

Hydrogen resistance to knock combustion in spark ignition internal combustion engines

The results of investigations focusing on knock combustion analysis of a hydrogen-fueled engine have been presented in the paper. Knock intensity was determined as the intensity of the in-cylinder combustion pressure pulsations (recorded with a sampling frequency of 100 kHz) and filtered through high-pass filtering with cut-off frequency of 3.5 kHz. The research was conducted on the CFR engine with a variable compression ratio ranging from 6 to 14. The research has shown a rapid increase in pressure pulsations amplitude was observed while the compression ratio was changed from 11 to 12. This was interpreted as a result of in-cylinder hydrogen-air mixture self-ignition at the end of the spark ignition controlled combustion. Supporting this observation the theorem of dual nature of hydrogen knock combustion was postulated. Intensity of the pressure pulsations that accompany normal combustion without hydrogen self-ignition was in an exponential correlation with the compression ratio, which directly translates into a similar correlation of the pulsations and temperature of hydrogen-air mixture at the moment of ignition.

Keywords: hydrogen, knock combustion, internal combustion engine

Odporność wodoru na spalanie stukowe w silniku z zapłonem iskrowym

W artykule przedstawiono wyniki badań spalania stukowego w silniku zasilanym wodorem. Intensywność spalania stukowego określano za pomocą intensywności pulsacji ciśnienia odfiltrowywanych filtrem górnoprzepustowym o częstotliwości granicznej 3,5 kHz z przebiegu ciśnienia spalania rejestrowanego z częstotliwością 100 kHz. Badania przeprowadzono na silniku badawczym CFR o stopniu sprężania zmieniającym się od 6 do 14. Na podstawie przeprowadzonych badań zaobserwowano gwałtowny przyrost amplitudy pulsacji przy zmianie stopnia sprężania z 11 na 12, co zinterpretowano jako skutek pojawiania się samozapłonów mieszanki wodorowo-powietrznej w końcowej fazie spalania inicjowanego kontrolowanym zapłonem iskrowym. Na tej podstawie postawiono tezę o dwojakiej naturze stuku w silniku wodorowym. Dla przebiegu spalania bez samozapłonów intensywność pulsacji ciśnienia spalania pozostawała w wykładniczej relacji ze stopniem sprężania, co bezpośrednio przekładało się na podobną zależność pomiędzy intensywnością pulsacji i temperaturą mieszanki w chwili zapłonu.

Słowa kluczowe: wodór; spalanie stukowe, silnik spalinowy

1. Introduction

The basic disadvantage of fossil fuels in comparison with renewable fuels is their limited resources. In the nearest future gasoline and diesel fuel will be replaced with biomass originating fuels or fuels generated from electrical energy processing (water electrolysis through photovoltaic cells). Among the potential fuels that can be widely applied in the near future is hydrogen. Hydrogen seems the most probable fuel for general use. It is because very strong financing stimulates the advancement of production and storage technology of this fuel and the development of fuel cells. Besides, a huge potential in the combustion engine manufacturing industry hints that the first mass-produced hydrogen engine will be a classic piston engine.

The main disadvantage of hydrogen as engine fuel is its proneness to develop knock combustion. Knock combustion is an undesired course of combustion of fuel air mixture in the engine as it generates intense pressure pulsations that exert impact stress on the crankshaft bearings and can generate vibrations of the piston rings. Besides, the occurrence of knock combustion results in a growth of the thermal loads of the combustion chamber, piston crown in particular. These are the factors that clearly reduce the life of an engine. The

1. Wstęp

Podstawową wadą paliw kopalnych, w porównaniu do paliw odnawialnych, są ich skończone zasoby. W niedalekiej przyszłości benzyna i olej napędowy będą zastąpione paliwami z biomasy lub paliwami powstającymi w wyniku przetwarzania energii elektrycznej (np. elektroliza wody za pomocą ogniw fotowoltaicznych). Wśród potencjalnych paliw, które mogą być szeroko stosowane już w nieodległej przyszłości jest wodór. Wodór wydaje się paliwem najbardziej prawdopodobnym w powszechnym użyciu, ponieważ rozwój technologii wytwarzania i magazynowania tego paliwa oraz rozwój wodorowych ogniw paliwowych są stymulowane bardzo dużymi środkami finansowymi. Ponadto ogromny potencjał przemysłu silników spalinowych skłania do przypuszczeń, że pierwszym masowo produkowanym urządzeniem wykorzystującym wodór będzie klasyczny, tłokowy silnik spalinowy.

Główną wadą wodoru jako paliwa silnikowego jest jego skłonność do generowania spalania stukowego. Spalanie stukowe jest niepożądanym przebiegiem spalania mieszanki paliwowo-powietrznej w silniku, ponieważ generuje intensywne pulsacje ciśnienia, które oddziałują udarowo na łożyska układu tłokowo-korbowego i mogą wprawiać w

prone to a fuel to develop knock combustion is a barrier that limits the engine compression ratio, thus reducing its efficiency.

An indicator that characterizes the fuel resistance to knock combustion is the octane number (ON). This number was introduced for liquid fuels and characterizes the resistance of these fuels to a knock generated by self-ignition of the remains of the mixture in its final phase of combustion in a piston engine. Hydrogen, in literature (Das [1], Swain and others [2]) is characterized by RON (research octane number) with the value of 130 as a fuel of very good resistance to knock combustion. On the other hand, during combustion hydrogen can generate pressure waves of intensity higher than gasoline combusted under the same conditions [3]. In literature we thus see hydrogen resistance to knocking expressed in ON, which is on the level of 70 [4, 5, 6]. As we can see, large discrepancy occurs in the evaluation of the hydrogen resistance to knocking here. A much better indicator of gaseous fuel resistance to knock combustion, including hydrogen is methane number (MN) expressing percentage share of methane in the reference mixture composed of methane and hydrogen. MN of the value of 0 contains pure hydrogen and MN of the value of 100 contains pure methane (tab. 1). For gases of the methane number higher than 100 the reference fuel are mixtures of methane and carbon dioxide and the volumetric, percentage content of CO₂ corresponds to the surplus of MN above 100%. Example: according to Malenshek and Olsen [7] the fuel of the methane number MN = 120 has a resistance to knocking as the reference fuel of the methane content of 80% and 20% carbon dioxide.

Table 1. Methane number for selected gases [7]
Tabela 1. Liczba metanowa dla wybranych gazów [7]

Gas/gaz	Methane number/ liczba metanowa
Methane/metan	100
Hydrogen/wodór	0
Fermentation gas (biogas) 60% CH ₄ , 40% CO ₂ /gaz fermentacyjny (biogaz)	140
Typical wood gas/typowy gaz drzewny	61 – 70
Natural gas/gaz ziemny	75 – 95
Coal gas/gaz koksowniczy	24 – 30

Based on the evaluation of MN we observe that among gaseous fuels hydrogen is the least resistant to knock combustion.

The paper presents the results of investigations of the hydrogen combustion in a piston combustion engine at different compression ratios. Based on these results the authors have shown that the knocking phenomenon generated by the combustion of hydrogen has a dual nature. In a hydrogen-fueled engine of low compression ratio pressure pulsations occur due to an unstable course of hydrogen combustion. At a high compression ratio the pressure pulsations are generated by self-ignition of the hydrogen oxygen mixture.

drżania pierścienie tłokowe. Ponadto występowanie spalania stukowego prowadzi do wzrostu obciążeń termicznych komory spalania, a szczególnie denka tłoka. Są to czynniki, które wydatnie skracają trwałość silnika. Skłonność paliwa do spalania stukowego jest barierą ogólnie ograniczającą stopień sprężania silnika, a tym samym ograniczającą sprawność silnika.

Wskaźnikiem charakteryzującym odporność paliwa na generowanie stuku jest liczba oktanowa (LO). Liczba ta została wprowadzona dla paliw ciekłych i charakteryzuje odporność tych paliw na stuk powstający wskutek samozapłonu resztek mieszanki palnej w jej końcowej fazie spalania w silniku tłokowym. W odniesieniu do wodoru w literaturze (m.in. Das [1] oraz Swain i inni [2]) podaje się LOB (liczba oktanowa badawcza) na poziomie 130, charakteryzując wodór, z jednej strony, jako paliwo o bardzo dobrej odporności na spalanie stukowe. Z drugiej strony wodór podczas spalania może generować fale ciśnienia o intensywności wyższej niż spalana w takich samych warunkach benzyna [3]. W literaturze podaje się wówczas, że odporność wodoru na stuk wyrażona za pomocą LO jest na poziomie około 70 [4, 5, 6]. Jak można zauważyć, występuje duża rozbieżność w ocenie odporności wodoru na spalanie stukowe. Znacznie lepszym wskaźnikiem odporności paliwa gazowego, w tym także wodoru, na spalanie stukowe jest liczba metanowa (LM), która wyraża udział procentowy metanu w mieszance wzorcowej złożonej z metanu i wodoru. Zdefiniowano dwie wartości referencyjne dla liczby metanowej. LM o wartości 0 ma wodór, natomiast LM o wartości 100 ma metan (tab. 1). Dla gazów o liczbie metanowej większej niż 100 jako paliwo odniesienia stosuje się mieszaniny metanu i dwutlenku węgla, przy czym objętościowa, procentowa zawartość CO₂ odpowiada nadwyżce LM powyżej 100%. Przykładowo, według Malensheka i Olsena [7] paliwo o liczbie metanowej LM = 120 ma taką samą odporność na stuk jak paliwo wzorcowe o 80-procentowej zawartości metanu i 20-procentowej zawartości dwutlenku węgla.

Na podstawie oceny LM można stwierdzić, że wodór wśród paliw gazowych jest paliwem najmniej odpornym na generowanie stuku.

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących spalania wodoru w tłokowym silniku spalinowym przy różnym stopniu sprężania. Na podstawie tych wyników wykazano, że stuk pochodzący od spalania wodoru ma dwojaką naturę. W zasilanym wodorem silniku o niskim stopniu sprężania powstają pulsacje ciśnienia spowodowane niestabilnym przebiegiem spalania wodoru. Przy wysokim stopniu sprężania spalaniu wodoru towarzyszą pulsacje ciśnienia spowodowane samozapłonem mieszanki wodorowo-powietrznej. Ich amplituda w porównaniu do pulsacji z niestabilnego spalania jest co najmniej o rząd większa.

2. Stanowisko badawcze

Podstawowym elementem stanowiska badawczego był silnik o zmiennym stopniu sprężania CFR (*Cooperative Fuel Research*) wyprodukowany przez Waukesha Motor Company. Silnik miał zmodyfikowany tłok, aby uzyskać zakres zmienności stopnia sprężania od 4,5 do 18,5.

The amplitude of the pulsations in comparison with the pulsations from unstable combustion is at least one order of magnitude greater.

2. Test stand

The basic element of the test stand was an engine of variable compression ratio CFR (Cooperative Fuel Research) manufactured by Waukesha Motor Company. The engine had a modified piston to obtain the range of compression ratio variability from 4.5 to 18.5.

The engine technical data has been presented in table 2.

The engine was fitted with a programmable ECU control module enabling the control and variability of the:

- ignition angle,
- throttle position,
- phases and opening times of the hydrogen injector placed in the intake manifold.

During the tests the following quantities were measured:

- intake manifold pressure,
- intake air temperature,
- amount of air taken by the engine,
- oxygen amount in the exhaust gases measured with a broadband lambda sensor,
- exhaust gases temperature,
- coolant temperature,
- crankshaft position and its speed,
- torque on the crankshaft,
- pressure in the engine cylinder.

The pressure in the cylinder was recorded with the sampling frequency of 100 kHz. The remaining quantities – with the frequency of 200 Hz respectively.

In the tests the engine was indicated at a constant ignition angle $\alpha_z = 0^\circ$ and variable compression ratio from 6 to 14 with the resolution of 1. The coolant temperature was on the level of 85 – 88 °C. Due to a high intensity of the pressure pulsations during the combustion of hydrogen for compression ratios higher than 12 the tests were not carried out at full engine load (part loads were used) at a constant hydrogen dose for all test series.

3. Test results and discussion

Figure 1 presents an example, extended indicator diagram, covering the course of the combustion of the hydrogen air mixture. The diagram shows the courses of pressure for individual engine work cycles at two different compression ratios – 10 and 12. The diagram also shows the course of the averaged pressure (for $\epsilon = 12$) from the whole test series composed of 300 consequent combustion cycles. In both cases the engine burnt the hydrogen air mixture of stoichiometric composition at the ignition angle of $\alpha_z = 0^\circ$.

Figure 2 shows example courses of the pulsations marked SZCS (combustion pressure component variable) filtered from 300 consequent pressure courses included in a single test series for a given compression ratio. This component was filtered with a high-pass filter of the cut-off frequency of 3.5 kHz. A clearly noticeable hydrogen induced knocking was heard generated by the engine of the compression ratio of 9.

Dane silnika przedstawiono w tabeli 2.

Silnik był wyposażony w programowalny moduł sterujący ECU, za pomocą którego można było sterować:

- kątem wyprzedzenia zapłonu,
- położeniem przysłony przepustnicy,
- fazami oraz czasem otwarcia wtryskiwacza wodoru zainstalowanego w kolektorze dolotowym.

Podczas badań dokonywano pomiaru następujących wielkości:

- ciśnienie w kolektorze dolotowym,
- temperatura powietrza dolotowego,
- wydatek powietrza pobieranego przez silnik,
- zawartość tlenu w gazach spalinowych mierzona szerokopasmową sondą lambda,
- temperatura gazów spalinowych,
- temperatura wody chłodzącej,
- położenie wału korbowego i jego prędkość obrotowa,
- moment obrotowy na wale korbowym,
- ciśnienie w cylindrze silnika.

Table 2. Engine technical data (CFR Waukesha)

Tabela 2. Dane techniczne silnika CFR Waukesha

Compression ratio/ <i>stopień sprężania</i>	4.5 – 18.5
Bore [cm]/ <i>średnica cylindra [cm]</i>	8.26
Stroke [cm]/ <i>skok tłoka [cm]</i>	11.43
Piston rod length [cm]/ <i>dlugość korbowa [cm]</i>	25.4
Displacement [cm ³]/ <i>pojemność skokowa [cm³]</i>	611
Opening of the intake valve/ <i>otwarcie zaworu dolotowego</i>	10° after TDC
Closing of the intake valve/ <i>zamknięcie zaworu dolotowego</i>	34° after BDC
Opening of the exhaust valve/ <i>otwarcie zaworu wylotowego</i>	40° before BDC
Closing of the exhaust valve/ <i>zamknięcie zaworu wylotowego</i>	15° after TDC
Engine speed/ <i>prędkość obrotowa</i>	0 – 900 rpm

Ciśnienie w cylindrze rejestrowano z częstotliwością próbkowania 100 kHz. Pozostałe wielkości – odpowiednio z częstotliwością 200 Hz.

W ramach badań indykowano silnik przy stałym kącie zapłonu $\alpha_z = 0^\circ$ i różnym stopniu sprężania zmienianym co 1 od 6 do 14. Temperatura wody chłodzącej utrzymywana była na poziomie 85 – 88 °C. Ze względu na dużą intensywność pulsacji ciśnienia podczas spalania wodoru dla stopni sprężania wyższych niż 12 badań nie prowadzono przy pełnym obciążeniu silnika, ale przy obciążeniu częściowym, zachowując jednakże stałą dawkę wodoru dla wszystkich serii pomiarowych.

3. Wyniki badań i dyskusja

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy, rozwinięty wykres indykatorowy, obejmujący przebieg spalania mieszanki wodorowo-powietrznej. Pokazano na nim przebiegi

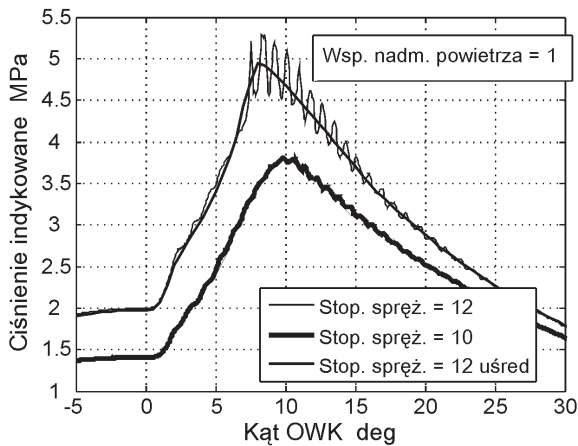
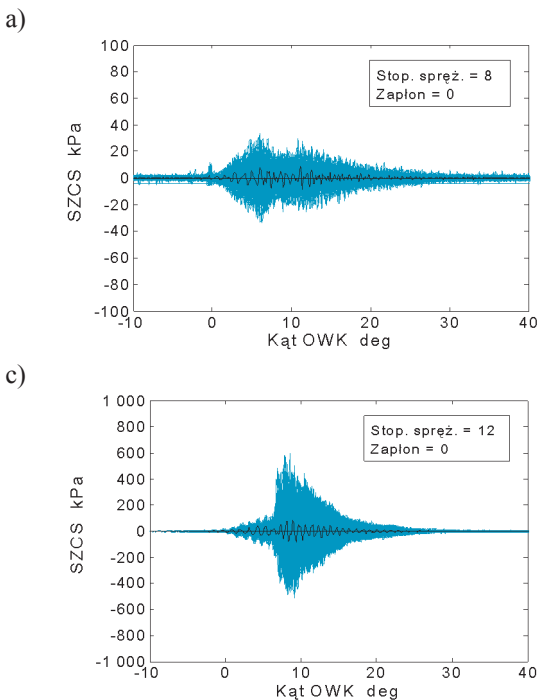


Fig. 1. A fragment of a single averaged (300 cycles) extended indicator graph for the engine of compression ratio of $\epsilon = 12$ and 10 burning a stoichiometric hydrogen oxygen mixture at the angle of ignition $\alpha_z = 0^\circ$

Rys. 1. Fragment pojedynczego i uśrednionego (300 cykli) rozwiniętego wykresu indykatorowego dla silnika o stopniu sprężania $\epsilon = 12$ i 10 spalającego stechiometryczną mieszankę wodorowo-powietrzną przy kącie zapłonu $\alpha_z = 0^\circ$



ciśnienia dla pojedynczych cykli pracy silnika pracującego przy dwóch różnych stopniach sprężania 10 i 12. Pokazano także przebieg ciśnienia uśrednionego (dla $\epsilon = 12$) z całej serii pomiarowej złożonej z 300 kolejnych cykli spalania silnika. W obydwu przypadkach silnik spalał mieszankę wodoru z powietrzem o składzie stechiometrycznym przy kącie zapłonu $\alpha_z = 0^\circ$.

Na rysunku 2 pokazano przykładowe przebiegi pulsacji oznaczanych skrótem SZCS (składowa zmienna ciśnienia spalania) odfiltrowanych z 300 kolejnych przebiegów ciśnienia spalania wchodzących w skład danej serii pomiarowej dla wybranego stopnia sprężania. Składową tę odfiltrowano za pomocą cyfrowego filtra górno-przepustowego o częstotliwości granicznej 3,5 kHz. Zauważono, że wyraźnie słyszalny stuk wodorowy generowany był przez silnik o stopniu sprężania 9.

Intensywność stuku oceniano przez pomiar intensywności odfiltrowanych pulsacji ciśnienia spalania. Do oceny intensywności tych pulsacji przyjęto miarę polegającą na pomiarze największej amplitudy (dodatniej lub ujemnej) z przebiegu pulsacji (SZCS) z pojedynczego cyklu spalania (rys. 3a). Miarę tę oznaczoną jako PP_i (Peak Pressure) dla i-tego przebiegu pulsacji można wyrazić wzorem (1).

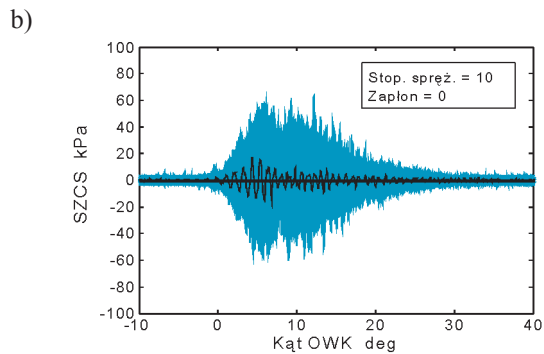


Fig. 2. 300 overlain consequent courses of the component of the combustion pressure variable (SZCS) for the combustion of a stoichiometric hydrogen air mixture at the ignition angle of $\alpha_z = 0^\circ$ in the engine of the compression ratio of: 8 (a), 10 (b), 12 (c)

Rys. 2. Trzysta nałożonych na siebie kolejnych przebiegów składowej zmiennej ciśnienia spalania (SZCS) dla spalania stechiometrycznej mieszanki wodoru z powietrzem przy kącie wyprzedzenia zapłonu $\alpha_z = 0^\circ$ w silniku o stopniu sprężania: 8 (a), 10 (b), 12 (c)

The intensity of knocking was assessed through the measurement of the intensity of the filtered pulsations of the combustion pressure. For the assessment of the intensity of the pulsations a measure was assumed that used the highest amplitude (positive or negative) from the course of the pulsations (SZCS) from a single combustion cycle (Fig. 3a). This measure, marked PP_i (Peak Pressure) for the i-th course of pulsations we can express as follows:

$$PP_i = \max[|SZCS_i(t)|] \quad (1)$$

Dla całej serii pomiarowej złożonej z n przebiegów wyznacza się wartość średnią PP_{sr} (rys. 3b) według wzoru (2), gdzie: n – liczba cykli.

Na rysunku 4 przedstawiono intensywność pulsacji PP_{sr} w zależności od stopnia sprężania.

Jest bardzo prawdopodobne, że duży przyrost intensywności pulsacji ciśnienia PP_{sr} , występujący w silniku o stopniu sprężania 12 w porównaniu do silnika ze stopniem sprężania 11, jest spowodowany wystąpieniem samozapłonu wodoru w końcowej fazie spalania mieszanki. W przedziale stopnia sprężania od 6 do 11 pulsacje ciśnienia są wynikiem

For the whole test series composed of n courses we derive an average value of PP_{sr} (Fig. 3b) that equals to

$$PP_{sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} PP_i \quad (2)$$

where: n – number of cycles.

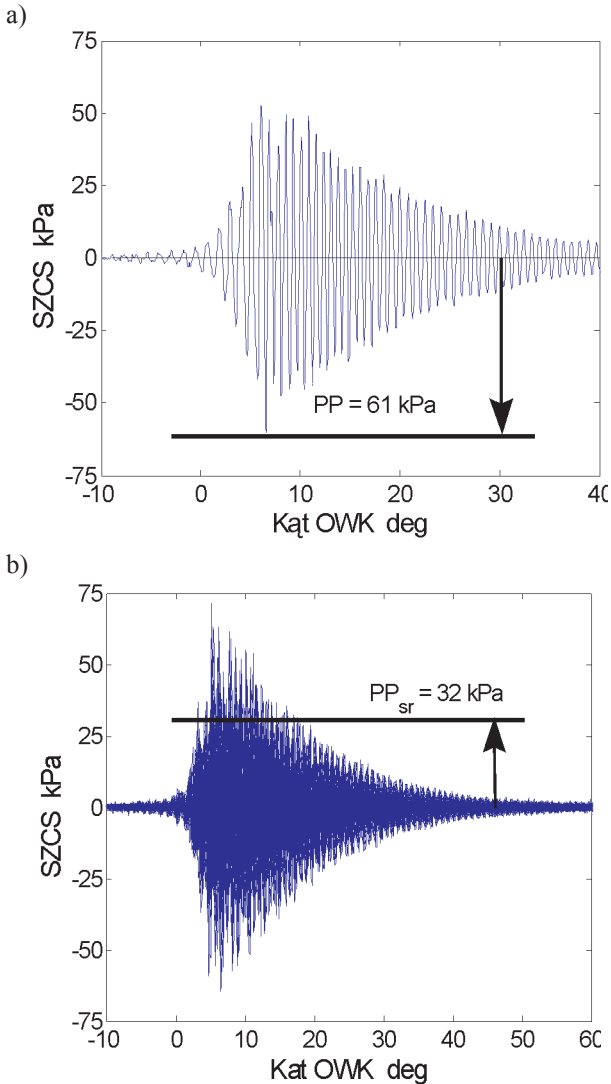


Fig. 3. Graphic representation of the PP measure: for a selected individual cycle (a), for the whole tests series composed of 120 individual courses (b)

Rys. 3. Graficzne przedstawienie miary PP: dla wybranego cyklu pojedynczego (a), dla całej serii pomiarowej złożonej ze 120 przebiegów indywidualnych (b)

Figure 4 presents the intensity of the PP_{sr} pulsations depending on the compression ratio.

It is very probable that a high growth of the intensity of the PP_{sr} pressure pulsations, occurring in the engine of the compression ratio of 12 as compared to the engine of the compression ratio of 11 is caused by the occurrence of self-ignition of hydrogen in the final phase of the mixture combustion. In the compression ratio range from 6 to 11 the pressure pulsations are a result of an unstable course

niestabilnego przebiegu spalania bez samozapłonów. Na rysunku 4b przedstawiono przebieg PP_{sr} dla tego zakresu zmian stopnia sprężania. Przedstawiona na tym rysunku wykładnicza krzywa regresji niemalże idealnie odwzorowuje dane eksperymentalne. Tak dobra korelacja danych eksperymentalnych z krzywą wykładniczą może świadczyć o wykładniczym charakterze intensywności pulsacji w zależności od temperatury mieszanki w chwili zapłonu jako wielkości zależnej od stopnia sprężania.

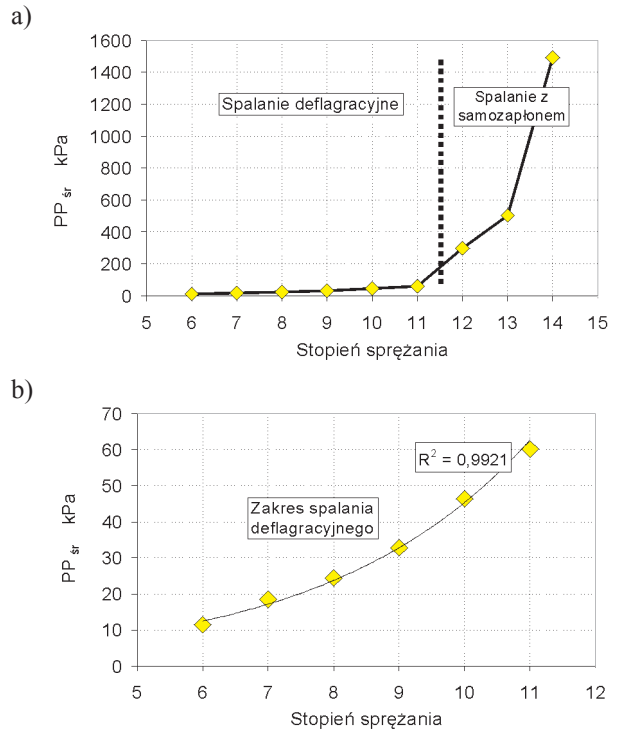


Fig. 4. Intensity of the PP_{sr} pressure pulsations depending on the compression ratio while combusting hydrogen at the ignition angle of $\alpha_z = 0^\circ$ (a), an enlarged fragment of the graph from fig. 4a) with the exponential curve of regression (b)

Rys. 4. Intensywność pulsacji ciśnienia PP_{sr} w zależności od stopnia sprężania podczas spalania wodoru przy kącie zapłonu $\alpha_z = 0^\circ$ (a), powiększony fragment wykresu z rys. 4a) z wykładniczą krzywą regresji (b)

Jak przedstawiono na rysunku 5, temperatura mieszanki w chwili zapłonu zależnie od stopnia sprężania zmieniała się od około 680 do około 950 K.

Dla mieszanki wodorowo-powietrznej zwłoka samozapłonu maleje wykładniczo wraz ze wzrostem temperatury, jak to pokazano na rysunku 6. Taka zależność dla spalania paliw w zamkniętej objętości cylindra silnika tłokowego jest bardzo niekorzystna, bowiem nadmierne skrócenie zwłoki samozapłonu prowadzi do wzrostu prawdopodobieństwa występowania samozapłonów. Jak można zauważyć, ze wzrostem temperatury o 100 K zwłoka ta maleje około 10-krotnie. Zwłokę tę obliczano w programie Chemkin dla modelu reaktora o stałej objętości wypełnionego homogeniczną mieszkanką wodorowo-powietrzną o składzie stechiometrycznym.

Na podstawie przeprowadzonych badań zauważono również, że intensywny przebieg spalania stukowego prowadzi

of combustion without self-ignitions. Figure 4b presents the course of PP_{sr} for this range of changes of the compression ratio. The presented exponential curve of regression almost ideally reflects the experimental data. Such a good correlation of experimental data with the exponential curve may confirm the exponential nature of the intensity of the pulsations depending on the temperature of the mixture at the moment of ignition as a quantity dependent on the compression ratio.

As shown in Figure 5, the temperature of the mixture at the moment of ignition varied from approximately 680 to approximately 950 K depending on the compression ratio.

For the hydrogen air mixture the delay in the ignition reduces exponentially along the growth of the temperature as shown in Figure 6. Such dependence for the combustion of fuels in a closed space of the cylinder of a piston engine is very disadvantageous, as excess reduction of the delay of the self-ignition leads to a growth of the probability of self-ignitions. As we can see, along the growth of the temperature by approximately 100 K this delay drops ten times. This delay was calculated in the Chemkin software for a model of a constant volume reactor filled with a homogenous hydrogen air stoichiometric mixture.

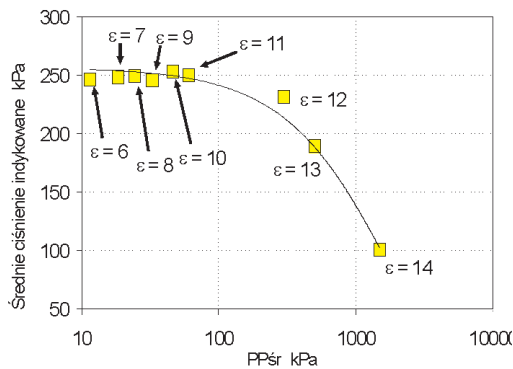


Fig. 7. Mean indicated pressure in relation to the intensity of pressure pulsation PP_{sr} for a constant hydrogen dose at $\lambda = 1$ and a constant ignition angle $\alpha_z = 0^\circ$ for a CFR variable compression ratio engine

Rys. 7. Średnie ciśnienie indykowane w zależności od intensywności pulsacji ciśnienia PP_{sr} dla stałej dawki wodoru przy $\lambda = 1$ i stałego kąta zapłonu $\alpha_z = 0^\circ$ dla silnika CFR o zmiennym stopniu sprężania

Based on the performed investigations it has been observed that an intense course of the knock combustion leads to a significant reduction of the mean indicated pressure, which has impact on the engine torque and its efficiency. The dependence of the mean indicated pressure on the intensity of pulsation PP_{sr} has been shown in Figure 7.

4. Conclusions

1. In a hydrogen-fueled engine the compression ratio dually influences the generating processor the knocking and its intensity. The compression ratio, mainly influences the temperature of the mixture in the final phase of the compression stroke. The increase in the temperature of the hydrogen air mixture at the moment of ignition exponentially impacts the reduction of the delay in the

do znaczącego obniżenia średniego ciśnienia indykowanego, co ma wpływ na moment obrotowy silnika i jego sprawność. Zależność średniego ciśnienia indykowanego od intensywności pulsacji PP_{sr} przedstawiono na rysunku 7.

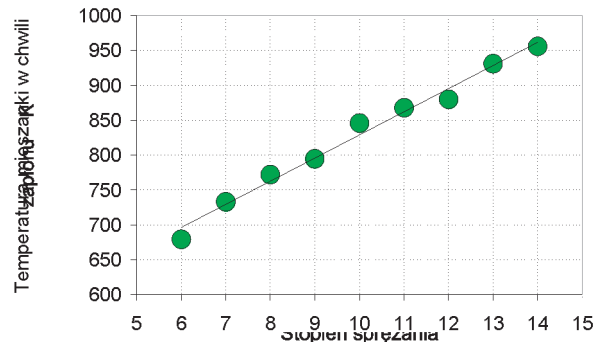


Fig. 5. The temperature of the hydrogen air mixture at the moment of ignition depending on the compression ratio for a constant value of the ignition angle $\alpha_z = 0$ and a constant pressure at the onset of compression

Rys. 5. Temperatura wodorowej mieszanki palnej w chwili zapłonu w zależności od stopnia sprężania dla stałej wartości kąta zapłonu $\alpha_z = 0$ i stałego ciśnienia początku sprężania

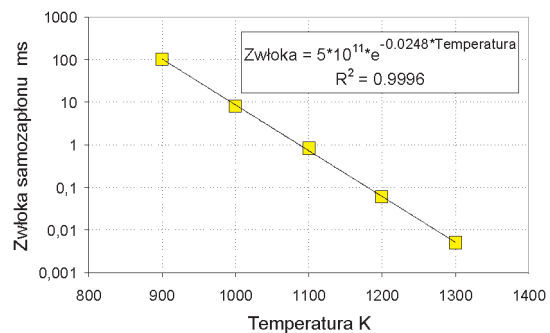


Fig. 6. The delay of the self-ignition of the hydrogen air stoichiometric mixture in the function of temperature in a reactor of a constant volume reactor (own calculations in the Chemkin 4.1 software)

Rys. 6. Zwłoka samozapłonu stechiometrycznej mieszanki wodorowo-powietrznej w funkcji temperatury w reaktorze o stałej objętości (obliczenia własne w programie Chemkin 4.1)

4. Wnioski

1. W silniku zasilanym wodorem stopień sprężania wpływa dwójako na generację stuku i jego intensywność. Stopień sprężania wpływa głównie na temperaturę mieszanki w końcu suwu sprężania. Wzrost temperatury mieszanki wodorowo-powietrznej w chwili jej zapłonu wpływa w sposób wykładniczy na skrócenie zwłoki jej samozapłonu. W odniesieniu do spalania wodoru relatywnie wysoka temperatura w chwili zapłonu prowadzi do znacznego przyspieszenia przebiegu spalania, powodując gwałtowny przyrost ciśnienia i powstanie fali ciśnieniowej o dużej amplitudzie. Drugą przyczyną potęgującą intensywność pulsacji ciśnienia w wyniku stosowania wyższego stopnia sprężania jest skoncentrowanie takiej samej masy ładunku w relatywnie mniejszej objętości komory spalania. Większe stężenie substratów wpływa na większą szybkość reakcji chemicznych i tym samym również na

self-ignition. In relation to the combustion of hydrogen a relatively high temperature at the moment of ignition leads to a significant acceleration of the course of combustion resulting in an abrupt pressure surge and a high amplitude pressure wave. Another reason augmenting the intensity of the pressure pulsations resulting from higher compression ratios is concentrating of the same charge mass in a relatively smaller volume of the combustion chamber. A higher concentration of the substrates increases the speed of the chemical reactions thus adds to a faster combustion. Hence, the influence of the compression ratio on the intensity of the hydrogen generated knocking can be considered as a joint effect of two affecting phenomena:

- temperature of the mixture at the moment of ignition,
 - volumetric density of the mixture energy at the moment of ignition.
3. The pulsations occurring during hydrogen combustion at low compression ratios ($\epsilon \leq 11$) are a result of a flame propagating in an unstable manner during the combustion.
 4. Along the growth of the compression ratio these pulsations grow and at a certain compression ratio ($\epsilon = 12$ – for the CFR engine) the increment is rather substantial. Due to a different quality of these pulsations we can assume that they are generated in a different way. With a high level of probability we can state that they result from a self-ignition of the mixture.
 5. Because of two different reasons for the pressure pulsations we cannot clearly determine the intensity of hydrogen generated knocking expressed through PP_{sr} depending on compression ratio ϵ in its wide range of changes. In the range of ϵ from 6 to 11 for which the self ignition of hydrogen did not occur this dependence takes an exponential form.

The investigations were carried out within a research grant no. N502 029 31/3535.

Bibliography/Literatura

- [1] Das L.M.: Hydrogen-oxygen reaction mechanism and its implication to hydrogen engine combustion, Int. Journal of Hydrogen Energy, 1996, 21, 703-715.
- [2] Swain M.R., Filoso P.A., Swain M.N.: Ignition of lean hydrogen-air mixtures, Int. Journal of Hydrogen Energy, 2005, 30, 1447-1455.
- [3] Szwaja S.: Geneza pulsacji ciśnienia spalania w silniku tłokowym, benzynowym i wodorowym, Archiwum Spalania, 2010, 10, 1-2, 27-49.
- [4] Binder K., Withalm G.: Mixture formation and combustion in hydrogen engine using hydrogen storage technology, Int. J. Hydrogen Energy, 1982, 7, 651-659.
- [5] Karim G.A.: Hydrogen as a spark ignition engine fuel, Int. Journal of Hydrogen Energy, 2003, 28, 569-577.
- [6] Li H., Karim G.A.: Experimental investigation of the knock and combustion characteristics of CH₄, H₂, CO and some of their mixtures, Proc. Inst. Mech. Eng., 220, 5, Part A: J.Power and Energy, 2006.
- [7] Malenshek M., Olsen D.B.: Methane number testing of alternative gaseous fuels, Fuel, 2009, 88, 650-656.

większą szybkość spalania. Stąd wpływ stopnia sprężania na intensywność stuku wodorowego można rozpatrywać jako połączony efekt dwóch oddziaływań:

- temperatury mieszanki w chwili zapłonu,
 - objętościowej gęstości energii mieszanki w chwili zapłonu.
2. Pulsacje występujące podczas spalania wodoru przy niskich stopniach sprężania ($\epsilon \leq 11$) są wynikiem niestabilnie rozchodzącego się płomienia podczas spalania.
 3. Ze wzrostem stopnia sprężania pulsacje te wzrastają i przy pewnej wartości stopnia sprężania ($\epsilon = 12$ – dla silnika CFR) ulegają znacznemu przyrostowi. Ze względu na jakościowo inny wygląd tych pulsacji, można przyjąć, że powstają one w inny sposób. Z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że powstają od samozapłonu mieszanki.
 4. Ze względu na dwie różne geny pulsacji ciśnienia nie można jednoznacznie określić intensywności stuku wodorowego wyrażanej za pomocą PP_{sr} w zależności od stopnia sprężania ϵ w jego szerokim zakresie zmian. W przedziale ϵ od 6 do 11, dla których nie występował samozapłon wodoru, zależność ta przyjmuje postać wykładniczą.

Badania zrealizowano w ramach grantu badawczego nr N502 029 31/3535.

Paper reviewed/Artykuł recenzowany

Nomenclature/Oznaczenia

α_z	ignition angle/kąt zapłonu
ϵ	compression ratio/stopień sprężania
λ	excess air coefficient/współczynnik nadmiaru powietrza
MN	methane number/LM liczba metanowa
ON	octane number/LO liczba oktanowa
CA	crankshaft angle/OWK obrót wału korbowego
PPi	maximum amplitude of pulsations in a single combustion cycle/maksymalna amplituda pulsacji w pojedynczym cyklu spalania
PPśr	average for the whole series from the maximum amplitudes of the pulsations from individual combustion cycles/średnia dla całej serii z maksymalnych amplitud pulsacji z pojedynczych cykli spalania
SZCS	combustion pressure component variable/składowa zmienna ciśnienia spalania
WZP	bottom dead center/wewnętrzne zwrotne położenie
ZZP	top dead center/zewnętrzne zwrotne położenie

Mr. Stanisław Szwaja, DEng. – doctor in the Faculty of Mechanical Engineering and Computer Science at Częstochowa University of Technology.

Dr inż. Stanisław Szwaja – adiunkt na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej.

e-mail: szwaja@imc.pcz.czyst.pl

