

# INVESTIGATION OF COMBUSTION PROCESS IN RAPID COMPRESSION MACHINE USING HIGH SPEED SCHLIEREN PHOTOGRAPHY

Wiesław Glinka, Tomasz Leżański, Piotr Wolański

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

## Abstract

The paper presents results of experimental investigation of combustion process in rapid compression machine. New combustion system for spark ignition engines, in which combustion chamber was divided into the prechamber and main chamber was applied. It is known as Jet Dispersion Combustion (JDC) because intensification of combustion process is achieved by the injection of the burning mixture jet into the main chamber. Experimental set up and testing procedure is briefly described. Schlieren system was used to visualize combustion process. Development of combustion process was recorded with high speed camera. The research was focused on study of the influence of prechamber volume, spark location, ignition timing and orifice diameter on flame propagation and pressure variation inside the main combustion chamber. To avoid soot deposition on glass windows of combustion chamber all tests were conducted for propane/air mixture of stoichiometric composition. The research results show that the application of new combustion system allows obtaining the increase of maximum rate of pressure rise and maximum pressure as well as maximum combustion efficiency.

**Keywords:** rapid compression machine, combustion, combustion chamber, prechamber, ignition timing, visualization of combustion process

## BADANIE PROCESU SPALANIA W MASZYNE POJEDYNCZEGO SPRĘŻU Z WYKORZYSTANIEM SZYBKIEJ FOTOGRAFII SMUGOWEJ

### Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych procesu spalania w maszynie pojedynczego sprężu. W badaniach zastosowano oryginalny system spalania, opracowany w Zakładzie Silników Lotniczych Politechniki Warszawskiej, w którym dokonano podziału komory spalania na komorę wstępną i główną. System ten, znany jako JDC (Jet Dispersion Combustion), intensyfikuje proces spalania w wyniku wtrysku palącej się strugi mieszaniny z komory wstępnej do komory głównej. W artykule przedstawiono opis stanowiska badawczego i stosowanych procedur badawczych. Do wizualizacji procesu spalania został wykorzystany smugoskop. Przebieg procesu spalania był rejestrowany szybką kamerą. Badania prowadzono przy zastosowaniu mieszaniny propanu z powietrzem o składzie stechiometrycznym, w celu uniknięcia zaczernienia wzierników w komorze badawczej. Celem pracy było zbadanie wpływu objętości komory wstępnej, miejsca zapłonu, wyprzedzenia zapłonu oraz średnicy otworu w przegrodzie na szybkość rozprzestrzeniania się płomienia oraz na przebieg ciśnienia w komorze głównej. Wyniki badań wskazują, że zastosowanie tego systemu spalania pozwala uzyskać zwiększenie maksymalnych wartości szybkości narastania ciśnienia, ciśnienia oraz sprawności spalania.

**Słowa kluczowe:** maszyna pojedynczego sprężu, spalanie, komory spalania, komory wstępne, kąt wyprzedzenia zapłonu, wizualizacja procesu spalania

### 1. Wstęp

Optymalizacja konstrukcji i parametrów pracy silników spalinowych wymaga dobrej znajomości procesu przygotowania mieszaniny paliwo-powietrze oraz mechanizmu spalania. Zastosowanie technik wizualizacyjnych i fotografii szybkiej pozwala na rejestrację przebiegu

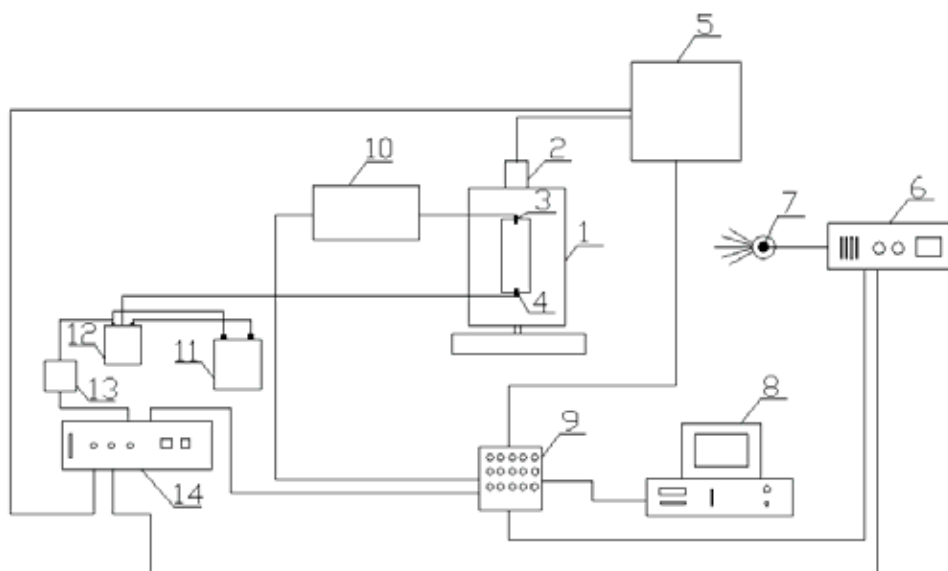
procesu przygotowania mieszanki i procesu spalania w komorze silnika [1,12]. Skomplikowana konstrukcja silników spalinowych i znaczna liczba zjawisk, jakie zachodzą jednocześnie w komorze spalania powoduje, że w badaniach procesów spalania są stosowane różne urządzenia, takie jak: komory o stałej objętości, silniki badawcze przystosowane do wizualizacji procesów zachodzących w komorze spalania, silniki wyposażone w specjalne urządzenia endoskopowe, maszyny pojedynczego sprężu. Urządzenia te, z różnych względów, nie odzwierciedlają w pełni warunków panujących w silnikach, ale pozwalają łatwiej określić wpływ różnych parametrów na spalanie w silnikach i w ten sposób ułatwiają prowadzenie, w określonym kierunku, modyfikacji silnika [2].

W pracy przedstawiono wyniki badań procesu spalania w maszynie pojedynczego sprężu (MPS). W badaniach zastosowano system spalania JDC [9,12] proponowany dla silników o zapłonie iskrowym (ZI), w którym zastosowano podział komory spalania w głowicy silnika na komorę wstępną i główną [5,6,7,9,13]. Komora wstępna jest oddzielona od komory głównej przegrodą, w której umieszczono otwór. Zarówno komora wstępna jak i komora główna, są zasilane mieszanką palną paliwo-powietrze o takim samym składzie. Zapłon mieszanki następuje w komorze wstępnej, której objętość jest wielokrotnie mniejsza, niż komory głównej. W wyniku spalania, ciśnienie w komorze wstępnej rośnie szybciej niż w komorze głównej i następuje wypływ strumienia palącej się mieszanki i spalin, o wysokiej energii, do komory głównej, powodując zapłon i intensywne spalanie mieszanki w komorze głównej [6,10]. Badania prowadzono dla różnych objętości wstępnej komory spalania, średnic otworu w przegrodzie oraz miejsc zapłonu.

Celem badań było określenie wpływu wyżej wymienionych parametrów na proces zapłonu i spalania w nowym systemie z półotwartą komorą spalania.

## 2. Urządzenia badawcze i aparatura

Badania przeprowadzone zostały na stanowisku, którego schemat przedstawiono na rys.1.

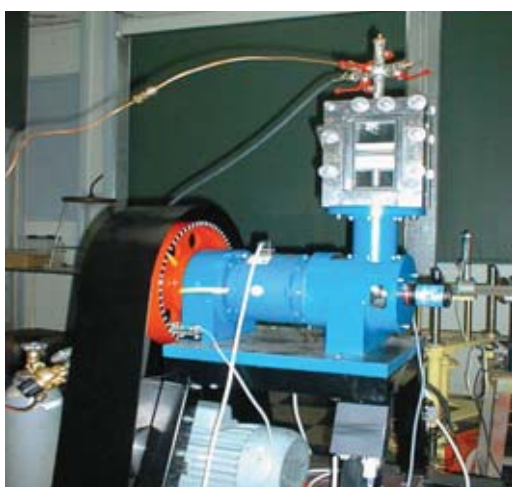


Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1. maszyna pojedynczego sprężu, 2. kątowny impulsator obrotów wału korbowego, 3. czujnik ciśnienia, 4. świeca zapłonowa, 5. indyskop AVL, 6. elektroniczny moduł sterujący diodą, 7. dioda, 8. komputer PC, 9. karta akwizycji danych, 10. wzmacniacz sygnału ciśnienia, 11. akumulator, 12. cewka zapłonowa, 13. przerywacz, 14. elektroniczny moduł sterujący kątem zapłonu

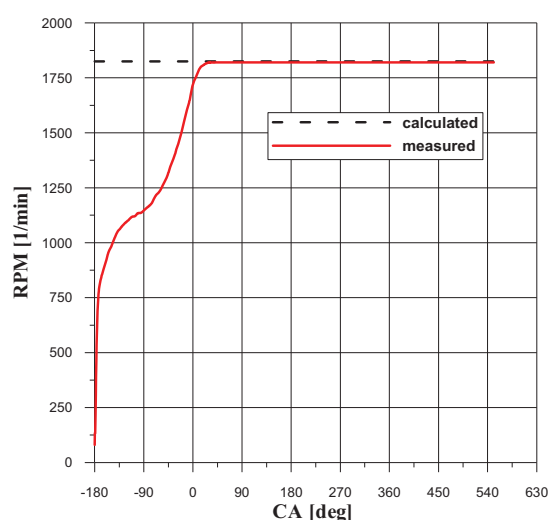
Fig. 1. Schematic of experimental setup: 1. rapid compression machine, 2. angle encoder, 3. pressure transducer, 4. spark plug, 5. indiskope AVL, 6. electronic control module for LED, 7. LED, 8. computer PC, 9. acquisition system chart, 10. pressure amplifier, 11. battery, 12. ignition coil, 13. interrupter, 14. electronic control module for ignition timing

Podstawowym elementem stanowiska jest maszyna pojedynczego sprężu (MPS). Napęd maszyny jest realizowany przez silnik elektryczny, który poprzez przekładnię pasową napędza koło zamachowe o dużej masie i dużym momencie bezwładności połączone ze sprzęgłem elektromagnetycznym. Kiedy koło zamachowe osiągnie odpowiednią prędkość obrotową wtedy sprzęgło łączy je z MPS. Po przebyciu drogi kątowej około  $180^\circ$  OWK maszyna pojedynczego sprężu osiąga prędkość obrotową 1800 obr/min, przy której prowadzono badania.

Na rys.2 przedstawiono widok MPS a na rys.3 charakterystykę przebiegu prędkości obrotowej w funkcję kąta obrotu wału korbowego podczas rozruchu maszyny pojedynczego sprężu. Komora spalania MPS ma kształt prostopadłościanu o wymiarach 78 mm x 30 mm. Skok tłoka 78 mm. W górnej części komory spalania umieszczono wkładki o różnej konfiguracji modelujące komory spalania silnika. Ścianki boczne, czołowa i tylna, są wykonane ze szkła kwarcowego o grubości 30 mm w taki sposób, aby można je było łatwo demontować i montować. W głowicy komory spalania MPS umieszczono świecę zapłonową, czujnik do pomiarów szybkozmiennych ciśnień oraz końcówkę do napełniania i opróżniania komory spalania.

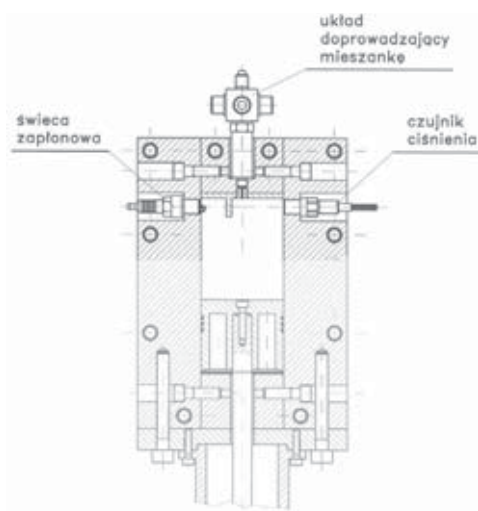


Rys. 2. Widok maszyny pojedynczego sprężu  
Fig. 2. View of rapid compression machine



Rys. 3. Zmiany prędkości obrotowej MPS, w funkcji kąta OWK podczas rozruchu

Fig. 3. Variation of the rpm of RCM as a function of CA during start of machine



Rys. 4. Przekrój komory spalania MPS

Fig. 4. Cross section of the combustion chamber of rapid compression machine



Rys. 5. Widok komory spalania maszyny pojedynczego sprężu

Fig. 5. View of the combustion chamber of rapid compression machine

Na rys. 4 przedstawiono przekrój komory spalania a na rys. 5 jej widok na stanowisku badawczym. Widoczny jest prostopadłościenny tłok z rowkami do umieszczania uszczelnień, w postaci wałków z tworzywa odpornego na wysokie prędkości liniowe. Smarowanie tłoka i cylindra zapewniał smar stały (dwusiarczek molibdenu). Do końcówki wału korbowego MPS zamocowano optyczny czujnik położenia wału korbowego PFI 60 o rozdzielczości 1° OWK. Pomiarów ciśnienia w komorze spalania dokonywano czujnikami piezokwarcowymi Kistler 6053B współpracującym ze wzmacniaczem typu 5011A firmy Kistler. Akwizycji wyników badań dokonywano przy zastosowaniu systemu Indiskope 427 firmy AVL oraz komputera klasy PC wyposażonego w specjalną kartę pomiarową.

### 3. Wyniki badań

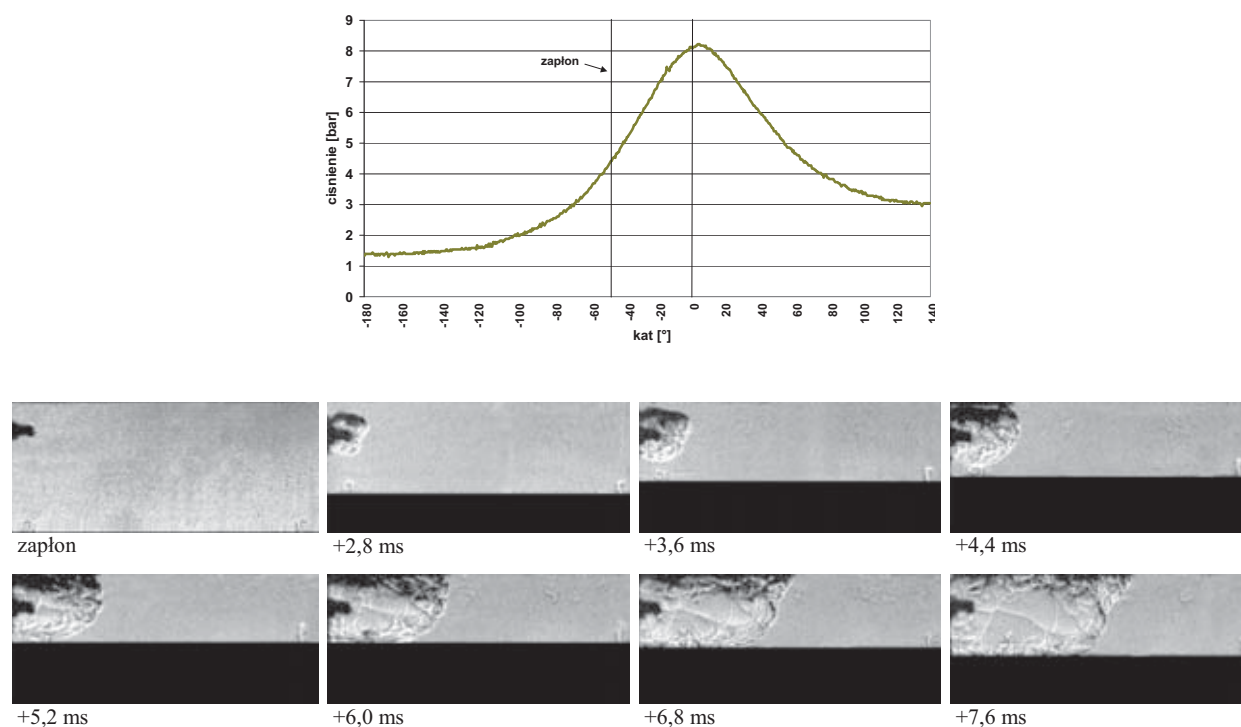
Badania prowadzono stosując trzy różne objętości komory wstępnej: 10%, 20% i 28% w stosunku do całkowitej objętości komory spalania (komora wstępna + komora główna); trzy różne średnice otworu w przegrodzie oddzielającej komorę wstępną od komory głównej (2 mm, 3 mm, 5 mm) oraz trzy różne miejsca zapłonu: ścianka komory spalania, środek komory spalania i otwór łączący wstępną komorę spalania z komorą główną. Świeca zapłonowa była umieszczona we wstępnej komorze spalania. Badania prowadzono przy stałej prędkości obrotowej 1800 obr/min, przy różnych wartościach kąta wyprzedzenia zapłonu, w granicach od 90° OWK przed GMP do 15° OWK przed GMP. Przedstawiono wyniki badań dla prób, w których uzyskiwano najbardziej korzystne przebiegi ciśnienia, przy określonej wartości kąta wyprzedzenia zapłonu. Oceny dokonywano głównie w oparciu o maksymalną wartość ciśnienia uzyskaną w cyklu pracy maszyny pojedynczego sprężu. Badania obejmowały wyłącznie suw sprężania i rozprężania (pracy), ponieważ proces napełniania i opróżniania komory spalania odbywał się przy zastosowaniu urządzeń zewnętrznych.

Na rys. 6 przedstawiono przebieg spalania w standardowej, niedzielonej komorze spalania. Prowadząc badania przy różnych kątach wyprzedzenia zapłonu, w zakresie od 50° OWK przed GMP do 20° OWK przed GMP, stwierdzono, że najwyższe ciśnienie maksymalne (8,25 bara), uzyskuje się dla kąta wyprzedzenia zapłonu 50° OWK. W tych warunkach szybkość przemieszczania się płomienia jest nieco mniejsza od maksymalnej uzyskanej dla kąta wyprzedzenia zapłonu 20° OWK przed GMP. Należy to wiązać z wyższą wartością ciśnienia w komorze spalania podczas zapłonu.

Na rys.7 przedstawiono przebieg spalania w komorze z przegrodą, o objętości komory wstępnej stanowiącej 20% całkowitej objętości komory spalania, dla kąta wyprzedzenia zapłonu 35° OWK przed GMP, przy średnicy otworu w przegrodzie 3 mm. Widać wpływ strumienia palącej się mieszaniny i spalin z komory wstępnej do komory zasadniczej, po czym następuje intensywne spalanie w komorze głównej, które po około 4,4 ms proces obejmuje całą komorę. Dla tego przypadku uzyskano ciśnienie maksymalne 15,1 bara. Dla porównania, czoło płomienia w komorze bez przegrody (rys. 6) po czasie 4,4 ms przemieściło się tylko o 21% a po czasie 7,6 ms o 55% długości komory spalania. Cały proces spalania w komorze spalania bez przegrody trwał więc prawie czterokrotnie dłużej niż w komorze spalania z przegrodą. Jednocześnie uzyskane ciśnienie maksymalne w cyklu było w przypadku komory z przegrodą około 1,8 razy większe niż w przypadku komory spalania bez przegrody.

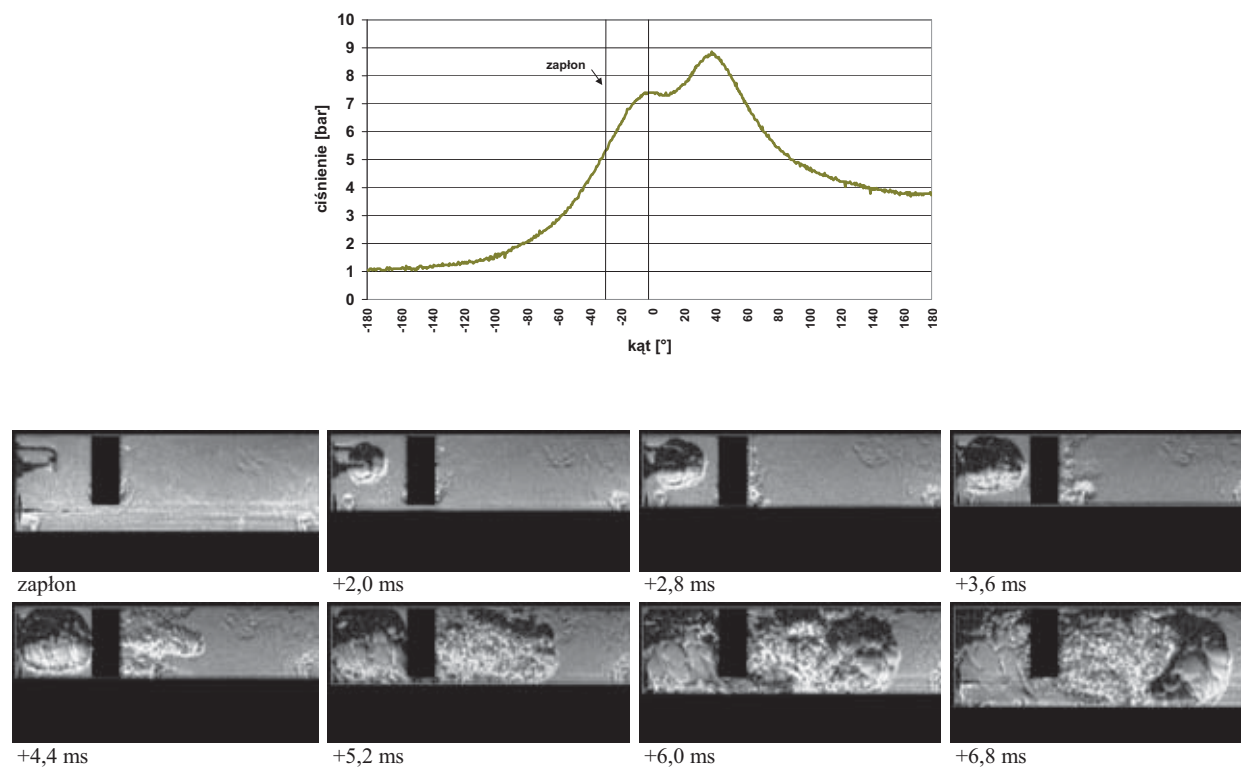
Na trzech kolejnych rysunkach, rys. 8, 9, 10 przedstawiono przebieg spalania dla komory wstępnej o objętości 28%, otworu o średnicy 3 mm, dla trzech różnych miejsc zapłonu. Na rys. 8 przedstawiono przebieg spalania w przypadku zapłonu ładunku w komorze wstępnej na ściance przeciwległej do otworu. Proces spalania rozpoczyna się od miejsca zapłonu, przemieszcza się w kierunku otworu i aż do chwili zamknięcia komory przez denko tłoka odbywa się tylko w komorze wstępnej. Kiedy już w całej komorze wstępnej odbywa się spalanie następuje wpływ palącej się mieszaniny do komory głównej.





Rys. 6. Przebieg spalania w standardowej komorze spalania bez przegrody; zapłonu na ścianie, wyprzedzenie zapłonu - 50° OWK przed GMP

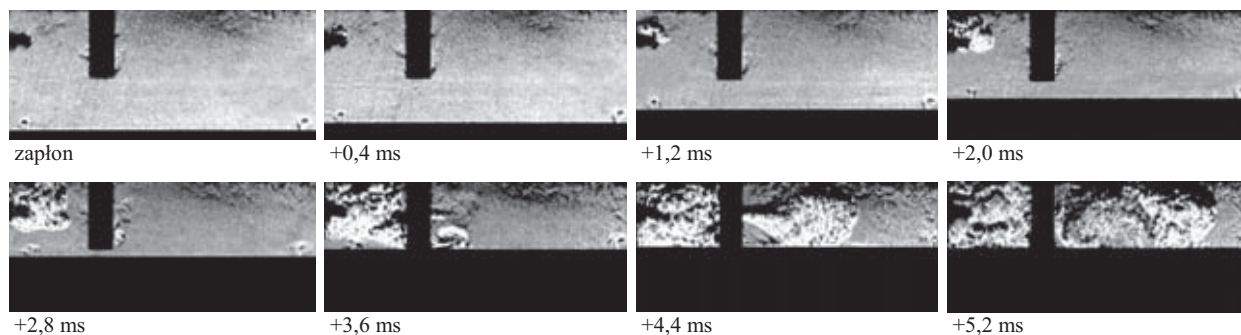
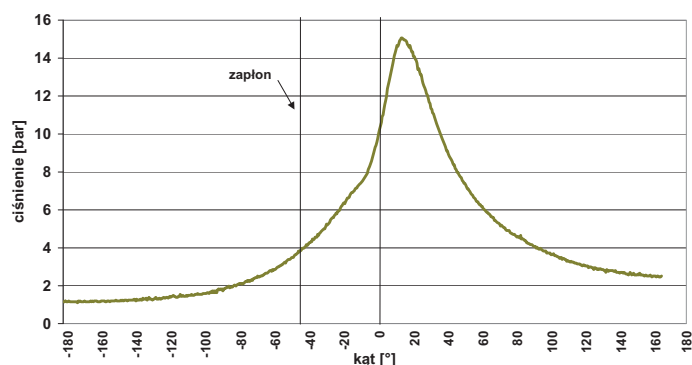
Fig. 6. Schlieren photographs of combustion process in standard combustion chamber without partition; ignition at the wall of combustion chamber, ignition timing - 50° BTDC



Rys. 7. Przebieg spalania w komorze spalania z komorą wstępną; objętość komory wstępnej – 20%, wyprzedzenie zapłonu - 35° OWK przed GMP, średnica otworu – 3mm, zapłon na ścianie

Fig. 7. Schlieren photographs of combustion process in combustion chamber with prechamber; prechamber volume – 20%, ignition timing - 35° BTDC, orifice diameter – 3mm, ignition at the prechamber wall

W przypadku zapłonu w środku wstępnej komory spalania, co zostało przedstawione na rys. 9, płomień przemieszcza się jednocześnie w obu kierunkach, dzięki czemu szybciej następuje spalanie w komorze wstępnej i szybciej strumień palącej się mieszaniny wypływa do komory głównej. Gdy szczelina pomiędzy przegrodą, oddzielającą komory spalania, a denkiem tłoka rośnie, następuje zintensyfikowanie procesu spalania w komorze głównej, spowodowane występowaniem zawirowań na krawędzi przegrody. Uzyskana wartość ciśnienia maksymalnego jest niższa (13,9 bara), niż ciśnienie maksymalne w przypadku zapłonu na ścianie (15 barów).

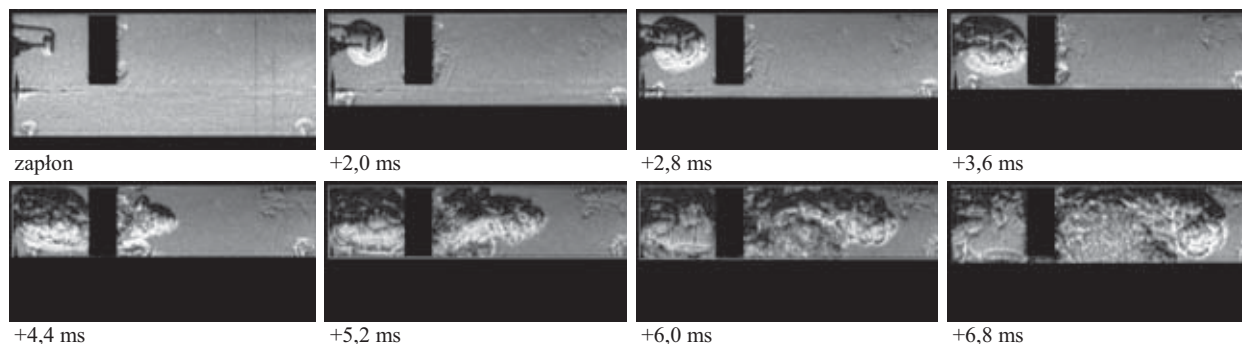
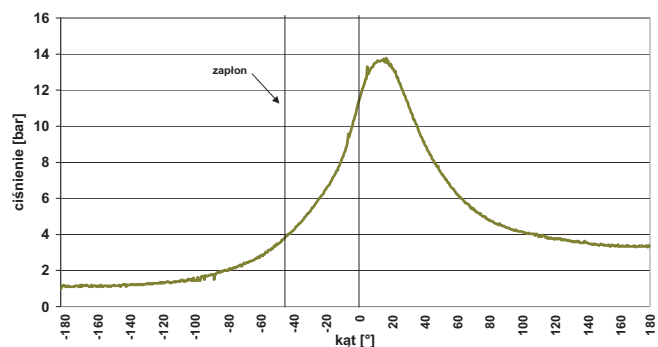


Rys.8. Przebieg spalania w komorze spalania z komorą wstępną; objętość komory wstępnej – 28%, wyprzedzenie zapłonu - 45° OWK przed GMP, średnica otworu – 3mm, zapłon na ścianie

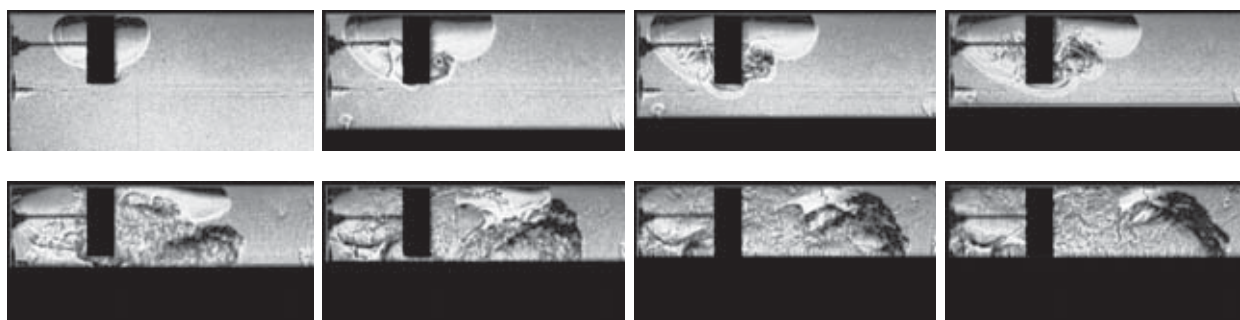
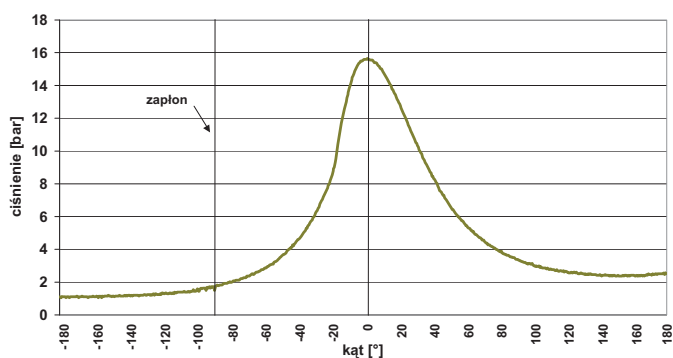
Fig.8. Schlieren photographs of combustion process in combustion chamber with prechamber: prechamber volume – 28%, ignition timing - 45° BTDC, orifice diameter – 3mm, ignition at the prechamber wall

Na rys. 10 przedstawiono przebieg spalania w przypadku zapłonu w otworze łączącym komorę wstępną z komorą główną. Widać, że promień rozprzestrzeniania się równocześnie w komorze wstępnej i w komorze głównej. Ponieważ komora wstępna ma mniejszą objętość niż komora główna, ciśnienie w komorze wstępnej rośnie szybciej niż w komorze głównej. Dla uzyskania prawidłowego przebiegu spalania konieczne było zastosowanie dużego kąta wyprzedzenia zapłonu (90° OWK). Przed zamknięciem szczeliny między denkiem tłoka a przegrodą następuje wypływ palącej się mieszaniny przez tę szczelinę i turbulizowanie palącej się mieszaniny w komorze głównej. Po zamknięciu szczeliny występuje dodatkowy wypływ przez otwór z komory wstępnej, co jeszcze bardziej intensyfikuje proces spalania w komorze głównej. W efekcie uzyskuje się wysokie ciśnienie maksymalne cyklu (15,9 bara) a więc prawie dwukrotnie wyższe, niż w przypadku otwartej, standardowej komory spalania (8,25 bara).

Na rys. 11 pokazano wykresy przebiegów ciśnienia dla przedstawionych na rys. 8, 9, 10 przypadków spalania, a więc w odniesieniu do różnych miejsc zapłonu w komorze wstępnej. Analiza wykresów pokazuje, że nie można oceniać uzyskanych efektów jedynie na podstawie wartości ciśnienia maksymalnego. Istotny jest też przebieg narastania ciśnienia podczas sprężania ładunku i zmniejszania się ciśnienia podczas sprężania. Wprawdzie w przypadku zapłonu w otworze uzyskano najwyższą wartość ciśnienia maksymalnego, jednakże wyraźnemu zwiększeniu uległo pole pracy sprężania, co jest spowodowane bardzo wczesnym zapłonem.

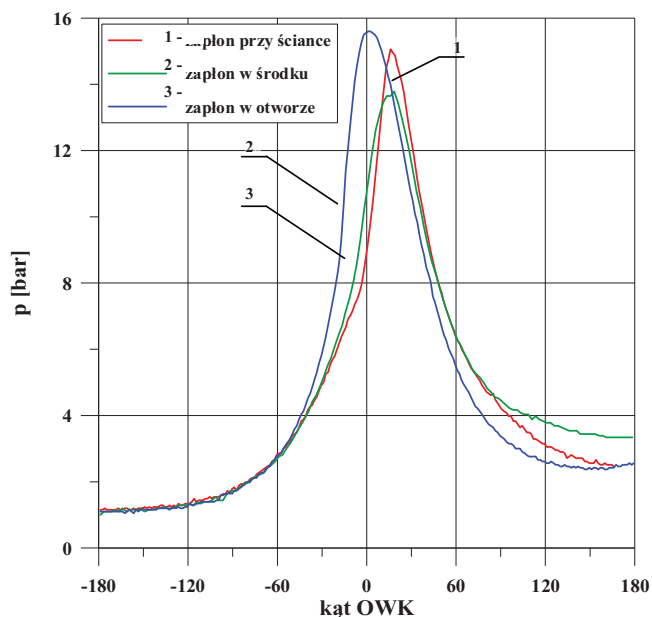


Rys. 9. Przebieg spalania w komorze spalania z komorą wstępną; objętość komory wstępnej – 28%, wyprzedzenie zapłonu - 45° OWK przed GMP, średnica otworu – 3mm, zapłon w środku komory wstępnej  
 Fig. 9. Schlieren photographs of combustion process in combustion chamber with prechamber: prechamber volume – 28%, ignition timing - 45° BTDC, orifice diameter – 3mm, ignition at the center of prechamber



Rys. 10. Przebieg spalania w komorze spalania z komorą wstępną; objętość komory wstępnej – 28%, wyprzedzenie zapłonu - 90° OWK przed GMP, średnica otworu – 3mm, zapłon w otworze  
 Fig. 10. Schlieren photographs of combustion process in combustion chamber with prechamber: prechamber volume – 28%, ignition timing - 90° BTDC, orifice diameter – 3mm, ignition inside the orifice

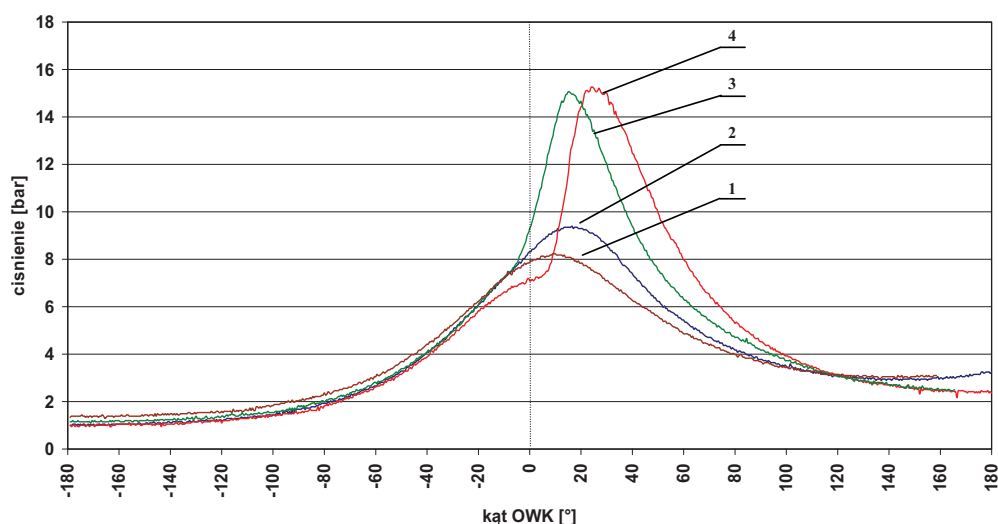
W efekcie trzeba sprężyć ładunek o stosunkowo wysokim ciśnieniu powstałym pod wpływem spalania. Dla porównania na wykresie zamieszczono także wykres indykatorowy uzyskany podczas spalania ładunku w standardowej komorze spalania silnika, bez przegrody.



Rys. 11. Przebieg ciśnienia w komorze spalania, dla różnych miejsc zapłonu; objętość komory wstępnej – 28%, średnica otworu – 3mm

Fig. 11. Cylinder pressure versus crank angle for different spark plug locations (on the wall of prechamber, in the middle of prechamber, inside of orifice); prechamber volume – 28%, orifice diameter – 3mm

W celu oceny wpływu objętości wstępnej komory spalania na proces spalania wykonano pomiary przebiegów ciśnienia szybkozmiennego na MPS przy zastosowaniu komór spalania o różnej objętości stosując różne wartości kąta wyprzedzenia zapłonu, przy stałej wartości średnicy otworu w przegrodzie łączącej komorę wstępną z komorą główną – 3 mm. Wyniki badań pokazane są na rys. 12. Przedstawiają one przebieg ciśnienia w funkcji kąta obrotu wału korbowego.



Rys. 12. Przebieg ciśnień w komorze spalania dla różnych objętości komory wstępnej; zapłon na ścianie, kąt wyprzedzenia zapłonu pozwalający uzyskać maksymalne ciśnienie cyklu, średnica otworu – 3 mm

1 – komora bez przegrody, 2 – komora wstępna 10%, 3 – komora wstępna 28%, 4 – komora wstępna 20%  
 Fig. 12. Cylinder pressure versus crank angle for different prechamber volumes; ignition at the prechamber wall, ignition timing optimized in point of view of maximum cycle pressure, orifice diameter – 3mm  
 1 – chamber without partition, 2 – prechamber 10%, 3 – prechamber 28%, 4 – prechamber 20%



Dla porównania pokazano także wykres przebiegu ciśnienia w standardowej komorze spalania bez przegrody. Najwyższe wartości ciśnienia maksymalnego uzyskano w przypadku największych badanych objętości komór wstępnych, tzn. o objętości 20% i 28%. Ze względu na większe pole pracy wykres uzyskany w przypadku objętości 20% jest nawet korzystniejszy od wykresu uzyskanego dla objętości 28%, chociaż wyprzedzenie zapłonu w tym przypadku było zbyt małe i ciśnienie maksymalne wystąpiło zbyt późno. W przypadku najmniejszej objętości komory wstępnej 10% uzyskano również pewne zwiększenie pola pracy i wartości ciśnienia maksymalnego w stosunku do standardowej komory spalania, co świadczy o korzystnym wpływie podziału komory spalania na komorę wstępną i główną w silnikach o zapłonie iskrowym.

Należy zaznaczyć, że wszystkie wyniki uzyskano zasilając MPS mieszaniną stechiometryczną propanu z powietrzem, a więc ilość dostarczonego paliwa była we wszystkich badaniach jednakowa, co pozwala na porównanie wyników badań.

#### **4. Wnioski**

Przeprowadzone badania wizualizacyjne oraz pomiary ciśnień szybkozmiennych przy zastosowaniu maszyny pojedynczego sprężu (MPS) pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Zastosowanie nowego systemu spalania z półotwartą, wstępną komorą spalania pozwala na zintensyfikowanie procesu spalania, czego efektem jest: zwiększenie ciśnienia maksymalnego cyklu, zwiększenie sprawności spalania (zwiększenie pola pracy) oraz skrócenie czasu spalania ładunku.
2. Kąt wyprzedzenia zapłonu ma istotny wpływ na wartość ciśnienia maksymalnego i sprawność cyklu
3. Zmiana miejsca zapłonu w komorze wstępnej powoduje zmianę wartości ciśnienia maksymalnego oraz pola pracy cyklu. Oceny jego wpływu na przebiegu procesu spalania trzeba dokonywać nie tylko na podstawie wartości ciśnienia maksymalnego, ale także na podstawie przebiegu ciśnienia w całym cyklu pracy silnika, gdyż uzyskanie wysokiej wartości ciśnienia maksymalnego, przy zwiększeniu pola pracy sprężania, nie zawsze będzie dawało pozytywne efekty w przypadku silnika.
4. W przypadku badań prowadzonych przy zastosowaniu wstępnych komór spalania o różnej objętości, w odniesieniu do całkowitej objętości komory spalania, najkorzystniejsze efekty uzyskano w przypadku komór wstępnych o objętości 20% i 28%.

Podziękowanie: Niniejsza praca została zrealizowana w ramach Projektu Badawczego Nr 4T12D 029 30 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Informatyzacji i zawiera wybrane wyniki przeprowadzonych badań.

#### **Literatura**

- [1] Alcock, J. F, Scott, W. M., *Some More Light on Diesel Combustion*, Proceedings of the IMechE, Automobile Division, No.5, 1962-63.
- [2] Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill. Inc New York, 1998.
- [3] Jankowski, A., Sęczyk, J., Wolański, P., *Badania rozpylenia paliwa za pomocą wtryskiwania ze wspomaganem powietrznym w komorze o stałej objętości*, Materiały KONES 93, Jurata, str. 593-598, 1993.
- [4] Karimi, E. R., *High-Speed Photography of Fuel Spray and Combustion Events in a Production Diesel Engine and Combustion Bomb*, Proceedings of the IMechE, Part A: Journal of Power Engineering, Vol. 203 pp. 269-281.
- [5] Kośmicki, T., Rychter T., *Combustion Simulation by External Gas Jet in SI Piston Engine*, SAE Paper, No. 960084, 1996.

- [6] Leżański, T., Rychter, T., Teodorczyk, A., *Single Compression Machine for SI Engine Studies with Semi-Open Combustion Chamber*, Proceedings of KONES 99, 1999.
- [7] Leżański, T., Rychter, T., Teodorczyk, A., *Prechamber Combustion System Studies Using Rapid Compression Machine*, Journal of KONES, Internal Combustion Engines, Vol.7, No.1-2, 2000.
- [8] Leżański, T., Wolański, P., *Badania nowego systemu spalania dla silników o zapłonie iskrowym z półotwartą komora spalania*, (przekazany do publikacji w Journal of KONES, Internal Combustion Engines, Vol.14, 2007).
- [9] Oppenheim, A. K., *Pulsed Jet Combustion – Its Past, Present and Future*, Archivum Combustionis, Vol. 11, No. 1-2, 1991.
- [10] Rychter, T., Teodorczyk, A., *An Evaluation of Effectiveness of the Combustion Jet in a Dual – Chamber Configuration*, Archivum Combustionis, Vol. 4 No. 3, 1984.
- [11] Salomon, A.S.P., *Photographic Study of Fuel Spray Ignition in a Rapid Compression Machine*, SAE Paper No. 860065, 1986.
- [12] Werlbergen, P., Cartellieri, W. P., *Fuel Injection and Combustion Phenomena in a High Speed DI Diesel Engine Observed by Means of Endoscopic High Speed Photography*, SAE Paper No. 870097, 1987.
- [13] Wolański, P., *Application of Pulsed Jet Combustion in Internal Combustion Engines*, Dynamics of Exothermicity, J. Ray Bowen Ed., Gordon and Breach Publications, pp. 131-150, 1996.