

Badania wstępne wytypowanej grupy paliw o potencjalnych możliwościach ich zastosowania w technologii suchego szczelinowania

Preliminary researches of selected propellants in their potential use in dry fracturing

Justyna Hadzik^{1*}, Piotr Koślik¹, Zenon Wilk¹, Antoni Frodyma², Łukasz Habera²

1) Instytut Przemysłu Organicznego, Oddział zamiejscowy w Krupskim Młynie,
ul. Zawadzkiego 1, 42-693 Krupski Młyn, PL

2) Zakład Techniki Strzelniczej, Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy,
ul. Lubicz 25A, 31-503 Kraków, PL

*E-mail: justyna.hadzik@ipo.waw.pl

Streszczenie: Temat pracy związany jest z doбором i badaniami paliw stałych przeznaczonych do zabiegów związanych z intensyfikacją wydobycia ropy i gazu, w tym również z formacji łupkowych. Opracowanie jest rezultatem aktualnej współpracy z Zakładem Techniki Strzelniczej w Instytucie Nafty i Gazu - Państwowy Instytut Badawczy w Krakowie. Podstawowym założeniem badawczym jest wytypowanie grupy paliw stałych, ich badania i modyfikacje do etapu, w którym ich właściwości i parametry użytkowe będą właściwe dla technologii suchego szczelinowania. W pracy zaprezentowano metodykę badawczą dla określenia parametrów wytypowanych paliw w układzie laboratoryjnego silnika, np. wielkości impulsu ciśnienia. Ponadto zaimplementowano skuteczny elektryczny układ inicjacji zapłonu paliw oraz sposób właściwego inhibitowania próbek paliw do badań w celu ukierunkowania procesu spalania próbki.

Abstract. This paper related to selected solid propellants researches, which are intended for treatments associated with the intensification of oil and gas, including shale formations. Results of the study is connected with actual cooperation with Department Shooting Engineering in Oil and Gas Institute National Research Institute in Krakow. The basic assumption of research was selection a group of solid propellants, their modifications to the stage where their properties and operating parameters are appropriate for dry fracturing. The paper presents research methods for determining the parameters of selected propellants in the laboratory rocket motor, e.g. pressure impulse. Moreover was implemented effective electric initiation system and method of inhibiting propellant samples in order to direct the process of combustion the sample.

Słowa kluczowe: paliwa stałe, silnik laboratoryjny, suche szczelinowanie

Keywords: propellants, laboratory rocket motor, dry fracturing

1. Wprowadzenie

Złoże gazu ziemnego i ropy naftowej znajdują się na całym świecie i zgromadzone są w różnych rodzajach skał osadowych np. w piaskowcach, wapieniach i łupkach. Wyróżnia się dwa rodzaje występowania gazu i ropy naftowej: konwencjonalne i niekonwencjonalne. Złoże konwencjonalne to węglowodory zgromadzone w naturalnych pułapkach, w skałach porowatych (przepuszczalnych) przykrytych warstwą skał nieprzepuszczalnych, a złoże niekonwencjonalne to węglowodory zgromadzone w skałach nieprzepuszczalnych. Skały porowate takie jak np. piaskowce charakteryzują się wysoką przepuszczalnością, dzięki czemu małe pory w skale są dobrze połączone i umożliwiają swobodny przepływ gazu w skale. Dzięki wysokiej przepuszczalności skał, złoże konwencjonalne łatwo przedostaje się do miejsca zgromadzenia, z którego można je stosunkowo łatwo wydobywać poprzez wykonanie odwiertu [1].

Obecnie zasoby złóż niekonwencjonalnych na świecie są prawie dwukrotnie większe niż złóż konwencjonalnych. Mianem złóż niekonwencjonalnych określa się surowce, które wymagają specyficznych technik jego wydobycia. Jest to przede wszystkim gaz łupkowy (shale gas), gaz zamknięty (tight gas) oraz metan pokładów węgla (coal bed methane). Gaz łupkowy (shale gas) to gaz ziemny zgromadzony w skałach łupkowych. W przeciwieństwie do skał przepuszczalnych, łupki nie umożliwiają swobodnego przepływu gazu wewnątrz swojej struktury. Z tego powodu wydobycie gazu z tych skał wymaga stosowania innych technologii - m.in. szczelinowania hydraulicznego, które polega na tworzeniu szczelin łączących pory w skale, dzięki czemu możliwy jest swobodny przepływ gazu [1].

Dotychczas, najbardziej znaną na świecie technologią pozyskiwania węglowodorów ze złóż niekonwencjonalnych, w tym gazu ziemnego z łupków jest szczelinowanie hydrauliczne. Jest to technologia dobrze ugruntowana i opanowana, wiążąca się jednak z zaangażowaniem znacznych środków technicznych, materiałowych i ludzkich oraz jest stosunkowo droga.

Alternatywą do szczelinowania hydraulicznego jest suche szczelinowanie EPS (Explosive/Propellant System). System ten polega na połączeniu ładunków wybuchowych i paliwa stałego. W wyniku detonacji ładunków wybuchowych następuje wielostopniowe spalanie paliwa [2, 3]. Suche szczelinowanie EPS posiada szereg zalet:

- zwiększa długość szczelin do 10-50 m,
- eliminuje takie problemy jak kompatybilność pomiędzy płynem szczelinującym a złożem, zwilżanie łupków, ich pęcznienie, zatykanie złoża, ługowanie metali ciężkich i lekkich,
- cały odcinek odwiertu poziomego jest szczelinowany, dlatego przepływ gazu może być nawet zbliżony do poziomu szczelinowania hydraulicznego,
- zajmuje mniej miejsca, wymaga zaangażowania mniejszej liczby pracowników i specjalistycznego sprzętu.

Temat badawczy jest kontynuacją prac zespołu IPO w Krupskim Młynie oraz Zakładu Materiałów Wysokoenergetycznych IPO Warszawa, związanych z intensyfikacją wydobycia ropy i gazu w tym również z formacji łupkowych [4, 5]. Prace te wiążą się również ze współpracą badawczą z Zakładem Techniki Strzelniczej Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie w zakresie wdrożenia nowych komponentów i technologii do prac perforujących szczelinujących w odwiertach w warunkach krajowych. W artykule zaprezentowano fragment wykonanych prac, przedstawiono wytypowane paliwa, potencjalnie odpowiednie dla technologii suchego szczelinowania oraz przedstawiono metodę ich badań z zastosowaniem stacjonarnego silnika laboratoryjnego, do oznaczania właściwości balistycznych paliw stałych.

1.1. Paliwa stosowane w przemyśle naftowym

Stale paliwa można podzielić na jednorodne (homogeniczne) i złożone (heterogeniczne). Z kolei paliwa homogeniczne mogą być dalej klasyfikowane, jako jedno-, dwu- lub trójbazowe. Paliwa jednobazowe składają się z jednego zasadniczego składnika, którym jest nitroceluloza posiadająca zarówno własności utleniające jak i redukcyjne. Głównymi składnikami paliw dwubazowych są nitroceluloza i nitrogliceryna z dodatkiem plastyfikatorów, modyfikatorów szybkości spalania i stabilizatorów. Paliwa złożone stosowane w górnictwie naftowym to mieszanina stałego nieorganicznego utleniacza (nadchloranu amonu, azotanu amonu) stanowiącego 60-90 % masy całego paliwa oraz ciekłego rodzaju dodatków (związków organicznych i nieorganicznych oraz pierwiastków), zarówno w stanie ciekłym jak i stałym, pełniących funkcję dodatków technologicznych, energetycznych i balistycznych [6 – 9].

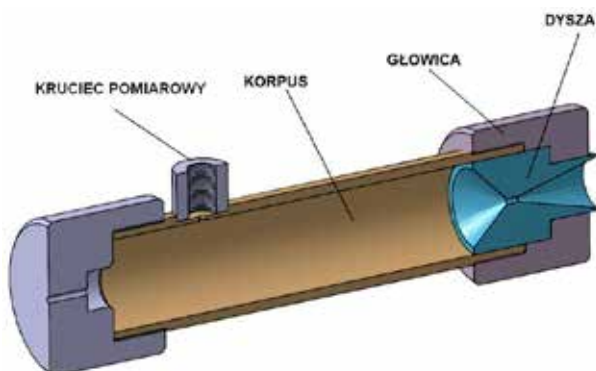
W przypadku zastosowań paliw dla celów szczelinowania nie istnieją rygorystyczne wymagania wobec struktury wytworzonego paliwa (jak dla potrzeb napędów raketowych), lecz istotne są właściwe parametry, zwykle niższe szybkości spalania i pewność ich zapłonu w warunkach wysokich temperatur i ciśnień. Potrzebna jest postać używanego paliwa dogodna dla wytwarzania odpowiednich elementów paliwowych, dostosowanych do konstrukcji urządzeń wgłębnych stosowanych w wydobyciu. Ekonomiczne w tych zastosowaniach będą technologie prasowania kształtek lub odlewania.

2. Materiały i metody

Tematyka badawcza artykułu głównie dotyczy badań zapłonu paliw w stacjonarnym silniku laboratoryjnym. W tym celu zaprojektowano i wykonano silnik do spalania paliw wraz z zestawem dysz wylotowych, przygotowano próbki kilku rodzajów paliw oraz przeprowadzono serię badań spalania wytypowanej grupy paliw wraz z rejestracją ciśnienia. Etap przygotowania próbek paliw do badań w silniku laboratoryjnym obejmował również wykonanie niezbędnego układu inicjującego zapłon paliw oraz pokrywania powierzchni paliw tzw. inhibitorem w celu ukierunkowania procesu spalania próbki.

2.1. Przygotowanie stanowiska badawczego

Do badań wytypowanych paliw zaprojektowano i wykonano silnik laboratoryjny. Jest to stacjonarne urządzenie do badania podstawowych parametrów materiałów pędnych takich jak liniowa prędkość spalania, czy ciśnienie spalania. Na rysunku 1 przedstawiono projekt klasycznego silnika adaptowanego na potrzeby niniejszego tematu.



Rys. 1. Przekrój silnika laboratoryjnego do badań zapłonu i spalania paliw

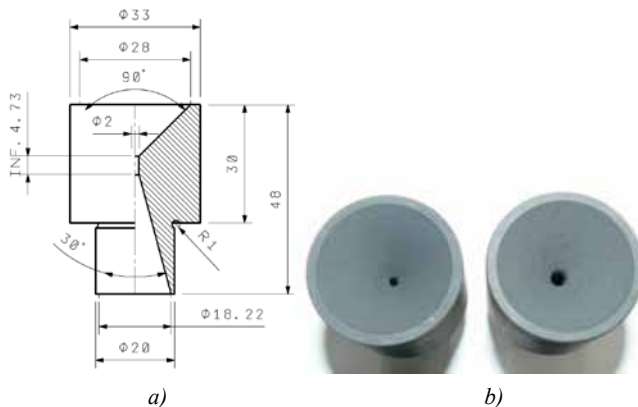
W widocznej na rysunku 1 głowicy umieszczano wymienną grafitową dyszę. Korpus posiadał króciec pomiarowy, do którego wkręcany był piezorezystancyjny przetwornik ciśnienia przekazujący sygnał do oscyloskopu. Fragment wykonanego silnika wraz z głowicą i dyszą pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Widok części silnika laboratoryjnego do badania paliw: a) dysza wylotowa, b) głowica silnika, w której umieszczana jest dysza, gwintowana końcowa część korpusu umożliwiająca dokręcenie głowicy, c) króciec pomiarowy do montażu przetwornika ciśnienia, d) piezorezystancyjny czujnik ciśnienia

Bardzo ważną częścią silnika do badań parametrów spalania paliw jest dysza wylotowa. Praktyka badań na laboratoryjnych silnikach wskazuje, że najlepsze rezultaty i powtarzalność wyników otrzymuje się

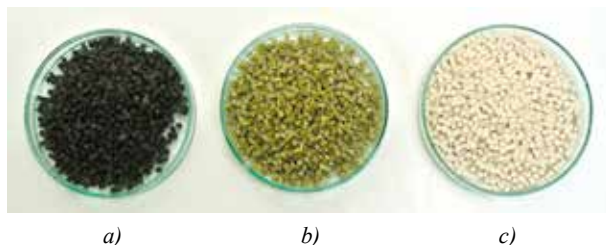
przy odpowiednich średnicach dysz (w zakresie kilku mm). Dysze do badań wykonano z dużą precyzją i odpowiedniego materiału, z wałka grafitowego. Konstrukcje dysz wylotowych i przykłady ich wykonania przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. a) projekt dyszy wylotowej o średnicy 2 mm, b) przykłady gotowych dysz o średnicy 1 mm i 3 mm

2.2. Przygotowanie próbek paliw do badań zapłonu w silniku laboratoryjnym

Do badań sprawnościowych w silniku laboratoryjnym wytypowano nitrocelulozowo- nitroglicerynowe paliwa produkcji krajowej, występujące pod nazwami handlowymi Szmaragd® i Szafir®, mieszaniny tych paliw w proporcjach 1:1 (Sz/Sz) oraz paliwa modyfikowane jednobazowe, które oznaczono Nr 1 (rys. 4c) i Nr 2 (rys. 4a). Widok rozdrobnionych paliw w postaci granulatu przedstawiono na rysunku 4. Paliwa Nr 1 i 2 sporządzone były na bazie nitrocelulozy i modyfikowane dodatkiem ftalanu dibutyli i odpowiednio tlenku tytanu lub grafitu.



Rys. 4. Widok paliw granulowanych: a) modyfikowane Nr 2, b) Szmaragd/Szafir (Sz/Sz), c) modyfikowane Nr 1

Próbki paliw wykonano za pomocą technologii prasowania matrycowego. Granulat paliwa z dodatkiem lepiszcza w postaci lakieru nitrocelulozowego prasowano w przygotowanej matrycy (rysunek 5).



Rys. 5. Widok matrycy do prasowania paliw (o średnicy 23 mm)

Dodatek lepiszca okazał się właściwy dla otrzymania właściwej formy wyprasek. Na rysunku 6 pokazano przykłady zaprasowanych paliw.



Rys. 6. Przykładowe wypraski paliwa przygotowane do badań w silnikach laboratoryjnych

Próbki paliw do badań posiadały odpowiednie wymiary, dopasowane do wielkości silnika. Średnica wyprasek wynosiła 23 mm. W tabeli 1 przedstawiono charakterystykę próbek paliw z podaniem ich średnich wymiarów i gęstości.

Tab. 1. Wymiary i gęstości próbek paliw przygotowanych do badań w silniku laboratoryjnym

Lp.	Rodzaj paliwa	Wysokość wypraski [mm]	Masa wypraski [g]	Gęstość [g cm ⁻³]
1	Sz/Sz ^{a)}	96,6	61,9	1,50
2	Sz ^{b)}	98,1	61,6	1,47
3	Nr 1	110,6	61,5	1,29
4	Nr 2	109,3	61,7	1,31

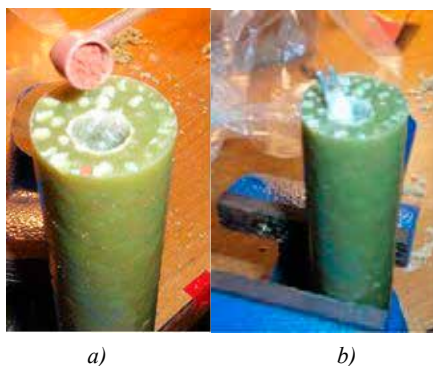
a) Sz/Sz - Szmaragd/Szafir, b) Sz – Szmaragd

2.3. Określenie sposobu inhibitowania powierzchni paliw

W etapie przygotowania próbek paliw do badań w silniku laboratoryjnym należy również uwzględnić tzw. inhibitowanie, a więc stosowanie miejscowego powierzchniowego pokrywania paliwa substancjami niepalnymi. Zabieg ten ma na celu regulowanie ilości dostępnej powierzchni palnej i ilości emitowanych gazów, i tym samym zapewnić kontrolowany przebieg spalania. Istotnym parametrem eksploatacyjnym jest odpowiednie przyleganie powierzchni inhibitowanej do paliwa, co uzyskuje się przez dobór substancji o odpowiedniej adhezji. Brak przylegania, czy jakiegokolwiek pęcherze powietrza na granicy ładunku i inhibitora mogą prowadzić do niekontrolowanego rozwinięcia powierzchni palnej i w efekcie do rozerwania komory silnika. Dodatkowo warstwa inhibitora musi być odpowiednio wytrzymała mechanicznie i odporna na oddziaływanie strumienia gorących gazów w czasie pracy silnika [10, 11]. W niniejszej pracy najbardziej praktycznym i skutecznym rozwiązaniem inhibitowania paliw okazało się użycie folii poliesterowej termoodpornej.

2.4. Określenie sposobu inicjacji zapłonu badanych paliw

W celu przeprowadzenia badań paliw w silniku laboratoryjnym, niezbędne było w dalszym etapie prac opracowanie układu inicjującego zapłon paliw. W próbce paliwa wykonywano otwór o głębokości 10 mm i średnicy 5 mm, który zasypywano masą pirotechniczną PS (około 200 mg). Następnie w wierzchniej warstwie kanału wypełnionego masą PS umiejscowiono główkę zapalczą termoodporną typu GZ-0,2-Tr z przewodami prądowymi. Na rysunku 6 przedstawiono sposób przygotowania zespołu inicjującego paliwo.



Rys. 6. Przygotowanie zespołu inicjującego paliwo składającego się z: a) masy pirotechnicznej, b) główki zapalczej

W celu sprawdzenia prawidłowego działania zaproponowanego zespołu inicjującego przygotowaną próbkę paliwa poddano testom spalania (na wolnym powietrzu). Wynik jednego z testów przedstawiono w formie poniższych fotografii (rys. 7).

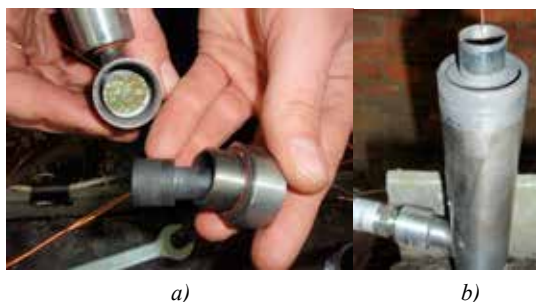


Rys. 7. Przykład inicjowania zapłonu próbki paliwa Sz – za pomocą główki zapalczej wraz z masą pirotechniczną PS

Do pobudzenia standardowej główki zapalczej 0,2 A użyto prądu nominalnego o wartości 0,8 A. Zaproponowany sposób inicjowania paliw okazał się skuteczny dla pozostałych wytypowanych rodzajów paliw.

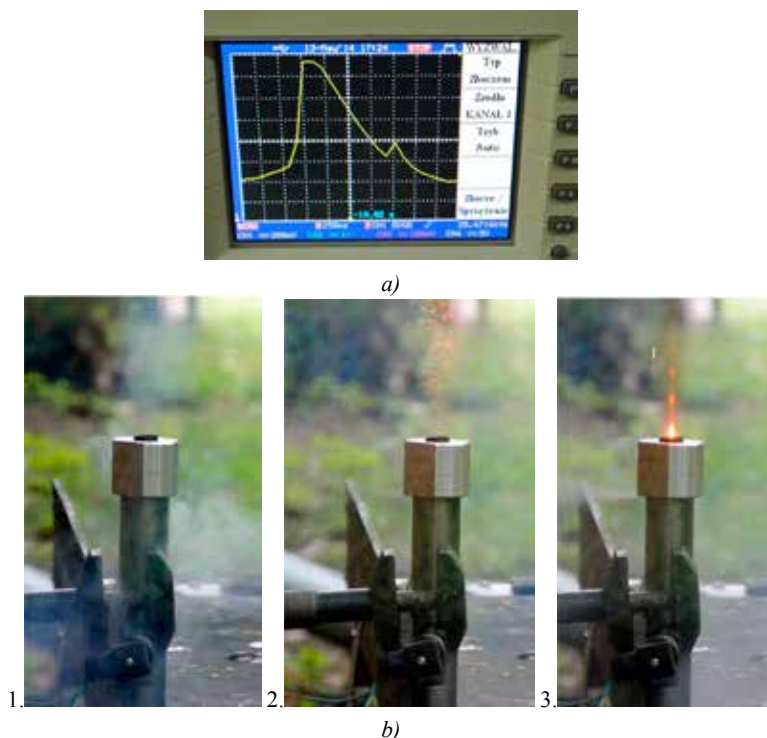
2.5. Przebieg badań w silniku laboratoryjnym

W kolejnym punkcie badawczym przystąpiono do badań wcześniej przygotowanych próbek paliw w silniku laboratoryjnym. Do badań przygotowano próbki paliw na bazie paliwa Szmaragd/Szafir i Szmaragd o zbliżonej wadze i rozmiarach fizycznych. Na rysunku 8 a) przedstawiono moment instalowania próbki paliwa w komorze silnika i składania pozostałych elementów (głowicy, dyszy wylotowej, przewodów). W pionowo usytuowanym korpusie silnika umieszczono próbkę badanego paliwa. Przewody główki zapalczej przewlekano przez dyszę wylotową, a następnie dokręcano głowicę silnika.



Rys. 8. Przykład montażu silnika laboratoryjnego

Rysunek 8 b) przedstawia widok komory silnika z paliwem, zamkniętej grafitową dyszą wylotową. Widoczne są przewody główki zapalczącej i przetwornik ciśnienia w dolnej części korpusu. Podczas badań rejestrowano za pomocą oscyloskopu cyfrowego przebieg zmian ciśnienia w komorze silnika oraz równoległe prowadzono rejestrację filmową przebiegu badania. Kamera o wysokiej częstotliwości kadrowania pozwoliła uchwycić przebieg eksperymentów. Przykładową rejestrację na oscyloskopie oraz sekwencję z rejestracji cyfrowej obrazu jednego z testów spalania paliwa przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. a) przykład rejestracji ciśnienia na ekranie oscyloskopu, b) widok pracującego silnika laboratoryjnego w trakcie testu spalania paliwa w różnych momentach czasowych

3. Wyniki

Przedstawione wyniki badań dotyczą podstawowych analiz termodynamicznych przeprowadzonych dla wykorzystywanych w badaniach paliw: Szmaragd i Szaafir. Analizę wykonano za pomocą programu ICT Thermodynamic Code Version 1.0. Następnie omówiono rezultaty wyników związane z przeprowadzonymi badaniami spalania paliw w silniku laboratoryjnym.

3.1. Analiza termodynamiczna parametrów wytypowanych paliw

Dla przeprowadzenia analiz niezbędna jest znajomość składu jakościowego i ilościowego analizowanych paliw. W tabeli 2 przedstawiono składy w % wag. dla analizowanych paliw typu Szmaragd i Szaafir.

Tab. 2. Składy paliw typu Szmaragd i Szafir

Składniki paliwa	Zawartość [%]	
	Szmaragd	Szafir
Nitrogliceryna	26,5	40
Nitroceluloza	56	58,5
Centralit I (centralit etylu)	9	1
DNT (dinitrotoluen)	3	-
DBP (ftalan dibytylu)	4,5	-
Wazelina	1	0,5

Analizy pozwoliły na określenie takich parametrów jak: bilans tlenowy, objętość gazów i ciepło wybuchu w warunkach standardowych i w stałej objętości ($V = \text{const.}$, gęstość ładowania paliwa $0,1 \text{ g cm}^{-3}$) oraz impulsu właściwego w warunkach standardowych i pod stałym ciśnieniem ($p = \text{const.} = 70 \text{ bar}$). Poniżej w tabeli 3 zestawiono te parametry.

Tab. 3. Parametry termodynamiczne dla paliw Szmaragd i Szafir uzyskane w kodzie ICT

Parametr	Szmaragd	Szafir
Gęstość teoretyczna [g cm^{-3}]	1,545	1,611
Bilans tlenowy [%]	-52,14	-25,40
Objętość produktów gazowych [$\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$]	912,3	712,6
Objętość produktów gazowych w stosunku jednostki objętości paliwa [$\text{cm}^3 \text{ ml}^{-1}$]	1409	1148
Ilość produktów gazowych [$\text{mol kg}_{\text{expl.}}^{-1}$]	37,289	29,127
Ciepło wybuchu [J g^{-1}]	3396,6	4847,0
Impuls właściwy ($p = \text{const.} = 70 \text{ bar}$) [s]	209,8	241,3

W przypadku zastosowań paliw w urządzeniach wgłębnych do szczelinowania odwiertów istotna jest znajomość ilości gazów generowanych z jednostki objętości paliwa. W gotowych rozwiązaniach tych urządzeń ograniczona jest zwykle objętość na pomieszczenie paliwa lub elementów paliwowych. Z powyższej analizy wynika, że paliwo typu Szmaragd generuje znacznie większą objętość gazów niż paliwo typu Szafir (o około 25 %). Ponadto z zebranych w tabeli 3 danych termodynamicznych można dokonać porównania paliw Szafir i Szmaragd. Paliwo Szafir jest bardziej energetyczne od paliwa Szmaragd. Procesom rozkładu towarzyszy wydzielanie większej ilości ciepła oraz wyższe parametry tego procesu (temperatura i ciśnienie). Zależności te wynikają z samego składu wyjściowego czystych paliw.

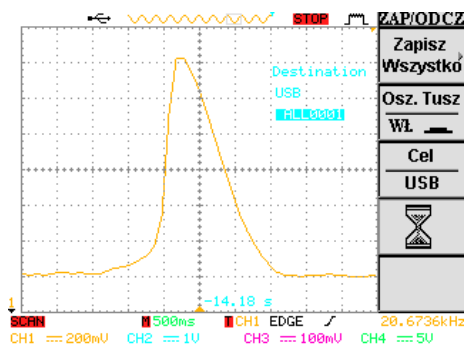
3.2. Wyniki badań zapłonu i spalania paliw w silniku laboratoryjnym

Badaniom w silniku laboratoryjnym poddano dwa rodzaje paliw na bazie paliwa Szmaragd i mieszaniny Szmaragd/Szafir. Badania przeprowadzono z użyciem dyszy wylotowej silnika o średnicy 3 mm. Próbkę inhibitowano folią poliesterową termoodporną. Wyniki zapłonu badanych paliw przedstawiono w formie wykresów zmian ciśnienia uzyskanych podczas spalania paliw w silniku laboratoryjnym. Stanowisko pomiarowe składało się z oscyloskopu cyfrowego (GwINSTEK GDS-2204 – maksymalna szybkość próbkowania 1 Gs s^{-1}), który rejestrował sygnał z piezorezystancyjnego czujnika ciśnienia DZ NAGANO serii SML-31.0. Parametry czujnika podano w tabeli 4. Do akwizycji danych użyto komputer PC wraz z oprogramowaniem Microsoft Office EXCEL 2003.

Tab. 4. Parametry techniczne czujnika ciśnienia DZ NAGANO serii SML-31.0

Parametr	Jednostka miary	Wartość dla czujnika
Zakres pomiarowy	MPa	0-16
Próbkowanie	ms	< 1
Sygnał wyjściowy	V	0,5-4,5

Na rysunku 10 przedstawiono przykładowy przebieg ciśnienia podczas spalania próbki paliwa Sz/Sz zarejestrowany na ekranie oscyloskopu.



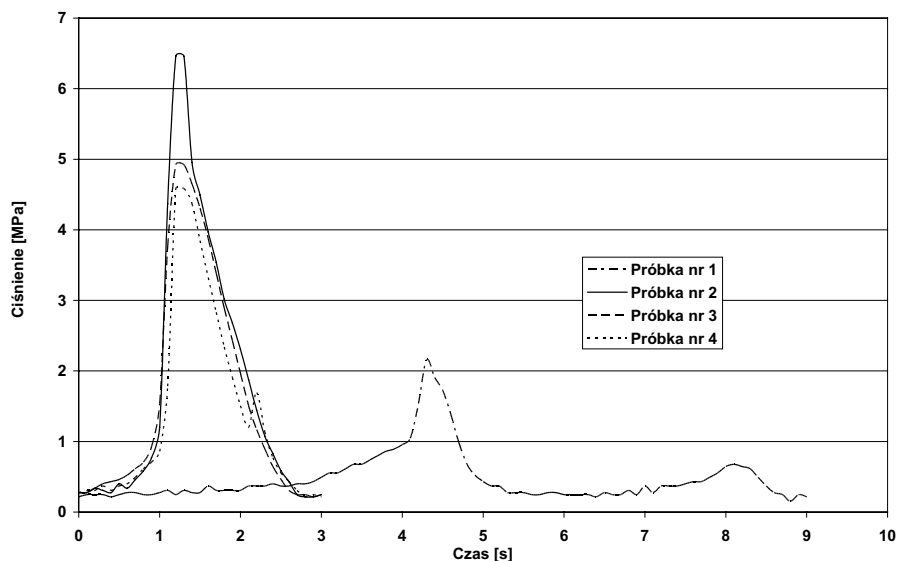
Rys. 10. Przebieg zmian ciśnienia podczas spalania paliwa Sz/Sz w silniku laboratoryjnym

W tabeli 5 zestawiono wyniki badań w formie wartości ciśnień maksymalnych i impulsu ciśnienia osiągniętych dla badanej próbki.

Tab. 5. Ciśnienie maksymalne oraz impuls ciśnienia dla badanych próbek paliw w silniku laboratoryjnym

Nr próbki	Rodzaj paliwa	Masa próbki [g]	Ciśnienie maksymalne [MPa]	Impuls ciśnienia [MPa·s]
1	Smaragd/Szafir	49	4,58	3,94
2		54	4,92	3,33
3		62	6,46	5,07
4	Smaragd	62	2,15	3,33

Na rysunku 11 przedstawiono profile ciśnień dla poszczególnych badanych próbek paliw.



Rys. 11. Wykresy $p = f(t)$ dla próbek nr 1, nr 2, nr 3 i nr 4

Z przeprowadzonych w silniku badań wytypowanych paliw (Smaragd i mieszaniny Smaragd/Szafir) wynika, że dla paliwa Sz/Sz osiągnięto znaczenie wyższe wartości ciśnienia niż dla paliwa Smaragd (próbka nr 4). Ponadto dla paliwa Smaragd zaobserwowano znacznie dłuższy czas niezbędny do zapłonu próbki. Zarejestrowane zmiany ciśnienia w czasie dla paliwa Sz/Sz (próbki 1 – 3) wykazują się takim samym profilem ciśnienia o szerokości ok. 1,5 s i o wartościach maksymalnych ciśnienia zależnych od masy badanej próbki.

4. Podsumowanie

Przedstawiona tematyka dotyczyła badań wytypowanych paliw stałych, ich właściwości i parametrów energetycznych pod kątem potencjalnych możliwości zastosowania ich w otworach naftowych w zabiegach szczelinowania gazowego. Z dyskusji przeprowadzonych wyżej wyników wynikają następujące wnioski:

- 4.1. Do serii badań parametrów energetycznych paliw i różnych mieszanek paliwowych wykorzystano narzędzia do analiz termodynamicznych (ICT).
- 4.2. Zaimplementowano skuteczny elektryczny układ inicjacji zapłonu paliw, niezbędny do przeprowadzenia testów spalania paliw w silniku laboratoryjnym.
- 4.3. Dla uzyskania próbek do badań o żądanym cylindrycznym kształcie zastosowano technologię prasowania paliwa lub ich mieszanek w formie granulowanej z zastosowaniem lepiszcza na bazie nitrocelulozy.
- 4.4. Dobrano sposób inhibitowania próbek paliw do badań.
- 4.5. Przeprowadzono serię badań wytypowanych paliw potwierdzających skuteczność wybranego systemu zapłonu próbek paliw.
- 4.6. Ze względu na skuteczność zapłonu badanych próbek w silniku laboratoryjnym, stwierdzono korzystniejsze właściwości mieszanki paliw Smaragd/Szafir niż dla samego paliwa Smaragd. Dla paliwa Smaragd obserwowano blisko trzykrotnie dłuższy czas zapłonu próbki.

Literatura

- [1] www.balticceramicsinvestments.com, dostęp 20 styczeń 2014r.
- [2] Rogala A., Księżniak K. *Alternatywne technologie szczelinowania w wydobywaniu gazu z łupków*. Forum czystej energii, 8 październik 2013, Poznań (www.czystaenergia.pl/pdf/poleko2013/08/12.pptx)
- [3] Frodyma A., Habera Ł. *Zasady oddziaływań fizycznych paliw stałych w środowisku otworu wiertniczego i skał złożonych i ich implikacje dla prac stymulacyjnych*. Materiały wysokoenergetyczne, tom 5, 59-79, IPO, Warszawa 2013.
- [4] Praca statutowa nr EMC 014002213, *Badania w zakresie modyfikacji paliw przeznaczonych do stosowania w technologii suchego szczelinowania złóż węglowodorów z formacji łupkowych*. IPO Warszawa/Krupski Młyn, 2014.
- [5] *Badania skuteczności działania ładunków kumulacyjnych i wytypowanej grupy paliw przeznaczonych do intensyfikacji wydobywania ropy i gazu*. IPO Warszawa/Krupski Młyn raport nr 10000216, 2013.
- [6] Barrere M., et al, *Rocket Propulsion*. Elsevier Publishing Comp., 1960.
- [7] Florczak B., Witkowski W., *Perspektywy rozwoju stałych heterogenicznych paliw raketowych*. Problemy Techniki Uzbrojenia, tom 35, z. 98, WITU, Zielonka 2006.
- [8] Buchalik K, Florczak B., Lipiński M., *Stale paliwa raketowe – stan obecny perspektywy rozwoju*. Problemy Techniki Uzbrojenia, 78, Nr 3, 2001, 129-142.
- [9] Florczak B., Lipińska K., *Thermochemical Properties of Composite Propellants Combustion Products*. Proceedings of the 4th Seminar New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice 2011, 86-98.
- [10] Wolszakiewicz T., *Badania balistyczne i wytrzymałościowe stałych paliw raketowych w aspekcie prawidłowości ich zapłonu oraz możliwości występowania sytuacji awaryjnych pracy silników raketowych*. IPO, Warszawa 2013.
- [11] Florczak B., Wolszakiewicz T., Marzec A., Patent nr 207094, 2006.