

EXPERIMENTAL STUDY OF COMBUSTION PROCESS IN A HIGH ASPECT RATIO ENGINE

Piotr Kalina, Maciej Rusin, Józef Jarosiński

Instytut Lotnictwa

02-256 Warszawa, Al. Krakowska 110/114, Poland

Tel. +48 22 846 44 95, kalina@ilot.edu.pl; mrusin@ilot.edu.pl; jarosin@ilot.edu.pl

Abstract

The main objective of the present study is optimization of the compression, ignition and combustion processes in an internal combustion engine with high aspect ratio. A small rapid compression machine was build to study these processes in detail. The bore diameter and stroke of this machine was $D=6\text{mm}$ and $L=12\text{mm}$, respectively. Stoichiometric propane-air and hydrogen-air mixtures were employed in experiments. The catalyst heated to necessary temperature was used to ignite the mixture. It was found experimentally that the compression process in a high aspect ratio engine was isothermal. The serious problem in this engine is also dead volume created by crevices. Isothermal compression and dead volume are responsible for very low value of the maximum compression pressure. It was also found that the mixture couldn't be ignited in a very small volume ($V=27\text{mm}^3$) of the catalytic prechamber (with dimensions $\phi 2.8\text{mm} \times 4.7\text{mm}$). Some additional volume in a form of the combustion chamber should be added to make possible ignition and following to it combustion of the mixture.

BADANIE PROCESU SPALANIA W SILNIKU MINIATUROWYM

Streszczenie

Celem pracy jest optymalizacja procesów sprężania, zapłonu i spalania w małym silniku o wyjątkowo dużym stosunku powierzchni do objętości. Dla badania tych procesów zbudowano niewielką maszynę pojedynczego sprężania. Średnica tłoka w tej maszynie wynosiła $D = 6\text{mm}$, a maksymalny skok tłoka $L = 12\text{mm}$. Maszynę zasilano stechiometryczną mieszanką propanu z powietrzem lub wodoru z powietrzem. Nagrzana do odpowiedniej temperatury spiralka z drutu o własnościach katalitycznych służyła do zapłonu mieszanki. W wyniku przeprowadzonych eksperymentów stwierdzono, że proces sprężania w badanym silniku przebiegał izotermicznie. Poważnym problemem w tym silniku okazała się martwa przestrzeń kształtowana przez różnego rodzaju szczeliny. Sprężanie izotermiczne i martwa przestrzeń są przyczyną występowania niskich ciśnień sprężania. Stwierdzono również, że nie ma możliwości spalania mieszanki w izolowanej komorze wstępnej o bardzo małej objętości (o wymiarach $\phi 2.8\text{mm} \times 4.7\text{mm}$). Pomyślny zapłon i następujące po nim spalanie mieszanki są możliwe wówczas, gdy komora wstępna jest uzupełniona o pewną – dodatkową przestrzeń wypełnioną mieszanką palną.

1. Wstęp

Postęp technologiczny i rozwój nowych technik precyzyjnego wytwarzania części maszyn stworzyły możliwości miniaturyzacji urządzeń mechanicznych i elektromechanicznych. Takie skomplikowane urządzenia mechaniczne jak roboty, pompy, silniki, a nawet samoloty i śmigłowce są dziś rozwijane w mikroskali. Miniaturowe urządzenia mechaniczne stwarzają zapotrzebowanie na równie miniaturowe jednostki napędowe, które charakteryzowałyby się wysoką energią właściwą (powinny być małe, lekkie, trwałe i niezawodne). Jednostki te mają wielorakie zastosowania, nie tylko w miniaturowych systemach mechanicznych, ale również w różnych urządzeniach elektronicznych. We wszystkich swych zastosowaniach jednostki te muszą być lekkie. Z tego względu akumulatory są nie do zaakceptowania jako źródło zasilania, ponieważ charakteryzują się one niską energią właściwą w porównaniu z ciekłymi pali-

wami węglowodorowymi. Ciekłe węglowodory posiadają ekstremalnie wysoką gęstość energii właściwej – typowa wielkość dla nich wynosi 45 JM/kg wobec 1,2 MJ/kg dla dostępnych obecnie najlepszych akumulatorów. Mikrosilniki produkują energię w miliwatach lub w watach. Charakterystyczne wymiary tych jednostek są określane w centymetrach.

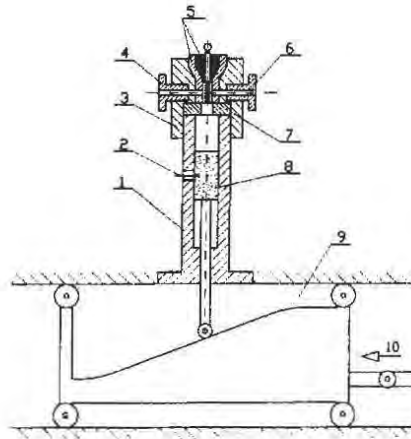
Współczesne tendencje rozwojowe mikrosilników jako jednostek generujących prąd elektryczny zostały przedstawione w artykule przeglądowym prezentowanym przez Fernandez-Pello [1]. Aktualnie rozwija się kilka mikro-komór spalania [2-5] i mikrosilników o spalaniu wewnętrznym [6-9]. Mikrosilniki te pracują z możliwą do zaakceptowania sprawnością spalania. Pomysł wykorzystania mikrosilników do generacji prądu elektrycznego jest stosunkowo nowy i ciągle są badane różne aspekty jego praktycznej realizacji.

Spróbujmy scharakteryzować krótko kilka najbardziej zaawansowanych projektów. W Laboratorium Turbin Gazowych MIT jest rozwijana mikro-turbina gazowa budowana w oparciu o elementy MEMS (Mili-Elektryczno-Mechaniczny System). Planuje się uzyskać 10-20W mocy elektrycznej z 300mm³ objętości tej jednostki [6]. Laboratoria Spalania Uniwersytetu w Berkeley rozwijają mikrosilnik o spalaniu wewnętrznym, typu Wankel'a, zasilany ciekłym paliwem węglowodorowym. Poszczególne wersje tego silnika mają średnice rotora 10mm i 3mm. Mniejszy z tych silników ma rozwijać moc rzędu miliwatów [7]. W koncernie Honeywell rozwijany jest mikrosilnik ze swobodnie wędrującym tłokiem, pracujący w oparciu o zasadę samozapłonu mieszanki jednorodnej (HCCI). Silnik o objętości 1000mm³ ma rozwijać moc rzędu 10W [8]. W Georgia Institute of Technology rozwijany jest mikrosilnik o swobodnie wędrującym tłoku. Tłok ten zbudowany z materiału ferromagnetycznego. Przesuwając się w polu elektromagnetycznym ruchem oscylacyjnym generuje on prąd o mocy ok. 12W [9].

Ogólne zainteresowanie rozwojem produkcji mikrosilników do wytwarzania energii elektrycznej stwarza nowe możliwości do studiowania procesów termodynamicznych zachodzących w tych silnikach. Specyfika mikrosilników polega na znacznie większym studzącym oddziaływaniu ścianek na przebieg wszystkich zachodzących tam procesów niż ma to miejsce w silnikach konwencjonalnych. Takie procesy jak sprężanie, rozprężanie, zapłon, spalanie, a także wymiana ładunku, znajdują się pod silnym wpływem tego oddziaływania. W silniku o dużym stosunku powierzchni komory spalania do jej objętości większość tych procesów silnie zależy od geometrii komory spalania. W silnikach tych procesy sprężania ładunku i jego spalania są szczególnie krytyczne w porównaniu z podobnymi procesami w silnikach konwencjonalnych, ze względu na duże odprowadzanie ciepła do ścianek i lokalne wygaszanie płomienia. Zarówno wyniki eksperymentów, jak i wnioski wynikające z teorii wskazują, że dla zapewnienia przebiegu reakcji egzotermicznej jest niezbędna krytyczna średnica o skali długości rzędu milimetra. Prąd generowany przez mikrosilnik zależy od wyniku wzajemnie znoszących się działań: szybkości odprowadzania ciepła z mikroobszaru reakcji do ścianek i szybkości wydzielania ciepła z tego obszaru reakcji. Zarówno proces sprężania ładunku, jak i jego spalania będzie się znajdował pod dużym wpływem odprowadzania ciepła do ścianek.

Budowa mikrosilnika wymaga zrozumienia podstawowych procesów zachodzących w komorze spalania o bardzo małej objętości. Tak, więc, aby zbudować stosunkowo sprawny i niezawodny mikrosilnik należy badać procesy termodynamiczne w komorach spalania o bardzo małej skali. Należy również rozwinąć nowe, niekonwencjonalne metody projektowania tych silników. W realizacji niniejszego projektu zdecydowano się rozwijać mikrosilnik ze swobodnie poruszającym się tłokiem, pozostającym w nieustannym ruchu oscylacyjnym. Postanowiono prowadzić badania na maszynie pojedynczego sprężania o średnicy tłoka $D = 6\text{mm}$. Do budowy maszyny pojedynczego sprężania wykorzystano parę precyzyjną seryjnego wtryskiwacza silnika wysokoprężnego.

2. Stanowisko badawcze



Rys. 1. Maszyna pojedynczego sprężania: 1 – tuleja cylindrowa, 2 – kanał wlotowy dopływu mieszanki, 3 – głowica, 4 – kanał wylotowy z zaworem, 5 – zapłonnik katalityczny, 6 – gniazdo czujnika ciśnienia, 7 – komora spalania, 8 – tłok, 9 – krzywka, 10 – trzpień od siłownika

Fig. 1. Rapid compression machine: 1 – cylinder, 2 – inlet channel, 3 – cylinder head, 4 – outlet channel with valve, 5 – catalytic igniter, 6 – fastener of pressure transducer, 7 – combustion chamber, 8 – compressing piston, 9 – cam, 10 – rod from the driving piston.

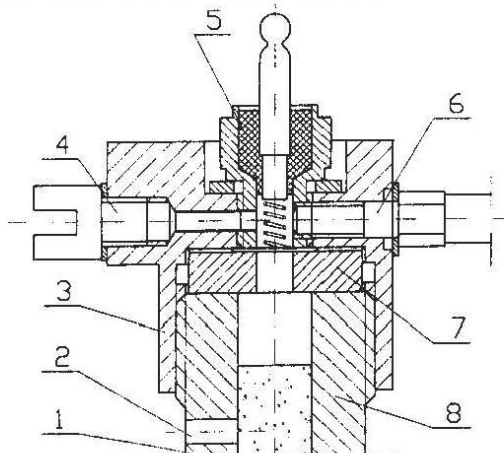
Do badania podstawowych procesów sprężania, zapłonu i spalania w mikrosilniku zbudowano małą maszynę pojedynczego sprężania ładunku. Fizyczne procesy badane w tej maszynie były bardzo podobne do tych zachodzących w silniku rzeczywistym. Schemat tej maszyny pokazano na rys. 1.

Średnica tłoka w maszynie pojedynczego sprężania wynosiła 6mm, a skok 12mm. Średnia prędkość tłoka 4m/s w przybliżeniu odpowiadała prędkości obrotowej silnika $n=10000$ obr/min. Ciśnienie w cylindrze było mierzone za pomocą miniaturowego czujnika PS1-S M3×0,5 model C832D1 firmy Optrand Incorporated. Czulość czujnika wynosiła 38,7mV/bar. Jako paliwo był stosowany propan i wodór w stechiometrycznym stosunku z powietrzem. Jednorodna mieszanka tych paliw z powietrzem była z odpowiednim wyprzedzeniem przygotowywana i przechowywana w specjalnym zbiorniku dla przeprowadzenia serii eksperymentów. Stosowanie tej samej mieszanki w serii prób gwarantowało powtarzalność warunków eksperymentu.

Maszyna pojedynczego sprężania została wyposażona w siłownik wymuszający ruch krzywki (9) za pomocą trzpienia (10) z jednego granicznego położenia do drugiego. Położenie tłoka sprężającego mieszankę (8) jest określone krzywizną krzywki (9). Układ jest gotowy do przeprowadzenia eksperymentu sprężania i spalania mieszanki po załadowaniu sprężonego powietrza do siłownika. Stosunek średnicy tłoka siłownika do średnicy tłoka roboczego (8) wynosi 3,3:1. Maszyna pojedynczego sprężania pracuje przy stopniach sprężania, które zależą od wymiarów komory spalania (7). Komory te testowane na maszynie pojedynczego sprężania miały stopnie sprężania znajdujące się w granicach $\epsilon = 4,5 - 7,6$. Głowica była wyposażona w kanał wylotowy (4) i kanał do osadzania czujnika ciśnienia (6). Przed każdym eksperymentem wymuszano przepływ mieszanki przez cylinder. W tym celu wykorzystywano kanały (2) i (4). Po napełnieniu cylindra mieszanką zawór kanału wylotowego zamykano i maszyna była gotowa do przeprowadzenia eksperymentu.

Dość dokładny schemat głowicy przedstawiono na rys. 2. Cylindryczne komory spalania o różnych średnicach i różnych wysokościach cylindra były badane w celu wyselekcjonowania wariantu komory o maksymalnym przyroście ciśnienia w wyniku spalania w niej mieszanki.

Przed przeprowadzeniem serii eksperymentów wszystkie współpracujące części maszyny pojedynczego sprężania były sprawdzane na szczelność. Szczelność kompletnego systemu została pozytywnie zweryfikowana w czasie specjalnej próby wypełnienia przestrzeni roboczej maszyny sprężonym powietrzem o ciśnieniu 1MPa.



Rys. 2. Głowica: 1 – tuleja cylindrowa, 2 – kanał wlotowy, 3 – głowica, 4 – kanał wylotowy z zaworem, 5 – zapłonnik katalityczny, 6 – czujnik ciśnienia, 7 – komora spalania, 8 – tłok.

Fig. 2. Cylinder head: 1 – cylinder, 2 – inlet channel, 3 – cylinder head, 4 – outlet channel with valve, 5 – catalytic igniter, 6 – pressure transducer, 7 – combustion chamber, 8 – compressing piston.

3. Dyskusja uzyskanych wyników

3. 1. Próby funkcjonalne

Trzy rodzaje działań podjęto w czasie przeprowadzania prób funkcjonalnych na maszynie pojedynczego sprężania.

- Szczegółowe sprawdzenie geometrii obszaru spalania i określenie przestrzeni szkodliwych,
- Sprawdzenie szczelności układu za pomocą sprężonego powietrza,
- Szczegółowa analiza poprawności pomiaru ciśnienia.

W początkowej fazie eksperymentów próbowano uzyskać zapłon i spalanie w cylindrycznej mikro-komorze spalania, służącej w następnych etapach badań jako komora wstępna. Miała ona wymiary ϕ 2,8mm x 4,7mm, a jej objętość wynosiła 27mm³. Komora ta była wyposażona w spiralę z drutu platynowego osadzoną w jej osi. Charakterystyczne parametry komory wstępnej są przedstawione w Tabeli 1, gdzie znaczenie poszczególnych symboli jest następujące: d – średnica, h – wysokość, p_{max} – maksymalne ciśnienie sprężania, S – powierzchnia, V – objętość, V_{lc} – minimalna objętość cylindra (objętość uwzględniająca martwe przestrzenie), V_2 – maksymalna objętość cylindra, ϵ - stopień sprężania i AR – stosunek powierzchni S do objętości V. Objętość wszystkich szczelin w głowicy w pobliżu komory wstępnej oszacowano na 25mm³. Ponieważ objętość martwej przestrzeni jest tego samego rzędu wielkości co objętość komory wstępnej, to ta dodatkowa objętość bardzo obniża planowany początkowo stopień sprężania.

Tabela 1. Parametry charakteryzujące komorę wstępną.

d	h	p_{max}	S	V	V_{lc}	V_2	ϵ	AR
mm	mm	bar	mm ²	mm ³	mm ³	mm ³		mm ⁻¹
2.8	4,7	7.6	45.0	27.0	52.0	391	7.5	1.7

Szczelność głowicy i całego układu była sprawdzona w specjalnie w tym celu przeprowadzonych eksperymentach i okazała się zadowalająca w małej skali czasowej.

Specjalna głowica została zaprojektowana i wykonana w celu zweryfikowania poprawności pomiaru ciśnienia. Objętość cylindra powyżej tłoka została połączona za pośrednictwem przewodu i zaworu z dużym zbiornikiem zawierającym powietrze pod ciśnieniem o znanej wzorcowej wartości. Otwarcie zaworu umożliwiało zarejestrowanie przez stoiskowy układ pomiarowy wzrostu ciśnienia do takiego poziomu jak w zbiorniku.

3. 2. Sprężanie

Przeprowadzone próby sprężania czynnika w komorze wstępnej pokazały, że maksymalny uzyskany przyrost ciśnienia wyniósł $\Delta p = 6,6$ bar (średnia wartość z wielu prób). Tak niska wartość przyrostu ciśnienia wynika z niezwykle wysokich strat ciepła do ścianek w warunkach mikrokomory. Stosunek powierzchni mikrokomory do jej objętości wynosi $S/V \approx 1,7$. Jest to wartości przynajmniej o rząd wielkości większa od wartości typowych dla silników konwencjonalnych. Oszacowano, że w istniejących warunkach proces sprężania przebiega izotermicznie. Zwiększenie przestrzeni spalania poprzez dodanie pewnej objętości komory głównej nie wprowadza w tej skali większych zmian – stosunek powierzchni komory spalania do jej objętości pozostaje nadal wysoki (patrz Tabela 2). W tej sytuacji proces sprężania jest zdominowany przez duży i natychmiastowy odpływ ciepła do ścianek, w wyniku czego przebiega on izotermicznie.

3. 3. Zapłon

Najważniejszą częścią zapłonika katalitycznego (5 na rys. 3) jest spiralka z drutu o własnościach katalitycznych umieszczona centralnie w małej komorze wstępnej o średnicy 2,8mm. Spiralka ta jest nagrzewana elektrycznie (z baterii) do temperatury 800°C . W czasie cyklu pracy kontakt pomiędzy przepływającą świeżą mieszanką paliwowo-powietrzną a drutem katalitycznym utrzymuje się podczas suwu sprężania. Na powierzchni katalizatora zachodzą wówczas reakcje zapłonu heterogenicznego. Reakcje heterogeniczne na tej powierzchni pobudzają aktywność chemiczną mieszanki homogenicznej. W tych warunkach aktywne składniki reakcji sprzyjają zapłonowi autotermicznemu. Z wcześniejszych badań [10] wynika, że reakcje chemiczne w mieszance paliwo/powietrze przebiegają na powierzchni katalizatora, gdy suma temperatur mieszanki i katalizatora przekroczy krytyczny poziom właściwy dla reakcji heterogenicznej, bądź też autotermicznej. Tak więc jest ważne, aby temperatura katalizatora wraz z temperaturą mieszanki przekroczyła w czasie suwu sprężania temperaturę zapłonu autotermicznego. W przypadku mieszanki propan/powietrze temperatura ta znajduje się w granicach od 250°C do 500°C (jej wartość zależy od składu mieszanki).

Próby zapłonu stechiometrycznej mieszanki propan/powietrze w samej tylko komorze wstępnej zawiodły całkowicie w całym zakresie zmian temperatury powierzchni katalizatora włącznie do wartości 880°C . Z eksperymentów tych wyciągnięto wniosek, że gaszące oddziaływanie ścianki przeciwdziała uformowaniu się płomienia, ponieważ odległość gasząca dla tego płomienia jest tego samego rzędu wielkości, co średnica komory wstępnej. W kolejnych eksperymentach komorę wstępną zasilano stechiometryczną mieszanką wódor/powietrze. Odległość gasząca płomieni wodorowych jest kilkakrotnie mniejsza niż płomieni propanowych, dlatego więc spodziewano się, że stechiometryczną mieszankę wódor/powietrze będzie można zapalić. Przebieg eksperymentów wykazał jednak, że również w tej mieszance nie można było zainicjować zapłonu. Objasnienie tego zjawiska może być dwójakiego rodzaju: 1) katalizator nie może zainicjować płomienia w obecności zimnej ścianki, 2) szybkość reakcji zapoczątkowana przez katalizator jest zbyt wolna, aby podnieść

ciśnienie w obecności zimnych ścianek. Wyniki tych eksperymentów pokazują, że warunki brzegowe odgrywają niezmiernie istotną rolę w inicjacji płomienia przez katalizator.

Natychmiastowy zapłon mieszanek propan/powietrze i wodór/powietrze uzyskano w przypadku zainstalowania dodatkowej komory spalania na styku z komorą wstępną. Poprzednio przeprowadzone eksperymenty wykazały, że wzrost temperatury katalizatora obniżał czas opóźnienia zapłonu i że czysto katalityczny zapłon był możliwy, gdy temperatura katalizatora przewyższała 700°C [10]. Zdecydowano, aby w kolejnych eksperymentach stosować najwyższą możliwą temperaturę powierzchni katalizatora na poziomie 880°C.

3.4. Spalanie

W celu wyłonienia najlepszych warunków przebiegu sprężania i spalania przygotowano i przetestowano kilka mikrokomór spalania o zróżnicowanej geometrii. Niektóre z najważniejszych parametrów tych komór przedstawiono w Tabeli 2.

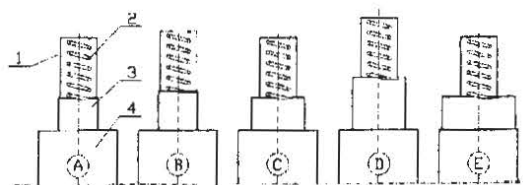
Konfiguracje tych komór z komorą wstępną są przedstawione w identycznej skali na rys. 3. Eksperymenty pokazały, że maksymalne przyrosty ciśnienia spalania uzyskano w komorach oznaczonych w Tabeli 2 literami B i C.

Typowy zapis przebiegu ciśnienia w komorze spalania typu B zasilanej mieszanką propan/powietrze przedstawiono na rys. 4. Ta sama komora spalania zasilana mieszanką wodór/powietrze wykazuje nieco wyższy przyrost ciśnienia i zwiększoną w stosunku do poprzedniego przypadku szybkość narastania ciśnienia (patrz rys.5). Stwierdzono, że spalanie stechiometrycznych mieszanek wodór/powietrze charakteryzuje znacznie większa powtarzalność przebiegów ciśnienia, niż ma to miejsce dla mieszanek propan/powietrze.

Tabela 2. Parametry komór spalania badanych razem z komorą wstępną.

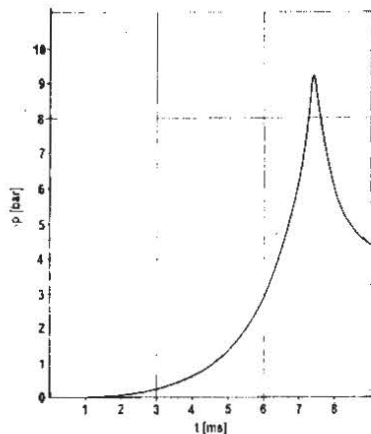
n	d mm	h mm	p_{max} bar	S mm ²	V mm ³	V_{1c} mm ³	V_2 mm ³	ϵ	AR mm ⁻¹
A	3.0	2.5	5.6	72.0	44.6	69.6	409	5.8	1.6
B	3.0	3.0	5.8	82.8	48.2	73.2	413	5.6	1.7
C	4.0	2.5	5.0	85.3	58.4	83.4	423	5.0	1.5
D	4.0	4.0	4.8	110	77.2	102	442	4.3	1.4
E	5.5	2.5	4.5	108	86.3	111	451	4.0	1.3

* p_{max} jest maksymalnym ciśnieniem sprężania



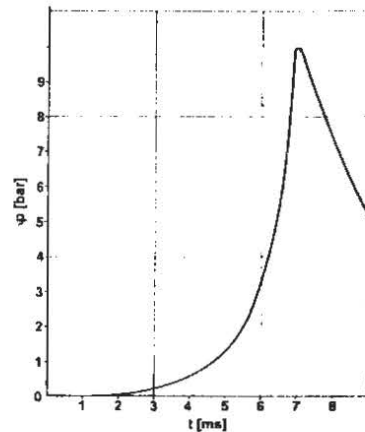
Rys. 3. Konfiguracja różnych komór spalania z komorą wstępną i tuleją cylindrową (w tej samej skali): 1 – komora wstępna, 2 – katalizator, 3 – komora spalania, 4 – tuleja cylindrowa. Litery oznaczają komory spalania występujące w Tabeli 2.

Fig. 3. Configuration of different combustion chambers in relation to prechamber and engine cylinder (in scale): 1 – prechamber, 2 – catalytic wire, 3 – combustion chamber, 4 – engine cylinder. Letters in a circle indicate the order numbers shown in Table 2.



Rys. 4. Ciśnienie w funkcji czasu. Komora spalania o średnicy 3mm i wysokości 3mm. Współczynnik nadmiaru powietrza w mieszance propan/powietrze $\alpha=1$. Zapłon katalityczny. Katalizator grzany do temperatury 880 °C.

Fig. 4. Cylinder pressure as a function of time. Combustion chamber of 3mm diameter and 3mm height. Propane/air equivalence ratio equal to $\phi=1$. Catalytic ignition. Catalyst heated to 880 °C.



Rys. 5. Ciśnienie w funkcji czasu. Komora spalania o średnicy 3mm i wysokości 3mm. Współczynnik nadmiaru powietrza w mieszance wodor/powietrze $\alpha=1$. Zapłon katalityczny. Katalizator grzany do temperatury 880 °C.

Fig. 5. Cylinder pressure as a function of time. Combustion chamber of 3mm diameter and 3mm height. Hydrogen/air equivalence ratio equal to $\phi=1$. Catalytic ignition. Catalyst heated to 880 °C.

Eksperymenty wykazały, że przyrosty ciśnienia będące wynikiem spalania nie przekraczają wartości 4,0 - 4,5 barów. Są to bardzo małe przyrosty w porównaniu z przyrostami ciśnienia w silnikach konwencjonalnych.

4. Wnioski

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów stwierdzono, że w mikrosilnikach o bardzo dużym stosunku powierzchni komory spalania do jej objętości, przemiana sprężania mieszanki przebiega izotermicznie, co można objaśnić intensywnym odprowadzaniem ciepła do ścianek. Poważnym problemem w tych silnikach jest również duży udział objętości szkodliwej uformowanej przez różnego rodzaju szczeliny w ogólnej objętości spalania. Przestrzeń szkodliwa w znaczący sposób obniża stopień sprężania. Oba te czynniki (izotermiczne sprężanie i przestrzeń szkodliwa) są odpowiedzialne za stosunkowo niską wartość maksymalnego ciśnienia sprężania.

Stwierdzono również, że nie można zapalić za pomocą katalizatora stechiometrycznych mieszanek propanu z powietrzem a także wodoru z powietrzem w bardzo małej komorze wstępnej o średnicy ϕ 2,8mm, nawet wtedy, gdy katalizator jest grzany do temperatury 880°C. Nie spodziewano się takiego wyniku, gdyż średnica komory wstępnej przekraczała wielokrotnie odległość gaszącą dla stechiometrycznej mieszanki wodoru z powietrzem. Najprawdopodobniej katalizator nie jest w stanie uformować płomienia w pobliżu zimnych ścianek, lub też szybkość reakcji zainicjowanej przez katalizator jest zbyt mała w porównaniu z szybkością odpływu ciepła, co uniemożliwia wzrost ciśnienia. Uzupelnienie objętości komory wstępnej przez małą komorę spalania, będącą jej przedłużeniem, umożliwia zapłon mieszanki i jej spalanie, czemu towarzyszy wzrost ciśnienia.

Eksperymenty wykazały bardzo małe przyrosty ciśnienia od spalania. Zjawisko to może być objaśnione niepełnym spalaniem mieszanki i odprowadzeniem ciepła do ścianek. Przyro-

sty ciśnienia wynikające ze spalania mieszanki w badanym silniku są przynajmniej 2 razy mniejsze od przyrostów występujących w silnikach konwencjonalnych.

Przyszłe prace będą się koncentrować na eksperymentalnym badaniu strat ciepła i masy podczas suwu sprężania i następującego po nim spalania, a także na badaniu wpływu ścianek na gaszenie płomienia. Dodatkowe informacje uzyska się z pomiarów chwilowej temperatury czynnika podczas suwu sprężania i spalania. W kolejnych badaniach będą optymalizowane procesy sprężania i spalania.

Podziękowania

Prezentowana praca była finansowana przez Komitet Badań Naukowych w ramach projektu badawczego 5 T12D 022 22.

Literatura

- [1] Fernandez-Pello A. C., „Micropower Generation Using Combustion: Issues and Approaches”, *Proc. Combust. Inst.*, **29**: 883-899, 2002.
- [2] Maruta K., Takeda K., Sitski L., Borer K., Ronney P. D., Wussow S. and Deutschmann O., „Catalytic Combustion in Microchannel for MEMS Power Generation”, *Third Asia-Pacific Conference on Combustion*, Seoul, Korea, June 24-27, 2001.
- [3] Vican J., Gajdeczko B. F., Dryer F. L., Milius D. L., Aksay I. A. and Yetter R. A., „Development of a Microreactor as a Thermal Source for Microelectromechanical Systems of Power Generation”, *Proc. Combust. Inst.*, **29**: 909-916, 2002.
- [4] Sitzki L., Borer K., Wussow S., Schuster E., Maruta K., Ronney P. and Cohen A., „Combustion in Microscale. Heat-Recirculating Burners”, paper AIAA-2001-1087, *Thirty-Eight AIAA Space Sciences and Exhibit*, Reno, NV, 2001.
- [5] Kyritsis D. C., Guerrero-Arias I., Roychoudhury S. and Gomez A., „Mesoscale Power Generation by a Catalytic Combustor Using Electrosprayed Liquid Hydrocarbons”, *Proc. Combust. Inst.*, **29**: 965-972, 2002.
- [6] Spadaccini C. M., Zhang X., Cadou C. P., Miki N. and Waitz I. A., „Development of a Catalytic Silicon Micro-Combustor for Hydrocarbon-Fueled Power MEMS”, *MEMS 2002 IEEE International Conference*, Las Vegas, NV, January 20-25, 2002.
- [7] Fu K., Knobloch A., Martinez F., Walther D., Fernandez-Pello A. C. Pisano A. and Liepmann D., „Design and Fabrication of a Silicon-Based MEMS Rotary Engine”, *Proceedings of the 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE)*, American Society of Mechanical Engineers, New York, November 11-16, 2001.
- [8] Yang W., „MEMS Free Piston Knock Engine”, *Book of abstracts for poster presentation, Twenty-Eight International Symposium on Combustion*, The Combustion Institute, Edinburgh, UK, July 30-August 4, 2000.
- [9] Kirtas M., Disseau M., Scarborough D., Jagoda J. and Menon S., „Combustion Dynamics in a High Aspect Ratio Engine”, *Proc. Combust. Inst.*, **29**: 917-923, 2002.
- [10] Jarosinski J. and Podfilipski J., „Influence of Catalysis on Combustion in Spark Ignition Engine”, *SAE Technical Paper Series*, 2001-01-1338, 2001.