

Endoskopowe obserwacje rozprzestrzeniania się płomienia w komorze spalania silnika ZS z wtryskiem bezpośrednim i wstępną homogenizacją mieszanki

W artykule przedstawiono wyniki badań silnika o zapłonie samoczynnym z wtryskiem bezpośrednim i częściową homogenizacją ładunku w cylindrze. Uwzględniając potrzeby badawcze w rozwoju systemów wtrysku paliwa i spalania w nowoczesnych silnikach, szczególnie dotyczących uwarstwienia ładunku i propagacji płomienia, do szczegółowych badań wybrana została metoda optyczna. Wykonane zostały obserwacje endoskopowe wtrysku paliwa, samozapłonu i procesu spalania oraz przeprowadzono numeryczną analizę wyników obserwacji wraz z ich oceną.

Wykorzystując numeryczną obróbkę otrzymanych obrazów możliwe było ich sparometryzowanie i ocena jakościowa. Obserwacje przeprowadzone w komorze spalania pracującego silnika pozwoliły na określenie prędkości rozprzestrzeniania się płomienia i rozkładu temperatury w obszarze komory spalania. Badania przeprowadzono dla różnych wartości ciśnienia doładowania i dla różnych systemów zasilania: konwencjonalnego i z częściową homogenizacją ładunku.

W artykule sformułowano wnioski dotyczące struktury płomienia i prędkości jego rozprzestrzeniania się w komorze spalania z częściową homogenizacją ładunku w porównaniu do systemu konwencjonalnego.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe o zapłonie samoczynnym, wtrysk bezpośredni, spalanie, endoskopia silnikowa, płomień dyspersyjny, rozkład temperatury, homogenizacja mieszanki (silnik HCCI)

Endoscopic observations of flame propagation in combustion chamber of an DI Diesel engine with mixture partial homogenisation

In the paper the results of the research on CI direct injection combustion engines with partial homogenisation of the cylinder charge have been presented. Based on the research needs in the development of injection and combustion systems in modern engines, particularly in the range of stratification of the charge and flame propagation optical investigation methods have been chosen for the detailed studies. The endoscopic observations of the injection, self ignition and combustion processes have been carried out and a numerical analysis of the observation results has been evaluated and discussed.

The observations carried out in the combustion chamber on running engines allowed the estimation of the flame propagation and the flame temperature distribution in the combustion chamber. Research has been executed for a variety of cylinder charging pressures and for different fuelling systems: conventional and with partial homogenisation of the charge.

Some conclusions concerning problems of the flame structure and its propagation in the combustion chamber with partial homogenisation of the charge in comparison to the conventional system have been formulated.

Key words: internal combustion engine, DI, CI engines, combustion process, engine endoscopy, sooting flame, temperature distribution, mixture homogenisation (HCCI engine)

1. Wstęp

Istotą działania silnika spalinowego jest przetwarzanie energii chemicznej zawartej w paliwie na pracę mechaniczną. Najważniejszym ogniwem zachodzących w nim przemian jest więc proces spalania, którego jakość determinuje nie tylko sprawność wyzwala energii chemicznej i jej przetworzenia na energię cieplną opisaną parametrami termodynamicznymi, ale także wiąże się z powstawaniem wielu nowych związków chemicznych, z których niektóre stanowią toksyczne składniki spalin.

Ocena współczesnych wymagań stawianych procesowi spalania prowadzi do wniosku o konieczności sterowania zmiennymi w czasie i przestrzeni parametrami tego procesu, wśród których najistotniejszymi są: lokalna dostępność paliwa i utleniacza w odpowiedniej proporcji, energia akty-

1. Introduction

The essence of a combustion engine operation is the transformation of the chemical energy contained in the fuel into mechanical work. Thus, the most important element of the transformations going on there is the combustion process whose quality not only determines the chemical energy release efficiency and its transformation into thermodynamic parameters, but is also related to the formation of numerous new chemical compounds some of which are the toxic components of exhaust gases.

The evaluation of contemporary demands set to the combustion process leads to the conclusion on the necessity to control the process parameters, varying in time and space. The most significant parameters are: local availability of fuel and oxidant in appropriate proportion, activation energy of

wacji łańcuchowych reakcji spalania, prędkość rozprzestrzeniania się płomienia i jego zdolności dyfuzyjne.

Sterowanie przebiegiem procesu spalania w komorze spalania silnika spalinowego wymaga opanowania techniki jego diagnozowania, szczególnie prędkości i kierunków rozprzestrzeniania się płomienia oraz rozkładu temperatury płomienia i stężenia cząstek stałych w przestrzeni spalania. Zastosowanie diagnostyki tego rodzaju wymaga bieżącej rejestracji obrazów uzyskanych z obserwacji przemian zachodzących wewnątrz cylindra pracującego silnika i ich interpretacji jakościowej oraz – trudniejszej – interpretacji ilościowej.

Nową, obecnie proponowaną metodą poprawy wskaźników pracy silnika ZS jest spalanie w warunkach wstępnie zhomogenizowanej mieszanki palnej. Uzyskuje się je przez wtrysk części dawki paliwa do przewodu dolotowego lub do cylindra we wczesnej fazie procesu sprężania. Ta druga propozycja jest realizowana z wykorzystaniem wielofazowego wtrysku, w którym dawka paliwa przypadająca na jeden cykl roboczy dzielona jest na kilka dawek częściowych. W tym kontekście powstało pytanie, na ile zastosowanie wtrysku wielofazowego (wieloczęściowego) wpływa na strukturę powstającego w komorze spalania płomienia oraz na parametry jego rozprzestrzeniania oraz, czy podobny wpływ występuje przy zastosowaniu doładowania. Próba odpowiedzi na te pytania stanowiła istotę omawianych badań.

2. Przedmiot badań i metoda badawcza

W systemach spalania ze wstępną homogenizacją ładunku upatruje się możliwości obniżenia emisji cząstek stałych (głównie sadzy) i emisji tlenków azotu przy jednoczesnym uzyskaniu zadowalającej ekonomiczności pracy silnika. Jednocześnie, wielofazowe dostarczanie paliwa do cylindra silnika, wstępna homogenizacja ładunku i przebieg procesu spalania w takim środowisku istotnie zmieniają warunki termodynamiczne obiegu silnikowego. Rozpoznanie parametrów i wskaźników termodynamicznych charakterystycznych dla procesu spalania i obiegu silnikowego realizowanego w takim systemie spalania stanowi istotny problem badawczy.

Zasadniczym celem prowadzonych prac była ocena wpływu wstępnej homogenizacji mieszanki oraz doładowania silnika na strukturę płomienia powstającego w przestrzeni spalania oraz na wskaźniki porównawcze tego procesu. Podjęto próbę oceny takiego wpływu na przebieg tworzenia mieszanki, powstawanie ognisk samozapłonu oraz na prędkość rozprzestrzeniania się płomienia w silniku o zapłonie samoczynnym.

Ocenę przebiegu procesu spalania postanowiono przeprowadzić z wykorzystaniem metody obserwacji bezpośredniej i numerycznej obróbki obrazów cyfrowych. Cechą płomieni silnikowych istotną dla tego wyboru były ich właściwości radiacyjne, szczególnie w odniesieniu do silników o ZS. Postanowiono wykorzystać metodę badań optycznych pozwalającą na pomiary radiacji, której intensywność jest związana z promieniowaniem temperaturowym oraz rodzajem promiennika i koncentracją promieniujących cząstek w ośrodku. Poszukiwano przy tym takiej metody, która pozwoliłaby na prowadzenie obserwacji w czasie ciągłej pra-

combustion chain reactions, flame propagation rate and its diffusion capacities.

The combustion process control in the combustion chamber of a combustion engine requires the knowledge of its diagnosing technique, particularly the flame propagation rate and directions as well as the flame temperature distribution and particle concentration in the combustion space. The application of this type of diagnostics requires current recording of images obtained from observation of transformations taking place inside the running engine's cylinder and their qualitative interpretation and the more difficult quantitative analysis.

A new method now proposed to improve performance of Diesel engine is combustion in the conditions of partially premixed, homogenized charge fuel mixture. This is obtained through partial fuel dose injection to the inlet duct or to the cylinder at an early stage of compression. The other proposal is performed with the use of multiple injection where the fuel dose per 1 working cycle is divided into several partial doses. In this context the question arose whether similar influence occurs when supercharging is applied. An attempt to answer the questions was the essence of the tests discussed here.

2. Material and method

The combustion systems with premixed, homogenized charge are considered as the potential factor of simultaneous reduction of particle (mainly soot) and NO_x emissions, obtaining satisfactory level of engine operation at the same time. However, the fuel multiple injection into the cylinder, charge pre-homogenization and the course of the combustion process in such environment significantly change the thermodynamic conditions of the engine cycle. Recognition of the parameters and thermodynamic indexes, characteristic of the combustion process and engine cycle performed in such combustion system constitutes a significant research issue.

The principal purpose of the work done was the valuation of the influence of the charge pre-homogenization and supercharging on the flame structure. An attempt was made to value such influence on the process of mixture formation, on the rise of self-ignition foci and on the flame propagation rate in the internal combustion engine.

The evaluation of the combustion process was made by optical direct observation method and numerical analysis of the digital images). The feature of the engine flame relevant for this selection comprises their properties of radiation, particularly concerning the CI engines. The method of optical research was decided upon allowing radiation measuring whose intensity is related to temperature induced radiation, a kind of radiator and concentration of radiating particles in the center. Simultaneously such method was searched for that would allow observations during continuous operation of the engine. An important element of the method usability valuation was also the possibility of prompt obtaining photographic material and its relatively fast interpretation.

For the interpretation of the results, the digital record of some images filmed in video technique was applied, which

cy silnika oraz na ich rejestrację w dowolnie wybranej chwili, określonej położeniem wału korbowego silnika. Ważnym elementem oceny przydatności metody była także możliwość szybkiego pozyskiwania materiału zdjęciowego i jego interpretacji.

Do interpretacji wyników wykorzystano cyfrowy zapis poszczególnych obrazów sfilmowanych z wykorzystaniem techniki obserwacji stroboskopowej. Obraz procesu jest zapamiętywany w elektronicznym układzie rejestracji, a następnie zapisywany w pamięci masowej komputera. Proces przetwarzania elektronicznego i zapamiętywania obrazu trwa jednak na tyle długo (0,1–1 s), że niemożliwy jest zapis wielu obrazów z jednego krótkotrwałego procesu. Rejestruje się więc zdjęcia metodą stroboskopową, co kilka kolejnych cykli roboczych silnika. Jeżeli kolejne rejestrowane zdjęcia są przesunięte względem chwili początku rejestracji wyrażonej kątem obrotu wału korbowego o kąt $\Delta\alpha$, to otrzymuje się sekwencję zdjęć, którą – pod pewnymi warunkami – można uznać za reprezentatywny obraz przebiegu procesu [1].

Obraz uzyskiwany z kamery zapamiętywany jest w pamięci komputera w postaci mapy pikseli, których liczba wynika z rozdzielczości kamery. Przy zastosowanej rozdzielczości rejestrowanego obrazu obserwowana powierzchnia obiektu reprezentowana przez piksel wynosiła $33,1 \times 51,7$ mm. Każdy z pikseli opisany jest słowem 16-bitowym zawierającym informację o barwie, nasyceniu i jasności (zgodnie z modelem barw HSI/HSB/HSL¹⁾). W celu ilościowej, parametrycznej interpretacji materiału zdjęciowego opracowano własny program numeryczny PatEV (*Image Analysis and Transformation for Engine Video Observations*), który posłużył do analizy zdjęć oraz oceny przebiegu wtrysku paliwa i rozprzestrzeniania się płomienia w czasie spalania [2, 3].

Płomienie węglowodorowych paliw silnikowych promieniują zarówno w zakresie widzialnym, jak i w nadfiolecie. Promieniowanie w nadfiolecie jest charakterystyczne dla płomieni gazowych, rozprzestrzeniających się w ośrodku o równomiernym składzie mieszanki, a poszczególne widma wskazują promieniowanie określonych substancji i związków. Promieniowanie w podczerwieni jest emitowane głównie przez rozgrzane ciała stałe. Promieniowanie płomieni w silniku spalinywym w widzialnym zakresie fal jest interpretowane następująco [4]:

- kolor niebiesko-zielony – promieniowanie występuje w początkowych fazach spalania i jest związane ze spalaniem kinetycznym we wstępnie wymieszanej mieszance; typowa jest mała luminancja, a temperatura strefy płomienia wynosi ok. 2070 K;
- kolor biały i jasnożółty – charakteryzuje wypalanie cząsteczek węgla w płomieniu dyfuzyjnym przy temperaturze ok. 2300–2800 K;
- kolor żółty i pomarańczowoczerwony – oznacza wypalanie cząsteczek węgla w płomieniu dyfuzyjnym w niższej temperaturze; promieniowanie jest widoczne, gdy temperatura przekracza ok. 1270 K;
- kolor brązowy – oznacza wypalanie sadzy w obszarach bardzo bogatej mieszanki; wypalanie sadzy w obszarach

allows observations to be made in a stroboscopic manner. The image of the process is stored in an electronic recording system and then saved in the mass storage of the computer. The electronic processing and the storage of the image is too long (ca. 0.1–1 s) for saving several images from a short-term process. Therefore, images are recorded in the stroboscopic method, once in a few subsequent working cycles of the engine. If subsequent images recorded are displaced in relation to the recording onset, expressed in the crankshaft angle by $\Delta\alpha$, then a sequence of photographs is obtained that under certain conditions may be construed as the representative image of the process [1].

The image obtained from the camera was stored in the computer storage in the form of a pixel map, whose number results from the camera superficial resolution. With the resolution of the recorded image applied the observed area of the object, represented by a pixel was 33.1×51.7 mm. Each pixel was described by a 16-bit computer word containing information about the hue, saturation, intensity, brightness and luminance, according to the HSI/HSB/HSL hue model. For the quantitative, parametric interpretation of the photographic material, proprietary numerical program PatEV (*Image Analysis and Transformation for Engine Video Observations*) was developed and used for the analysis of photographs and the fuel injection course and flame propagation during combustion [2, 3].

The flames of liquid hydrocarbon-based engine fuels emit both visible and UV range of radiation. The UV radiation is characteristic of gas flames propagating in the center with relatively regular air/fuel ratio and the individual spectra indicate defined substances and compounds substances and molecules. The IR is mainly emitted by heated solid state. The flame radiation in the combustion engine in the visible range of radiation is interpreted as follows [4]:

- Bluish and green – radiation occurs in the first combustion stages and is related to kinetic combustion in the pre-mixed fuel mixture, low luminance is typical while the temperature exceeds ca. 2070 K;
- White and bright yellow – means burning of coal particles in the diffusion flame at the temperature ca. 2300–2800 K;
- Yellow and orange-red – means burning out of coal particles in the diffusion flame at a lower temperature, the radiation is visible when the temperature exceeds ca. 1270 K;
- Brown – means burning of soot in very rich mixture areas; burning out of soot in areas with higher oxygen content causes the occurrence of a white rim around the hot flame;
- Dark brown – means burning liquid fuel injected into the flame.

Upon analysis of literature in the scope of examining engine combustions processes, the most significant radiation ranges include [4–7]:

- 1) UV range:
 - $\lambda < 200$ nm (so-called vacuum UV) – CO emission,
 - $\lambda = 297; 306; 307.84; 309.04; 317$ nm – radicals OH^* (hydroxyl) radiation,

¹ HSI/HSB/HSL – ang. Hue, Saturation, Intensity/Brightness/Luminance

o większej zawartości tlenu powoduje powstawanie białej obwódki dookoła gorącego płomienia;

– kolor ciemnobrązowy – to spalanie ciekłego paliwa wtryskiwanego do płomienia.

Jak wynika z analizy literatury w zakresie badań silnikowych procesów spalania, do najistotniejszych zakresów promieniowania należą [4–7]:

1) zakres ultrafioletowy:

– $\Lambda < 200$ nm (tzw. nadfiolet próżniowy) – emisja CO,
– $\Lambda = 297; 306; 307,84; 309,04; 317$ nm – promieniowanie rodników OH* (hydroksylu),

– $\Lambda = 314,4; 387; (431)$ nm – promieniowanie wynikające z przejść rodnika CH* ze stanu elektronowo wzbudzonego do stanu podstawowego, szczególnie silne w strefie reakcji,

2) zakres widzialny ($\Lambda = 400\text{--}760$ nm):

– $\Lambda = 418,1; 419,7$ nm – promieniowanie rodnika CN* [5],
– $\Lambda = 431,4$ nm – promieniowanie rodnika CH*,
– $\Lambda = 516$ nm (zielony zakres widma) – promieniowanie rodnika C₂*, szczególnie silne w strefie reakcji.

Pasma promieniowania rodników CH* i C₂* są trudne do wydzielenia w zakresie światła widzialnego.

3) zakres podczerwony:

– $\Lambda = 2752, 2554$ nm – pasma promieniowania H₂O,
– $\Lambda = 2752, 4200, 4238$ nm – pasma promieniowania CO₂.

Zawartość węglowodorów w spalinach bada się za pomocą światła podczerwonego o długości fali $\Lambda = 3450 \pm 100$ nm, zawartość węgla przy długości fali $\Lambda = 3950 \pm 100$ nm, zawartość CO przy $\Lambda = 4700 \pm 200$ nm, a zawartość CO₂ przy $\Lambda = 4400 \pm 200$ nm. Detekcja różnych węglowodorów wymaga zastosowania większej rozdzielczości pomiarów.

3. Aparat badawczy

Jako obiekt badań wykorzystano jednocylindrowy, czterozaworowy, silnik badawczy o zapłonie samoczynnym typu AVL 5804 z bezpośrednim wtryskiem paliwa, wykorzystujący komputerowe sterowanie wielkością dawki i początkiem jej wtrysku (rys. 1). Silnik współpracował z hamulcem prądnicowym i był wyposażony w układ stabilizacji temperatury cieczy chłodzącej i oleju oraz w układ niezależnego doładowania. Cylinder roboczy tego silnika ma pojemność skokową 510 cm³, a komora spalania ma kształt toroidalny i jest umieszczona w tłoku. Jej objętość oszacowano na 23,5 cm³, a całkowitą objętość przestrzeni spalania na 27,0 cm³. W komorze spalania umieszczono centralnie wtryskiwacz pięciootworowy 5 × Ø0,195 mm; kąt rozchylenia strug wynosił 145°, wznios iglicy 0,25 mm, a ciśnienie otwarcia wtryskiwacza 220 bar.

Silnik przystosowano do obserwacji endoskopowych procesów wewnątrz cylindrowych przez umieszczenie dwóch przewodnic endoskopów w miejscu drugiego zaworu wylotowego; jedna z przewodnic wykorzystywana jest przez endoskop obserwacyjny, a druga – przez endoskop oświetlający, rys. 2. Endoskop obserwacyjny wprowadzany jest w głąb komory spalania w sposób pokazany na rysunku 3, co umożliwia obserwację znacznej części objętości komory. Jego umieszczenie poza obszarem zasięgu strug wtryskiwanego

– $\Lambda = 314,4; 387; (431)$ nm – radiation resulting from transformation of the CH* radical from the electron excited state to the basic state, particularly strong in the reaction zone,

2) visible range ($\Lambda = 400\text{--}760$ nm):

– $\Lambda = 418,1; 419,7$ nm – the CN* radical radiation [5],
– $\Lambda = 431,4$ nm – the CH* radical radiation,
– $\Lambda = 516$ nm (green range of spectrum) – the C₂* radiation, particularly strong in the reaction zone.

The CH* and C₂* radiation bands are difficult to be separated in the visible light range.

3) the IR range:

– $\Lambda = 2752, 2554$ nm – H₂O radiation bands,
– $\Lambda = 2752, 4200, 4238$ nm – CO₂ radiation bands.

The hydrocarbon content in the exhaust gases is tested by means of IR light of wavelength $\Lambda = 3450 \pm 100$ nm, the carbon content with the wavelength $\Lambda = 3950 \pm 100$ nm, the CO content with $\Lambda = 4700 \pm 200$ nm, and the CO₂ content with $\Lambda = 4400 \pm 200$ nm. The detection of various hydrocarbons requires the application of higher measuring resolution.

3. Research apparatus

A one-cylinder, four-valve, CI research engine AVL 5804 with direct fuel injection with computer controlled dose amount and start of injection (SOI, fig. 1), was used as the research object. The engine cooperated with the generator brake and was furnished with coolant and oil temperature stabilization system and an independent auxiliary supercharging system. The working cylinder of the engine has 510 cm³ stroke capacity, with toroidal form of the combustion chamber placed in the piston. Its volume was estimated as 23.5 cm³, while the total combustion space volume as 27.0 cm³. A 5-hole injector was placed centrally in the combustion chamber 5 × Ø0.195 mm; the jet flare angle was 145°, the needle lift was 0.25 mm and the opening pressure 220 bar.

The engine was adapted to the endoscopic observations of the in-cylinder processes through the placement of two endoscope guides in the point of the second outlet valve; one of the guides is used by the observation endoscope and the other by the light-guide endoscope (fig. 2). The observation endoscope is inserted inside the combustion chamber in the manner shown in fig. 3, which enables the observation of a large part of the chamber volume. Its placement outside the reach of injected fuel jets allows for the reduction of sooting of the quartz-window of the shield.

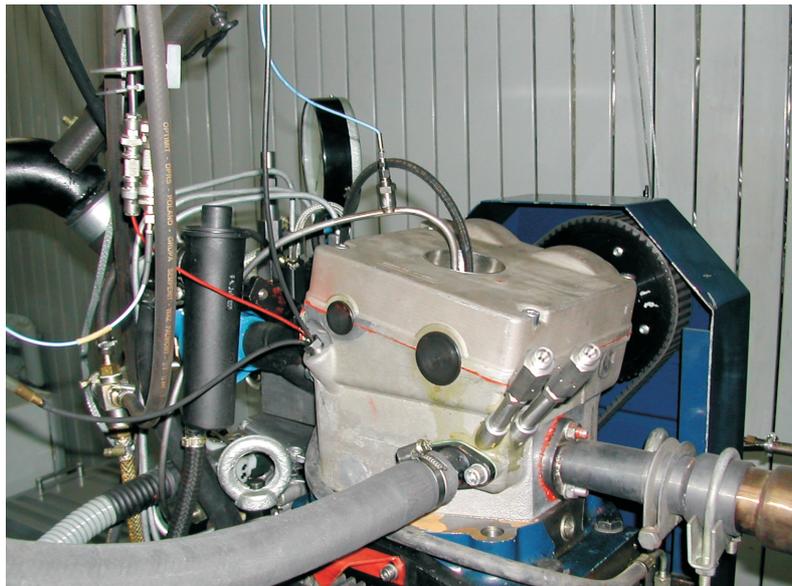
The device used for the observation of the combustion process was *Engine Video System 513D* with digital image recording, furnished with the endoscope, light-guide, image storage, image conversion and processing system and a computer. The endoscope used was of 4 mm diameter, nozzle cut-off angle 30° vision angle 70°, which allowed the observation of the combustion chamber. The endoscope in the engine head was placed in appropriate slare passing through the water coat with a quartz-window placed there.

The correct concluding related to the phenomena taking place in the operating area required the analysis of the repeatability of the recorded frames.



Rys. 1. Widok silnika AVL 5804 na stanowisku badawczym; otwarta pokrywa paska zębatego i napędu pompy wtryskowej

Fig. 1. View of the AVL 5804 engine on test site; the open cover of the geared belt and injection pump drive



Rys. 2. Widok głowicy silnika AVL od strony hamulca
Fig. 2. View of the AVL head from the brake side

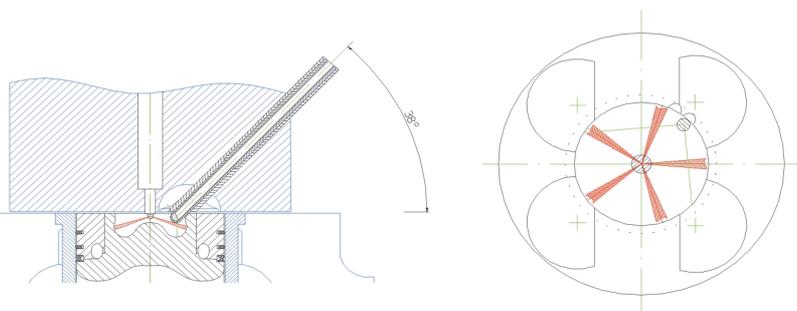
paliwa pozwala na zmniejszenie zanieczyszczenia osłonowego szkła kwarcowego.

Do obserwacji procesu spalania wykorzystano urządzenie *Engine Video System 513D* z cyfrowym zapisem obrazu, wyposażone we wzornik, światłowód, układ przetwarzania i pamięci obrazu oraz komputer. Zastosowany został endoskop $\varnothing 4$ mm, chłodzony sprężonym powietrzem, o kącie ścięcia końcówki 30° i kącie widzenia 70° , co pozwoliło na objęcie obserwacją dużego obszaru komory spalania. Endoskop w głowicy silnika umieszczony był w odpowiedniej tulei przechodzącej przez płaszczyznę wodny, w której umieszczona była osłona zakończona bańką ze szkła kwarcowego.

Prawidłowe wnioskowanie dotyczące zjawisk zachodzących w przestrzeni roboczej wymagało przeprowadzenia analizy powtarzalności zarejestrowanych obserwacji.

4. Ocena powtarzalności rejestrowanych obrazów

Analizę powtarzalności rejestrowanych obrazów przeprowadzono przy prędkości obrotowej silnika $n = 1000$ obr/min, na biegu jałowym. Obserwacje endoskopowe prowadzono przy dodatkowym oświetleniu, a pole powierzchni zdjęć wynosiło 47208 pikseli. Otrzymane obrazy analizowano w sposób cyfrowy wyznaczając obszary występowania promieniowania o określonych parametrach zgodnie z modelem HSL i tworząc podobszary ograniczone izoliniami, tzw. warstwy. Przy ich definiowaniu wykorzystano informacje na temat barwy występujących w przestrzeni spalania promienników oraz wyniki kalibracji układu, według której określonym wartościom luminancji można przypisać pewne wartości temperatury barwowej T_b oraz – przy założeniu,

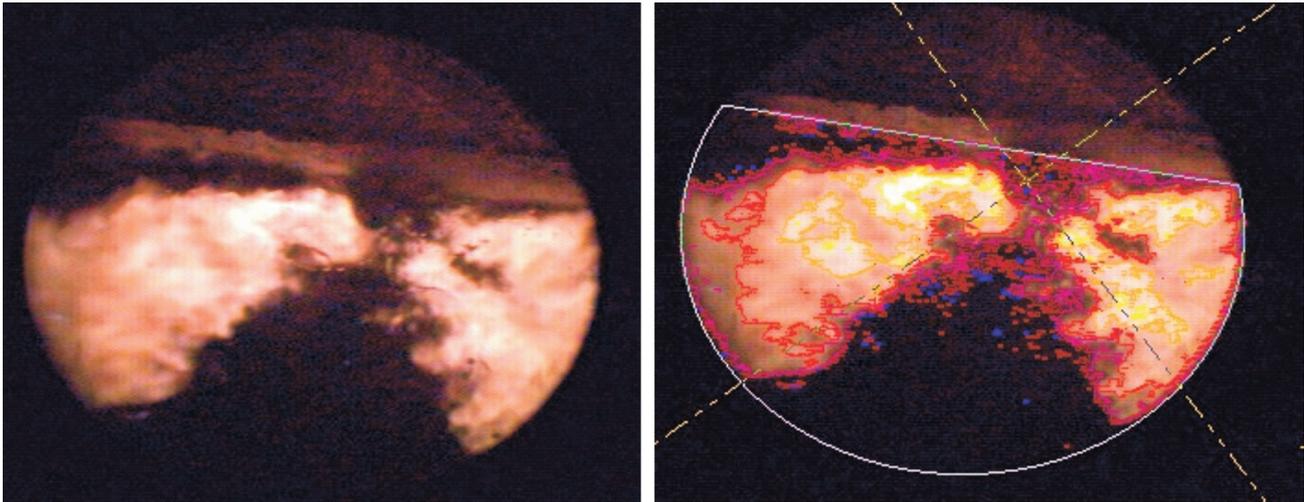


Rys. 3. Sposób umieszczenia endoskopu pokazany na przekroju cylindra silnika
Fig. 3. Method of placing the endoscope shown on the engine cylinder cross-section

4. Evaluation of the recorded frames repeatability

The evaluation of the recorded frames repeatability was carried out at engine speed $n = 1000$ rpm, idling. The endoscopic observations were made with additional lighting and the photographs total area was 47,208 pixels. The frames obtained were analyzed digitally, determining radiation occurrence areas of defined parameters, according to the HSL model and creating sub-areas limited by isolines, so-called contour lines. For their definition the information on the hue of radiators occurring in the combustion space was used as well as system calibration results, according to which the defined luminance values may be attributed certain values of the hue-temperature T_b and – with the assumption that the coefficient of emissivity $\epsilon = 0.65$ ¹⁾ – those of the actual flame temperature T_f . The values for the assumed luminance L range limits were defined as follows (temperature ranges result from divergences between the assumed models describing the dependency of luminance on the temperature [1]):

¹⁾ This value was obtained in more detailed comparative studies discussed in [1].



Rys. 4. Zdjęcie procesu spalania oświetlonego światłem zewnętrznym: a) zdjęcie naturalne, b) zdjęcie po obróbce w programie PatEV z naniesionymi warstwicami określonych parametrów pikseli ($n = 1000$ obr/min, bieg jałowy, $\alpha = 6,6^\circ$ OWK po początku wtrysku)

Fig. 4. Photograph of combustion process lit with ambient light: a) natural photograph, b) photograph after processing in PatEV with plotted contour lines of defined parameters ($n = 1000$ rpm, idling, $\alpha = 6.6$ CA after initial injection)

że współczynnik emisyjności $\epsilon = 0,65^2$ – także temperatury rzeczywistej płomienia T_f . Wartości te dla przyjętych granic przedziałów luminancji L określono następująco (przedziały temperatury wynikają z rozbieżności pomiędzy przyjmowanymi modelami opisującymi zależność luminancji od temperatury [1]):

- $L = 40$: T_b [K] = 1161–1172; T_f [K] = 1780–1800;
- $L = 100$: T_b [K] = 1276–1280; T_f [K] = 1960–1970;
- $L = 140$: T_b [K] = 1322–1333; T_f [K] = 2035–2050;
- $L = 200$: T_b [K] = 1404–1420; T_f [K] = 2160–2180;
- $L = 220$: T_b [K] = 1455–1462; T_f [K] = 2240–2250;
- $L = 240$: T_b [K] = 1620–1755; T_f [K] = 2500–2700;

Przykład zdjęcia procesu spalania w silniku, w którym zastosowano dodatkowe oświetlenie wnętrza komory spalania, pokazano na rysunku 4. Dzięki niemu łatwiejsze jest określenie miejsca umieszczenia rozpylacza oraz kształtu strug paliwa w czasie wtrysku. Obróbka obserwacji w programie PatEV pozwoliła na wyznaczenie przebiegu warstwic określających przedziały intensywności świecenia płomienia (luminancje) w sposób omówiony powyżej. W prowadzonej analizie obrazów zastosowano parametry warstwic zdefiniowane następująco (por. przypis 1):

- warstwa 0: $H = 150$ – 200 ; $S = 0$ – 180 ; $L = 40$ – 185 ; kolor niebieski;
- warstwa 1: $H = 201$ – 240 ; $S = 0$ – 180 ; $L = 40$ – 230 ; kolor brązowy;
- warstwa 2: $H = 0$ – 50 ; $S = 0$ – 240 ; $L = 50$ – 140 ; kolor żółty;
- warstwa 3: $H = 0$ – 50 ; $S = 0$ – 240 ; $L = 141$ – 200 ; kolor pomarańczowy;
- warstwa 4: $H = 0$ – 50 ; $S = 0$ – 240 ; $L = 201$ – 240 ; kolor czerwony.

Warstwa 0 obejmuje parametry charakterystyczne dla strugi wtryskiwanego paliwa świecącej światłem odbitym.

²⁾ Wartość tą uzyskano w wyniku dokładniejszych badań porównawczych omówionych w pracy [1].

- $L = 40$: T_b [K] = 1161–1172; T_f [K] = 1780–1800;
- $L = 100$: T_b [K] = 1276–1280; T_f [K] = 1960–1970;
- $L = 140$: T_b [K] = 1322–1333; T_f [K] = 2035–2050;
- $L = 200$: T_b [K] = 1404–1420; T_f [K] = 2160–2180;
- $L = 220$: T_b [K] = 1455–1462; T_f [K] = 2240–2250;
- $L = 240$: T_b [K] = 1620–1755; T_f [K] = 2500–2700;

An example of a photograph of the combustion process in an engine where additional lighting of the combustion chamber inside was applied, is presented in fig. 4. Thanks to this the determination of the spray location and fuel jet forms during injection is easier. The observation processing in PatEV allowed determining of the courses of contour lines defining the luminance intensity ranges in the methods discussed above. In the frame analysis carried out the contour line parameters applied were defined as follows (see note 1):

- Contour line 0: $H = 150$ – 200 ; $S = 0$ – 180 ; $L = 40$ – 185 ; blue;
- Contour line 1: $H = 201$ – 240 ; $S = 0$ – 180 ; $L = 40$ – 230 ; brown;
- Contour line 2: $H = 0$ – 50 ; $S = 0$ – 240 ; $L = 50$ – 140 ; yellow;
- Contour line 3: $H = 0$ – 50 ; $S = 0$ – 240 ; $L = 141$ – 200 ; orange;
- Contour line 4: $H = 0$ – 50 ; $S = 0$ – 240 ; $L = 201$ – 240 ; red.

Contour line 0 comprises the parameters characteristic of the injected fuel jet emitting reflected luminance. Contour line 1 comprises particles emitting dark brown light, of low temperature, and the other contour lines comprise particles covered by the flame and emitting light of intensity resulting from the assumed luminance range (contour line 4 – the highest luminance).

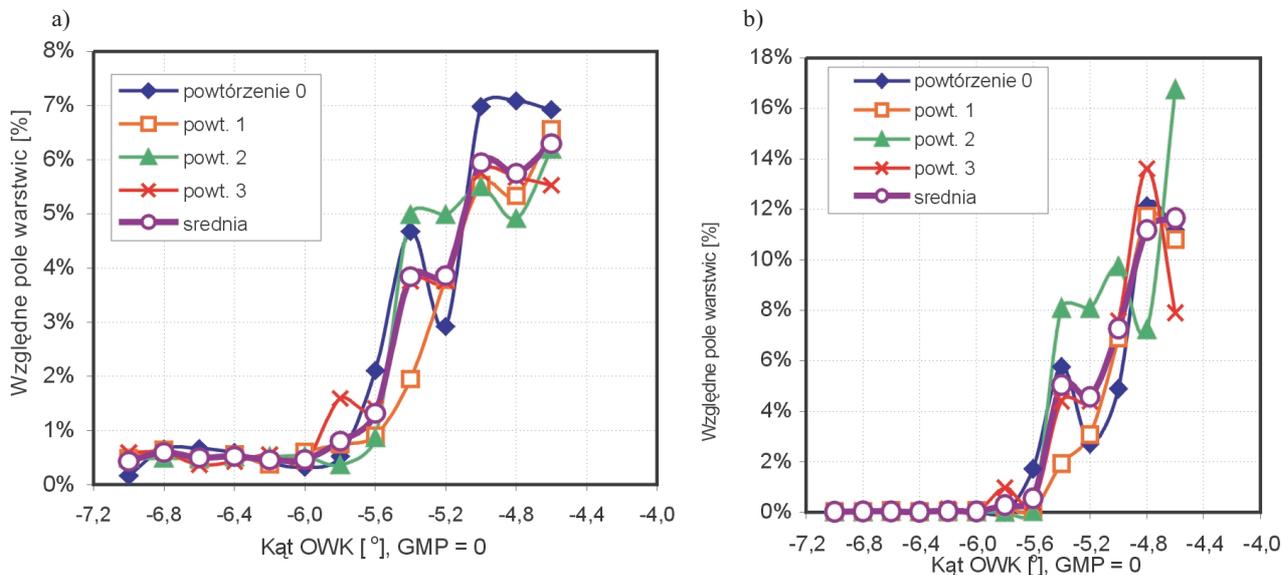
At the point of the engine operation under analysis, at the beginning of combustion, the course of changes of the field covered by the contour line 1 is formed in the manner presented in fig. 5a, and that of the field covered by the con-

Warstwica 1 obejmuje cząstki świecące światłem ciemnobrunatnym, o niskiej temperaturze, a pozostałe warstwice obejmują cząstki objęte płomieniem i świecące z intensywnością wynikającą z przyjętego przedziału luminancji (warstwica 4 – największa luminancja).

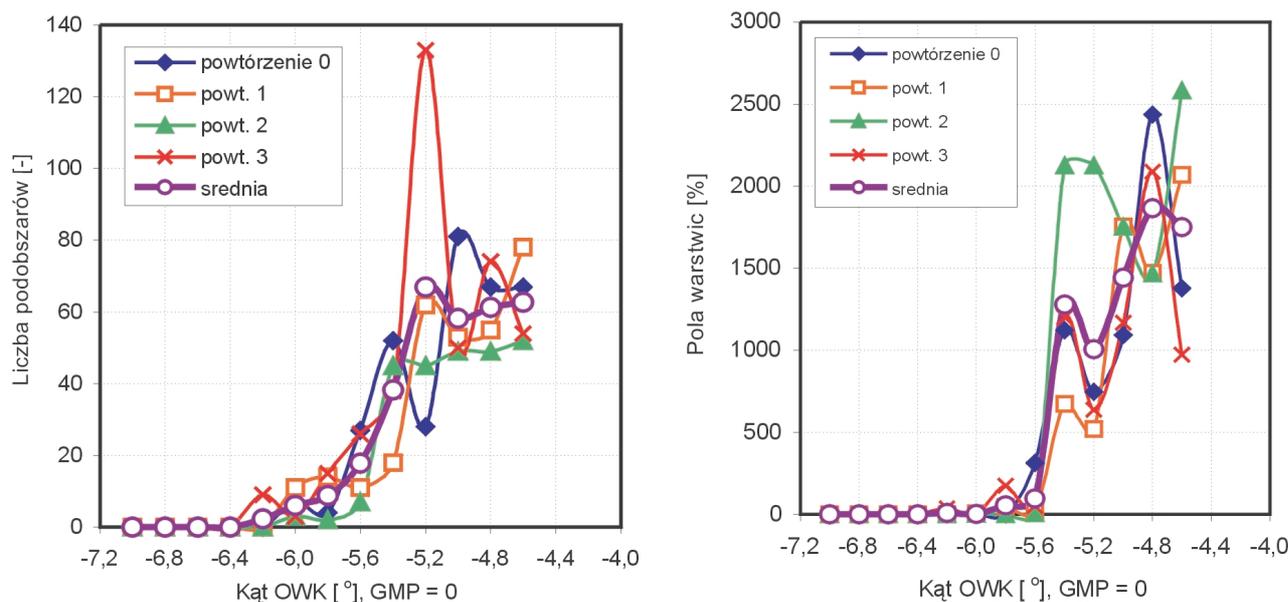
W analizowanym punkcie pracy silnika, na początku spalania, przebieg zmian pola objętego warstwicą 1 kształtuje się w sposób pokazany na rys. 5a, a pola objętego warstwicą 2 – tak jak na rys. 5b. Z przebiegu krzywej uzyskanej z uśrednienia czterech pomiarów wynika, że początek narastania pola objętego warstwicą 1 przypada na kąt $-6,0^{\circ}$ OWK przed GMP, a dokładność jego wyznaczenia można oszacować na $0,2^{\circ}$ OWK, choć wahania wartości wynikających z kolejnych powtórzeń dla danego kąta (np. $-6,6^{\circ}$ OWK) osiągają 1,2%.

tour line 2 – as in fig. 5b. The course of the curve obtained from averaging the four measures indicates that the beginning of expansion of the field covered by contour line 1 falls on the angle -6.0 CA before TDC, while the accuracy of its determination can be estimated as 0.2 CA, although the values resulting from the subsequent repeats for a given angle (e.g. -6.6 CA) reach 1.2%.

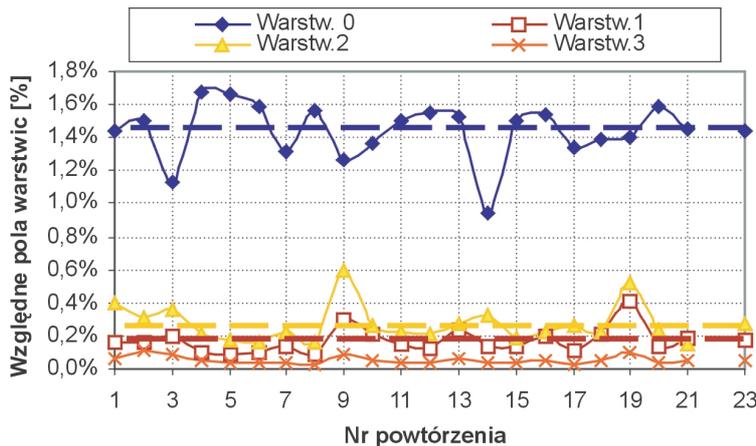
In fig. 6 the changes of the sizes of sub-areas covered by contour line 1 were presented as well as the maximum areas of the sub-areas. Although their size determined as the average of the subsequent observation repeats growth already from angle -6.2 CA, however, the growth of the maximum area of the sub-areas is observed from angle -6.0 CA. The increase of the sizes so determined may be interpreted as the



Rys. 5. Względne pola warstwic 1 (a) i 2 (b) w zależności od kąta OWK dla 4 powtórzeń obserwacji i wartości średniej
Fig. 5. Relative areas of contour lines 1 (a) and 2 (b) depending on the CA for 4 observation repeats and average value



Rys. 6. Liczba podobszarów (a) oraz największe pola podobszarów (b) objętych warstwicą 1
Fig. 6. Number of sub-areas (a) and the largest areas of sub-areas (b) covered by contour line 1



Rys. 7. Pola powierzchni poszczególnych warstwic odniesione do pola powierzchni zdjęcia komory spalania ($n = 1000$ obr/min, $\alpha = -6,0^\circ$ OWK)

Fig. 7. Relative areas of contour lines related to the area of the image of combustion chamber ($n = 1000$ rpm, $\alpha = 6.0$ CA before TDC)

Na rysunku 6 pokazano zmiany liczebności podobszarów objętych warstwicą 1 i maksymalne pola tych podobszarów. Wprawdzie ich liczebność, określona jako średnia z kolejnych powtórzeń obserwacji, wzrasta już od kąta $-6,2^\circ$ OWK, jednak wzrost maksymalnej powierzchni podobszarów obserwuje się od kąta $-6,0^\circ$ OWK. Zwiększenie liczebności tak określonych obszarów można interpretować jako przyrost liczby miejsc samozapłonu, natomiast zwiększenie ich obszaru jako zapoczątkowanie propagacji płomienia.

Przy ocenie pewności wyznaczania początku spalania istotne jest określenie powtarzalności obserwacji. Ocena taką przeprowadzono dla powyżej określonych warunków pracy silnika, dla kąta $6,0^\circ$ OWK przed GMP, przyjmując nieco zmodyfikowaną definicję warstwic 1 i 2: warstwica 1: $H = 1-102$, $L = 38-99$, warstwica 2: $H = 180-240$, $L = 40-190$.

Wyniki tej oceny wyrażonej we względnych wartościach pól poszczególnych warstwic pokazano na rysunku 7 dla 20 powtórzeń obserwacji (1–21) oraz dla wartości średniej przypisanej na rysunku odciętej oznaczonej jako 23. Warstwica 0, obejmująca pole charakterystyczne dla strugi wtryskiwanego paliwa, zajmuje względnie największe pole, a jego wahania dochodzą do ok. 0,9% pola powierzchni obserwacji. Przy obserwacjach dla tego kąta OWK warstwica 4 się nie pojawiła, a pozostałe warstwice (1–3) przybierały wartości średnie na poziomie odpowiednio ok. 0,4; 0,6; 0,1%. Stwierdzono, że większość obserwacji jest zbliżona do wartości średniej i – po odrzuceniu wartości skrajnych – wahania wokół niej można szacować na kilkanaście procent.

Przedstawione wyniki wskazują, w jakim stopniu analiza obrazu endoskopowego może być pomocna w określaniu kąta początku spalania, a szczególnie chwili pojawienia się płomienia w zakresie widma widzialnego. Pokazane na rysunkach 5–7 rozrzuty przebiegu krzywych mogą być miarą niepewności obserwacji i wyników jej analizy, a określenia początku pojawienia się płomienia widzialnego możliwe jest z dokładnością wynikającą z rozdzielczości obserwacji.

Podobną ocenę powtarzalności rejestracji płomienia w komorze spalania przeprowadzono także analizując obrazy

growth of self-ignition points, whereas the expansion of their area – as the initialization of flame propagation.

When assessing the certainty of determination of the onset of combustion, it is essential to determine the observation repeatability. Such assessment was made for the engine operation conditions described above, for angle 6.0° CA before TDC, assuming a slightly modified definition of contour lines 1 and 2: contour line 1: $H = 1-102$; $L = 38-99$; contour line 2: $H = 180-240$; $L = 40-190$.

The results of this assessment expressed in relative values of the areas of the individual contour lines were presented in fig. 7 for 20 observation repeats (1–21) and for the average attributed to value 23 on X-axis.

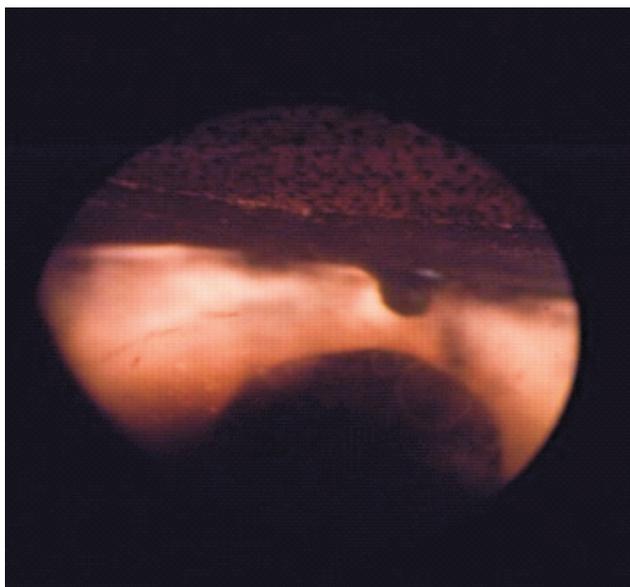
Contour line 0, covering the area characteristic for the jet of injected fuel occupies relatively the largest area and its oscillations reach ca. 0.9% of the observation area. With the observations for this angle CA the contour line 4 did not appear and the other contour lines (1–3) assumed the average values on the level of ca. 0.4; 0.6; 0.1%, respectively. It was found that most of the observations is close to the average and – after rejecting the extreme values – the oscillations around it may be estimated around a dozen per cent.

The results presented indicate the extent to which the analysis of the endoscopic image may be helpful at determining of the combustion initial angle and, particularly, the moment of flame occurrence in the visible spectrum range. The curve course dispersions shown in figures 5–7 may be the measure of observation non-repeatability and its analysis results and the determination of the beginning of visible flame occurrence is possible with accuracy resulting from the observation resolution.

A similar repeatability evaluation of the flame recording in the combustion chamber was also carried out analyzing the images obtained in 21 repeats for the angle -2.4 CA (10 after the observation beginning). The averaged image was shown in fig. 8, where the surface of the head with the spray nozzle is seen and – at the bottom of the photograph – a dark contour of the hump in the piston. The area of the recorded frames amounted to 44,522 pixels in this case.

For this moment of the process the evaluation of the flame development repeatability was also carried out, obtaining the results shown in fig. 9. Contour line 0 whose parameters referred to the luminous reflection from the injected fuel jet does not appear in the analyses; the other contour lines refer to the flame emitting light of various intensity and their sum was determined as the total flame.

The dispersion of the value determined for the total flame amounted to 9–11%, which, considering the low load of the engine characterized with high non-repeatability of cycles, should be assumed as a satisfactorily low result. The oscillations for contour lines 1, 2 and 3 are ca. 14–21%. The high-



Rys. 8. Zdjęcie płomienia w silniku AVL ($n = 1000$ obr/min, $\alpha = -2,4^\circ$ OWK, bieg jałowy)

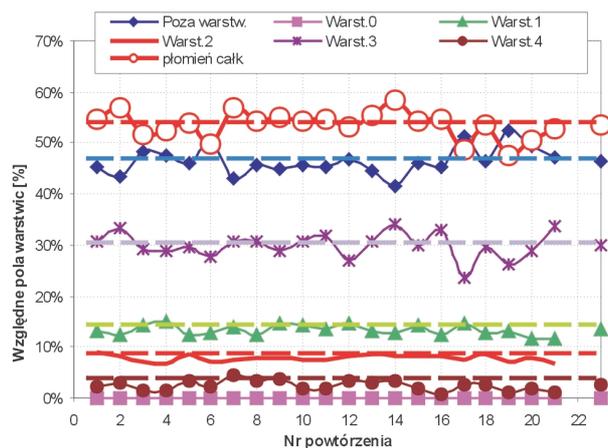
Fig. 8. Photograph of flame in the AVL engine ($n = 1000$ rpm, $\alpha = -2.4$ CA, idling)

uzyskane w 21 powtórzeniach dla kąta $-2,4^\circ$ OWK (10° po początku obserwacji). Uśredniony obraz pokazano na rysunku 8, na którym widoczna jest płyta głowicy z końcówką rozpylacza oraz – u dołu zdjęcia – ciemny zarys garbu w tłoku. Powierzchnia zarejestrowanych zdjęć wynosiła w tym przypadku 44 522 piksele.

Również dla tej chwili procesu przeprowadzono ocenę powtarzalności rozwoju płomienia uzyskując wyniki pokazane na rysunku 9. Warstwica 0, której parametry odnosiły się do odbicia światła od strugi wtryskiwanego paliwa nie pojawia się w analizie; pozostałe warstwy odnoszą się do płomienia świecącego z różnym natężeniem, a ich sumę określono jako płomień całkowity.

Rozrzut wartości określonej dla płomienia całkowitego wyniósł 9–11%, co – biorąc pod uwagę małe obciążenie silnika charakteryzujące się dużą niepewnością cykli – należy uznać za wynik zadowalający. Wahania wartości dla warstw 1, 2 i 3 wynoszą 14–21%. Największy rozrzut wartości wystąpił dla warstwy 4, określającej płomień o największej intensywności luminancji, ale jest to związane z bardzo małymi wartościami bezwzględными tego pola. Obszar komory nie objętej płomieniem zmienia się o 10–13% wartości średniej, co również uznano za wartość wystarczającą do wnioskowania o rozprzestrzenianiu się płomienia na podstawie zdjęcia uśrednionego.

W większości pozostałych punktów pomiarowych dla warstw 1 i 2 rozbieżności te kształtują się na poziomie do $\pm 10\%$. Jakkolwiek z punktu widzenia zasad statystycznych są one znaczne, jednak nie należy oczekiwać mniejszych różnic, szczególnie w warunkach małych i bardzo małych obciążeń silnika, w których niepewność procesów wymiany ładunku, zawirowania oraz procesów wtrysku i spalania jest znaczna.



Rys. 9. Wyniki analizy względnego pola powierzchni warstw dla zdjęć płomienia z rys. 8; wartość średnią z powtórzeń 1–21 przypisano odczytanej nr 23

Fig. 9. Results of the analysis of relative area of contour lines for the photographs of flame from fig. 8; the value determined for X-value 23 is the average of repeats 1–21

est dispersion of the values was for contour line 4 defining the highest intensity luminance flame, but this is related to very low absolute values of the area. The area of the chamber not covered by the flame changes by ca. 10–13% of the average value, which was also considered a sufficient value for the conclusion on flame propagation based on the averaged photograph.

In most of the other measuring points for the contour lines 1 and 2 the divergences are formed on the level up to ca. $\pm 10\%$, however, from the point of view of the statistical principles they are significant, but lower differences should not be expected, particularly in the conditions of low and very low engine loads, where the non-repeatability of the load exchange processes, whirls and injection and combustion processes are well known.

5. Self-ignition delay assessment

The analysis of the area covered by contour line 2 in fig. 5b indicates that its growth occurs with delay in relation to contour line 1 (fig. 5a) by ca. 0.2...0.4 CA (33–66 μ s). However, in so much as the speed of the area growth covered by contour line 1 stabilizes after ca. 1 CA (167 μ s), in so far the area defined by contour line 2 dynamically increases, which means higher temperature flame propagation rate growth. Although the local dispersion of the area value may be significant (ca. 5...8% of the observation field), it is possible to determine the beginning of its growth with accuracy up to ca. 0.2 CA.

The endoscopic observations were applied without limitation to the analysis of combustion onset for the AVL fuelled conventionally with charge pre-homogenization. The comparison was made for the operating point: $n = 1000$ rpm (idling). The injection initiation of the principal dose was set on 9.8 CA before TDC. In both cases the dose injected was ca. 7 mg/injection (air access ratio $\lambda = 5$ –6), but in the engine with pre-homogenization its significant part was in

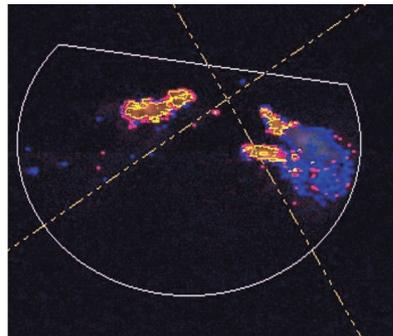
5. Ocena opóźnienia samozapłonu

Analiza powierzchni objętej warstwicą 2 na rysunku 5b wskazuje, że jej narastanie występuje z opóźnieniem względem warstwic 1 (rys. 5a) o ok. 0,2...0,4°OWK (33–66 μs). O ile jednak prędkość narastania pola objętego warstwicą 1 stabilizuje się po ok. 1°OWK (167 μs), o tyle pole określone warstwicą 2 dynamicznie się zwiększa, co oznacza wzrost prędkości propagacji płomienia o wyższej temperaturze. Wprawdzie lokalny rozrzut wartości tego pola może być znaczny (ok. 5...8% pola obserwacji), jednak jest możliwe określenie początku jego narastania z dokładnością do 0,2°OWK.

Obserwacje endoskopowe zastosowano m.in. do analizy początku spalania dla silnika AVL zasilanego konwencjonalnie oraz ze wstępną homogenizacją ładunku. Porównanie wykonano dla punktu pracy: n = 1000 obr/min (bieg jałowy). Początek wtrysku dawki zasadniczej ustawiono na 9,8°OWK przed GMP. W obu przypadkach wtryskiwana dawka wynosiła ok. 7 mg/wtrysk ($\lambda = 5-6$), lecz w silniku ze wstępną homogenizacją znaczna jej część była wtryskiwana do przewodu dolotowego w czasie suwu ładowania (ok. 5 mg/wtrysk, $\lambda_{wst} \gg 9$).

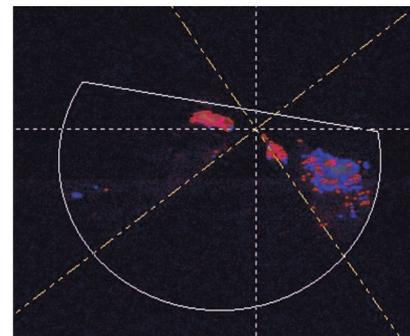
Na rysunku 10 pokazano porównanie obserwacji dla początkowych faz procesu spalania. Przy częściowej homoge-

Zasilanie konwencjonalne
pocz. spalania 4,0°OWK po pocz. wtr.
Conventional fueling, SOC 4.0 CA after SOI

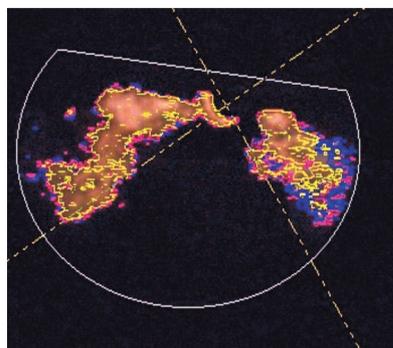


Kąt 4,2°OWK po początku wtrysku
4.2 CA after SOI

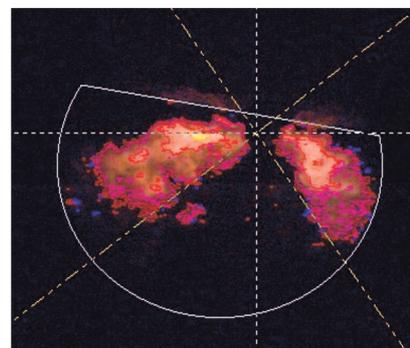
Ze wstępną homogenizacją
pocz. spalania 3,2°OWK po pocz. wtr.
HCCI SOC 3.2 CA after SOI



Kąt 3,4°OWK po pocz. wtrysku
3.4 CA after SOI



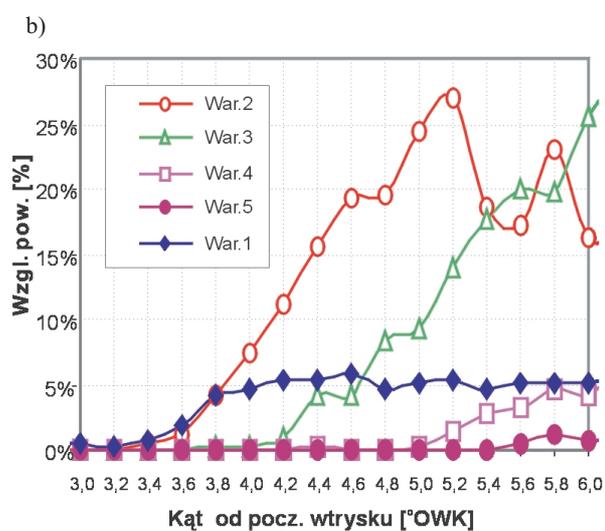
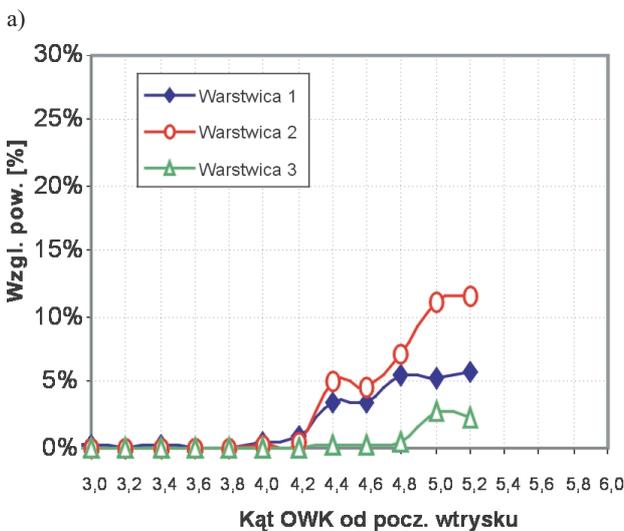
Kąt 5,0°OWK po początku wtrysku
5.0 CA after SOI



Kąt 4,4°OWK po pocz. wtrysku
4.4 CA after SOI

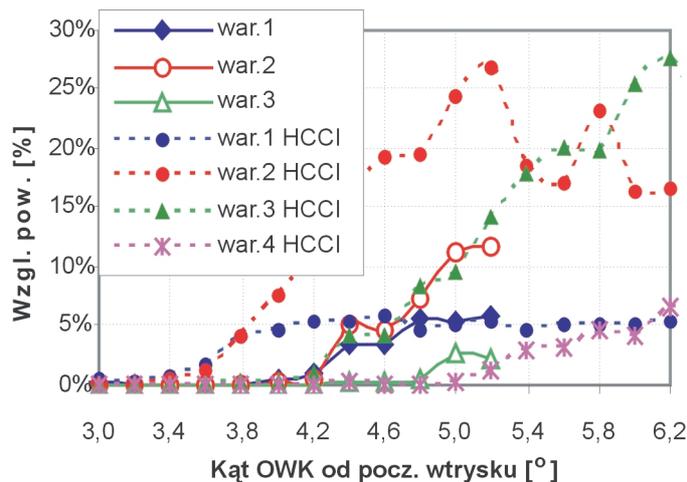
Rys. 10. Zarejestrowane obserwacje płomienia w silniku AVL w początkowym okresie spalania
Fig. 10. The flame observations recorded in the AVL at the initial combustion period

jected into the inlet duct during the fuelling stroke (ca. 5 mg/injection, $\lambda_{mit} \gg 9$).



Rys. 11. Względne pole powierzchni warstwic w zależności od kąta OWK po początku wtrysku; a) zasilanie konwencjonalne, b) zasilanie ze wstępną homogenizacją mieszanki HCCI

Fig. 11. Relative area of contour lines depending on the CA angle after initial injection; a) conventional fuelling, b) HCCI



Rys. 12. Porównanie zmian względnych powierzchni warstw 1–4 dla silnika zasilanego konwencjonalnie (linie ciągłe) i dla silnika ze wstępną homogenizacją (HCCI, linie przerywane)

Fig. 12. Comparison of changes of relative areas of contour lines 1–4 for conventionally fuelled engine (continuous lines) and for HCCI (dotted lines)

nizacji mieszanki proces spalania z widocznym promieniowaniem cieplnym zaczyna się wcześniej. Na zdjęciach widać wyraźnie mniejszy obszar zaznaczony kolorem niebieskim określającym występowanie fazy ciekłej paliwa. W silniku tym już po obrocie o $4,4^{\circ}$ OWK (0,73 ms) od początku wtrysku faza ciekła paliwa w zasadzie zanikła, podczas gdy w silniku zasilanym konwencjonalnie była jeszcze wyraźnie widoczna po obrocie o 5° OWK (0,84 ms). Zmiany względnych pól powierzchni poszczególnych warstw w tych warunkach pokazano na rysunku 11.

Charakterystyczne dla tego porównania jest wcześniejsze wystąpienie płomienia w silniku ze wstępną homogenizacją ładunku ($3,2^{\circ}$ OWK po początku wtrysku, co odpowiada czasowi 0,53 ms) niż w silniku zasilanym konwencjonalnie (4° OWK po początku wtrysku; 0,67 ms). Towarzyszy temu szybsze narastanie obszaru zajętego płomieniem, a obszary o temperaturze ponad 2000 K pojawiają się wcześniej: $4,2^{\circ}$ OWK po początku wtrysku, podczas gdy w silniku zasilanym konwencjonalnie po $4,8^{\circ}$ OWK. W silniku ze wstępną homogenizacją po 5° OWK pojawiają się obszary o temperaturze przekraczającej 2200 K; w silniku konwencjonalnym jest to opóźnione o 6° OWK. Na rysunku 12 nałożono na siebie oba przebiegi, żeby uwydatnić te różnice.

Ciekawym spostrzeżeniem może być etapowy charakter narastania obszarów objętych płomieniem; zarówno dla silnika zasilanego konwencjonalnie, jak i ze wstępną homogenizacją dają się zauważyć charakterystyczne „półki” na krzywych opisujących poszczególne warstwy; np. pomiędzy kątami $4,2$ a $4,4^{\circ}$ OWK występuje takie załamanie na krzywych: war. 1, war. 2 oraz war. 1 HCCI i war. 3 HCCI. Te załamania krzywych przyrostu powierzchni obszaru objętego płomieniem potwierdzają wykresy przedstawione na rysunkach 5 i 6. Sugeruje to etapowość procesu spalania w jego początkowym okresie.

Fig. 10 presents the comparison of observations for the initial combustion process phases. It is noticeable that with partial homogenization of the mixture the combustion process with visible thermal radiation starts earlier. The images on the right show a clearly smaller area marked blue determining the occurrence of the fuel liquid phase. In this engine after rotation by 4.4 CA (0.73 ms) from the initial injection, the liquid phase of the fuel clearly faded, while in a conventionally fuelled engine it was still clearly visible after rotation by 5 CA (0.84 ms). The changes of the relative areas of the particular contour lines in those conditions were shown in fig. 11.

The earlier occurrence of flame in a HCCI engine is characteristic of such a comparison (3.2 CA after SOI, which corresponds to the time 0.53 ms) as compared to a conventionally fuelled engine (4 CA after SOI, 0.67 ms). This is accompanied by faster expansion of the area occupied by the flame and the areas of temperature above 2000 K occur earlier; ca. 4.2 CA after initial injection, while in a conventionally fuelled engine – after 4.8 .

In a HCCI engine, areas of temperature exceeding 2200 K occur after 5 CA, in a classic engine this is delayed by 6 CA. In fig. 12 both courses have been overlapped to make the tendencies clearer.

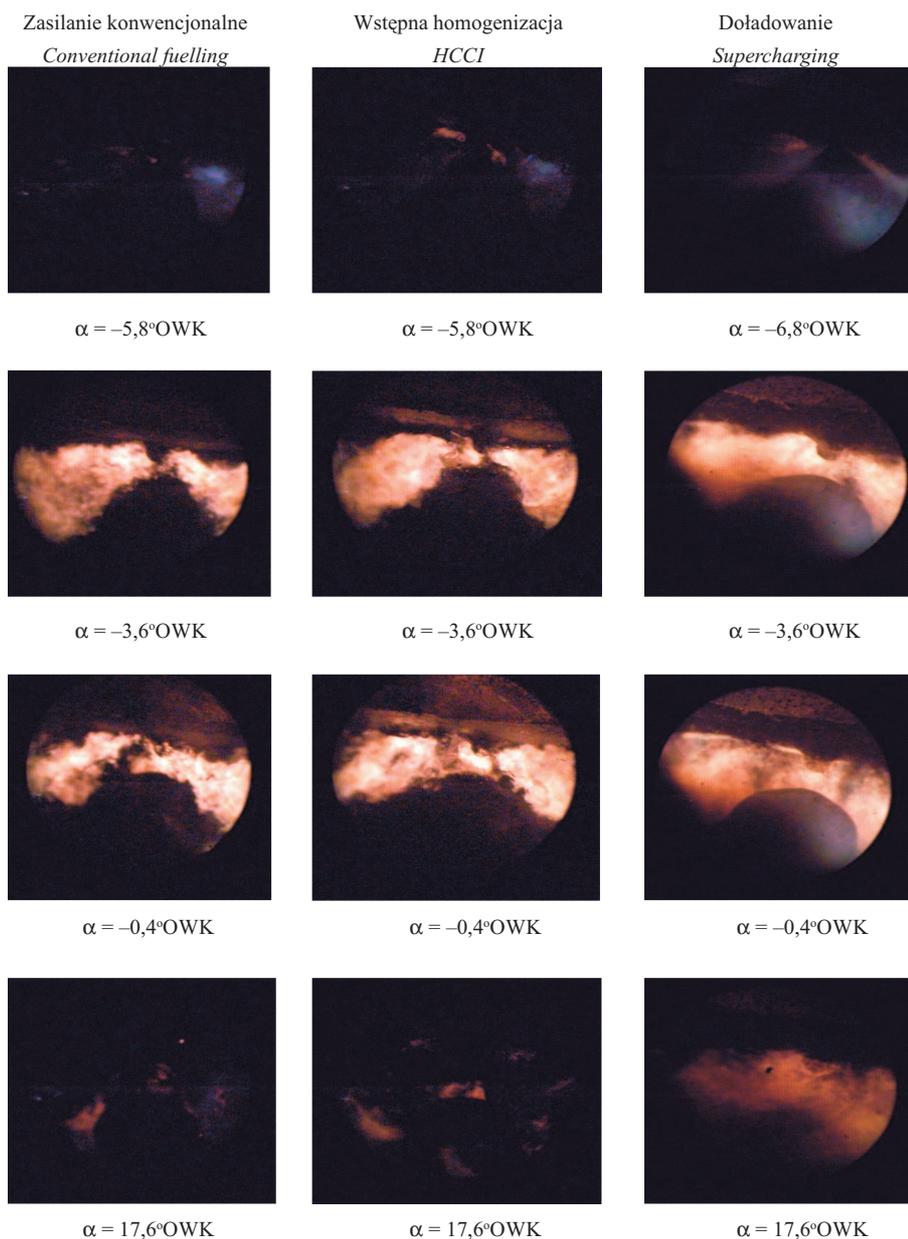
An interesting observation may be the “staginess” of the growth of areas covered by the flame: both for a conventional and a HCCI engine, characteristic “shelves” area noticeable on the curves describing the particular contour lines, e.g. between angles 4.2 and 4.4 there is such a refraction on the curves: c.line 1, c.line 2 and c.line 1 HCCI and c.line 3 HCCI. The refractions of the flame covered area growth curves are confirmed by the graphs shown in figures 5 and 6. This suggests the “staginess” of the combustion process at its initial stage.

6. Results of flame propagation observation in combustion chamber

6.1. Flame type and structure

The results of the observations recorded in an engine with partial charge homogenization were presented in fig. 13 for the same crankshaft angles in order to allow their comparison with the photographic material obtained in a conventionally fuelled engine. Similar observations were carried out for a supercharged engine. The preliminary analysis shows that the application of charge pre-homogenization causes self-ignition acceleration (at -5.6 CA angle a clear flame is already visible). A similar situation is in the case of engine supercharge as the growth of supercharged air temperature causes significant acceleration of the combustion process, under the conditions tested, the combustion began 8.4 CA before TDC, i.e. 1.4 after SOI (0.23 ms). In a HCCI engine, the values were 6.6 CA before TDC, respectively, i.e. 3.2 after SOI (0.53 ms).

The comparison presented in fig. 13 also indicates that for comparable times from the initial fuel injection, various



Rys. 13. Porównanie obserwacji płomienia ($n = 1000$ obr/min) w silniku zasilanym konwencjonalnie ($q_0 = 2,0$ mg/wtrysk), w silniku z wstępną homogenizacją mieszanki ($q_0 = 7,0$ mg/wtrysk) i w silniku doładowanym ($q_0 = 7,6$ mg/wtrysk)

Fig. 13. The comparison of flame observations ($n = 1000$ rpm) in a conventionally fuelled engine ($q_0 = 2.0$ mg/injection), in a HCCI engine ($q_0 = 7.0$ mg/injection) and in a supercharged engine ($q_0 = 7.6$ mg/injection); $\alpha = -5.8^{\circ}\text{OWK}$ means 5.8 CA before TDC

6. Wyniki obserwacji propagacji płomienia w komorze spalania

6.1. Charakter i struktura płomienia

Wyniki zarejestrowanych obserwacji w silniku z częścią homogenizacją ładunku przedstawiono na rysunku 13 dla tych samych kątów obrotu wału korbowego, aby umożliwić ich porównanie z materiałem zdjęciowym uzyskanym w silniku zasilanym konwencjonalnie. Podobne obserwacje przeprowadzono także dla silnika z doładaniem. Z analizy obserwacji wynika, że zastosowanie wstęp-

intensities of the flame propagation within the combustion chamber occur. At pre-homogenization of the charge, a larger area covered by the flame was found and there was lower variability of radiation intensity inside the area, which may prove the existence of lower flame temperature gradients or – more probably – lower soot concentration in the flame. In the case of engine supercharging, larger radiation intensity is observed, with lower variability in space, however. The combustion chamber fragments are better illuminated here, but the number of area with high luminance is lower. This is probably not related to the lower flame temperature, but to a clearly lower soot particle concentration. This supposition is confirmed by the exhaust smoke measurements estimated as 0.6° in the Bosch scale, while in the classically fuelled engine the smoke was doubled and in the HCCI engine it was 0.8° . It means that in the case tested concerning low loads, supercharging the engine appeared to be a beneficial method of reducing soot formation intensity.

The comparable evaluation presented above is of a qualitative nature. It was expanded by the quantitative evaluation through the application of the contour line analysis.

6.2. Flame propagation in the combustion chamber

The flame propagation in the research engine combustion chamber was recorded at the engine speed $n = 1000$ rpm, ranging from forced idling to engine load of 10 N·m ($p_e = -0.15 \dots 0.25$ MPa). The

observations were made in a conventionally fuelled engine and in a HCCI engine. Some of the measurements were made for an engine running without supercharging and some for the one with supercharging, which allowed collecting comparable material.

The contour line analysis results of the photographic material obtained in a **conventionally fuelled engine** are presented in fig. 14, depending on the crankshaft angle calculated from the start of injection SOI. The flame occurrence was seen after 3.8 CA (0.63 ms), and after further 3.4 (0.57 ms) it covers the largest combustion chamber area of

nej homogenizacji ładunku powoduje przyspieszenie samozapłonu (przy kącie $-5,6^\circ\text{OWK}$ widoczny jest już wyraźny płomień). Podobnie jest w przypadku doładowania silnika, gdyż wzrost temperatury powietrza doładowanego powoduje znaczne przyspieszenie procesu spalania; w badanych warunkach początek spalania wystąpił $8,4^\circ\text{OWK}$ przed GMP, tj. ok. $1,4^\circ\text{OWK}$ po początku wtrysku ($0,23\text{ ms}$). W silniku ze wstępną homogenizacją wartości te wyniosły odpowiednio: $6,6^\circ\text{OWK}$ przed GMP, tj. $3,2^\circ\text{OWK}$ po początku wtrysku ($0,53\text{ ms}$).

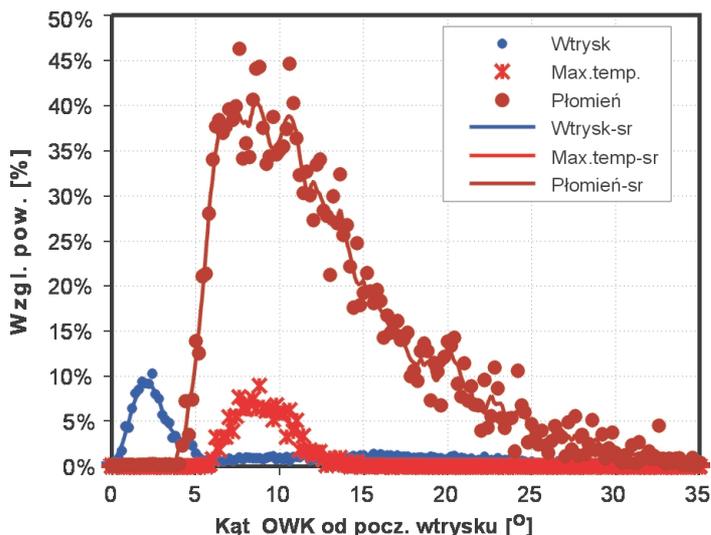
Z porównania przedstawionego na rysunku 13 wynika także, że dla porównywalnych czasów od początku wtrysku paliwa występują istotne różnice intensywności rozwoju płomienia w obrębie komory spalania. Przy wstępnej homogenizacji ładunku stwierdzono większy obszar objęty płomieniem, a w jego obrębie występuje mniejsze zróżnicowanie intensywności radiacji, co może świadczyć o mniejszych gradientach temperatury płomienia lub – co bardziej prawdopodobne – o mniejszej koncentracji sadzy w płomieniu. W przypadku doładowania silnika obserwuje się większe natężenie promieniowania, jednak o mniejszym zróżnicowaniu przestrzennym. Fragmenty komory spalania są tutaj lepiej oświetlone, ale występuje mniej obszarów o dużej luminancji. Nie jest to prawdopodobnie związane z niższą temperaturą płomienia, lecz z wyraźnie mniejszą koncentracją cząstek sadzy. Przypuszczenie to potwierdzają pomiary zadymienia spalin ocenionego na $0,6$ jedn. w skali Boscha, podczas gdy w silniku zasilanym konwencjonalnie zadymienie było dwukrotnie większe, a w silniku niedoładowanym ze wstępną homogenizacją wynosiło $0,8$ j.s.B. Oznacza to, że w badanym przypadku dotyczącym małych obciążeń doładowanie silnika okazało się korzystną metodą zmniejszania intensywności tworzenia sadzy.

Przedstawiona powyżej ocena porównawcza ma głównie charakter jakościowy. Rozszerzono ją o ocenę ilościową przez zastosowanie analizy warstwicowej.

6.2. Rozprzestrzenianie się płomienia w komorze spalania

Rozprzestrzenianie się płomienia w komorze spalania silnika badawczego rejestrowano przy prędkości obrotowej $n = 1000\text{ obr/min}$, w zakresie od wymuszonego biegu jałowego do obciążenia silnika wynoszącego 10 Nm ($p_e = -0,15 \dots 0,25\text{ MPa}$). Obserwacje te prowadzono w silniku z zasilaniem konwencjonalnym oraz ze wstępną homogenizacją mieszanki. Część pomiarów wykonano dla silnika pracującego bez doładowania, a część dla silnika z doładowaniem; pozwoliło to na zgromadzenie materiału porównawczego.

Wyniki analizy warstwicowej materiału zdjęciowego uzyskanego w silniku zasilanym konwencjonalnie przedstawiono na rysunku 14

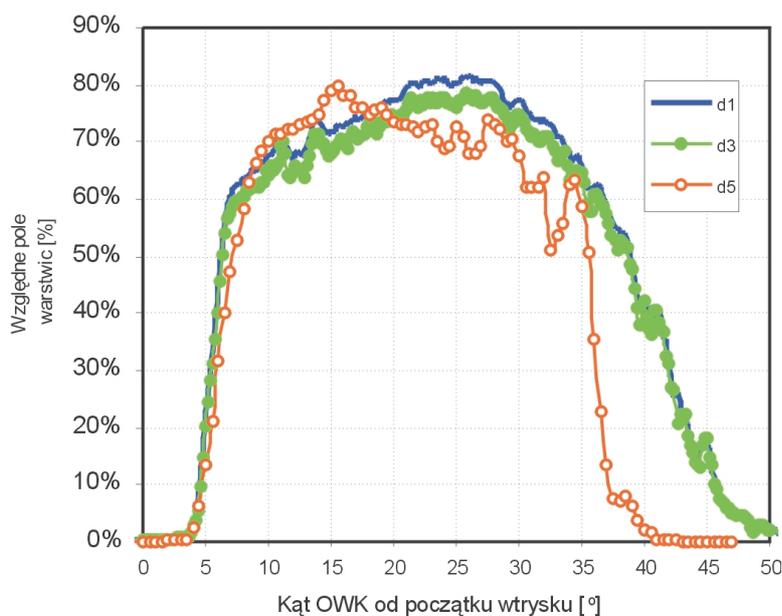


Rys. 14. Wyniki analizy warstwicowej obserwacji w komorze spalania silnika AVL zasilanego konwencjonalnie

Fig. 14. Results of contour line analysis of the observations in the combustion chamber of a conventionally fuelled AVL engine

about 40% (46% maximum). The area of temperature exceeding 2160 K occurs slightly earlier, after approximately 2.0 CA . After $10\text{--}11\text{ CA}$ (ca. 1.83 ms) from SOI, the area covered by flame begins to decrease, although the area with the highest temperature fades $1\text{--}2\text{ CA}$ later. For the tested operating point the flame faded in the combustion chamber after approximately 35 CA .

The analysis of **supercharge pressure impact** on the flame propagation was carried out for the conditions determined as: d_1 ($q_0 = 6.3\text{ mg/inj.}$, $p_d = 4.0\text{ kPa}$), d_3 ($q_0 = 7.6\text{ mg/inj.}$,



Rys. 15. Zmiany względnego pola objętego płomieniem w funkcji kąta OWK dla różnych wartości ciśnienia doładowania

Fig. 15. Changes of the relative area covered by the flame in the function of the crankshaft angle for various values of supercharging pressure

w zależności od kąta OWK liczonego od początku wtrysku paliwa. Wystąpienie płomienia stwierdzono po 3,8°OWK (0,63 ms), a po kolejnych 3,4°OWK (0,57 ms) obejmuje on największy obszar komory spalania wynoszący ok. 40% (maksymalnie 46%). Obszar o temperaturze przekraczającej 2160 K pojawia się chwilę wcześniej, po 2,0°OWK. Po 10–11° OWK (ok. 1,83 ms) od początku wtrysku obszar objęty płomieniem zaczyna się zmniejszać, choć obszar o najwyższej temperaturze zanika 1–2°OWK później. Dla badanego punktu pracy płomień w komorze zanikał po ok. 35°OWK.

Analizę **wplywu ciśnienia doładowania** na przebieg rozprzestrzeniania się płomienia w silniku z zasianiem konwencjonalnym przeprowadzono dla warunków oznaczonych jako: d1 ($q_0 = 6,3$ mg/wtr., $p_d = 4,0$ kPa), d3 ($q_0 = 7,6$ mg/wtr., $p_d = 68$ kPa) i d5 ($q_0 = 6,6$ mg/wtr., $p_d = 40$ kPa). Wynika z niej, że obszary o najwyższej temperaturze płomienia, szacowanej w zakresie 2200–2800 K, wystąpiły po 4°OWK (0,7 ms) po początku spalania w przypadku wyników d1 i d3, a w przypadku d5 – nieco później, po 10–12°OWK. Przebieg zmian wielkości obszaru objętego poszczególnymi warstwicami dla zaprezentowanych przypadków jest bardzo zbliżony; krzywe wykazują podobny, charakterystyczny kształt. Przez zsumowanie obszarów objętych tymi warstwicami (z wyłączeniem warstwy 0, opisującej strugę paliwa) uzyskano przebieg zmian całego obszaru objętego płomieniem.

Porównanie krzywych względnego obszaru płomienia w komorze spalania dla analizowanych przypadków pokazano na rysunku 15. Wynika z niego znaczne podobieństwo przebiegów charakteryzujących się podobną wielkością dawki paliwa ($q_0 = 6,3$ – $7,6$ mg/wtr) i zmiennością ciśnienia doładowania p_d w zakresie 4,0–68,0 kPa. Wartość ciśnienia doładowania sprzyja szybszemu zanikowi płomienia, a większe obciążenie (większa dawka paliwa) powoduje dwufazowość procesu spalania.

Rozprzestrzenianie się płomienia obserwowano również w silniku **ze wstępną homogenizacją mieszanek** w warunkach określonych następująco (h – homogenizacja, d – doładowanie):

- dane h; $p_{2d} = 0,0$ kPa, $q_0 = 7,0$ mg/wtr., $q_{wst}/q_0 = 71,5\%$, $M_0 = -4,5$ Nm;
 - dane h2; $p_{2d} = 0,0$ kPa, $q_0 = 16,6$ mg/wtr., $q_{wst}/q_0 = 46,1\%$, $M_0 = 5,0$ Nm;
 - dane hd2; $p_{2d} = 40,0$ kPa, $q_0 = 15,0$ mg/wtr., $q_{wst}/q_0 = 0,0\%$, $M_0 = 8,8$ Nm;
- a dla innego pola obserwacji przy endoskopie skierowanym w kierunku komory w tłoku:
- dane hd5; $p_{2d} = 40,0$ kPa, $q_0 = 14,3$ mg/wtr., $q_{wst}/q_0 = 53,4\%$, $M_0 = 8,0$ Nm;
 - dane hd6; $p_{2d} = 40,0$ kPa, $q_0 = 9,0$ mg/wtr., $q_{wst}/q_0 = 26,0\%$, $M_0 = 2,0$ Nm.

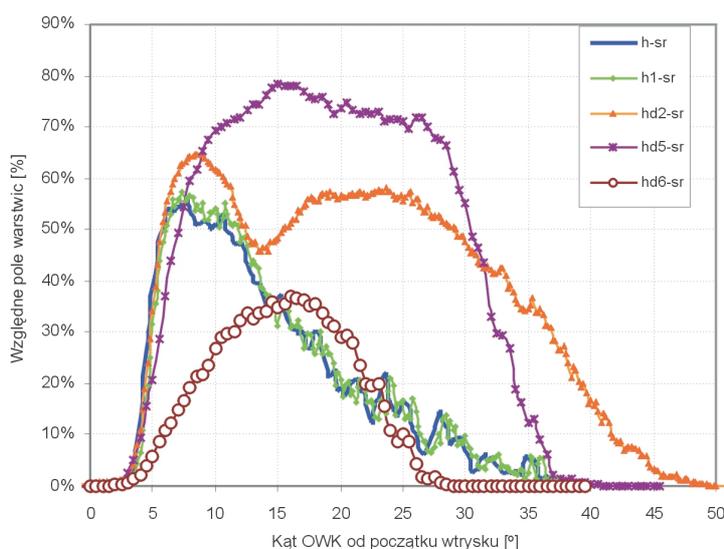
Wyniki warstwicowej analizy przeprowadzonych obserwacji potwierdzają typowy charakter zmian obszaru objętego płomieniem, podobny do pokazanych na rysunku 15. Stwierdzono, że w warunkach spalania wstępnie zhomogenizowanej mie-

$p_d = 68$ kPa) and d5 ($q_0 = 6.6$ mg/inj., $p_d = 40$ kPa). It indicates that the areas of the highest flame temperature, estimated in the range 2200–2800 K, occurred after approximately 4 CA (0.7 ms) after SOI in the case of results d1 and d3, while in the case of d5 – a little later, after approximately 10–12 CA. The course of changes of the size of the area covered by the individual contour lines for the cases presented is very close; the curves present a similar characteristic form. Through summing up the areas covered by those contour lines (excluding the contour line 0, describing the fuel jet) the course of changes of the whole area covered by flame was obtained.

The comparison of the curves of the relative flame area in the combustion chamber for the cases under analysis is shown in fig. 15. This indicates high similarity between the courses characterized with similar fuel dose size ($q_0 = 6.3$ – 7.6 mg/inj.) and variability of supercharge pressure p_d in the range 4.0–68.0 kPa. The supercharge pressure value supports faster flame fading, while the larger load (larger fuel dose) causes a two-phase combustion process.

The flame propagation was also observed in the **HCCI engine** under the following conditions:

- data h; $p_{2d} = 0.0$ kPa, $q_0 = 7.0$ mg/inj., $q_{init}/q_0 = 71.5\%$, $M_0 = -4.5$ Nm;
 - data h2; $p_{2d} = 0.0$ kPa, $q_0 = 16.6$ mg/inj., $q_{init}/q_0 = 46.1\%$, $M_0 = 5.0$ Nm;
 - data hd2; $p_{2d} = 40.0$ kPa, $q_0 = 15.0$ mg/inj., $q_{init}/q_0 = 0.0\%$, $M_0 = 8.8$ Nm;
- and for another observation field with the endoscope in the piston directed towards the chamber:
- data hd5; $p_{2d} = 40.0$ kPa, $q_0 = 14.3$ mg/inj., $q_{init}/q_0 = 53.4\%$, $M_0 = 8.0$ Nm;
 - data hd6; $p_{2d} = 40.0$ kPa, $q_0 = 9.0$ mg/inj., $q_{init}/q_0 = 26.0\%$, $M_0 = 2.0$ Nm.



Rys. 16. Zmiany względnego pola obszaru objętego płomieniem dla danych serii h i hd

Fig. 16. Changes of the relative area of the flame covered surface for data series h and hd

sżanki nie wystąpiły warstwy najwyższych wartości temperatury płomienia, natomiast obszar o temperaturach ok. 2100–2200 K został znacznie zredukowany. Powiększeniu uległy natomiast wielkości obszarów o temperaturze do ok. 2000 K. Stwierdzono także, że przy większych dawkach paliwa podawanego do cylindra zaznacza się dwufazowy charakter rozprzestrzeniania się płomienia (tutaj dla danych h2, $q_0 = 16,6$ mg/wtr. – rys. 16). Krzywe opisujące względne pole płomienia dla danych hd6 nie wskazują na występowanie dwufazowości procesu spalania. W tym przypadku endoskop skierowany był w kierunku komory w tłoku, wewnątrz której dominuje płomień o charakterze dyfuzyjnym.

Porównanie wyników obserwacji względnego pola objętego płomieniem w różnych punktach pracy silnika pokazane na rysunku 16 wykazuje, że wspomniany dwufazowy charakter spalania zaznaczył się także dla danych hd2, uzyskanych przy podobnej wielkości dawki paliwa ($q_0 = 15,0$ mg/wtr.) i przy zwiększonym ciśnieniu doładowania. W obu przypadkach widoczne jest na krzywych minimum lokalne odpowiadające kątowi ok. $13,5^\circ$ OWK (2,25 ms) po początku wtrysku paliwa, a punkt gwałtownego zmniejszenia prędkości rozprzestrzeniania się płomienia w pierwszej fazie spalania odpowiada kątowi ok. $7-8,5^\circ$ OWK (1,2–1,4 ms).

7. Spostrzeżenia i podsumowanie

Zastosowanie techniki obserwacji endoskopowych i modeli zależności barwy (H) i luminancji (L) od własności promieniującego ośrodka umożliwia ocenę temperatury i struktury płomienia w poszczególnych punktach przestrzeni spalania (jej płaskiej ekspozycji).

Przytoczone przykłady analizy obrazów spalania wskazują na możliwości oceny rozprzestrzeniania się płomienia w komorze spalania, jednak wymaga ona wcześniejszej oceny powtarzalności rejestrowanych obserwacji dla poszczególnych wartości kąta obrotu wału korbowego w porównywalnych warunkach pracy silnika. Niepowtarzalność w analizowanych warunkach oceniono na 9-13% i uznano ją jako wystarczającą małą do prowadzenia takich analiz na podstawie obrazów uśrednionych.

Analiza promieniowania przeprowadzona na podstawie parametrów pikseli zarejestrowanego obrazu pozwoliła na wyznaczenie chwili początku spalania z większą dokładnością niż na podstawie oceny zmian parametrów termodynamicznych (indykowania). Potwierdziła ona także występowanie wielostadynowości procesu samozapłonu (por. rys. 5, 6, 12). W początkowej fazie samozapłonu występuje wzrost liczby ogniska samozapłonu, a po okresie ocenionym na $0,4-0,6^\circ$ OWK (w warunkach badań; 0,07-0,10 ms) następuje wzrost powierzchni płomienia (por. rys. 6).

W badaniach potwierdzono, że zasilanie typu HCCI sprzyja szybszemu odparowaniu paliwa (o ok. 0,10 ms, zanik fazy ciekłej, rys. 10) i wcześniejsze (o 0,10-0,14 ms) pojawienie się tzw. gorącego płomienia; również wcześniej niż w silniku zasilanym konwencjonalnie powstają obszary o temperaturze przekraczającej 2000 K (por. rys. 11).

Obserwacje porównawcze w stosunku do silnika z zasilaniem konwencjonalnym wykazały, że zasilanie typu HCCI

The results of the contour line analysis of the observations confirm the typical nature of changes of the area covered by flame, similar to those shown in fig. 15. It was found that in the combustion conditions of the homogenized mixture the contour lines of the highest flame temperature values did not occur, while the area of temperatures ca. 2100–2200 K was significantly reduced, while the sizes of the areas of temperature up to ca. 2000 K expanded. It was also seen that with larger fuel doses loaded into the cylinder, a two-phase nature of the flame propagation is conspicuous (here for data h2, $q_0 = 16.6$ mg/inj. – fig. 16). The curves describing the relative flame area for data hd6 do not indicate the occurrence of a two-phase combustion process. In this case the endoscope was directed towards the chamber in the piston, with the diffusion flame dominating inside.

The comparison of the results of the observation of the relative area covered by flame in various points of the engine operation shown in fig. 16 indicates that the said two-phase nature of combustion was also conspicuous for data hd2, obtained with a similar fuel load ($q_0 = 15.0$ mg/inj.) and increased supercharging pressure. In both cases the local minimum corresponding to the angle approximately 13.5° CA (2.25 ms) is visible after SOI and the point of rapid deceleration of flame propagation in the first combustion phase corresponds to the angle approximately $7-8.5^\circ$ CA (1.2–1.4 ms) after SOI.

7. Conclusions and remarks

The application of the endoscopic observation techniques and modeling of the Hue (H) and Luminance (L) as function of the radiation source properties makes it possible to determine the flame temperature and structure in any point of combustion volume (its planar exposure).

The examples of combustion image analysis, presented here, indicate the possibilities of evaluation of flame propagation in the combustion chamber, however it requires the prior assessment of the repeatability of the observations recorded for the individual crankshaft angle values in comparable engine operating conditions. The repeatability in investigated circumstances was estimated for 9-13% and was accepted as small enough for that kind of analysis based on averaged images.

The analysis carried out on the pixel parameters of recorded images made it possible to determine the start of combustion (SOC) with higher accuracy as it could be done from the analysis of thermodynamical parameters (cylinder indicating). It confirmed the multi-stage nature of self-ignition (see Fig. 5, 6, 12). In the beginning part of this process the growing number of ignition point occurs, and after the time estimated for $0.4-0.6^\circ$ CA (in research conditions; 0.07-0.10 ms) the increase of flame area was observed (see Fig. 6).

It was stated, that HCCI fueling system helps in faster fuel evaporation (of ca. 0.10 ms, atrophy of liquid phase, Fig. 10) and earlier (of 0.10-0.14 ms) formation of the so-called hot flame; areas of temperatures above 2000 K appears earlier as in the conventional fuelled engine as well (see Fig. 11).

wykazuje wcześniejsze pojawienie się płomienia, a jego struktura jest bardziej jednorodna; w przypadku zastosowania doładowania obserwuje się większe natężenie promieniowania, jednak o mniejszym zróżnicowaniu przestrzennym. Jest to prawdopodobnie związane z wyraźnie mniejszą koncentracją cząstek sadzy.

Stwierdzono także, że zmniejszyła się wielkość obszarów występowania wysokich temperatur na rzecz zwiększenia obszarów o temperaturach niskich i średnich. Stwierdzono także, że przy większych dawkach paliwa podawanego do cylindra zaznacza się dwufazowy charakter rozprzestrzeniania się płomienia.

Podane wyżej wartości odnoszą się wprawdzie do określonych obserwacji, jednak ich rozkład i proporcje można uznać za charakterystyczne. Świadczą o tym także wyniki publikowane przez Larssona [9], w których pokazano przebiegi funkcji wywiązywania się ciepła oraz pole powierzchni płomienia o temperaturze powyżej 2300 K. Charakterystyczne w tych badaniach jest także podobne opóźnienie pojawienia się płomienia o wysokiej temperaturze w stosunku do kąta początku wtrysku paliwa, pomimo zmiany kąta wyprzedzenia wtrysku o 6°OWK. Jednocześnie w obu przypadkach krzywe wywiązywania się ciepła są bardzo zbliżone. Może to wskazywać na występowanie określonej korelacji pomiędzy przebiegiem wywiązywania się ciepła, a wynikami analizy warstwicowej rozprzestrzeniania się płomienia. Poszukiwanie takiej korelacji przedstawiono w pracach [2, 8].

Observations carried out comparatively to the conventionally fuelled engine have shown, that in HCCI engine the flame appears earlier and its structure is more homogenous; when supercharging has been applied the higher intensity of flame radiation was observed, but with lower diversification of radiation along the area. Probably, it correlates with lower concentration of soot particles.

It was also found, that the area of higher temperatures gets smaller and areas of low and middle temperatures grows up. It was also stated, that with larger fuel supply into cylinder a two-stage character of flame propagation could be observed.

Although the values presented above refer to some defined observations, however, their distribution and proportions may be assumed as characteristic ones. The results published by Larsson [9], prove the same, presenting the courses of heat release functions and the flame area of temperature above 2300 K. Another characteristic elements of the research is also a similar delay of high temperature flame occurrence in relation to initial fuel injection, despite the injection angle change by 6 CA. At the same time, in both cases the heat release curves are very close. This may indicate the occurrence of a defined correlation between the heat release course and contour line analysis of flame propagation. Search for such a correlation was presented in the papers [2, 8].

Artykuł recenzowany

Literatura/Bibliography

1. Wisłocki K.: Studium wykorzystania badań optycznych do analizy procesów wtrysku i spalania w silnikach o zapłonie samoczynnym. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2004 r., ss. 280.
2. Wisłocki K., Gehrlach D.: Endoscopic observations of flame propagation in DI Diesel engine. *Journal of KONES*, Vol. 8, No 1-2, September 2001.
3. Wisłocki K. (kier.), Kozak W., Pielecha I., Dziaduk A., Markowski J.: Zastosowanie analizy obrazu z obserwacji endoskopowych procesów silnikowych. Opracowanie wewnętrzne 52-867 DS. Instytut Silników Spalinowych i Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Poznańskiej, 2003.
4. Heywood J.B.: *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill Book Co., Series in Mechanical Engineering, 1988.
5. Hentschel W.: *Modern Tools for Diesel Engine Combustion Investigation*. W: *Twenty-six International Symposium on Combustion*. The Combustion Institute, 1996.
6. Kordylewski W. (red.): *Spalanie i paliwa*. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, wyd. 2, Wrocław, 2005.
7. Larsson A.: Research done in the field of direct injected diesel engines concerning exhaust gas emission and optical measurements of the fuel injection and combustion. *Internal Combustion Engines*, Department of Machine Design, Royal Institute of Technology. Report no. 65, 960418.
8. Wisłocki K.: Some diagnostic possibilities of the combustion process in DI Diesel engines. *Ehkologija*. Sbornik nauchnykh trudov Vostochnogo Nacional'nogo Universiteta im. Vladimira Dalja, Lugan'sk, Ukraina, No. 2/2002.
9. Larsson A.: *Optical Studies in a DI Diesel Engine*. SAE Paper 1999-01-3650.

Dr hab. inż. Krzysztof Wisłocki – profesor nadzw. na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

Mr Krzysztof Wisłocki, DSc, DEng. – professor in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznań University of Technology.

