

Leon BOGUSŁAWSKI*
Janusz RABIEGA

PTNSS-2007-SS1-204

Ocena wpływu rodzaju paliwa na przepływ ciepła w silniku spalinowym

Ze względu na mniejsze zasoby paliw ciekłych w stosunku do paliw gazowych i korzystne relacje cenowe istnieje tendencja do zastępowania paliw ciekłych gazowymi. Nie bez znaczenia są również przesłanki związane z ograniczeniem emisji toksycznych składników spalin w przypadku paliw gazowych. Wraz ze zmianą rodzaju paliwa pojawiło się szereg problemów, w tym wzrost obciążenia cieplnego skracający żywotność silnika. W związku z tym podjęto badania wybranego typu silnika, dokonując pomiaru strumienia ciepła w reprezentatywnych punktach głowicy silnikowej. Silnik zasilano najpierw benzyną a następnie gazem propan-butan. Przy obu sposobach zasilania uzyskiwano porównywalne moce. W badaniach stwierdzono znaczący wzrost obciążenia cieplnego na powierzchni głowicy silnikowej po przejściu z zasilania benzyną na zasilanie gazowe.

Słowa kluczowe: spalanie, wymiana ciepła, silnik spalinowy

Influence of the type of fuel on the heat transfer in internal combustion engine

Due to diminishing liquid fuel resources comparing with gaseous fuel as well as difference in their price one can observe a tendency to substitute liquid fuel with gaseous one. The reduction in the emission of toxic ingredients of fumes is also of extreme importance. However, together with the change of the fuel new problems have occurred. One of them is the increase in heat load that shortens the life of an engine. Therefore, studies on the chosen type of an engine were carried out. A heat flux in representative points of the engine's head was measured. The engine was firstly fed with petrol, later with LPG. For both types of fuel the obtained power was similar. Studies showed a significant growth in heat load on the surface of the engine's head after changing the fuel from petrol to LPG.

Key words: combustion, heat transfer, internal combustion engine

1. Wstęp

Ze względu na skomplikowaną geometrię o zmiennej objętości, wysokie wartości ciśnienia i temperatury, pomiar lokalnych wartości strumienia ciepła jest bardzo trudny. Dla potrzeb bilansowania strumienia energii wykorzystano relacje określające średni strumień ciepła w czasie całego cyklu. Opanowanie techniki pomiaru szybkozmiennych temperatur na ścianie umożliwia określenie lokalnego strumienia ciepła na ścianie komory spalania silnika spalinowego. Aby uniknąć przenoszenia sygnału z elementu ruchomego (tłok) czujniki najczęściej montuje się w nieruchomej głowicy. Rejestracja niewielkich zmian temperatury (rzędu 10 K) w szerokim paśmie częstotliwości (od ułamka Hz do ~20 kHz) wymaga opracowania specjalnych układów wzmacniających o minimalnym poziomie szumu. W pewnych zakresach pomiaru mierzony sygnał jest niewiele większy od poziomu zakłóceń. Redukcja wpływu zakłóceń wymaga użycia cyfrowej akwizycji danych i cyfrowej analizy sygnału, przy wykorzystaniu procedur uśredniania fazowego.

Wykorzystując wcześniejsze doświadczenia z pomiarami lokalnego strumienia ciepła na ścianie bomby kalorymetrycznej z ruchomym denkiem symulującej cykl pracy silnika spalinowego [5] i [6] podjęto badania na silniku rzeczywistym. Celem przeprowadzonego cyklu badań była ocena wpływu rodzaju paliwa na obciążenie cieplne powierzchni komory spalania. Dodatkowo w przypadku paliwa gazowego pomierzono wyniki dla dwóch wartości współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 1,2$ i $1,8$. Ta druga wartość λ dawa-

1. Introduction

Due to a complicated geometry characterized with a changing volume, high values of pressure and temperature, the measurement of local values of heat flux is very difficult to perform. For the needs of balancing the energy flux, the relations characterizing a mean heat flux within a whole cycle were used. Being able to apply the method of measurement of quickly-changing temperatures on a wall enables defining a local heat flux on the wall of the combustion chamber of an engine. To avoid transferring the signal from a moving part (the piston), the sensors are usually placed on a fixed head. Registration of minor temperature changes (about 10 K) in a wide frequency band (from a fraction of Hz to ~20 kHz) requires elaborating special amplifying systems with minimum noise level. In some ranges of the measurement the measured signal was slightly higher than the interference level. The reduction of the interference influence requires the use of digital data acquisition and digital signal analysis, applying the procedures of phase averaging.

Making use of previous experience with measurements of local heat flux on the wall of calorimetric bomb with a moving bottom, simulating the work cycle of a spark-ignition engine [5] and [6] the studies were executed on a real engine. The aim of this investigation was the evaluation of the influence of fuel on the heat load of the combustion chamber. Additionally, for LPG the measures were carried out for two values of excess air coefficient $\lambda = 1.2$ and $\lambda = 1.8$. The

ła najlepsze wyniki w zakresie osiągnięć silnika i toksyczności spalin.

Prowadzono badania wymiany ciepła w komorze spalania silnika spalinowego o zapłonie iskrowym zasilanego różnymi paliwami. Strumień ciepła od gorących gazów do ścianki mierzono termoparami powierzchniowymi. Trzy czujniki strumienia ciepła umieszczano w głowicy cylindrowej w sześciu różnych miejscach. Rejestrowano zarówno temperatury powierzchniowe jak i ciśnienie w cylindrze. Układ rejestracji przystosowany był do pracy długotrwałej a wyniki zapisywane były na komputerze. Silnik zasilano zarówno benzyną jak i gazem propan-butan przy różnych współczynnikach nadmiaru powietrza. Pomiar realizowano w różnych punktach głowicy przy użyciu termopar powierzchniowych. Mała stała czasowa czujników umożliwiła pomiar wartości chwilowych w funkcji kąta obrotu. Badania wykonano przy zasilaniu silnika benzyną i propanem-butanem stosując różne współczynniki nadmiaru powietrza. Stwierdzono wzrost wartości strumienia ciepła po zmianie paliwa z benzyny na paliwo gazowe.

2. Opis stanowiska badawczego

Badania zrealizowano na zmodyfikowanym silniku S320 ER, dostosowanym do pracy z zapłonem iskrowym. Schemat stanowiska badawczego i układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1. Silnik hamowany prądnicą asynchroniczną zachowując stałą prędkość obrotową równą 1000 obr/min. Silnik zasilano odpowiednio benzyną i propan-butanem. W przypadku paliwa gazowego zastosowano dwie wartości współczynnika nadmiaru powietrza $\lambda = 1,2$ i $1,8$. Wartość tę mierzono na bieżąco analizatorem spalin i dostosowywano proporcję powietrza do gazu zależnie od wyników pomiaru. Stopień otwarcia przepustnicy gaźnika był miarą obciążenia silnika, a na rysunku 2 pokazano zmiany obciążenia względnego w funkcji stopnia otwarcia przepustnicy dla zasilania różnymi paliwami. Moc silnika zasilanego benzyną przy pełnym otwarciu przepustnicy (~ 10 kW) stanowiła odniesienie. Przez obciążenie względne rozumiano iloraz rzeczywistej mocy oddawanej przez silnik w sto-

second value gave better results as far as the performance of the engine and the toxicity of the fumes are concerned.

The studies of heat exchange in the combustion chamber of the spark-ignition engine that was fed with different types of fuel were carried out. The heat flux from hot gases to the wall was measured by means of surface thermocouples. Three sensors were placed in six points on the engine's head. Both, surface temperatures and the pressure in the cylinder were recorded and gathered information was transferred to the computer. The engine was supplied with petrol and LPG, with different excess air coefficient. The measurement was executed at various points of the engine's head by means of surface thermocouples. A small time constant of the sensors made it possible to measure unsteady heat flux versus angle of the crankshaft rotation. The increase in the heat flux value after changing from petrol to LPG was observed.

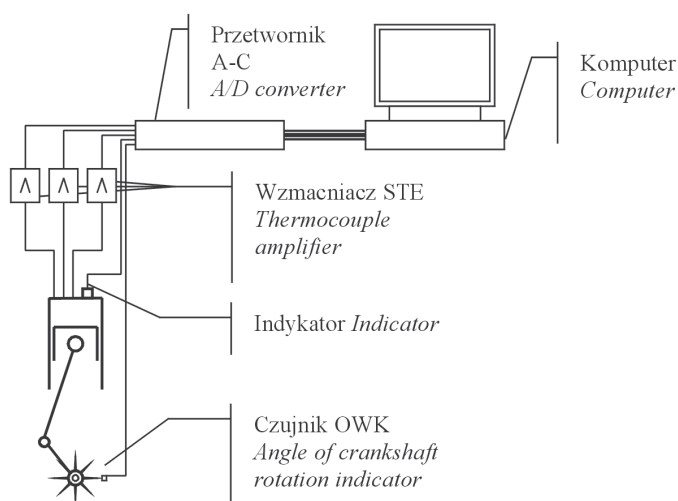
2. Description of the stand

The experiments were carried out on a modified S320 ER engine, adjusted for spark-ignition. The diagram of the stand and the measurement system was presented in Fig. 1. The engine was being broken by means of an asynchronous alternator keeping the same 1000 rpm. engine speed. The engine was fed both with petrol and LPG. For LPG fuel two values of λ were used ($\lambda = 1.2$ and $\lambda = 1.8$). The value was measured in progress, using fumes analyzer and adjusting the air-gas proportions according to the results of the measurement. The angle of the carburettor throttle opening was the measure of the engine power. The changes of the power versus the angle of the throttle opening for various types of fuel was shown in Fig. 2. The power of the engine fed with petrol at a maximum throttle opening (~ 10 kW) was the reference. The quotient of the real engine power to the reference value was considered to be a relative load/power. For $\lambda = 1.2$ there were attempts to deliver such amounts of gas so that the obtained power on the crankshaft could be similar to the one obtained with petrol.

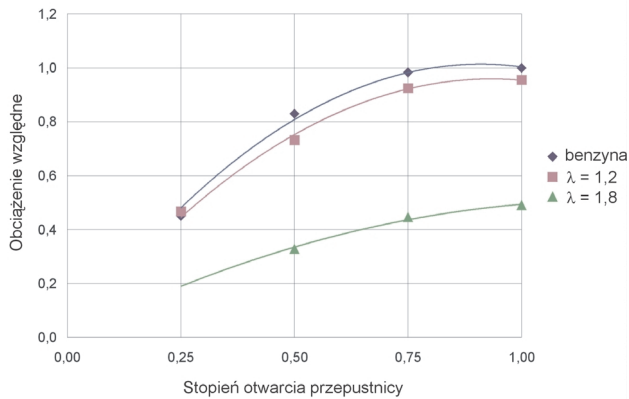
Simultaneously, three surface thermocouples of NANMAC company were placed on the engine's head. The heat flux measurements were taken at 6 chosen points. Their distribution on the engine's head was presented in Fig. 3.

After amplification the signal was registered on ADC488/8SA a 16-bit digital system of data acquisition. Five analogue signals (three surface temperatures, pressure and the index of the angle of crankshaft rotation) were sampled with the frequency of 10 kHz and registered in the computer memory for freely long time. The average values of the registered samples of the signal were found in order to eliminate random interference. The courses after finding the average of 1000 cycles were found representative.

The procedure of determining the heat flux, based on the increase in temperature on the surface was presented in paper [3]. For calculation reasons it was assumed that surface sensors of NANMAC company are made of SS303 steel, which heat properties (heat conductance and thermal conductivity) do not differ too much from the



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego i układu pomiarowego
Fig. 1. Diagram of a stand and measurement system



Rys. 2. Zależność względnego obciążenia silnika od stopnia otwarcia przepustnicy przy różnym zasilaniu

Fig. 2. Power of engine vs angle of throttle opening for different fuels

sunku do mocy odniesienia. Starano się doprowadzać tyle gazu przy $\lambda = 1,2$, by moc na wale była porównywalna z mocą na wale dla zasilania benzyną.

W głowicy silnika umieszczano jednocześnie 3 termopary powierzchniowe firmy NANMAC. Pomiary strumienia ciepła wykonywano w 6 wybranych punktach głowicy. Ich rozmieszczenie przedstawiono na rys. 3.

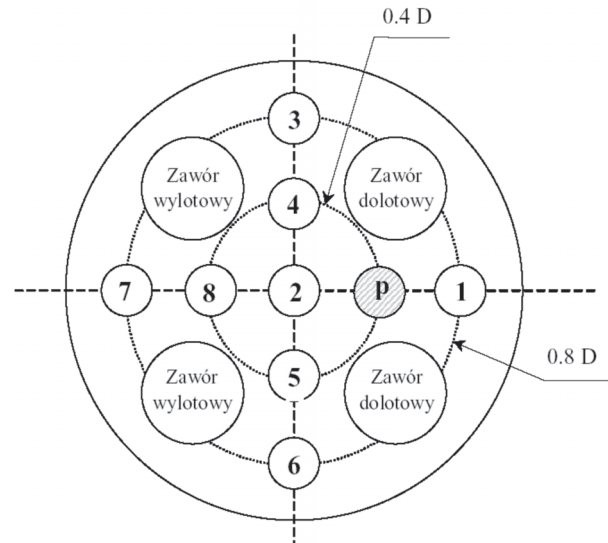
Sygnal po wzmacnieniu rejestrowano 16-bitowym cyfrowym układem akwizycji danych ADC488/8SA. Pięć sygnałów analogowych (3 temperatury powierzchniowe, ciśnienie i sygnał znacznika kąta obrotu wału korbowego) próbkowano z częstotliwością 10 kHz i zapisywano w pamięci masowej komputera przez dowolnie długi czas. Rejestrowane próbki sygnału poddano procedurom uśrednienia w celu wyeliminowania przypadkowych zakłóceń. Za reprezentatywne uznano przebiegi po uśrednieniu 1000 cykli.

Procedurę wyznaczania strumienia ciepła w oparciu o przyrost temperatury powierzchni przedstawiono w pracy [3]. Do obliczeń założono, że czujniki powierzchniowe firmy NANMAC wykonano ze stali SS303, której właściwości cieplne (przewodność cieplna i dyfuzyjność) nie różnią się dużo od materiału głowicy silnika, w którą zostały zamontowane. Materiał z którego wykonano termometr powierzchniowy powinien mieć właściwości cieplne zbliżone do materiału ścianki, w której go zamocowano. Swą obecnością termometr powierzchniowy nie powinien zmieniać pola temperatur w ściance silnika.

W celu zredukowania zakłóceń sygnału pomiarowego przydzwiękiem sieciowym cały układ pomiarowy zasilano poprzez UPS. Niskoszumny wzmacniacz pomiarowy nie przenosił składowej stałej, a jego dolne pasmo przenoszenia wynosiło 132 mHz.

4. Wyniki pomiarów

Zestawiony układ pomiarowy umożliwił rejestrację chwilowych zmian temperatury powierzchni dna komory spalania w wybranych punktach. Przykładowy przebieg zmian temperatury powierzchni dla kilku cykli przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Rozmieszczenie termopar powierzchniowych w głowicy silnika

Fig. 3. Place of surface thermocouple in a head of engine

material the engine's head is made of and on which they were placed. The material a surface thermometer was made of should also show heat properties similar to those of the material of the wall in which it is mounted. The presence of the thermometer should not change the field of temperatures in the engine's wall.

To reduce interference of the measured signal by a grid sound the whole measurement system was powered by UPS. Low-noise measurement amplifier did not carry the DC component and its low carrying band was 132 mHz.

4. Results

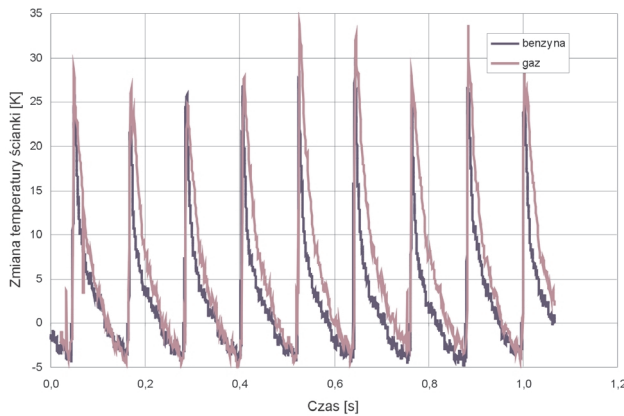
The measurement system enabled the registration of temporary temperature changes of the bottom of the combustion chamber at chosen points. An example course of these changes for some cycles was shown in Fig. 4.

No repeatability of temperature changes in individual cycles was observed. Inequality of the processes in individual cycles was much higher for LPG than for petrol. It suggests the existence of smaller repeatability of preparing fuel mixture dosages for individual cycles.

On the basis of the measured temperature changes the density of heat flux was defined. The courses of temporary values of the heat flux density at various points of cylindrical head have a similar shape, although they differ in their maximum value. An example of such courses was shown in Fig. 5.

Maximum densities of the heat flux was found in the cylinder axis and between exhaust valves (points 2 and 8 in Fig. 3). Closer to the cylinder axis the extreme of the course values was closer to TDC and for points more distant from the axis the extreme moved from TDC. It may be connected with the time of flame propagation. This phenomenon was independent from the applied fuel.

Together with the increase in the engine's load an awaited growth in maximum value of heat flux density was ob-



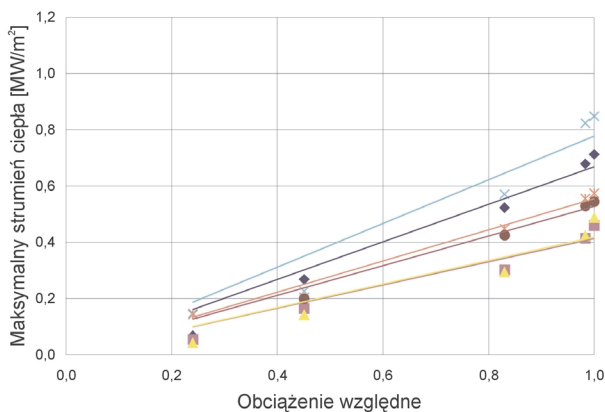
Rys. 4. Typowy przebieg zmian temperatury ścianki komory spalania
Fig. 4. Typical course of wall's temperature of combustion chamber

Zaobserwowano brak powtarzalności zmian temperatury w poszczególnych cyklach. Nierównomierność procesów w poszczególnych cyklach jest dla paliwa gazowego znacznie większa niż dla benzyny. Sugeruje to istnienie mniejszej powtarzalności przygotowania dawek mieszanki palnej dla poszczególnych cykli.

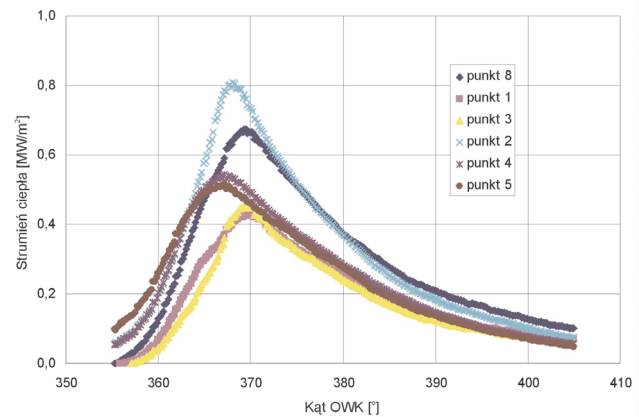
W oparciu o zmierzone zmiany temperatur wyznaczono gęstości strumienia ciepła. Przebiegi chwilowych wartości gęstości strumienia ciepła w różnych punktach głowicy cylindrowej mają zbliżony kształt, choć różnią się wielkością wartości maksymalnej. Przykład takich przebiegów przedstawiono na rys. 5.

Maksymalne gęstości strumienia ciepła odnotowano w osi cylindra i pomiędzy zaworami wydechowymi (punkty 2 i 8 na rys. 3). Minimalne wartości zmierzono w punktach najbardziej odległych od osi cylindra (punkty 1 i 3 na rys. 3). Bliżej osi cylindra ekstremum wartości przebiegu było bliżej ZZ a dla punktów bardziej odległych od osi do ekstremum odsuwało się od ZZ. Może to być związane z czasem propagacji płomienia. Zjawisko to było niezależne od rodzaju paliwa.

Wraz ze wzrostem obciążenia silnika zaobserwowano oczekiwany wzrost maksymalnej wartości gęstości stru-



Rys. 6. Maksymalne strumienie ciepła jako funkcja względnego obciążenia silnika zasilanego benzyną
Fig. 6. Maximum heat flux vs. power of engine for liquid fuel



Rys. 5. Typowy przebieg strumienia ciepła w pobliżu GMP (360°) dla 6 punktów (patrz rys. 3).

Fig. 5. Typical course of heat flux near TDC for 6 points (see Fig. 3).

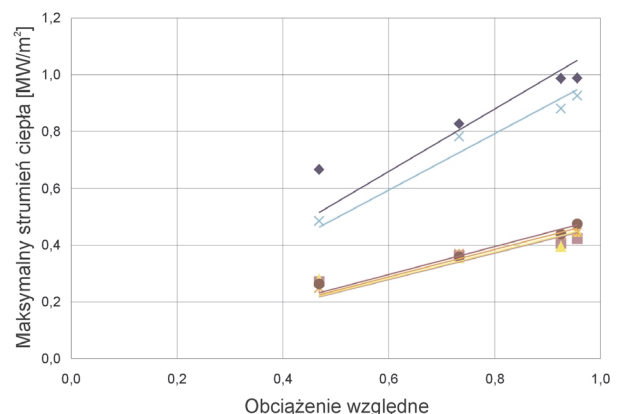
served. These changes were presented in Fig. 6 – for petrol and for LPG in Fig. 7 and 8. In Figures 6, 7 and 8 the same colours were applied for marking individual measuring points as in Fig. 5. Apart from measurement points, trend lines were also shown in the figures. The trend lines were obviously straight, starting at the beginning of coordinate axis. To show a common scale of the phenomena the same scale of coordinate axis was used in these three figures.

5. Conclusions

The measures of heat flux density in the head of the combustion chamber of a spark-ignition engine fed with petrol and LPG were carried out at $\lambda = 1.2$ and $\lambda = 1.8$.

The measures make it possible to draw the following conclusions:

- With the application of LPG at $\lambda = 1.2$ the mean density of heat flux was about 50% higher than the mean density of heat flux that occur during the burning of stoichiometric mixture of petrol. The trend lines in Fig. 7 were sloping/inclined steeper than the lines in Fig. 6.
- Burning poor gas mixture ($\lambda = 1.8$) is accompanied with a smaller heat flux, which reaches 85% of the value obtained for petrol.



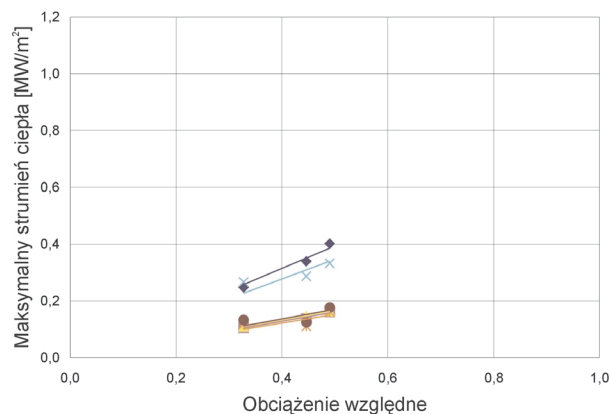
Rys. 7. Maksymalne strumienie ciepła jako funkcja względnego obciążenia dla paliwa gazowego przy $\lambda = 1,2$
Fig. 7. Maximum heat flux vs. power of engine for LPG and $\lambda = 1.2$

mienia ciepła. Zmiany te przedstawiono na rysunku 6 dla benzyny i rysunkach 7 i 8 dla gazu. Na rysunkach 6, 7 i 8 zastosowano te same kolory dla oznaczenia poszczególnych punktów pomiarowych co na rys. 5. Oprócz punktów pomiarowych na rysunkach dodano linie trendu. Narzucającymi się liniami trendu były linie proste, które miały swój początek w początku układu współrzędnych. Dla pokazania wspólnej skali zjawisk na wszystkich trzech rysunkach przyjęto tę samą skalę dla obu osi współrzędnych.

5. Wnioski

Wykonano pomiary gęstości strumienia ciepła w głowicy komory spalania silnika o zapłonie iskrowym zasilanym benzyną i gazem propan-butan przy $\lambda = 1,2$ i $1,8$. Pomiary te pozwalają sformułować następujące wnioski:

- W przypadku użycia gazu propan-butan przy $\lambda = 1,2$ średnia gęstość strumienia ciepła jest o ok. 50% większa od średniej gęstości strumienia ciepła występującej przy spalaniu stechiometrycznej mieszanki benzyny. Linie trendu z rysunku 7 są nachylone bardziej stromo od linii trendu z rysunku 6.
- Spalaniu ubogiej mieszanki gazu ($\lambda = 1,8$) towarzyszy mniejszy strumień ciepła, który osiąga 85% wartości uzyskanej dla benzyny.
- Największe strumienia ciepła zaobserwowano w osi głowicy cylindrowej i pomiędzy zaworami wylotowymi.
- Najmniejsze strumienie ciepła, które wystąpiły pomiędzy zaworami wlotowymi wynoszą około 50% wartości największych. Dla spalanie gazu obserwujemy większe różnicowanie wyników pomiaru.
- Największy strumień ciepła jaki zmierzono w badanym silniku był rzędu 1 MW/m^2 a najmniejszy, przy sprężaniu bez spalania około 50 kW/m^2 .
- Charakter zmian wartości gęstości strumienia ciepła na powierzchni głowicy w funkcji kąta obrotu jest bardzo podobny i nie zależy od rodzaju paliwa.
- Zarówno przy zasilaniu benzyną jak i przy zasilaniu gazem zaobserwowano liniowe narastanie strumienia ciepła wraz ze wzrostem obciążenia silnika.



Rys. 8. Maksymalne strumienie ciepła jako funkcja względnego obciążenia dla paliwa gazowego przy $\lambda = 1,8$

Fig. 8. Maximum heat flux vs. power of engine for LPG and $\lambda = 1.8$

- The biggest heat fluxes were observed in cylinder axis and between exhaust valves.
- The smallest heat fluxes which were observed between inlet valves amount to 50% of the biggest values. For LPG combustion a bigger differentiation of measurements results was observed.
- The biggest heat flux which was measured in the studied engine was about 1 MW/m^2 and the smallest at compression without combustion, about 50 kW/m^2 .
- The character of the changes in heat flux density on the surface of the head versus rotation angle was very similar for both types of the applied fuel.
- Linear growth in heat flux together with the increase in the engine's load/power was observed when the engine was fed both with petrol and LPG.

Artykuł recenzowany

Literatura/Bibliography

- [1] Rابيةga J., Bogusławski L.: Indykacja silnika spalinowego przetwornikiem ADC 488/8SA w środowisku LabVIEW, KONES 2001.
- [2] Rابيةga J., Bogusławski L., Cupiał K., Kociszewski A.: Pomiary lokalnego i chwilowego strumienia ciepła od spalin do ścianki w silniku badawczym, KONES 2002.
- [3] Wiśniewski S.: Wymiana ciepła, PWN, Warszawa 1979.
- [4] Rابيةga J., Bogusławski L., Cupiał K., Kociszewski A.: Badania wymiany ciepła w komorze spalania silnika z zapłonem iskrowym zasilanego paliwem ciekłym i gazowym, VI Międzynarodowa Konferencja Naukowa Silniki Gazowe, 2003.
- [5] Rابيةga J.: Wpływ warunków spalania i zawirowania ładunku na intensywność wymiany ciepła w gazowym silniku spalinowym, XI Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy, 2001.
- [6] Rابيةga J., Bogusławski L.: Influence of Combustion Condition and Air-Fuel Charge Rotation on Intensity of Heat Transfer in an IC Engine Operating on Gas Fuel. Konferencja NATO Research & Technology Organization Applied Vehicle Technology, 2001.

Dr inż. Janusz Rابيةga – adiunkt na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

Mr Janusz Rابيةga, DEng. – Doctor in the Faculty of Working Machines and Transportation at Poznań University of Technology.



Dr hab. inż. Leon Bogusławski – profesor nadzw. na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

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

