

## RESEARCH OF COMBUSTION SYSTEM WITH SEMI-OPEN COMBUSTION CHAMBER IN A COMMERCIAL SPARK IGNITION ENGINE

Tomasz Leżański, Janusz Sęczyk, Piotr Wolański

Warsaw University of Technology, Institute of Heat Engineering  
Nowowiejska Street 21/25, Warszawa  
tel.: +48 22 2345266  
e-mail: lezański@itc.pw.edu.pl

### Abstract

During the research of a new combustion system with semi-open combustion chamber for SI engines with use of the rapid compression machine (RCM) and visualisation experimental engine (VEE) it was proved that the application of this system results in shortening of the combustion time, increasing of the maximum cycle pressure and, in effect, increase of the combustion efficiency. The aim of the research using a commercial spark ignition engine was to prove that the similar results (as in RCM and VEE) could be obtained in a wide range of automotive engine operating parameters. In this research the two cylinder, four stroke air cooled SI engine, with volume displacement 650 cm<sup>3</sup> from Fiat 126 motorcar was used. This engine was fitted with a modified cylinder head and ignition distributor. Two types of prechamber with different shape were installed in different locations into the cylinder head but the ignition distributor had fixed, preadjusted, ignition advance angle in the full range of engine speed. The wide open throttle characteristics including power, specific fuel consumption and exhaust emission versus engine speed and load characteristics including: specific fuel consumption and exhaust emission versus engine torque were determined for different ignition advance angles. In the lower range of the ignition advance angle the engine showed stable operation at lower speed but unstable at high speed and, inversely, if the ignition advance angle was high the engine operation was stable at the higher speed and unstable at the lower. The engine characteristics during unstable operation were deteriorating. The research results show that improvement of the engine characteristics can be obtained in the full range of operating parameters if the ignition advance angle is varied continuously with the variation of engine speed. The ignition advance angle for the engine fitted with the new combustion system, which was subject of this research, was different from the ignition advance angle for standard engine.

**Keywords:** SI engines, combustion, combustion chamber of piston engines, exhaust emission

## BADANIA SYSTEMU SPALANIA Z PÓŁOTWARTĄ KOMORĄ SPALANIA W SILNIKU PRODUKCYJNYM O ZAPŁONIE ISKROWYM

### Streszczenie

W badaniach prowadzonych przy zastosowaniu maszyny pojedynczego sprzężu oraz badawczego silnika wizualizacyjnego, stwierdzono, że zastosowanie systemu z półotwartą komorą spalania może spowodować: skrócenie czasu spalania w komorze spalania, zwiększenie ciśnienia maksymalnego cyklu oraz zwiększenie sprawności spalania. Celem badań w silniku produkcyjnym było wykazanie, że takie pozytywne efekty można uzyskać również w szerokim zakresie parametrów pracy trakcyjnego silnika spalinowego. Badania prowadzono przy zastosowaniu silnika samochodu Fiat 126p. W badaniach stosowano dwie różne głowice, w których zainstalowano w różnych miejscach i o różnym kształcie wstępną komorę spalania oraz zmodernizowany aparat zapłonowy. Określono charakterystyki zewnętrzne i obciążeniowe przy różnych konfiguracjach komory spalania, różnych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu dla dwóch wartości współczynnika nadmiaru powietrza. W przypadku małych wartości kąta wyprzedzenia zapłonu uzyskiwano poprawę osiągnięć oraz zmniejszenie toksyczności spalin w zakresie niskich prędkości obrotowych, natomiast silnik pracował niestabilnie w zakresie wysokich prędkości obrotowych i odwrotnie, kiedy stosowano wysokie wartości kąta wyprzedzenia zapłonu uzyskiwano poprawę osiągnięć w zakresie wysokich prędkości obrotowych, natomiast silnik pracował niestabilnie w zakresie niskich wartości prędkości obrotowych. Uzyskane wyniki pokazują, że dzięki zastosowaniu systemu z półotwartą komorą spalania, o właściwie dobranych parametrach systemu, można uzyskać poprawę osiągnięć silnika oraz zmniejszenie toksyczności spalin w całym zakresie pracy silnika trakcyjnego

**Słowa kluczowe:** silniki spalinowe o zapłonie iskrowym, spalanie, komory spalania silników tłokowych, toksyczność spalin

## 1. Wstęp

Pomimo tego, że rozwój silników spalinowych trwa od stu kilkudziesięciu lat, to nadal istnieją możliwości poprawy ich osiągnięć i ciągle powstają nowe idee doskonalenia pracy silników. Również system spalania, zaprezentowany w niniejszej publikacji, przeznaczony dla silników o zapłonie iskrowym, chociaż mógłby być także stosowany w silnikach o zapłonie samoczynnym, niesie nową ideę intensyfikacji procesu spalania w silniku, która powinna w efekcie doprowadzić do zmniejszenia jednostkowego zużycia paliwa oraz obniżenia zawartości toksycznych składników spalin.

W systemie spalania będącym przedmiotem badań dokonano podziału komory spalania w głowicy standardowego silnika o zapłonie iskrowym na komorę wstępną i zasadniczą za pomocą przegrody. Zarówno komora wstępna jak i zasadnicza są zasilane taką samą mieszaniną paliwa z powietrzem. Mieszanina zawarta w komorze wstępnej jest zapalana za pomocą świecy zapłonowej, a kiedy różnica ciśnienia między komorą wstępną a zasadniczą, w wyniku spalania w komorze wstępnej, osiągnie odpowiednią wartość następuje wypływ, przez otwór w przegrodzie, palącej się mieszaniny i produktów niezakończonego spalania do komory zasadniczej. Strumień ten szybko, dynamicznie przemieszcza się przez komorę zasadniczą, z szybkością większą niż prędkość spalania mieszaniny, powodując zapłon kolejnych warstw w komorze zasadniczej i przyspieszenie procesu spalania a w efekcie zwiększenie sprawności spalania. Aby uzyskać pozytywne efekty, parametry nowego systemu spalania, którymi są: objętość komory wstępnej, średnica otworu w przegrodzie, lokalizacja komory wstępnej, miejsce zapłonu i kąt wyprzedzenia zapłonu, powinny być tak dobrane, aby wypływ palącej się mieszaniny nastąpił wówczas, kiedy tłok osiąga GMP. W przeciwnym przypadku, jak wykazały badania przy zastosowaniu maszyny pojedynczego sprężu (MPS) oraz silnika wizualizacyjnego, przebieg spalania jest niezgodny z założeniami i efekty są niewielkie albo nawet ujemne.

Celem badań silnikowych było potwierdzenie lub zanegowanie wyników badań uzyskanych przy zastosowaniu MPS i silnika wizualizacyjnego. Wadą badań przy zastosowaniu MPS i silnika wizualizacyjnego było to, że zostały one uzyskane w dość wąskim zakresie parametrów pracy silnika, co wynikało z ograniczeń konstrukcyjnych tych urządzeń, wprowadzonych celowo dla poprawy dostępu optycznego do komory spalania. W badaniach przy zastosowaniu MPS oraz silnika wizualizacyjnego, przeprowadzonych w możliwym do uzyskania zakresie parametrów, dokonano wyboru parametrów systemu spalania, które zapewniają najlepsze efekty i wytypowano rozwiązanie dla silnika badawczego, przy czym konieczne było uwzględnienie cech konstrukcyjnych silnika. Ze względu na stosunkowo prostą budowę i dostępność na rynku w badaniach stosowano silnik samochodu Fiat 126 o pojemności skokowej 650 cm<sup>3</sup>. W badaniach stosowano dwie różne głowice, o różnym kształcie i różnej lokalizacji komory wstępnej oraz zmodernizowany aparat zapłonowy, umożliwiający prowadzenie badań przy stałej nastawionej wartości kąta wyprzedzenia zapłonu, w całym zakresie prędkości obrotowej silnika. W trakcie badań określono charakterystyki zewnętrzne- szybkościowe (moc, moment obrotowy, zużycie paliwa oraz zawartość składników toksycznych w spalinach w funkcji prędkości obrotowej) oraz charakterystyki obciążeniowe, zużycie paliwa i toksyczność spalin w funkcji momentu obrotowego. Silnik zasilany był mieszaniną stechiometryczną albo mieszaniną zubożoną  $\lambda=1,1$ . Wyniki badań wskazują, że możliwe jest uzyskanie pozytywnych efektów w całym zakresie pracy silnika o ile zostanie zastosowany zmienny kąt wyprzedzenia zapłonu wraz ze zmianą prędkości obrotowej silnika. Bowiem w warunkach niskich prędkości obrotowych silnik dobrze pracował przy mniejszych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu, ale niestabilnie w warunkach wysokich prędkości obrotowych. Przy dużych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu pracował stabilnie w warunkach wysokich prędkości obrotowych i niestabilnie w warunkach niskich prędkości obrotowych. W czasie badań lepsze efekty uzyskano przy pracy na mieszaninie stechiometrycznej niż na ubogiej mieszaninie. Również, jeżeli chodzi o konfigurację komory wstępnej, to jedna

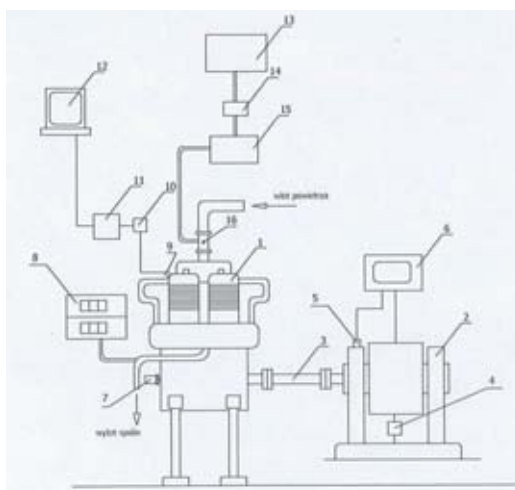
z nich, cylindryczna, umieszczona w pobliżu zaworów, zapewniła korzystniejsze wyniki, i to nie tylko w zakresie osiągnięć, ale także trwałości, niż komora wstępna umieszczona po stronie przeciwległej do zaworów na powierzchni wyciskającej.

## 2. Stanowisko i obiekt badań

Ze względu na: dość prostą budowę, małe wymiary silnika, możliwości stosunkowo prostego przeprowadzenia zmian konstrukcyjnych oraz dostępność na rynku, do badań wybrano silnik typu 126A1.076E. Jest to dwucylindrowy, czterosuwowy, chłodzony powietrzem silnik o zapłonie iskrowym o następujących parametrach: średnica cylindra 77 mm, skok tłoka 70 mm, pojemność skokowa 652 cm<sup>3</sup>, moc nominalna 17,6 kW, moment obrotowy 42,5 Nm i maksymalna prędkość obrotowa 4750 obr./min. Widok silnika na stanowisku badawczym przedstawiono na Rys. 1, a na Rys. 2 schemat stanowiska badawczego.



Rys. 1. Widok stanowiska badawczego  
Fig. 1. View of test stand



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego. 1-silnik FIAT 126A, 2-hamulec elektrowirowy E90, 3-wał Kardana, 4-czujnik momentu obrotowego, 5-czujnik prędkości obrotowej, 6- sterownik hamulca, 7-przetwornik PFI, 8-analizatory spalin, 9-czujnik ciśnienia, 10-wzmacniacz 5011, 11-indiskope 427, 12- komputer z kartą pomiarową, 13- zbiornik paliwa, 14-filtr, 15-waga do pomiaru zużycia paliwa, 16- zespół gaźnika i przepustnicy

Fig. 2. Schematic of test stand. 1-tested FIAT 126A engine, 2-eddy-curent brake, 3-Cardan shaft, 4-torque sensor, 5-engine speed sensor, 6-control unit of eddy-curent brake, 7-crank angele decoder, 8-exhaust emissions analyzers, 9-pressure transducer,10-amplifier, 11-Indiscope 427, 12-PC with measurement card, 13-fuel tank, 14-fuel filter, 15-fuel consumption measurement unit, 16-carburettor and throttle unit

Stanowisko badawcze zostało wyposażone: w hamulec elektrowirowy E90 firmy Schenck z aparaturą do pomiarów momentu obrotowego i prędkości obrotowej, który został połączony wałem Kardana z silnikiem; w instalację paliwową z wagowym pomiarem zużycia paliwa firmy Pierburg, w którym zastosowano komputerową akwizycję wyników pomiarów; w specjalny układ dolotowy i specjalny układ wydechowy, połączony z centralnym układem hamowni; w aparaturę do pomiarów toksyczności spalin typu K4500 firmy Arcon – Oliver oraz typu 951 firmy Rosemount-Beckman. W układzie wydechowym silnika zamontowano sondę do pomiarów toksyczności spalin. W układzie dolotowym zainstalowano specjalny wlot pomiarowy i zbiornik wyrównawczy dla pomiarów ilości powietrza zasysanego przez silnik. Przeprowadzono modernizację dwóch głowic silnika, które miały być przemiennie stosowane w badaniach oraz aparatu zapłonowego. Na Rys. 3 przedstawiono widok głowicy nr 1 z cylindryczną komorą wstępną, którą umieszczono za zaworami wylotowym i dolotowym. Taka lokalizacja komory wstępnej wymagała także zmiany w stosunku do komory standardowej, lokalizacji świecy zapłonowej.



Rys. 3. Widok głowicy z cylindryczną komorą wstępną nr.1  
Fig. 3. View of cylinder head with prechamber number 1

Umieszczenie w tym miejscu świecy sprawiało określone trudności techniczne ze względu na ożebrowanie i dość małą grubość ścianki głowicy w tym miejscu. Konieczne było specjalne uszczelnienie głowicy.



Rys. 4. Widok głowicy z komorą wstępną nr.2 (przed badaniami)  
Fig. 4. View of cylinder head with prechamber number 2 before testing

Na Rys. 4 przedstawiono widok głowicy nr 2 z komorą wstępną która została mieszczona na przeciwległej stronie w stosunku do komory cylindrycznej oraz dla lepszego przedstawienia szczegółów konstrukcyjnych powiększony widok na przegrodę i otwór łączący komorę wstępną w komorę zasadniczą.

W trakcie badań określano charakterystyki zewnętrzne (moment obrotowy, moc, zużycie paliwa, toksyczność spalin w funkcji prędkości obrotowej przy pełnym otwarciu przepustnicy), dla prędkości obrotowych 1500 obr./min – 4750 obr./min, co 500 obr./min., dla różnych wartości kąta

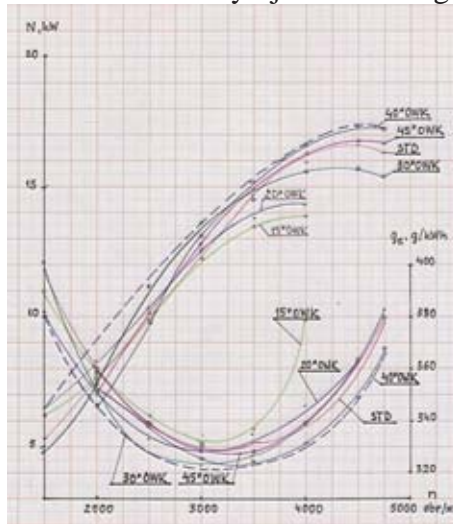


wyprzedzenia zapłonu, zapewniających stabilną pracę silnika, a następnie określono charakterystyki obciążeniowe silnika (zużycie paliwa i toksyczność spalin w funkcji momentu obrotowego, przy stałej prędkości obrotowej), przy prędkości obrotowej 2000 obr./min., 3000 obr./min., 4000 obr./min. W pierwszym etapie prowadzono badania przy zastosowaniu głowicy z komora wstępną nr 1 a w następnym przy zastosowaniu głowicy nr 2, przy zasilaniu silnika mieszaniną stechiometryczną, w warunkach zmiennych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu.

Następnie wybrano korzystniejszą wersję rozwiązania która okazała się głowica nr 1 i przeprowadzono badania w szerszym zakresie wartości kąta wyprzedzenia zapłonu oraz przy zasilaniu silnika mieszaniną stechiometryczną i ubogą.

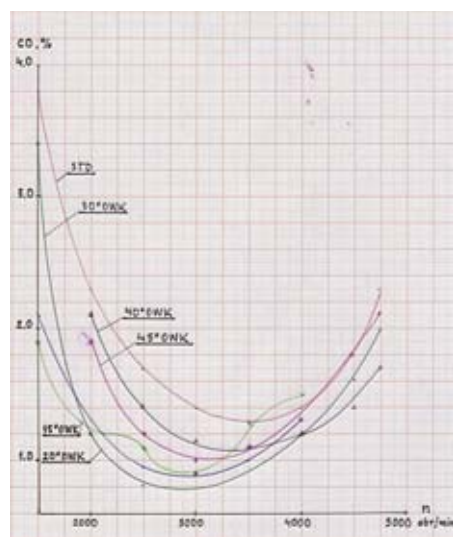
### 3. Wyniki badań

Na Rys. 5 przedstawiono wyniki badań w postaci charakterystyk zewnętrznych silnika z głowicą nr 1, w zakresie mocy i jednostkowego zużycia paliwa, przy różnych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu: 20°, 30°, 40° i 45° OWK; na Rys. 6 emisję CO, na Rys. 7 emisję HC, na Rys. 8 emisję NO<sub>x</sub> w warunkach charakterystyki zewnętrznej, przy tych samych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu, jak w odniesieniu do mocy i jednostkowego zużycia paliwa.



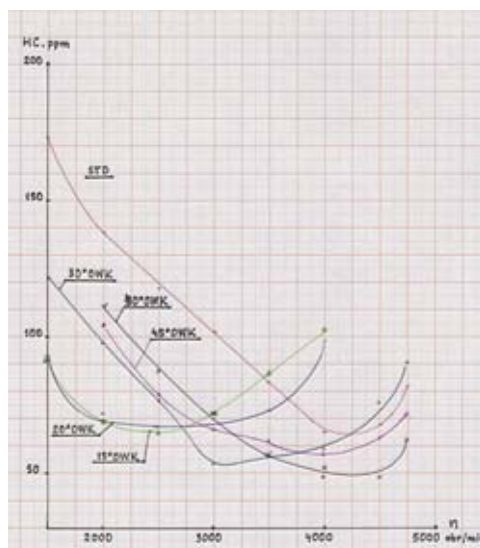
Rys. 5. Charakterystyka zewnętrzna dla komory nr 1

Fig. 5. Power and specific fuel consumption WOT curves for different ignition advance angle for cylinder head number 1

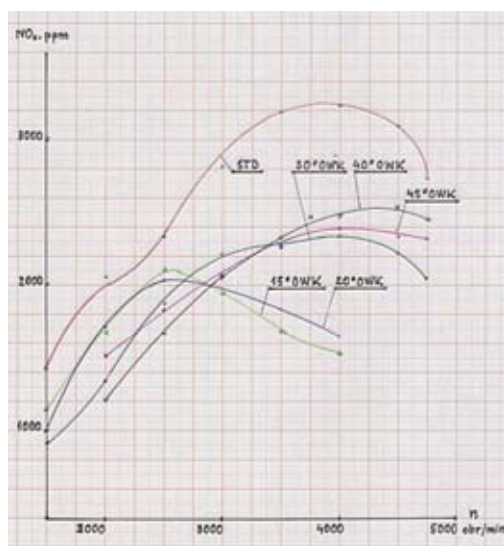


Rys. 6. Charakterystyki emisji CO w warunkach charakterystyki zewnętrznej dla komory wstępnej nr 1

Fig. 6. CO emission WOT curves for different ignition advance angle, for cylinder head number 1



Rys. 7. Charakterystyki emisji HC, w warunkach charakterystyki zewnętrznej, dla komory wstępnej nr 1  
 Fig. 7. HC emission WOT curves for different ignition advance angle, for cylinder head number 1

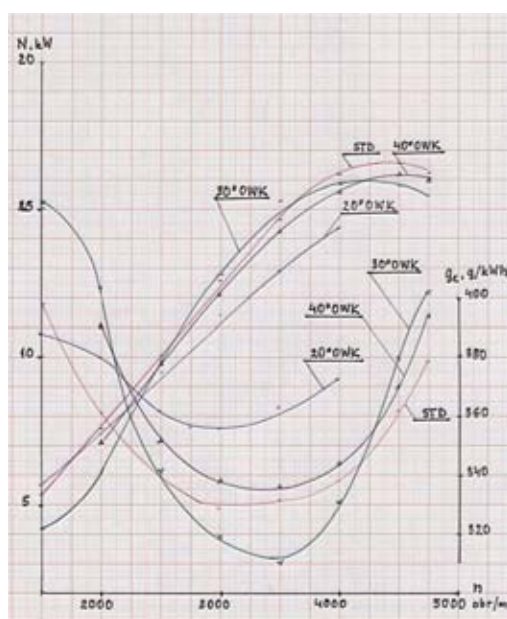


Rys. 8. Charakterystyki emisji NO<sub>x</sub>, w warunkach charakterystyki zewnętrznej, dla komory wstępnej nr 1  
 Fig. 8. NO<sub>x</sub> emission WOT curves for different ignition advance angle, for cylinder head number 1

Występuje wyraźny zakres korzystnych efektów dla określonych wartości kąta wyprzedzenia zapłonu, zarówno jeżeli chodzi o moc, jednostkowe zużycia paliwa, jak i toksyczność spalin. Dla porównania naniesiono charakterystyki uzyskane podczas badań silnika standardowego, które były przeprowadzone wcześniej, przed wymianą głowicy i aparatu zapłonowego. Wyniki badań wskazują, że możliwe jest uzyskanie pozytywnych efektów w całym zakresie prędkości obrotowych silnika z komorą wstępną nr 1, jeżeli wraz ze zmianą kąta wyprzedzenia zapłonu będzie następowała zmiana kąta wyprzedzenia zapłonu. Przy małych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu uzyskiwano korzystne wyniki, kiedy silnik pracował przy niskich prędkościach obrotowych. Kiedy jednak prędkość obrotowa rosła, to wyniki ulegały pogorszeniu a przy pewnej wartości praca była bardzo niestabilna, co od razu znajdowało odbicie w bardzo silnym wzroście emisji węglowodorów i zużycia paliwa. Dlatego też przy wartości kąta wyprzedzenia zapłonu 20° OWK badania prowadzono do prędkości obrotowej 4000 obr/min. Odwrotna sytuacja panowała w przypadku, kiedy silnik pracował przy wysokich wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu. Kiedy kat wyprzedzenia zapłonu wynosił 40° OWK, to silnik pracował bardzo niestabilnie w zakresie niskich prędkości obrotowych i dlatego w tym zakresie określano

charakterystyki od 2000 obr/min. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej przy ustawionych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu silnik pracował coraz lepiej i uzyskiwał większą moc od silnika standardowego o ok. 0,8 kW, mniejsze jednostkowe zużycie paliwa oraz mniejszą toksyczność spalin. Dalsze zwiększanie wartości kąta wyprzedzenia zapłonu (45° OWK) nie przyniosło już jednak poprawy efektów, co pozwala przypuszczać, że między wartością kąta wyprzedzenia zapłonu 40° OWK i 45° OWK. znajduje się wartość graniczna dla poprawy parametrów pracy silnika. Przebieg charakterystyk wskazuje, po porównaniu z wynikami badań przy zastosowaniu MPS, że w zakresie, gdzie osiągane są pozytywne efekty, dobrze dobrany jest moment wypływu strugi z komory wstępnej do komory zasadniczej.

Tak dobrych efektów, jak w przypadku komory wstępnej nr 1, nie uzyskano jednak po zastosowaniu komory wstępnej nr 2.



Rys. 9. Charakterystyki zewnętrzne dla komory wstępnej nr 2

Fig. 9. Power and specific fuel consumption WOT curves for different ignition advance angle for cylinder head number 2

Na Rys. 9 przedstawiono charakterystyki zewnętrzne, w zakresie mocy i jednostkowego zużycia paliwa w przypadku głowicy z komorą wstępną nr 2, dla trzech wartości kąta wyprzedzenia zapłonu: 20°, 30°, 40° OWK oraz dla porównania zaznaczono charakterystyki dla silnika standardowego. W trakcie tych badań tylko w pewnym zakresie prędkości obrotowej od około 2500 obr/min. do 4150 obr/min, przy kącie wyprzedzenia zapłonu 30° OWK, uzyskano poprawę wyników w stosunku do silnika standardowego, natomiast przy innych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu wyniki były gorsze. Problemem w tych badaniach było wypalanie się przegrody między komorą wstępną i zasadniczą. Pomimo naprawy przegroda po krótkim okresie pracy ulegała ponownie uszkodzeniu. Na Rys. 10 przedstawiono wygląd głowicy z komora nr 1 po badaniach a na Rys. 11 z komorą nr 2 po badaniach.

W przypadku głowicy z komorą wstępną cylindryczną nie wystąpiły żadne uszkodzenia głowicy, natomiast na denku tłoka widać odbity kształt komory cylindrycznej, który nie świadczy jednak o uszkodzeniu tłoka, lecz jest spowodowany przeniesieniem cząstek materiału przegrody na denko tłoka i ich osadzeniem na powierzchni.

Pomimo wielokrotnie dłuższego czasu prowadzenia badań z zastosowaniem głowicy z komorą nr 1 nie wystąpiły żadne problemy z trwałością. Natomiast w przypadku głowicy z komorą wstępną nr 2 nastąpiło wypalenie przegrody w miejscu, gdzie był otwór dla wypływu strugi palącej się mieszanki z komory wstępnej do komory zasadniczej. Wypalenie przegrody musiało mieć negatywny wpływ na przebieg spalania w silniku oraz na warunki przepływów czynnika

w komorze spalania. Zapalana w komorze wstępnej mieszanka nie mogła wytworzyć strugi o odpowiedniej energii zdolnej do przemieszczania się przez całą zasadniczą komorę spalania. Wpływ strugi następował w sposób przypadkowy i dlatego nie mógł zapewnić pozytywnych efektów w odniesieniu do przyspieszenia procesu spalania. Na pewno pogorszenie warunków przepływu odbiło się na zwiększenie jednostkowego zużycia paliwa i toksyczności spalin.



Rys. 10. Widok głowicy z komorą wstępną nr 1 po badaniach  
Fig. 10. View of cylinder head with prechamber number 1 after testing



Rys. 11. Widok głowicy z komorą wstępną nr 2 po badaniach  
Fig. 11. View of cylinder head with prechamber number 2 after testing

Jeżeli chodzi o wyniki badań silnika z komorą wstępną nr 1, przy zasilaniu silnika ubogą mieszanką, to uzyskane efekty były również gorsze, niż przy zasilaniu silnika mieszanką stechiometryczną. Przede wszystkim wystąpił bardzo duży rozrzut wyników badań w zakresie jednostkowego zużycia paliwa i toksyczności spalin.

#### 4. Wnioski

1. Wyniki badań silnika produkcyjnego z systemem spalania o dzielonej komorze spalania wskazują, że przy odpowiednim doborze parametrów systemu, można uzyskać poprawę osiągnięć silnika, w stosunku do osiągnięć silnika standardowego, w odniesieniu do mocy, jednostkowego zużycia paliwa i toksyczności spalin.
2. Aby uzyskać poprawę osiągnięć silnika z dzieloną komorą spalania w całym zakresie jego pracy, konieczne jest sterowanie kątem wyprzedzenia zapłonu w funkcji prędkości obrotowej silnika; wraz ze wzrostem prędkości obrotowej silnika powinien rosnąć kąt wyprzedzenia zapłonu.



3. W przypadku małych wartości kąta wyprzedzenia zapłonu silnik dawał korzystniejsze rezultaty przy niskich prędkościach obrotowych, natomiast pracował niestabilnie w warunkach wysokich prędkości obrotowych; w przypadku dużych wartości kąta wyprzedzenia zapłonu silnik pracował niestabilnie w warunkach niskich prędkości obrotowych, natomiast zapewniał korzystne wyniki przy pracy na wysokich prędkościach obrotowych.
4. Porównanie wyników badań, przy zastosowaniu dwóch różnych konfiguracji wstępnej komory spalania, wskazuje, że znacznie korzystniejsze rezultaty uzyskano w przypadku komory wstępnej cylindrycznej umieszczonej w pobliżu zaworów dolotowego i wylotowego, z elektrodami świecy umieszczonymi w pobliżu ścianki komory spalania, co można wiązać ze znacznie korzystniejszymi warunkami wymiany ciepła.
5. Badania silnika produkcyjnego, z systemem spalania o dzielonej komorze spalania, zasilanego ubogą mieszanką, pokazały, że korzystne rezultaty uzyskiwano przy wyższych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu niż dla silnika zasilanego mieszaniną stechiometryczną, co jest spowodowane mniejszą prędkością spalania mieszanki.
6. W wyniku badań przeprowadzonych na silniku produkcyjnym znalazły potwierdzenie wyniki badań uzyskane przy zastosowaniu maszyny pojedynczego sprężu oraz silnika wizualizacyjnego, jeżeli chodzi o możliwość uzyskania efektów przy zastosowaniu nowego systemu spalania.

## **5. Literatura**

- [1] Leżański, T., *Badania silnika o zapłonie iskrowym wyposażonego w nowy system spalania z półotwartą komorą spalania*. Sprawozdanie merytoryczne z realizacji projektu badawczego Nr 4T12D 029 30, Warszawa 2009.
- [2] Leżański, T., Sęczyk, J., Wolański, P., *Combustion Engines- Silniki Spalinowe*, Influence of ignition advance angle on combustion in internal combustion spark ignition engines with semi open combustion chamber, No PTNSS-2009-SC-169, 2009.
- [3] Leżański, T., Rychter, T., Teodorczyk, A., *Prechamber Combustion System Studies Using Rapid Compression Machine*, Journal of KONES. International Combustion Engines, Vol. 7, No. 1-2, Warsaw-Lublin 2000.
- [4] Glinka, W., Leżański, T., Wolański, P., *Zastosowanie fotografii szybkiej do badań spalania w silnikach SI z półotwartą komorą wstępną*, Journal of KONES, Internal Combustion Engines, Vol. 14, 2007.
- [5] Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, New York 1988.

