

## USING OF HIGH SPEED PHOTOGRAPHY TO RESEARCH OF IGNITION PROCESS IN SI ENGINES WITH SEMI OPEN COMBUSTION CHAMBER

**Tomasz Leżański , Janusz Sęczyk, Stanisław Siwiec, Piotr Wolański**

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

### **Abstract**

*The results of the research into visualisation of the ignition process in a combustion system with divided, semi open combustion chamber, for SI engines are presented in this paper. In this combustion system the original combustion chamber was divided, by partition, into prechamber and the main combustion chamber. Initiation of the ignition had place in the prechamber using electric spark plug. Expected results of the research of this combustion system were: shortening of combustion time in all combustion chambers, reduction of exhaust emission and increased engine efficiency. The research was focused on experimental study of flame propagation during ignition and combustion into the prechamber when the point of ignition was placed in the wall of the prechamber opposite to the orifice in the prechamber, in the middle of the prechamber and in the orifice in the partition. The rapid compression machine (RCM) was used in the experimental research to facilitate visualisation of the process. This high speed Schlieren photography system and high speed pressure measurement system were used to record path of combustion and pressure variation in the combustion chamber. The best results were obtained when the point of ignition was placed at the wall of the prechamber, it was probably caused by flame front turbulisation immediately after ignition initiation. In this case the shortest time of combustion and the highest maximum cycle pressure were achieved resulting in the maximum combustion efficiency and minimum exhaust emission. If the point of ignition was placed in the middle of the prechamber or in the orifice in the partition, immediately after ignition initiation the laminar flame front was observed. This flame front was turbulised after some time from ignition initiation, however, the time to turbulisation was shortened in the case of the ignition in the middle of the prechamber. As a result, the combustion time after ignition initiation in the orifice in the partition was close to one in the original combustion chamber. Pictures in the paper present black-white high speed photography of the flame front development after ignition initiation for different ignition placements and the curves of flame front travel after the ignition.*

**Keywords:** *SI engines, rapid compression machine, combustion, ignition, combustion process, visualization*

## ZASTOSOWANIE FOTOGRAFII SZYBKIEJ W BADANIACH PROCESU ZAPŁONU W SILNIKACH O ZAPŁONIE ISKROWYM Z PÓŁOTWARTĄ KOMORĄ SPALANIA

### **Streszczenie**

*W publikacji przedstawiono wyniki badań wizualizacyjnych procesu zapłonu w systemie spalania z dzieloną, półotwartą komorą spalania przeznaczoną dla silników o zapłonie iskrowym. System charakteryzuje się podziałem standardowej komory spalania na komorę wstępną i zasadniczą. Inicjacja zapłonu od świecy elektrycznej ma miejsce w komorze wstępnej. Przedmiotem badań był przebieg zapłonu i spalania mieszaniny w komorze wstępnej, w przypadku umieszczenia elektrod świecy zapłonowej: na ścianie, w środku komory wstępnej, w otworze w przegrodzie łączącym komorę wstępną z komorą zasadniczą. Badania prowadzono przy zastosowaniu maszyny pojedynczego sprzężu co pozwoliło ułatwić wizualizację procesu. Wraz z rejestracją przebiegu spalania na taśmie filmowej rejestrowano przebieg zmian ciśnienia w komorze spalania. Najlepsze efekt uzyskano w przypadku miejsca inicjacji zapłonu na ścianie komory wstępnej. Wówczas czas spalania był najkrótszy, ponieważ spalanie miało charakter turbulentny. W przypadku zapłonu w środku komory wstępnej i zapłonu w otworze spalania, bezpośrednio*

po zapłonie, miało charakter laminarny i dopiero po pewnym czasie następowała turbulizacja płomienia, z tym, że w przypadku zapłonu w otworze czas ten był bardzo długi. W efekcie czas spalania, w przypadku zapłonu w otworze, był bardzo zbliżony do czasu spalania w komorze standardowej. Najkrótsze czasy spalania uzyskiwano w przypadku zapłonu na ściance, co wyraźnie można ocenić na wykresach i fotografiach przebiegu spalania.

**Słowa kluczowe:** silniki spalinowe, maszyna pojedynczego sprężu, spalanie, zapłon, wizualizacja procesów spalania

## 1. Wstęp

Przebieg zapłonu ma istotny wpływ na spalanie także w nowym systemie spalania z komorą dzieloną. Wynika to z zasady działania systemu, w którym zapłon mieszaniny następuje w komorze wstępnej za pomocą iskry elektrycznej i tam tworzy się struga palącej się mieszaniny, która z dużą energią wypływa do komory zasadniczej i przemieszczając się przez nią zapala kolejne warstwy mieszaniny. W efekcie, jak pokazują badania prowadzone przy zastosowaniu maszyny pojedynczego sprężu, uzyskuje się skrócenie czasu spalania, a więc powinna też nastąpić poprawa osiągnięć, w tym zmniejszenie emisji toksycznych składników spalin silnika. Celem pracy było wyjaśnienie wpływu miejsca zapłonu na przebieg spalania w silniku wyposażonym w dzieloną, półotwartą komorę spalania. Komorę spalania w maszynie pojedynczego sprężu wyposażono w okienka umożliwiające wizualizację procesu spalania. Stanowisko badawcze zostało wyposażone w system szybkościowej fotografii cieniowej do wizualizacji procesu spalania oraz system pomiaru szybkozmiennych ciśnień w komorze spalania. Przedmiotem badań był przebieg spalania w zależności od położenia miejsca zapłonu: na ściance, w środku komory, w otworze w przegrodzie oddzielającej komorę wstępną od komory zasadniczej. Stwierdzono, że najlepsze efekty uzyskuje się w przypadku umieszczania elektrod świecy na ściance. Wówczas można było wygenerować w odpowiednim czasie strugę palącej się mieszaniny i rodników wpływającą z komory wstępnej do zasadniczej, która szybko przemieszczając się przez komorę zasadniczą powodowała zapłon mieszaniny w komorze zasadniczej, w wyniku czego skróceniu ulegał czas spalania. Przy niektórych wartościach objętości komory wstępnej można było także uzyskać korzystne rezultaty w przypadku zapłonu w środku komory wstępnej. Jeżeli elektrody świecy były umieszczone w otworze łączącym komorę wstępną z komorą zasadniczą, to płomień rozprzestrzeniał się jednocześnie, z podobną prędkością, w kierunku komory wstępnej i w kierunku komory zasadniczej i nie można było uzyskać odpowiedniej różnicy ciśnienia między komorą wstępną i zasadniczą, aby wygenerować strumień palącej się mieszaniny i rodników wpływających do komory zasadniczej, a w efekcie nie uzyskiwano skrócenia czasu spalania. W tym przypadku prędkość spalania była porównywalna z prędkością spalania w standardowej komorze spalania.

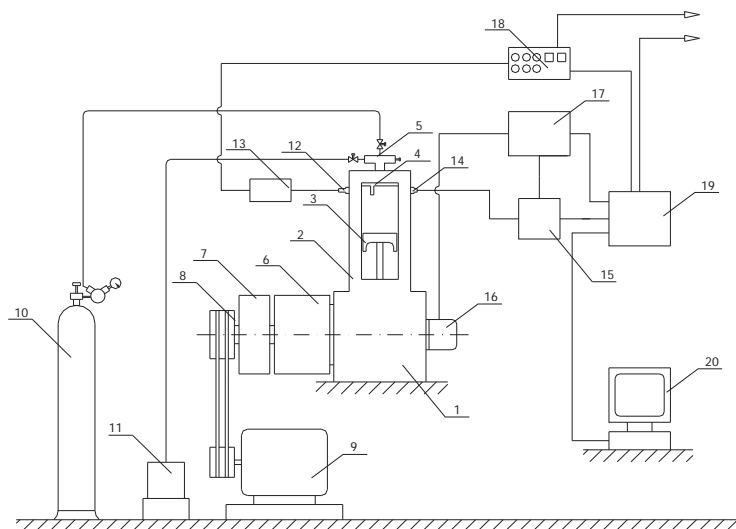
W publikacji przedstawiono przebiegi rozprzestrzeniania się płomienia po zapłonie, w przypadku różnych miejsc zapłonu oraz wykresy przemieszczeń czoła płomienia w odniesieniu do różnych miejsc zapłonu i różnych objętości komory wstępnej. Najlepsze rezultaty uzyskiwano wówczas, kiedy elektrody świecy zapłonowej umieszczano na ściance komory wstępnej, co należy wiązać z tym, że wówczas spalanie w komorze wstępnej miało charakter turbulentny, natomiast w pozostałych przypadkach spalanie miało charakter laminarny a więc czas spalania w komorze wstępnej ulegał wydłużeniu, gdyż turbulizacja płomienia następowała dopiero po pewnym czasie od zapłonu.

## 2. Stanowisko badawcze

Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na Rys. 1., a na Rys. 2. widok stanowiska badawczego. W skład stanowiska wchodziły: maszyna pojedynczego sprężu (MPS), układ napędowy, sprzęgło elektromagnetyczne, przekładnia pasowa, koło zamachowe, wizualizacyjna komora spalania. MPS posiada układ korbowo-tłokowy wykonujący ruch posuwisto-zwrotny, tak jak w standardowym silniku tłokowym. Komora wizualizacyjna ma wymiary 78 x 78 x 30 mm,

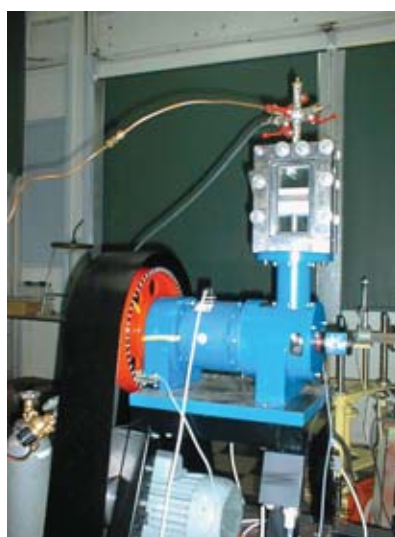
przy czym skok tłoka wynosi 78 mm, a wymiary tłoka 78 x 30 mm. Ścianka czołowa i tylna są wykonane z specjalnego szkła optycznego o grubości 20 mm.

Stanowisko badawcze zostało wyposażone w aparaturę do pomiarów szybkozmiennego ciśnienia w komorze spalania oraz w urządzenia do fotografii cieniowej. Przebieg spalania w płaszczyźnie ruchu tłoka był rejestrowany za pomocą kamery bębnowej.



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego MPS. 1.mechanizm korbowy, 2.cylinder roboczy, 3. tłok, 4.komora spalania, 5. System napełniania i usuwania spalin, 6. sprzęgło elektromagnetyczne, 7. koło zamachowe, 8 .przekładnia pasowa, 9. silnik elektryczny, 10. butla gazowa, 11. pompa próżniowa, 12. świeca zapłonowa, 13. układ zapłonowy, 14.piezoelektryczny czujnik ciśnienia, 15.wzmacniacz, 16.impulsator, 17. indiskop 427, 18. Sterownik systemu optycznego, 19. Karta pomiarowa, 20. Komputer PC

Fig. 1. Schematic of RCM test stand. 1.Crank mechanism, 2.combustion chamber, 3.piston, 4.insert model combustion chamber, 5. Refueling and emptying system, 6.electromagnetic clutch, 7.flyweel, 8.external belt transmission, 9.electric motor, 10.pressurized bottle, 11.vacuum pump, 12.spark plug, 13.ignition apparatus, 14.piezoelectric transducer, 15amplifier, 16crank encoder, 17 indiskope 427, 18.ECU of optical system, 19 measurement card, 20. PC



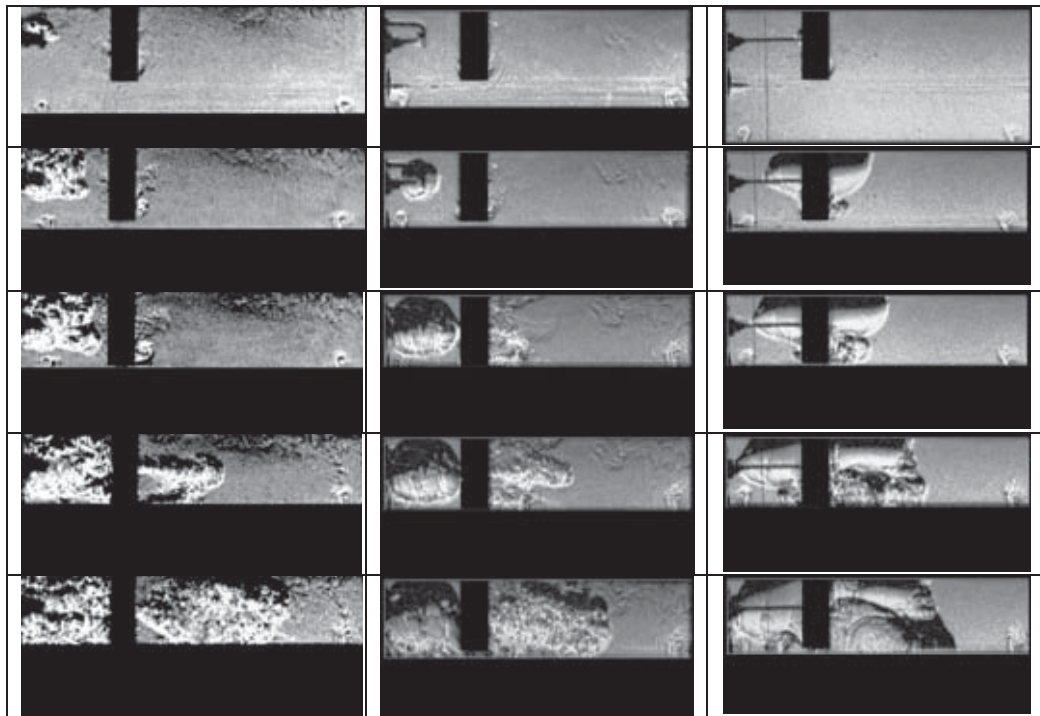
Rys. 2. Widok stanowiska badawczego MPS  
Fig. 2. View of Rapid Compression Machine Stand

W skład aparatury do pomiarów szybkozmiennego ciśnienia wchodziły: czujnik ciśnienia typ 6053B oraz wzmacniacz ładunku typ 5011 firmy Kistler, czujnik położenia wału korbowego PFI80, system akwizycji wyników pomiarów Indoskope 427 oraz komputer klasy PC.

### 3. Wyniki badań

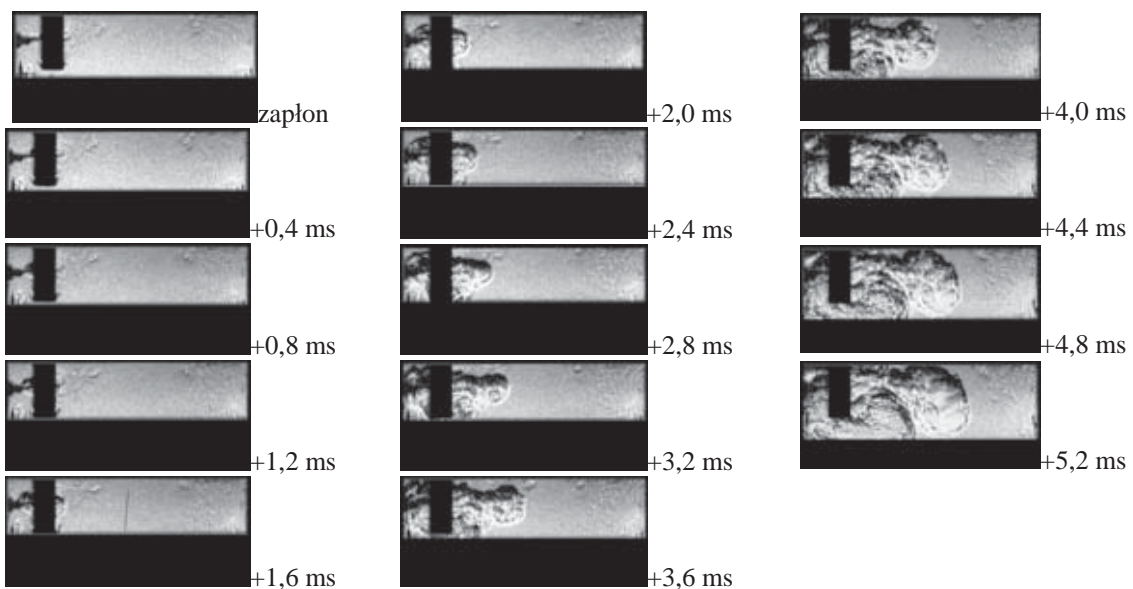
Badania prowadzono przy zastosowaniu MPS, przy prędkości obrotowej 1800 obr/min. Komora wizualizacyjna była zasilana mieszaniną stechiometryczną gazu ziemnego o zawartości 96% metanu z powietrzem. Mieszanina została przygotowana w butli ciśnieniowej, dla wszystkich prób, aby uniknąć rozrzutu w składzie. W komorze wizualizacyjnej były montowane specjalne wkładki modelujące komorę spalania silnika. Zapłon był realizowany za pomocą świecy elektrycznej której elektrody umieszczono w trzech różnych miejscach: na ścianie komory wstępnej przeciwległej do otworu w przegrodzie, w środku komory wstępnej, w otworze. Zmiennymi były: objętość komory wstępnej (a właściwie stosunek objętości komory wstępnej do sumy objętości komory wstępnej i zasadniczej), średnica otworu w przegrodzie, miejsce zapłonu i kąt wyprzedzenia zapłonu. Uzyskano wyniki w postaci fotografii przebiegu spalania w funkcji czasu oraz wykresów szybkozmiennego ciśnienia w funkcji kąta obrotu wału korbowego. Na fotografiach przebiegu spalania wyraźnie widać, że miejsce zapłonu w istotny sposób wpływa na przebieg spalania w komorze wstępnej i zasadniczej i jest to spowodowane głównie kierunkiem i długotrwałością rozprzestrzeniania się czoła płomienia oraz poziomem turbulizacji mieszaniny w komorze wstępnej po zapłonie. W efekcie końcowym prowadzi to do krótszego lub dłuższego czasu spalania w komorze wstępnej i do krótszego lub dłuższego całkowitego czasu spalania w komorze wstępnej i zasadniczej. Na Rys. 3. przedstawiono i porównano fotografie z przebiegiem zapłonu w przypadku: zapłonu na ścianie, zapłonu w środku komory wstępnej oraz zapłonu w otworze w przegrodzie oddzielającej wstępną komorę spalania od zasadniczej komory spalania. Widać wyraźnie różnice w przebiegu rozprzestrzeniania się płomienia w komorze wstępnej. Przy tym wydawałoby się, że w przypadku zapłonu w środku komory wstępnej czas spalania w komorze wstępnej powinien być najkrótszy, ale jest on nawet dłuższy, niż w przypadku zapłonu na ścianie, co jest spowodowane przyspieszeniem spalania w wyniku turbulizacji, jaka występuje przy zapłonie na ścianie (niezależnie od innych parametrów badań). Najwolniej płomień rozprzestrzenił się w przypadku zapłonu w otworze. Jeżeli rozpatrzy się przykład spalania w komorze wstępnej o objętości 28% i porówna te przebiegi to można zauważyć że kiedy po około 3,2 ms cała przestrzeń wstępnej komory spalania, w przypadku zapłonu na ścianie, była objęta procesem spalania, a w przypadku zapłonu w środku komory wstępnej po około 4,4 ms, to w przypadku zapłonu w otworze dopiero po około 6 ms. Ponadto trzeba zwrócić uwagę na to, że w przypadku zapłonu w otworze występują duże rozrzuty wyników badań, w czasie prób przy takich samych pozostałych parametrach badań.

Najbardziej charakterystyczny był przebieg zapłonu w przypadku umieszczenia elektrod świecy w otworze, w przegrodzie, łączącym komorę wstępną z komorą zasadniczą. Wówczas po zapłonie płomień rozprzestrzenił się równocześnie w kierunku komory wstępnej i komory zasadniczej. Czoło płomienia miało charakter laminarny, było mało rozczłonkowane, prawie gładkie. Różnica ciśnienia, jaka wytwarzała się między komorą wstępną a zasadniczą była mała, wynikająca tylko z różnych wartości bezwzględnych objętości komory wstępnej i zasadniczej. W związku z tym wpływ z komory wstępnej przez otwór w przegrodzie – jeżeli występował, to występował bardzo późno i praktycznie nie miał już wpływu na prędkość przemieszczania się czoła płomienia przez komorę zasadniczą. Pewien mały wpływ jest bardziej widoczny w przypadku komory wstępnej o małej objętości  $V_{kw} = 10\%$ . Jest to spowodowane prawdopodobnie tym, że w przypadku komory wstępnej, o objętości 10% już na początku spalania nastąpiła turbulizacja czoła płomienia, a więc prędkość spalania w komorze wstępnej była wyraźnie wyższa niż w komorze zasadniczej, gdzie w początkowym okresie nie widać występowania turbulizacji mieszaniny. Na fotografiach przedstawiających przebieg spalania, w przypadku zapłonu w otworze, można zauważyć, że jeżeli występowała turbulizacja czoła płomienia w komorze zasadniczej to była ona spowodowana przede wszystkim wpływem strugi palącej się mieszaniny z komory wstępnej, przez szczelinę między przegrodą a denkiem tłoka, a nie przez otwór w przegrodzie, którego opory przepływu były zbyt duże. Znaczne różnice w przebiegu spalania, przy zapłonie w otworze, występują w odniesieniu do różnej objętości wstępnej komory spalania oraz różnego kąta wyprzedzenia zapłonu.



Rys. 3 Porównanie przebiegów zapłonu w przypadku zapłonu na ścianie komory wstępnej, w środku komory wstępnej i w otworze w przegrodzie, łączącym komorę wstępną z zasadniczą

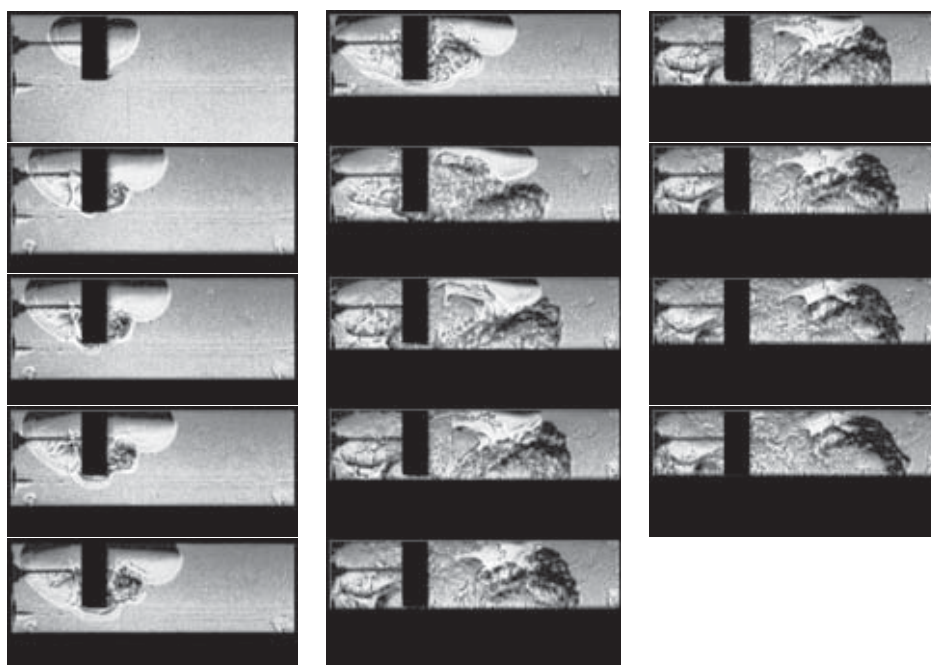
Fig. 3. Comparison of flame front development immediately after ignition initiation, for different ignition places in prechamber in wall of prechamber opposite to the orifice in partition in middle of prechamber into orifice in partition



Rys. 4. Przebieg spalania podczas badań z zastosowaniem MPS;  $V_{kw}=10\%$ ,  $\phi d=3\text{mm}$ ,  $\phi_{wz}=20^\circ\text{OWK}$ , zapłon w otworze  
 Fig. 4. Course of combustion for:  $V_p = 10\%$ ,  $d = 3\text{mm}$ ,  $\phi_{ia} = 20^\circ\text{CAD}$  for ignition initiation in orifice

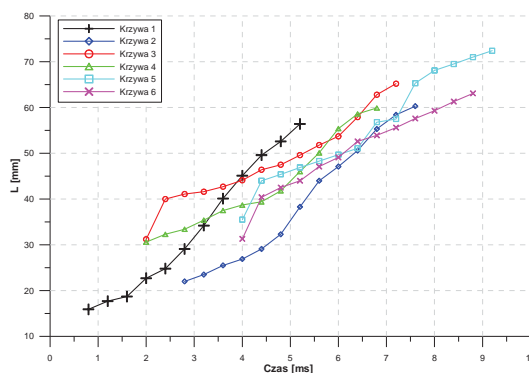
Na Rys. 4. przedstawiono przebieg zapłonu i spalania w przypadku objętości komory wstępnej  $V_{kw}=10\%$ , przy średnicy otworu w przegrodzie 3 mm i kącie wyprzedzenia zapłonu  $20^\circ\text{OWK}$ . Na kolejnych fotografiach widać, że bezpośrednio po zapłonie czoło płomienia przesuwa się równomiernie w kierunku przeciwnych ścianek komory wstępnej i zasadniczej. Ponieważ kąt wyprzedzenia zapłonu był stosunkowo mały a spalanie powolne, to dopiero po minięciu położenia GMP, czyli w swie rozprężania, widać większe przemieszczenie czoła płomienia w komorze

zasadniczej i objęcie całej komory wstępnej procesem spalania. Wówczas jednak odsłoniła się szczelina między przegrodą a denkiem tłoka i nastąpiło zawirowanie strumienia wypływającego przez szczelinę na krawędzi przegrody. Zawirowanie przemieszcza się przez zasadniczą komorę spalania z większą szybkością niż warstwa palącej się mieszaniny przemieszczającej się od otworu. Jest to spowodowane tym, że pole przekroju szczeliny jest kilkakrotnie większe niż pole przekroju otworu w przegrodzie, więc warunki dla przepływu przez szczelinę są o wiele korzystniejsze i mogą nastąpić nawet przy małej różnicy ciśnień między komorą wstępną i zasadniczą. Strumień wypływający przez szczelinę ma dużą energię i „przyciska” do górnej powierzchni zasadniczej komory spalania (głowica) warstwę pierwotną palącej się mieszaniny w komorze zasadniczej, przemieszczającej się od otworu w przegrodzie. Na Rys. 5. przedstawiono przebieg spalania, po zapłonie w otworze, w przypadku objętości komory spalania  $V_{kw}=28\%$ , przy średnicy otworu w przegrodzie 3 mm i kącie wyprzedzenia zapłonu  $90^\circ$  OWK. Należy zaznaczyć, że w przypadku zapłonu w otworze na ogół trzeba było stosować o wiele większe wartości kąta wyprzedzenia zapłonu, co było spowodowane małą prędkością spalania przy stosunkowo niskim ciśnieniu w chwili zapłonu.



Rys. 5. Przebieg spalania podczas badań z zastosowaniem MPS;  $V_{kw}=28\%$ ,  $\phi d=3$  mm,  $\phi_{wz}=90^\circ$  OWK, zapłon w otworze  
 Fig. 5. Course of combustion after ignition into orifice for:  $V_p = 28\%$ ,  $d = 3$  mm,  $\phi_{ia} = 90^\circ$  CAD

W tym przypadku spalanie rozpoczynało się przy bardzo dużej szczelinie między przegrodą a denkiem tłoka i jeszcze zanim tłok osiągnął położenie GMP już nastąpił wypływ palącej się, silnie sturbulizowanej mieszaniny, z komory wstępnej do zasadniczej, przez tę szczelinę. O ile warstwy pierwotne mieszaniny, spalające się bezpośrednio po zapłonie, mają charakter laminarny, to struga wypływająca pod przegrodą jest wyraźnie sturbulizowana i ma dominujący wpływ na spalanie w komorze zasadniczej, coraz bardziej przyciskając warstwę spalanej mieszaniny, która wypłynęła przez otwór w przegrodzie, do górnej powierzchni komory spalania. Ponowne odsłanianie się szczeliny, po minięciu przez tłok położenia GMP, powoduje powstanie nowego zawirowania na krawędzi przegrody, co świadczy o tym, że nadal ciśnienie w komorze wstępnej jest wyższe niż ciśnienie w komorze zasadniczej. Różnica ciśnienia jest jednak zbyt mała, aby spowodować wypływ intensywnej strugi przez otwór w przegrodzie. W efekcie czas spalania, w przypadku zapłonu w otworze w przegrodzie oddzielającej komorę wstępną od zasadniczej jest porównywalny lub nieco krótszy, niż w przypadku komory standardowej, co potwierdzają wykresy na Rys. 6.

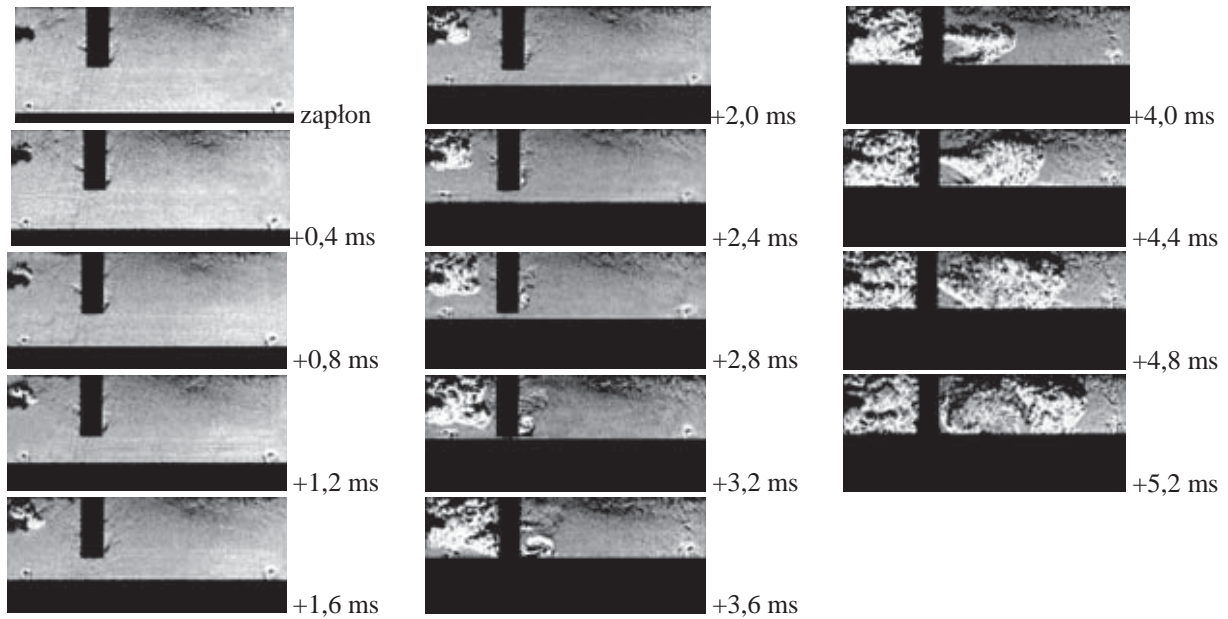


Rys. 6. Przemieszczenia czoła płomienia w czasie przy zapłonie w otworze 1-komora 10%, otwór 3 mm, kąt wyprzedzenia zapłonu 20°, 2-komora 10%, otwór 3 mm, kąt wyprzedzenia zapłonu 45°, 3-komora 28%, otwór 2 mm, kąt wyprzedzenia zapłonu 80°, 4-komora 28%, otwór 2 mm, kąt wyprzedzenia zapłonu 30°, a 5-komora 28%, otwór 3 mm, kąt wyprzedzenia zapłonu 90°, a 6-komora 28%, otwór 3 mm, kąt wyprzedzenia zapłonu 50°

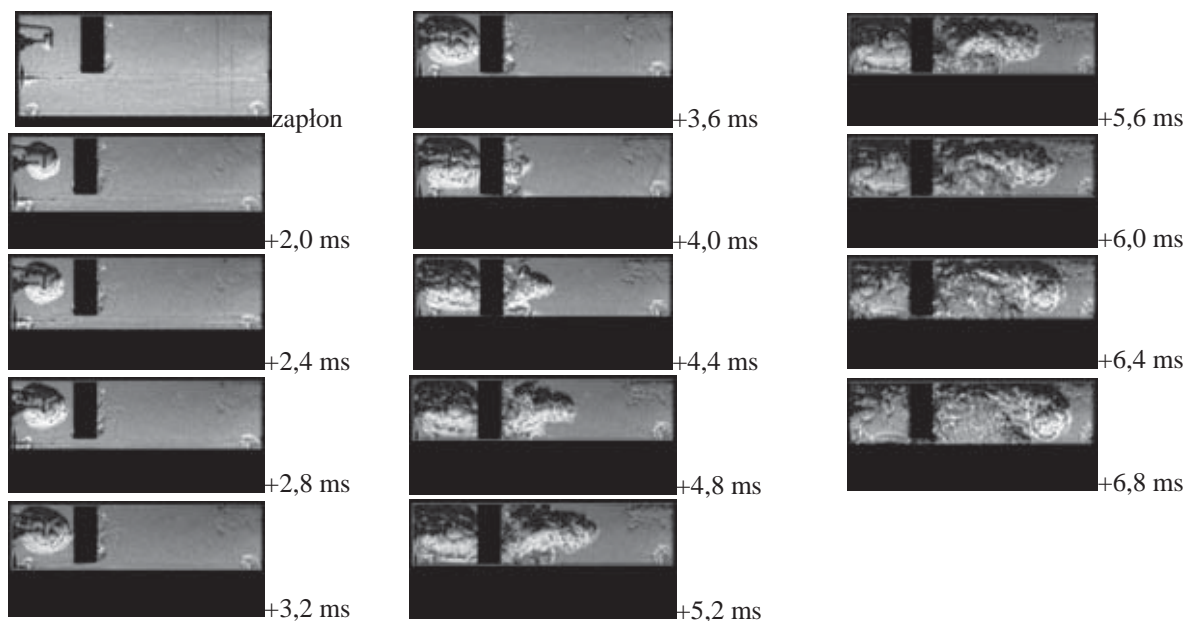
Fig. 6. Flame front travel after ignition initiation into orifice

Różnice w czasie spalania między komorą standardową a nowym systemem spalania przy zapłonie w otworze to głównie efekt tego, że czoło płomienia w komorze standardowej przemieszcza się w jednym kierunku a w przypadku zapłonu w otworze w dwóch kierunkach. Poza tym należy dodać, że zawirowanie na krawędzi przegrody ma dwójakie działanie: z jednej strony turbulizuje mieszaninę w komorze zasadniczej i działa w kierunku przyspieszenia procesu spalania a z drugiej strony działa hamująco na przemieszczanie się płomienia, ponieważ kierunek wektora prędkości jest w nim przeciwny do wektora prędkości spalania w komorze zasadniczej. Na Rys. 6. na którym pokazano wykresy przemieszczeń czoła płomienia w czasie, dotyczące zapłonu w otworze. Zwraca uwagę niestabilność przemieszczeń czoła płomienia, co powoduje, że kształt krzywych przemieszczeń czoła płomienia jest nieregularny. Jest to efekt bardzo spokojnego spalania i braku turbulizacji czoła płomienia bezpośrednio po zapłonie, być może sam otwór, w którym umieszczono elektrody świecy zapłonowej działa stabilizująco na płomień. Bardzo silny jest wpływ na prędkość spalania wiru powstającego na krawędzi przegrody i „warstwowe” spalanie w zasadniczej komorze spalania, wyraźny podział na warstwę laminarną i warstwę turbulentną, czego nie obserwuje się w przypadku innych miejsc zapłonu. Widać to na wykresach, szczególnie w odniesieniu do komory spalania o objętości 28%, kiedy to bezpośrednio po pojawieniu się wiru pod pierwotną warstwą spalającej się w zasadniczej komorze spalania mieszaniny następuje wyraźne zmniejszenie w niej prędkości spalania. Charakterystyczne jest też to, że o ile na początku, przy różnych kątach wyprzedzenia zapłonu, różnice w przemieszczeniach czoła płomienia są dość duże, to następnie różnice te ulegają zmniejszeniu.

Na Rys. 7. i 8. porównano przebieg zapłonu i spalania w przypadku umieszczenia elektrod świecy zapłonowej na ścianie wstępnej komory spalania i w środku komory wstępnej, dla: takiej samej objętości komory wstępnej – 28%, takiej samej średnicy otworu w przegrodzie – 3 mm i takiego samego kąta wyprzedzenia zapłonu – 45° OWK. Widać wyraźnie różnicę w charakterze rozprzestrzeniania się płomienia w komorze wstępnej. W przypadku zapłonu na ścianie (Rys. 7.) powstaje silnie strubulizowana przestrzeń wokół świecy zapłonowej, która obejmuje stopniowo coraz większą przestrzeń komory spalania i po 3,6 ms spalaniem objęta jest cała przestrzeń wstępnej komory spalania a ponieważ tłok znajduje się jeszcze dość daleko od położenia GMP, to następuje niewielki wypływ przez szczelinę między przegrodą a denkiem tłoka. To zawirowanie nie ma jednak istotniejszego wpływu na wypływ strugi przez otwór w przegrodzie, gdyż szczelina między przegrodą a denkiem tłoka szybko zamyka się i z otworu w przegrodzie wypływa struga, która szybko przemieszcza się przez zasadniczą komorę spalania. Dopiero przy ponownym otwarciu się szczeliny, po minięciu przez tłok położenia GMP, zawirowanie staje się bardziej intensywne i widać, że wpływa hamująco na dalsze przemieszczanie się strugi i czoła płomienia.



Rys. 7. Przebieg spalania podczas badań z zastosowaniem MPS;  $V_{kw}=28\%$ ,  $\phi d=3$  mm,  $\phi_{wz}=45^\circ$  OWK, zapłon na ścianie  
 Fig. 7. Course of combustion after ignition initiation in the wall of prechamber:  $V_p = 28\%$ ,  $d = 3$  mm,  $\phi_{ia} = 45^\circ$  CAD



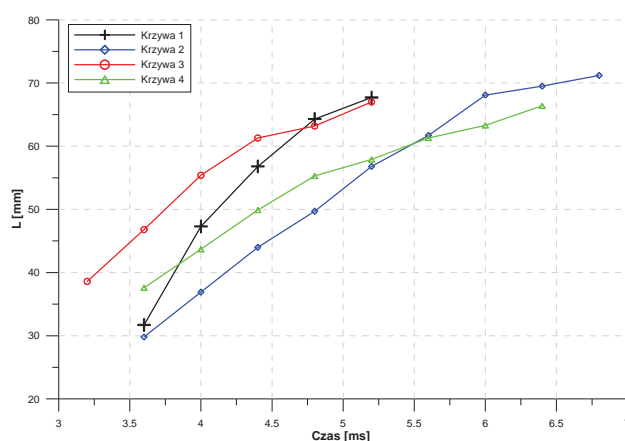
Rys. 8. Przebieg spalania podczas badań z zastosowaniem MPS;  $V_{kw}=28\%$ ,  $\phi d=3$  mm,  $\phi_{wz}=45^\circ$  OWK, zapłon na środku komory wstępnej  
 Fig. 8. Course of combustion after ignition initiation in the middle of prechamber:  $V_p = 28\%$ ,  $d = 3$  mm,  $\phi_{ia} = 45^\circ$  CAD

Z kolei na Rys. 8. przedstawiono przebieg spalania w komorze wstępnej i zasadniczej w przypadku zapłonu w środku wstępnej komory spalania. Widać tworzenie się charakterystycznej kuli wokół elektrod świecy zapłonowej, która stopniowo zwiększa swoją objętość, a kiedy osiąga ścianki komory spalania zaczyna dostosowywać się do ich kształtu i turbulizować mieszanie w tej przestrzeni. Czas, po jakim od zapłonu struga zaczyna wypływać z otworu w przegrodzie jest podobny jak w przypadku zapłonu na ścianie, ale struga ma wyraźnie mniejszą energię i wolniej przemieszcza się przez zasadniczą komorę spalania. Ponadto po odsłonięciu się szczeliny, po minięciu przez tłok położenia GMP, następuje wypływ przez szczelinę pod przegrodą i zawirowanie tej strugi, które jest o wiele intensywniejsze niż w przypadku zapłonu na ścianie, co



wyraźnie wpływa na wyhamowanie prędkości przemieszczeń strugi przez zasadniczą komorę spalania. Na fotografiach widać jak strumień wypływający przez otwór w przegrodzie jest dociskany przez zawirowanie strumienia wypływającego przez szczelinę do górnej ścianki komory spalania, po tym ulega zwiększonej turbulizacji ale jednocześnie wolniej przemieszcza się przez przestrzeń zasadniczej komory spalania.

Na Rys. 9. porównano przemieszczenie się czoła płomienia, przez przestrzeń zasadniczej komory spalania, w przypadku zapłonu na ścianie komory wstępnej i w środku komory wstępnej, w odniesieniu do dwóch wartości średnicy otworu w przegrodzie: 3 mm i 5 mm przy takiej samej objętości komory wstępnej (28%).



Rys. 9. Porównanie przebiegów przemieszczeń czoła płomienia przez zasadniczą komorę spalania w przypadku zapłonu na ścianie i w środku komory wstępnej. 1- zapłon na ścianie, otwór 3 mm, 2- zapłon w środku, otwór 3 mm; 3- zapłon na ścianie, otwór 5 mm; 4- zapłon w środku, otwór 5 mm

Fig. 9. Comparison of flame front travel after ignition initiation in the wall of prechamber (W) and in the middle of prechamber (M):  $V_p = 28\%$ ,  $\varphi_{ia} = 45^\circ$  CAD

Na wykresach można zauważyć, że całkowity czas spalania w przypadku zapłonu na ścianie będzie wyraźnie krótszy, niż w przypadku zapłonu w środku komory wstępnej, nawet jeżeli początek wypływu przez otwór nastąpił prawie po tym samym czasie od chwili zapłonu. Porównując przemieszczenia czoła płomienia w komorze wstępnej, w przypadku otworu w przegrodzie 3 mm i 5 mm, można zauważyć, że wypływ z komory wstępnej w przypadku średnicy otworu w przegrodzie 5 mm następuje po krótszym czasie co jest spowodowane mniejszymi oporami przepływu. Czoło płomienia przemieszcza się jednak wolniej przez zasadniczą komorę spalania niż w przypadku otworu w przegrodzie 3 mm co oznacza, że energia strugi jest mniejsza. Dlatego też po pewnym okresie czasu przemieszczenia, w przypadku otworu 3 mm, stają się większe niż w odniesieniu do 5 mm. W wyniku tego krzywe dotyczące komory spalania o objętości 28%, z otworem w przegrodzie 5 mm są bardziej płaskie od krzywych dotyczących otworu 3 mm. W obu przypadkach, tzn. otworu 5 mm i 3 mm, prędkości przemieszczenia czoła płomienia są większe w odniesieniu do zapłonu na ścianie niż w odniesieniu do zapłonu w środku komory wstępnej.

#### 4. Wnioski

1. Fotografie przebiegu spalania pokazują, że miejsce zapłonu bardzo silnie wpływa na charakter spalania po inicjacji zapłonu; w przypadku zapłonu na ścianie spalanie w komorze wstępnej ma charakter turbulentny a w przypadku zapłonu w środku komory wstępnej oraz zapłonu w otworze ma charakter laminarny.
2. Charakter spalania ma wpływ na czas spalania w komorze wstępnej a w efekcie na czas, po jakim od chwili zapłonu nastąpi wypływ strugi, spalin i produktów niezakończonych reakcji utleniania, z komory wstępnej do komory zasadniczej.

3. W przypadku zapłonu w środku komory wstępnej czoło płomienia miało kształt kuli i rozprzestrzeniało się równomiernie zwiększając swoją średnicę a dopiero po dotarciu do ścianek komory spalania przybierało kształt komory spalania, przy czym charakter spalania zmieniał się z laminarnego w turbulentny.
4. W przypadku zapłonu w otworze płomień rozprzestrzeniał się jednocześnie, równomiernie, w przeciwnych kierunkach, w kierunku komory wstępnej i w kierunku komory zasadniczej; różnica ciśnienia, jaka powstawała między komora wstępną i komora zasadniczą była zbyt mała, aby wytworzyć strugę z dużą prędkością przemieszczającą się przez komorę zasadniczą, powodującą przyspieszenie spalania, w stosunku do standardowej komory spalania.
5. W przypadku najmniejszej z badanych komór wstępnych (10%) charakter spalania w komorze wstępnej był podobny niezależnie od tego, czy zapłon następował na środku komory wstępnej czy w otworze, jednakże w przypadku zapłonu w otworze czas spalania w komorze zasadniczej był dłuższy niż przy zapłonie w środku komory wstępnej.
6. Przeprowadzone badania wykazały, że najlepsze efekty zapewnia zapłon na ściance komory wstępnej przeciwległej do otworu w przegrodzie a najgorsze zapłon w otworze w przegrodzie łączącej komorę wstępną z komorą zasadniczą.

## 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*, No PTNSS-2009-SC-169, Influence of ignition advance angle on combustion in internal combustion spark ignition engines with semi open combustion chamber, 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.