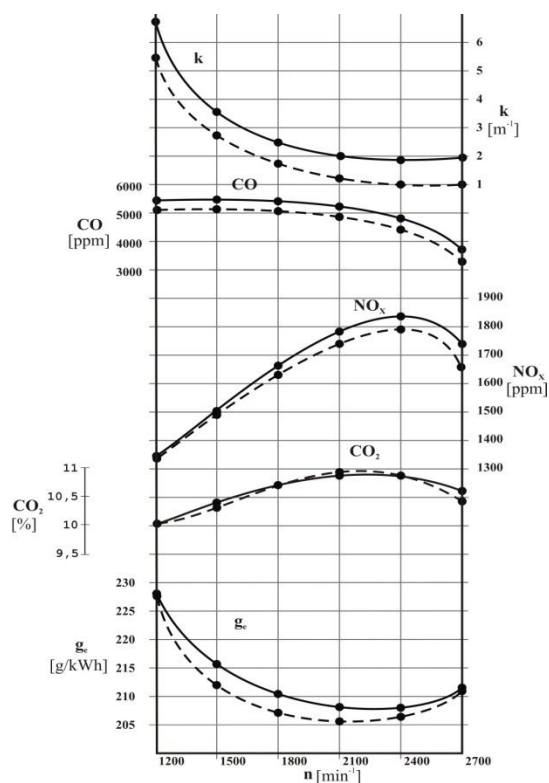
Na rys. 7 i 8 przedstawiono wyniki badań silnika 359 pracującego z wtryskiwaczami fabrycznymi oraz z naniesioną powłoką katalityczną.



Rys. 7. Porównanie podstawowych parametrów pracy silnika 359 na dwóch rodzajach wtryskiwaczy z fabrycznie ustawionym silnikiem: linia ciągła - wtryskiwacz klasyczny, linia przerywana - wtryskiwacz ze wstępną obróbką paliwa

Na rys. 7 przedstawiono wyniki badań silnika 359 w postaci zewnętrznej charakterystyki prędkościowej. Podczas badań zarejestrowano moc silnika (N), moment obrotowy silnika (M) oraz jednostkowe zużycie paliwa (g_e).

Zauważyć można, że zastosowanie warstwy katalitycznej w postaci platyny na niepracującej części iglicy spowodowało zmianę wartości momentu obrotowego, praktycznie w całym zakresie prędkości obrotowej. Natomiast wzrost mocy nastąpił od prędkości 2100 min^{-1} . Warstwa katalizatora ma także wpływ na zmniejszenie jednostkowego zużycia paliwa i dla prędkości 1800 min^{-1} wynosiła 205 g/kWh .



Rys. 8. Porównanie ekologicznych i ekonomicznych parametrów pracy silnika 359 na dwóch rodzajach wtryskiwaczy z fabrycznie ustawionym silnikiem: linia ciągła - wtryskiwacz klasyczny, linia przerywana - wtryskiwacz ze wstępną obróbką paliwa

Na rys. 8 przedstawiono wyniki badań silnika 359 w postaci zewnętrznej charakterystyki prędkościowej. Podczas badań zarejestrowano zadymienie spalin (k), emisję tlenku węgla (CO), emisję tlenków azotu (NO_x), emisję dwutlenku węgla (CO_2) oraz jednostkowe zużycie paliwa (g_e).

8. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza literatury przedmiotu badań oraz badania analityczne i eksperymentalne dotyczące zastosowania wstępnej obróbki paliwa w silnikach z zapłonem samoczynnym prowadzą do sformułowania następujących wniosków:

- korzystne zmniejszenie okresu samozapłonu uzyskać można przez zmniejszenie energii aktywacji przy wykorzystaniu zjawiska katalizy, co implikuje zastosowanie materiałów o działaniu katalitycznym w układzie wtryskowym;
- na podstawie opracowanego modelu matematycznego stwierdzono, że najlepszym katalizatorem pracującym przy temperaturze około 343 K jest platyna;
- obecnie zastosowanie katalizatorów w tłokowych silnikach spalinowych odbywa się w układach wylotowych w postaci reaktorów katalitycznych, prowadzone są nieliczne prace naukowo-badawcze nad zastosowaniem katalizatorów w komorze spalania, brak jest prac dotyczących zastosowania katalizatorów w układzie wtryskowym, co proponują autorzy;
- zaproponowano nowatorski układ wtryskiwania paliwa w silnikach z zapłonem samoczynnym w którym bezpośrednio przed rozpyleniem odbywa się obróbka katalityczna paliwa, rozwiązanie to można wykorzystać we wszystkich wtryskiwaczach wielootworowych również w systemach Common Rail;

- dokonano wyboru rodzaju katalizatora i metod ich naniesienia na elementy wtryskiwaczy paliwowych;
- opracowano koncepcję oraz wykonano modele fizyczne wtryskiwaczy wielootworowych z układem wstępnej katalitycznej obróbki paliwa;
- przeprowadzono badania eksperymentalne zaproponowanych rozwiązań konstrukcyjnych wtryskiwaczy paliwowych wyposażonych w układ wstępnej katalityczno-termicznej obróbki paliwa na stanowiskach probierczych i hamownianych;
- wyniki przeprowadzonych badań pokazują, że uzyskano poprawę ekologicznych i ekonomicznych parametrów pracy silnika,
- w celu dodatkowych badań zjawisk zachodzących w komorze spalania w wyniku wstępnej obróbki paliwa należy przeprowadzić indykowanie silnika z wtryskiwaczami z tym układem;

Analizując badania laboratoryjne zauważono zmianę struktury strugi wtryskiwanego paliwa przy zastosowaniu wtryskiwaczy z naniesioną powłoką katalityczną na iglicy rozpylacza. Badania silnikowe pokazały, że jednostkowe zużycie paliwa zmalało o około 10%, zadymienie spalin zmniejszyło się o około 15% oraz emisja tlenku węgla zmniejszyła się o około 10 % w całym zakresie prędkości obrotowej, natomiast emisja tlenków azotu zmalała o około 8% w przedziale 1500 – 2700 min⁻¹.

Podsumowując przeprowadzone badania stwierdzono, że zastosowanie układu wstępnej obróbki paliwa w postaci naniesienia powłoki katalitycznej na niepracującą część iglicy wtryskiwacza silnika 359 wpływa na poprawę jego ekologicznych oraz ekonomicznych parametrów roboczych. Dlatego, zadaniem Autorów, konieczne jest prowadzenie dalszych badań dotyczących możliwości stosowania powłok katalitycznych w układzie paliwowym silnika i ich wpływie na aspekty ekologiczne i ekonomiczne.

References

1. Czarnikowski J., Drożdziel P., Kordos P.: Charakterystyczne zakresy prędkości obrotowych wału korbowego podczas pracy silnika spalinowego w warunkach eksploatacji samochodu, *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, Vol. 14, No. 2/2012, 55 – 62.
2. Heywood J.B.: *Internal combustion engines fundamentals*, New York: McCraw – Hill Book Co., 1988.
3. Hossam A., El Asrag & Yiguang Ju: Direct numerical simulations of exhaust gas recirculation effect on multistage autoignition in the negative temperature combustion regime for stratified HCCI flow conditions by using H₂O₂ addition, *Combustion Theory and Modelling*, Volume 17, Issue 2, 2013, Pages 316 – 334.
4. Hsin – Kan Wank, Chia – Yu Cheng, Kang – Shin Chen, Yuan – Chung Lin, Chung – Bang Chen: Effect of regulated harmful matters from a heavy – duty diesel engine by H₂/O₂ addition to the combustion chamber, *Fuel*, Volume 93, march 2012, Pages 524 – 527.
5. Janiszewski H., Falkowski T., Sławski Cz.: *Krajowe silniki wysokoprężne. Obsługa i naprawa*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1987.

6. Kazuhiro Yamamoto, Fumihiro Fujikake, Kenta Matsui: Non – catalytic after – treatment for Diesel particulate carbon – fiber filter and experimental validation, Proceedings for the Combustion Institute 34/2013, Pages 2865 – 2875.
7. Klyus O.: Zastosowanie wstępnej termicznej i katalitycznej obróbki paliwa w aspekcie poprawy ekologicznych i ekonomicznych wskaźników pracy silników z zapłonem samoczynnym. Szczecin: Wydawnictwo Akademii Morskiej w Szczecinie, 2007.
8. Klyus O., Mysłowski J, Osipowicz T.: Wtryskiwacz paliwa, Patent, RP, P-381413, 2006.
9. Klyus O.: Analiza zastosowania katalizatorów w aparaturze paliwowej silników z zapłonem samoczynnym, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie; 2009. 18: 54-58.
10. Klyus O., Wierzbicki S.: Wpływ temperatury paliwa na tworzenie mieszaniny paliwowo – powietrznej w silnikach z zapłonem samoczynnym, III Międzynarodowa Konferencja Naukowa: Rozwój Teorii i Technologii w Technicznej Modernizacji Rolnictwa, Olsztyn, 2000: 47-55.
11. Kniefel T.: Ocena techniczna wtryskiwaczy Common Rail na podstawie doświadczalnych badań przelewów, Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, Vol. 14, No. 1/2012, 42 – 53.
12. Kowalczyk M.: Studium problemów dymienia silników wysokoprężnych z wtryskiem bezpośrednim, Zeszyt Rozpraw nr 139, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 1982.
13. Kubiak M., Perlicki J.: Metale nieżelazne. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, 1980.
14. M. V. S. Murali Krishna, K. Kishor, P. V. K. Murthy, A. V. S. S. K. S. Gupta, S. Narasimha Kumar: Comparative studies on Performance evaluation of a two stroke coated spark ignition engine with alcohols with catalytic converter, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16, Issue 8, October 2012, Pages 6333 – 6339.
15. Mingming Zhu, Yu Ma, Dongke Zhang: Effect of a homogeneous combustion catalyst on the combustion characteristics and fuel efficiency in a diesel engine, Applied Energy, Volume 91, Issue 1, March 2012, Pages 166 – 172.
16. N. Chakraborty, N. Swaminathan: Reynolds Number Effects on Scalar Dissipation Rate Transport and Its Modelling in Turbulent Premixed Combustion, Combustion Science and Technology, Volume 185, Issue 4, 2013, Pages 676 – 709.
17. Niewczas A., Rychter M.: Rozpływ cząstek metalicznych i innych twardych zanieczyszczeń w układzie olejenia i układzie wydechowym silnika spalinowego, Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, Vol. 4, No. 1/2000, 24 – 35.
18. Osipowicz T: Przyrost temperatury w kanale grzewczym we wtryskiwaczu silnika z zapłonem samoczynnym. Wyd. KGTU, Kaliningrad, 2007: 64-73.

19. Prace naukowe instytutu chemii i technologii nafty i węgla Politechniki Wrocławskiej: Właściwości powierzchniowe modyfikowanych rafineryjnych katalizatorów platynowych. Monografie nr 54/27, 1996.
20. R. Payri, F.J. Salvador, P. Martí-Aldaraví, J. Martínez-López: Using one-dimensional modeling to analyse the influence of the use of biodiesels on the dynamic behavior of solenoid-operated injectors in common rail systems, Detailed injection system model, Energy Conversion and Management, Vol. 54, Issue 1, 2012, 90-99.
21. Ronald M. Heck, Robert J. Farrauto: Automobile exhaust catalyst, Applied Catalysis, A: General 221, 2001, Pages 443 – 457.
22. Rychlik A.: Metoda pomiaru zużycia paliwa tłokowych silników spalinowych z wykorzystaniem zindywidualizowanych parametrów elektromagnetycznych wtrysku, Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, Vol. 34, No. 2/2007, 28 – 36.
23. Szargut J.: Termodynamika. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2000.
24. Varun Mittal, Heinz Pitsch & Fokion Egolfopoulos: Assessment of counterflow to measure laminar burning velocities using direct numerical simulations, Combustion Theory and Modelling, Volume 16, Issue 3, 2012, Pages 419 – 433.
25. Wajand J. A., Wajand J. T.: Tłokowe silniki spalinowe średnio i szybkoobrotowe. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, 2005.