

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA
im. Jarosława Dąbrowskiego
WYDZIAŁ MECHATRONIKI, UZBROJENIA I LOTNICTWA



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Jakub MICHALSKI

**Badania pirostatyczne materiałów
miotających z wykorzystaniem
plazmowego układu zapłonowego**

Promotor:
dr hab. inż. Zbigniew LECIEJEWSKI

Promotor pomocniczy:
dr inż. Zbigniew SURMA

Warszawa 2021

Chciałbym podziękować żonie Marii za słowa wsparcia i ciągłe motywowanie mnie do pracy.

Dodatkowo chciałbym wyrazić wdzięczność śp. dr. inż. Wiesławowi Picholi oraz podziękować Janowi Karczewskiemu z Instytutu Optoelektroniki, którzy razem tworzyli niezapomniany, wesoły duet elektroników, bez których realizacja tej pracy nie byłaby możliwa.

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń	5
Wykaz skrótów	7
Wprowadzenie	8
1. Wykorzystanie plazmy w balistyce wewnętrznej	12
1.1. Oddziaływanie plazmy z materiałem miotającym	12
1.2. Charakterystyka generatorów plazmy	16
1.2.1. Ogólny opis konstrukcji i zasada działania	16
1.2.2. Opatentowane rozwiązania konstrukcyjne generatorów plazmy	18
1.3. Zastosowanie generatorów plazmy w pirodynamice	24
1.4. Podsumowanie	31
2. Opracowanie stanowiska badawczo – pomiarowego do badań pirostatycznych z wykorzystaniem generatora plazmy typu CPG	33
2.1. Koncepcja układu generacji plazmy	33
2.2. Opis opracowanego układu generatora plazmy CPG	34
2.2.1. Wybór materiału inicjującego powstawanie plazmy w generatorze	36
2.2.2. Określenie warunków pracy opracowanego układu generatora plazmy	40
2.3. Stanowisko badawczo – pomiarowe	43
2.4. Ocena dokładności układu pomiarowego	45
2.5. Podsumowanie	47
3. Badania wstępne układów zapłonowych wykorzystujących proch czarny i plazmę jako medium zapłonowe	49
3.1. Czas generacji impulsu zapłonowego prochu czarnego i plazmy	49
3.2. Ciśnienie generowane przez układ plazmowy	51
3.3. Badania wpływu plazmy na powierzchnię wybranych materiałów	52
4. Badania pirostatyczne materiałów miotających z wykorzystaniem opracowanego plazmowego układu zapłonowego	56
4.1. Materiał badawczy	56
4.2. Wyniki badań pirostatycznych	60
4.2.1. Proch jednobazowy 5/7 cfl	60
4.2.2. Proch dwubazowy JA-2	63
4.2.3. Proch wielobazowy SC	64
4.3. Obliczenia i analiza wyników	66

4.3.1. Proch jednobazowy 5/7 cfl	66
4.3.2. Proch dwubazowy JA-2	79
4.3.3. Proch wielobazowy SC	88
4.4. Dyskusja wyników badań	96
Podsumowanie końcowe i wnioski	103
Bibliografia	105
Spis tabel	109
Spis rysunków	110

Wykaz ważniejszych oznaczeń

- C – pojemność kondensatorów,
 c – ciepło właściwe materiału miotającego,
 c_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu,
 E_b – energia promieniowania,
 e – grubość warstwy spalonej ziarna prochu,
 e_1 – grubość warstwy palnej ziarna prochu,
 f – siła prochu,
 f_{pcz} – siła prochu czarnego,
 f_{CP} – błąd liniowości przetwornika piezoelektrycznego,
 f_{PAC} – błąd liniowości przetwornika analogowo-cyfrowego,
 f_{gg} – górna częstotliwość graniczna,
 f_{WL} - błąd liniowości wzmacniacza ładunku,
 k – stosunek objętości zewnętrznej warstwy o grubości pojedynczej molekuly do objętości całego ciała,
 k_p – czułość przetwornika ciśnienia,
 k_w – charakterystyka przetwarzania wzmacniacza,
 L – dynamiczna żywość prochu,
 L_i – indukcyjność,
 m – masa ziarna prochu,
 m_c – masa cząstki prochu,
 m_e – masa elektronu,
 m_i – masa jonu,
 n_0 – gęstość plazmy,
 p – ciśnienie działające na przetwornik ciśnienia,
 q_i – gęstość strumienia ciepła, docierającego do powierzchni ziarna,
 q_{konw} – ciepło przekazywane na drodze konwekcji,
 R – rezystancja,
 s – droga przebyta przez promieniowanie,
 S_1 – początkowa powierzchnia ziarna prochu,
 t_m - czas osiągnięcia wartości maksymalnej ciśnienia,
 t_E - czas narastania przebiegu wg wzoru Shannona,

T – temperatura plazmy,
 T_e – temperatura elektronów w plazmie,
 T_g - temperatura gazów,
 T_i – okres trwania impulsu elektrycznego,
 T_p - temperatura początkowa,
 T_s – temperatura spalania,
 u_1 – współczynnik liniowego prawa prędkości spalania,
 U_a – różnica potencjałów na stykach przetwornika ciśnienia,
 U_B – napięcie na wejściu wzmacniacza,
 W_0 – początkowa objętość komory spalania,
 z – względna grubość spalonej warstwy ziarna prochu $z = \frac{e}{e_1}$,
 α – kowolumen gazów prochowych,
 α_{pcz} – kowolumen gazów powstałych ze spalania prochu czarnego,
 α_c – współczynnik przejmowania ciepła,
 β – współczynnik absorpcji,
 δ – gęstość prochu,
 Δ – gęstość ładowania,
 ρ – gęstość materiału miotającego
 ε – emisyjność,
 κ, λ, μ – charakterystyki geometryczne kształtu ziarna prochowego,
 Λ_1 – początkowa objętość ziarna prochu,
 λ_c – przewodność cieplna prochu,
 v_b – prędkość jonowa Bohma,
 σ – stała Stefana-Boltzmana,
 $\Delta\varphi$ - spadek potencjału wskutek narastania ładunku na powierzchni ziarna,
 ξ - współczynnik tłumienia,
 ψ – względna masa spalonego prochu $\psi = \frac{\omega_{sp}}{\omega}$,
 ω – początkowa masa prochu,
 ω_{pcz} – masa prochu czarnego,
 ω_p – masa prochu badanego.

Wykaz skrótów

CAB – ang. *Cellulose Acetate Butyrate*, acetylo maślan celulozy,

CPG – ang. *Capillary Plasma Generator*, kapilarowy generator plazmy,

TEGDN – ang. *Triethylene glycol dinitrate*, diazotan glikolu trietylenowego,

ETC – ang. *Electro – thermal – chemical*, elektro - termo – chemiczny,

IM – ang. *Insesitive Munition*, amunicja niewrażliwa,

IPC – ang. *International Patent Classification*, międzynarodowa klasyfikacja patentów,

LOVA – ang. *Low Vulnerability Amunition*, amunicja małowrażliwa,

MRSI – ang. *Multiple Rounds Simultaneous Impact*, jednoczesne uderzenie wielu pocisków,

NC – nitroceluloza,

NG – nitrogliceryna,

PE-HD – ang. *Poliethylen – high density*, polietylen o wysokiej gęstości,

STANAG – ang. *Standarization NATO Agreement*, porozumienie standaryzujące NATO,

USPC – ang. *United States Patent Classification*, klasyfikacja patentów USA,

UV – ang. *Ultraviolet*, ultrafiolet,

VCV – ang. *Vented Closed Vessel*, komora manometryczna z zaworem.

Wprowadzenie

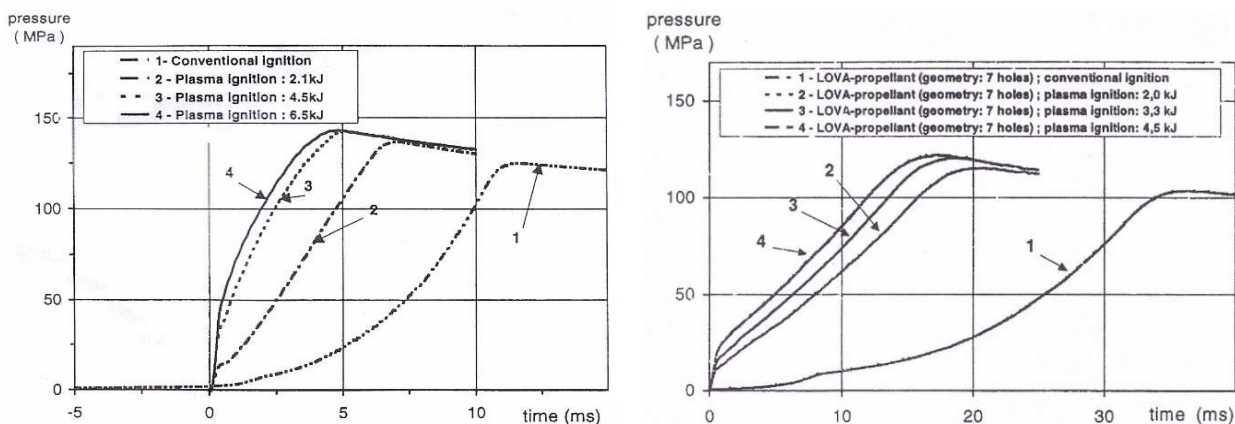
Współczesny rozwój amunicji artyleryjskiej ukierunkowany jest na podniesienie bezpieczeństwa związanego z jej wykorzystaniem i obsługą, a także zwiększenie prędkości wylotowej pocisku i zmniejszenie jego rozrzutu.

Jednym ze sposobów zwiększenia bezpieczeństwa podczas obchodzenia się z amunicją jest wykorzystanie do jej produkcji tzw. prochów małowrażliwych. Obniżona wrażliwość takich prochów wymaga stosowania do ich zapłonu silniejszych układów zapłonowych, w porównaniu do typowych rozwiązań, np. pirotechnicznych. Takim rozwiązaniem może być zapłon plazmowy, w którym rolę medium zapłonowego pełni plazma o wysokiej energii i temperaturze.

Aby projektować amunicję z zapłonem plazmowym należy zbadać jego wpływ na rozpalanie i spalanie prochowego ładunku miotającego. Zasadniczym rodzajem tego typu badań są tzw. badania pirostatyczne, polegające na spalaniu określonej masy prochu w zamkniętej komorze i pomiarze ciśnienia gazów prochowych.

Jedną z pierwszych prac, w której zaprezentowane zostały wyniki badań pirostatycznych z wykorzystaniem zapłonu plazmowego był artykuł D. Grune [1]. W pracy tej przebadano w komorze manometrycznej o pojemności 46 cm³ trzy prochy: jednobazowy, dwubazowy oraz małowrażliwy proch typu LOVA. Do zapłonu badanych prochów wykorzystano zapłon konwencjonalny oraz generator plazmy o niskiej energii od 2,0 kJ do 4,6 kJ. Wyniki zaprezentowane w pracy przedstawiają znaczne skrócenie czasu zapłonu i palenia się prochu (rys. 1). Badania przeprowadzone zostały tylko dla jednej gęstości ładowania. W artykule brakuje jednak informacji dotyczących właściwości zapłonu konwencjonalnego (prawdopodobnie czarnoprochowego).

W kolejnej pracy [2], zespół z Chin przebadał proch dwubazowy stosując zapłon plazmowy. W badaniach tych wykorzystano komorę VCV (z ang. Vented Closed Vessel – komora manometryczna z zaworem) o pojemności 80 cm³. W badaniach skupiono się na opóźnieniach zapłonu. Wyniki przedstawiają skrócenie czasu zapłonu z około 1000 ms przy zapłonie czarnoprochowym do około 300 ms przy zapłonie plazmowym. Należy podkreślić, że w badaniach wykorzystane były pojedyncze ziarna prochu, zazwyczaj trzy, przyklejone do podstawy i umieszczone naprzeciwko generatora plazmy.



Rys. 1. Wykresy ciśnienia gazów prochowych dla prochu dwubazowego (po lewej) i LOVA (po prawej) z wykorzystaniem zapłonu klasycznego i plazmowego [1]

W innych pracach [3, 4] przedstawiono układ do badań pirostatycznych z komorą manometryczną o pojemności 900 cm³ wykorzystujący zapłon plazmowy. Zbadano minimalną energię pobudzenia masy 120 g prochu trójbazowego, która wynosiła 6 kJ. W pracy nie zamieszczono niestety żadnych charakterystyk prochu.

Jedynym z niewielu artykułów z obszaru badań pirostatycznych, w którym przedstawiono charakterystyki prochu, wyznaczone z wykorzystaniem zapłonu plazmowego, jest praca francuskich naukowców [5]. W pracy tej przedstawiono wykresy prędkości spalania badanego prochu w funkcji ciśnienia. Zauważono wyższe prędkości spalania dla niskich gęstości ładowania.

W pracy M. Taylor [6] przedstawia wyniki badań z komory manometrycznej o pojemności 96 cm³. Generator plazmy mógł pracować z minimalną energią 6 kJ przy napięciu 10 kV. Badaniom poddany został proch dwubazowy JA-2. W pracy przedstawiono wykresy prędkości spalania badanego prochu w funkcji ciśnienia. Nie zauważono wpływu zapłonu na prędkość spalania.

W tabeli nr 1 zestawiono opublikowane prace przedstawiające układy generacji plazmy małych energii. Przeprowadzona analiza pokazuje niewielką liczbę danych literaturowych dotyczących wpływu rodzaju zapłonu na charakterystyki prochu oraz całkowity brak badań wpływu zapłonu na dynamikę spalania prochów.

Tabela nr 1. Opublikowane wyniki badań pirostatycznych

Źródło	Przedmiot badań	Rodzaj zapłonu	Warunki badań	Uwagi
[1]	19 kanalikowy proch jednobazowy, rurkowy proch dwubazowy, 7 kanalikowy proch LOVA	Plazmowy, proch czarny	Komora manometryczna o pojemności 46 cm ³ . Energia układu elektrycznego 2,1 kJ.	Przebadano tylko jedną gęstość ładowania.
[2]	19 kanalikowy proch jednobazowy i proch TEGDN	Plazmowy	Komora VCV o pojemności 80 cm ³ . Energia układu elektrycznego: (1,1 – 4) kJ.	Badanie pojedynczych ziaren.
[3, 4]	Proch trójbazowy	Plazmowy	Komora manometryczna o pojemności 900 cm ³ . Energia układu elektrycznego: (4 – 100) kJ.	Przedstawiono energię pobudzenia 120 g prochu wynoszącą 6 kJ.
[5]	Proch jednobazowy	Plazmowy	Komora manometryczna o pojemności 460 cm ³ . Energia układu elektrycznego: (20 – 40) kJ.	Wyznaczono prędkość spalania.
[6]	Proch JA-2	Plazmowy, proch czarny	Komora manometryczna o pojemności 96 cm ³ . Energia układu elektrycznego: 6 kJ przy 10 kV.	Wyznaczono prędkość spalania.

W związku z perspektywą coraz szerszego zastosowania nowoczesnych małowrażliwych materiałów miotających do produkcji amunicji oraz perspektywą opracowania w Polsce nowych konstrukcji uzbrojenia, a także wobec ograniczonej liczby materiałów źródłowych dotyczących wpływu zapłonu plazmowego na charakter spalania prochów, istnieje potrzeba opracowania stanowiska badawczego oraz przeprowadzenia badań pirostatycznych z wykorzystaniem plazmowego układu zapłonowego.

W związku z powyższym, celem głównym pracy było zbadanie wpływu zapłonu plazmowego wytworzonego przez układ o niskiej energii wyładowania na dynamikę procesu spalania materiałów miotających. Natomiast jako cele cząstkowe przyjęto:

- 1. Opracowanie i przebadanie układu generacji plazmy o niskiej energii wyładowania.**
- 2. Wykonanie badań porównawczych dla różnych rodzajów prochów z wykorzystaniem zapłonu plazmowego i czarnoprochowego.**
- 3. Porównanie wybranych charakterystyk dynamiki spalania badanych prochów.**

Cele pracy osiągnięto poprzez realizację następujących **zadań badawczych**:

1. Analiza oddziaływania zapłonu plazmowego na miotające materiały wybuchowe (rozdział 1).
2. Analiza konstrukcji generatorów plazmy wykorzystywanych w badawczych układach pirostatycznych i pirodynamicznych (rozdział 1).
3. Opracowanie i wykonanie układu badawczego oraz przeprowadzenie badań wstępnych (rozdział 2 i 3).
4. Wykonanie badań pirostatycznych trzech rodzajów stałych materiałów miotających oraz opracowanie i analiza otrzymanych wyników (rozdział 4).

Dotychczas tego typu badań nie prowadzono w Polsce. Do budowy stanowiska badawczego oraz do opracowania metody badań wykorzystano doświadczenia wyniesione z poprzednio realizowanych projektów na temat zapłonu, generacji plazmy i wykorzystania jej w badaniach pirostatycznych [7-12], w tym niżej wymienionych prac badawczych typu „Rozwój Młodych Naukowców”, których kierownikiem był autor dysertacji:

- RMN 08-690/2014 „Alternatywna metoda wyznaczania charakterystyk balistycznych stałych materiałów miotających. Plazmowy układ zapłonowy do badań pirostatycznych stałych materiałów miotających”,
- RMN 08-779/2016 „Plazmowy zapłon prochów małowrażliwych – wstępne badania pirostatyczne”,
- RMN 08-717/2017 „Badania elementów układu zapłonowego stałych materiałów miotających oraz różnych konstrukcji zapłonników w kontekście projektu małokalibrowego układu miotającego typu ETC”.

Podczas budowy oraz uruchomienia stanowiska z układem generacji plazmy nawiązano współpracę z pracownikami naukowymi Instytutu Optoelektroniki Wojskowej Akademii Technicznej oraz Narodowego Centrum Badań Jądrowych w Świerku.

ROZDZIAŁ I

Wykorzystanie plazmy w balistyce wewnętrznej

1.1. Oddziaływanie plazmy z materiałem miotającym

Plazma w warunkach laboratoryjnych uzyskiwana jest poprzez wyładowanie elektryczne między elektrodami oddzielonymi materiałem dielektrycznym (gaz lub ciecz). Jako medium zapłonowe stałych materiałów miotających została wykorzystana według doniesień literaturowych po raz pierwszy pod koniec lat 80. XX wieku [13]. Od tamtego czasu kilka ośrodków naukowych na świecie nieustannie bada oddziaływanie plazmy na miotające materiały wybuchowe, wciąż jednak pozostaje więcej pytań niż odpowiedzi dotyczących przebiegu procesu zapłonu w układach z zapłonem plazmowym oraz skutków oddziaływania plazmy na materiały miotające.

Można wyróżnić trzy podstawowe formy oddziaływania plazmy na powierzchnię ziaren materiału miotającego. Są to:

- 1) promieniowanie i konwekcja;
- 2) oddziaływanie na wiązania atomowe;
- 3) kondensacja odparowanego metalu.

Promieniowanie jest głównym sposobem transportu energii. Plazmę można opisać jako ciało szare (niedoskonałe ciało czarne) z energią promieniowania równą [14]:

$$E_b = \varepsilon\sigma T^4, \quad (1.1)$$

gdzie: ε - emisyjność, σ – stała Stefana-Boltzmanna, T - temperatura plazmy.

Jak wynika ze wzoru (1.1) energia promieniowania jest proporcjonalna do temperatury w czwartej potęgze i odgrywa główną rolę w transporcie energii.

Oprócz bardzo silnego nagrzewania całej powierzchni ziarna, promieniowanie wnika na niewielką odległość w głąb ziarna powodując wstępne odparowanie i ablację materiału miotającego. Takie oddziaływanie wpływa dwojako na proces zapłonu. Po pierwsze zwiększa początkową powierzchnię spalania ziarna, po drugie odparowany materiał miotający bardzo łatwo ulega zapłonowi.

Promieniowanie odgrywa znaczącą rolę w pierwszej fazie transportu energii, dopóki nie pojawią się gazy prochowe. W obecności gazów prochowych duża ilość energii wypromieniowywanej zostaje zatrzymana na cząsteczkach gazów.

Drugą drogą przekazywania energii plazmy do ziaren prochowych jest konwekcja. Strumień ciepła przekazywany do ziarna prochu na drodze konwekcji można opisać wzorem:

$$q_{conv} = n_0 v_b (3T_e + \Delta\varphi), \quad (1.2)$$

gdzie: n_0 – gęstość plazmy,

$v_b = \sqrt{T_e/m_i}$ – prędkość jonowa Bohma,

T_e – temperatura elektronów w plazmie,

m_i – masa pojedynczego jonu,

$\Delta\varphi$ - spadek potencjału wskutek narastania ładunku na powierzchni ziarna,

$$\Delta\varphi = 0,5T_e \ln m_i/(2\pi m_e),$$

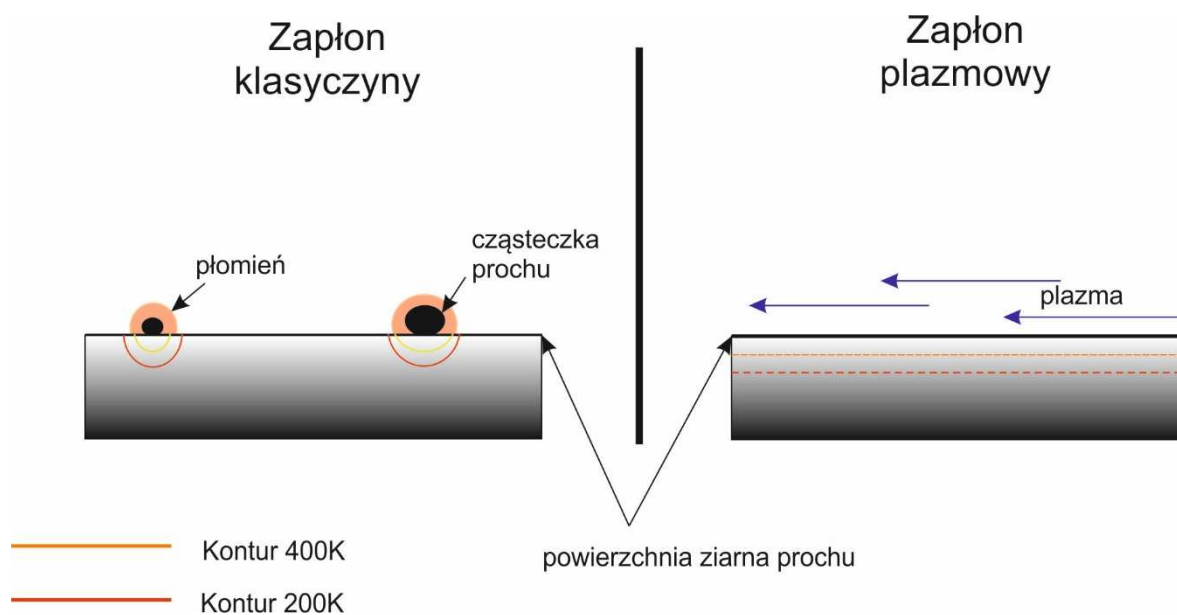
m_e – masa elektronu.

Całkowita gęstość strumienia ciepła na wyjściu z generatora może wynosić $10^8 - 10^9 \text{ W/m}^2$ w zależności od napięcia ładowania (2,5 kV – 4 kV).

Kolejną formą oddziaływania plazmy na materiał miotający jest oddziaływanie na wiązania atomowe. Promieniowanie plazmy oraz zderzenia wysoko zjonizowanych cząsteczek wzbudzają atomy azotu, powodując obniżenie poziomu energii potrzebnej do rozbicia wiązań i rozpoczęcia procesu rozkładu egzotermicznego (spalania). Bardzo wysoka temperatura plazmy sięgająca 1,5 eV (1 eV jest to około 10 000 K) powoduje wzrost ciśnienie w komorze spalania do kilku MPa.

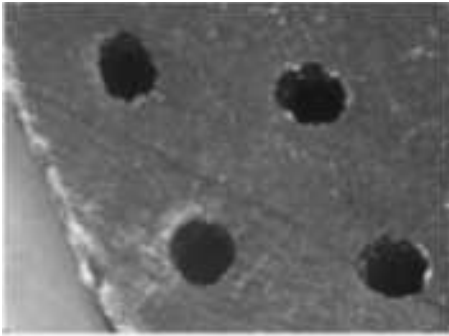
Trzecią formą oddziaływania plazmy na materiał miotający jest kondensacja odparowanego metalu, będąca dodatkowym źródłem energii dostarczanej do powierzchni ziarna. Plazma powstała z odparowania metalowego drutu po zakończeniu jarzenia się osiada na powierzchni ziarna powodując nagrzanie go temperatury powyżej 500°C [15]. Powoduje to zapłon prochów nitrocelulozowych, a w przypadku prochów kompozytowych ułatwia zapłon wstępnie nagrzewając powierzchnię.

W przypadku zapłonu konwencjonalnego, czyli za pomocą prochu czarnego, główną drogą przekazywania energii od gazów zapłonowych do ziaren prochowych jest przewodnictwo cieplne. Następuje ono na drodze zderzeń ziaren rozpalonego prochu czarnego z powierzchnią badanego prochu i powoduje rozpalenie z wykorzystaniem tzw. gorących punktów (z ang. *hot-spot*, rys. 1.1).

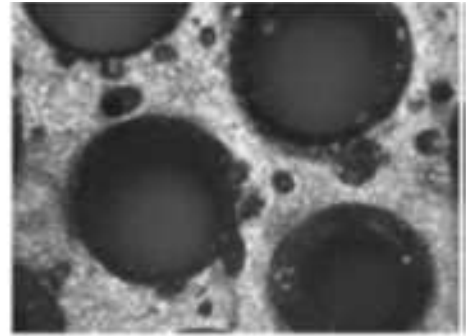


Rys. 1.1. Porównanie mechanizmów zapłonu plazmowego i klasycznego (opracowano na podstawie [6])

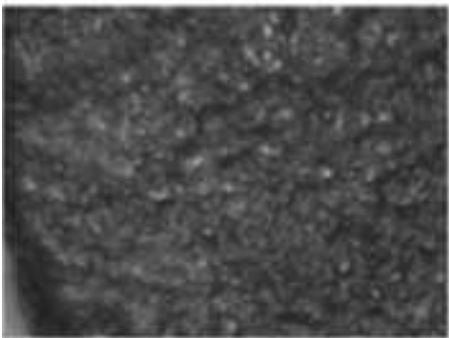
Na rys. 1.2 przedstawiono porównanie ziaren prochowych, poddanych zapłonowi klasycznemu (czarnoprochowemu) i plazmowemu [16]. Warto zwrócić uwagę na powierzchnię ziarna poddanego działaniu chmury plazmy, jak i na działanie konwencjonalnych środków zapalających w postaci prochu czarnego wraz z główką zapalczą. W przypadku prochu inicjowanego za pomocą plazmy widoczne są wyraźne zmiany na powierzchniach ziaren. Szczególnie widoczne są nadtopienia i wymycie części materiału. W przypadku prochów jednobazowych oraz dwubazowych (składających się z nitrocelulozy i nitrogliceryny o zbliżonych temperaturach topnienia i wrzenia) powierzchnia ziarna prochu jest równomiernie uszkodzona. W przypadku prochów kompozytowych, których składniki mają różne temperatury wrzenia, następuje parowanie jednej substancji w momencie gdy druga jest plastyczna. Wówczas można zaobserwować powstawanie bąbli na powierzchni ziarna. Jeżeli jedna z substancji odparowuje, gdy druga jest jeszcze w stanie stałym, następuje spękanie powierzchni ziaren i znaczące powiększenie się początkowej powierzchni ziarna. Tak powiększona powierzchnia ziarna bardzo łatwo ulega zapłonowi.



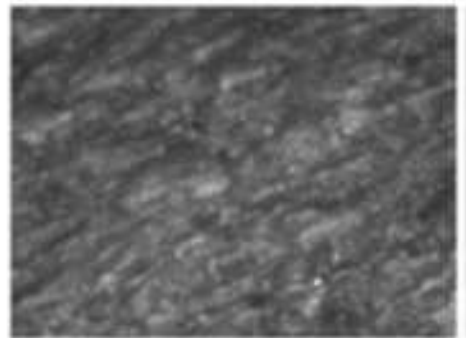
Zapłon czarnoprowowy, 50x



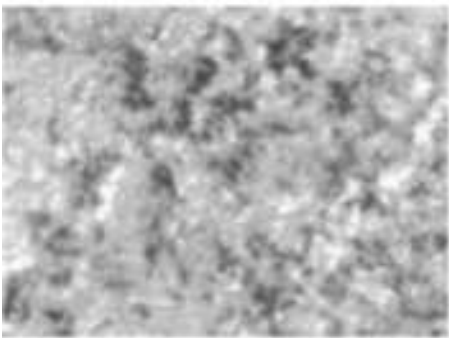
Zapłon plazmowy, 50x



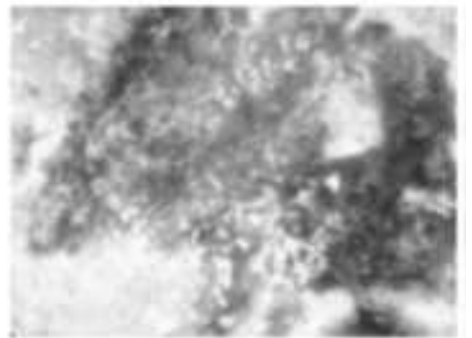
Zapłon czarnoprowowy, 400x



Zapłon plazmowy, 400x



Zapłon czarnoprowowy, 400x



Zapłon plazmowy, 400x

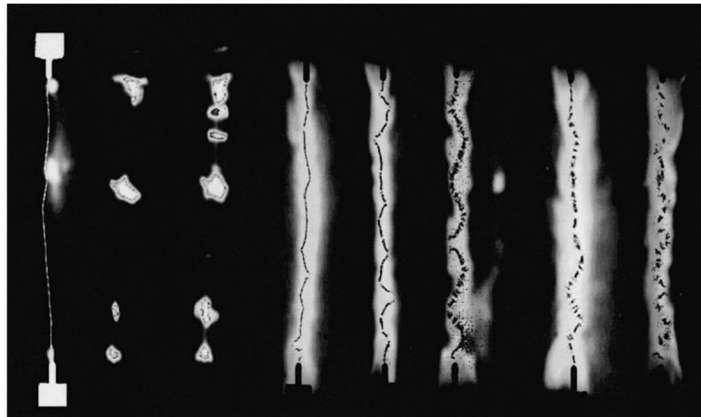
Rys. 1.2. Porównanie powierzchni ziaren prochowych po inicjacji klasycznym zapłonem czarnoprowowym oraz zapłonem plazmowym przy jednakowej energii zapłonu [16]

1.2. Charakterystyka generatorów plazmy

W literaturze dotyczącej plazmowych układów zapłonowych najczęściej występują następujące typy układów generatorów plazmy:

- Current Injection [17],
- Piccolo Tube,
- Capillary Plasma Generator [18].

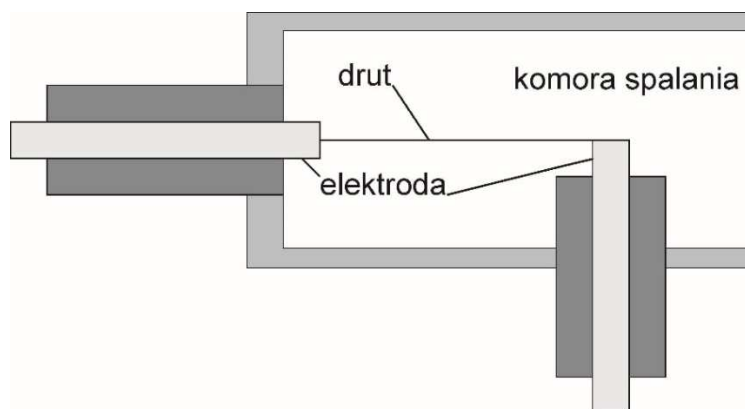
W wymienionych układach plazma generowana jest w wyniku rozładowania wysokonapięciowych kondensatorów przez drut o niewielkiej średnicy łączący elektrody. Prąd płynący przez drut powoduje jego gwałtowne odparowanie (rys. 1.3), a prąd płynący przez mieszaninę par metalu i powietrza powoduje bardzo silną jonizację gazów i powstanie plazmy.



Rys. 1.3. Zdjęcia rentgenowskie kolejnych faz powstawania plazmy [6]

1.2.1. Ogólny opis konstrukcji i zasada działania

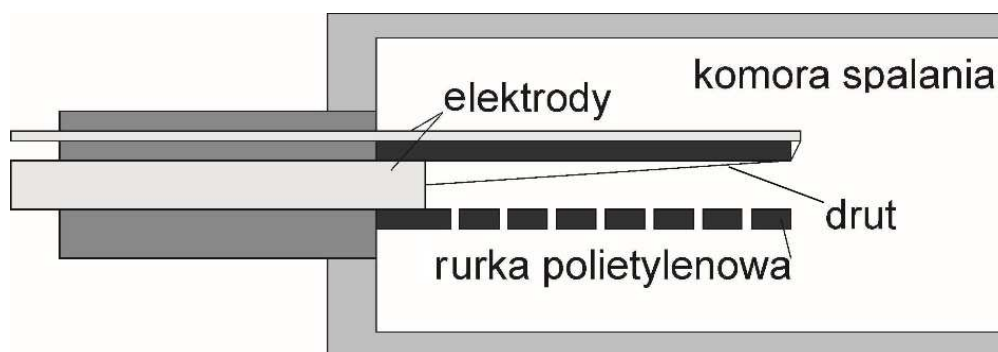
Układ zapłonowy Current Injection (rys. 1.4) jest promieniowym układem wyładowczym.



Rys. 1.4. Schemat ideowy generatora plazmy typu Current Injection (rysunek własny)

Oznacza to, że wygenerowana plazma rozchodzi się promieniście od drutu do ścianek komory generatora w której znajduje się materiał miotający. Układ składa się z dwóch elektrod, pomiędzy którymi rozciągnięty jest drut o małej średnicy. Nazwa tego układu pochodzi od iniekcji, czyli „wtrysku” prądu. Wadą tego rozwiązania jest oddziaływanie gazów prochowych o wysokiej temperaturze na plazmę, co znacząco pogarsza jej właściwości oraz wymaga większych energii zgromadzonych w kondensatorach, aby utrzymać stabilny łuk elektryczny wewnątrz komory. Kolejną wadą tego układu jest możliwość przerwania przewodu przez poruszający się wewnątrz komory (np. łuski) proch.

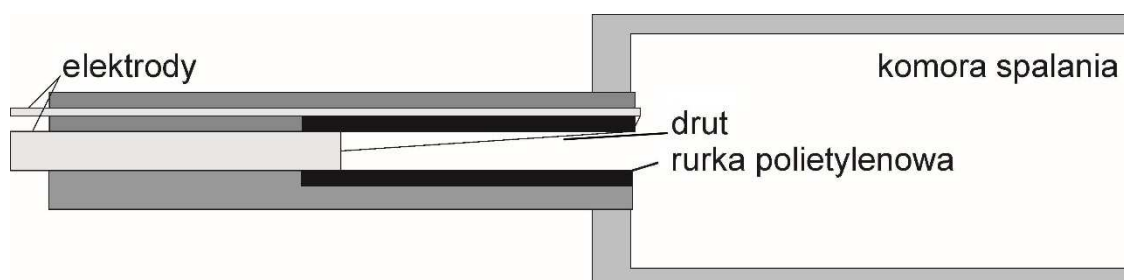
Aby tego uniknąć wprowadzono polietylenową rurkę, która otacza metalowy drut. Układ taki nazywany jest Piccolo Tube (rys. 1.5).



Rys. 1.5. Schemat ideowy generatora plazmy typu Piccolo Tube (rysunek własny)

W rurce wykonane są otwory ułożone promieniowo, mające na celu ukierunkowanie rozchodzenia się plazmy wewnątrz komory. Generowana wewnątrz rurki plazma wydmuchiwana jest pod własnym ciśnieniem na zewnątrz. Wspólną wadą promieniowych generatorów plazmy jest to, że dodatkowo obciążają ścianki komory spalania, a w połączeniu z wysoką temperaturą powodują szybkie jej uszkodzenie [6].

Typowym przykładem osiowego generatora plazmy jest kapilarowy generator plazmy (CPG – ang. *Capillary Plasma Generator*), przedstawiony na rysunku 1.6.



Rys. 1.6. Schemat ideowy generatora plazmy typu CPG (rysunek własny)

Rozwiązanie to różni się od układu Piccolo Tube tym, że nie posiada promieniowych otworów w polietylenowej rurce oraz tym, że rurka wraz z elektrodami i metalowym drutem wyprowadzona została poza komorę spalania. Poprawia to znacznie właściwości plazmy, która generowana jest w rurce i wydmuchiwana do komory spalania pod własnym ciśnieniem. Przeprowadzone badania porównawcze układów typu kapilarowego i bez kapilarowego wykazały, że przy użyciu rurki polietylenowej uzyskuje się dużo wyższe ciśnienie początkowe, co w początkowej fazie spalania prochu jest ważne. Ablacja rurki polietylenowej dostarcza dodatkowej energii ze względu na dysocjację oraz spalanie się cząsteczek węgla i wodoru [19].

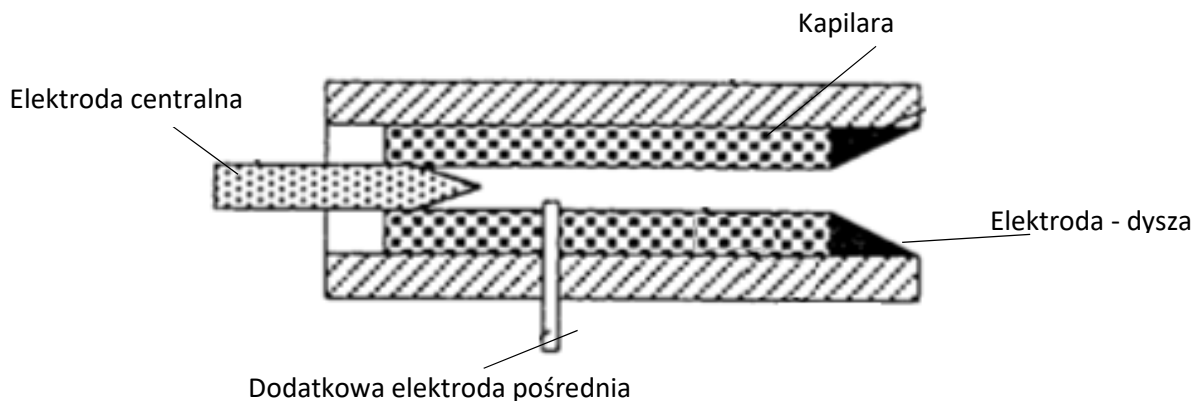
Strumień energii promieniowania największy jest w osi generatora plazmy, przy wylocie z generatora. Energia ta przekazywana jest nie tylko do prochu, ale także do ścianek komory manometrycznej oraz powietrza i gazów pochodzących ze spalania się prochu znajdujących się wewnątrz niej. Konsekwencją nagrzewania się gazów wewnątrz komory jest wzrost ich ciśnienia.

1.2.2. Opatentowane rozwiązania konstrukcyjne generatorów plazmy

W przeglądzie opatentowanych rozwiązań skupiono się na klasie urządzeń F42C – zapalniki, F41A – sprzęt bojowy według klasyfikacji międzynarodowej (IPC) oraz klasie urządzeń 102.202 – zapalniki materiałów miotających według klasyfikacji Stanów Zjednoczonych (USPC).

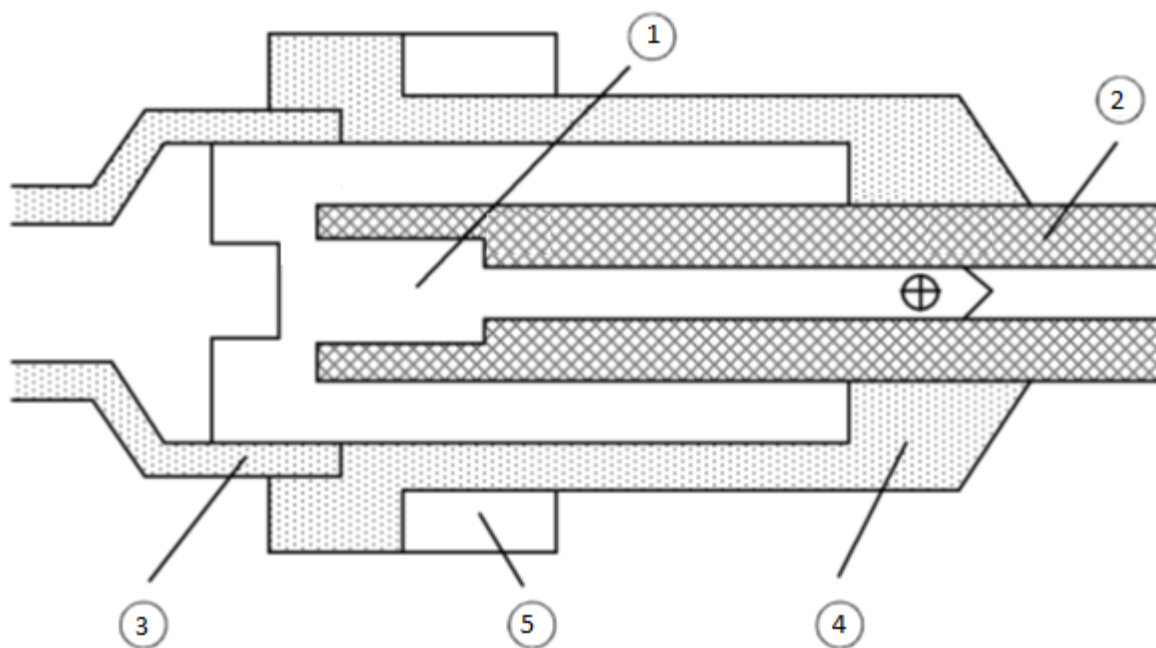
W publikacjach patentowych można znaleźć liczne rozwiązania odnoszące się zarówno do samych generatorów plazmy, jak i do amunicji.

W chińskim patencie CN1358058A [20] (rys. 1.7) przedstawiono kapilarowy generator plazmy nie wykorzystujący drutu do inicjacji generacji plazmy. Zastosowano za to dodatkową elektrodę pośrednią, na którą podawane jest napięcie. Urządzenie łączy w sobie generator plazmy oraz iskiernik do zamykania obwodu elektrycznego za pomocą iskry.



Rys. 1.7. Rozwiązanie patentowe kapilarowego generatora plazmy [20]

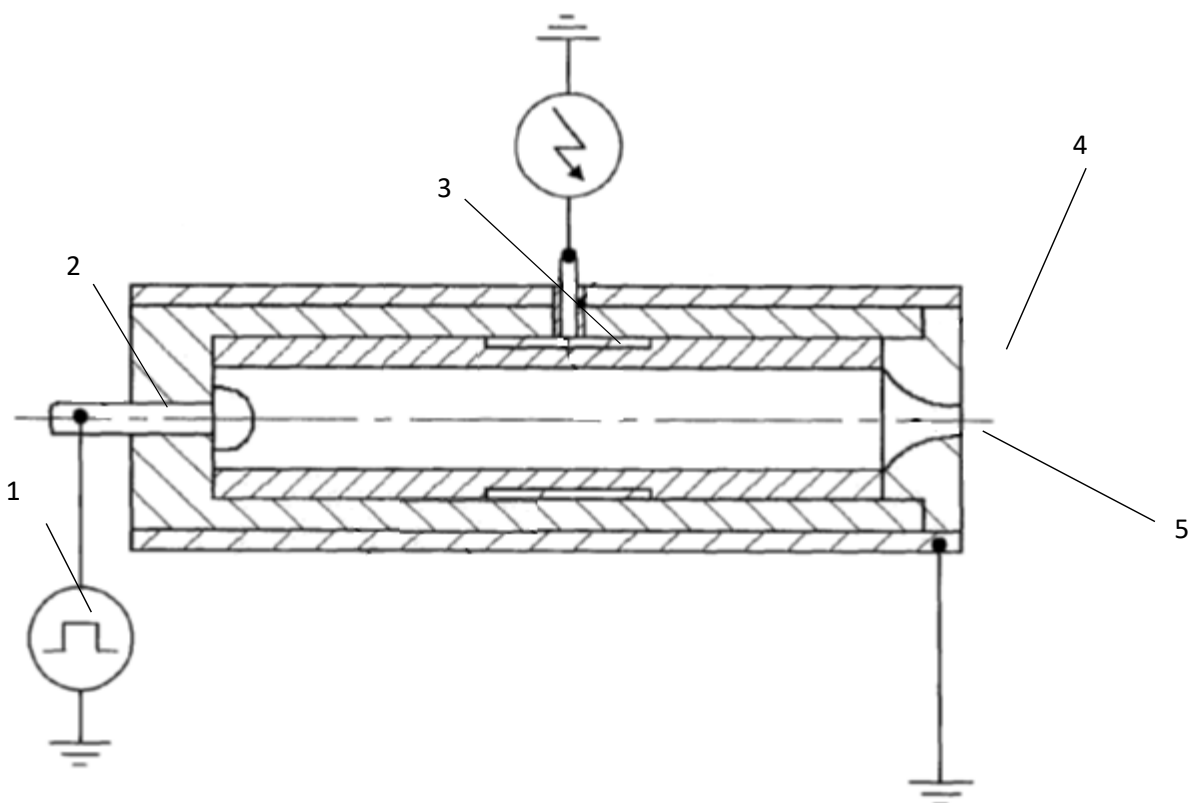
Kolejnym chińskim opatentowanym rozwiązaniem (CN102361528B) [21] w dziedzinie kapilarowych generatorów plazmy, jest uszczelnienie elektrody dodatniej (rys. 1.8).



Rys. 1.8. Opatentowane rozwiązanie uszczelnienia elektrody: 1 – elektroda, 2 – rurka polietylenowa, 3, 4 – izolacja elektryczna, 5 – pierścień wzmacniający [21]

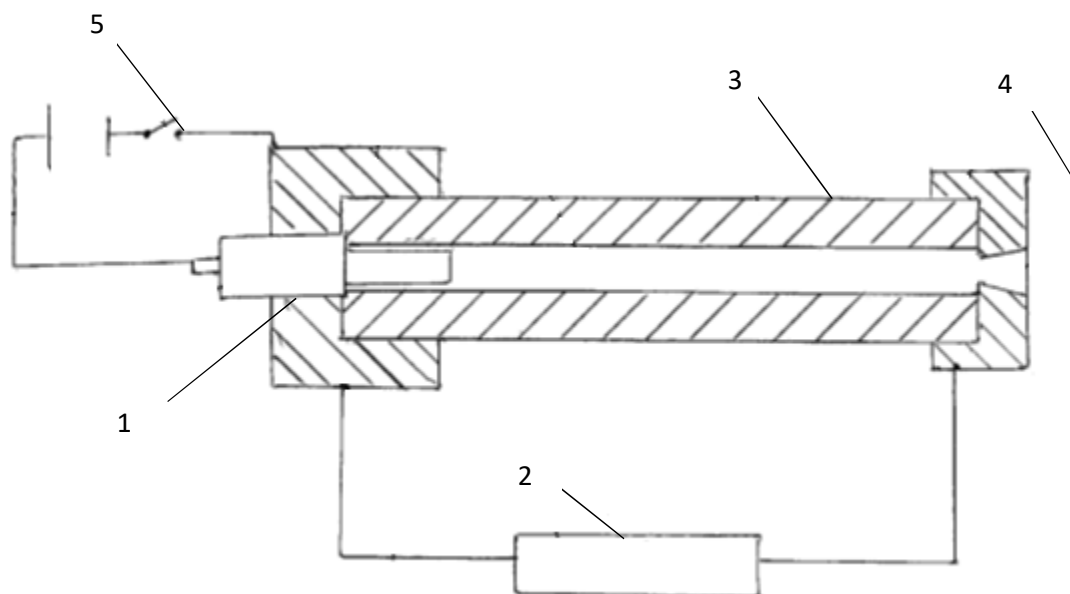
W zaprezentowanym rozwiązaniu elektroda dodatnia (1) jest tak ukształtowana, aby zachodziła na rurkę polietylenową. W momencie wpłynięcia gazów do przestrzeni, w której znajduje się elektroda, ciśnienie gazów prochowych spowoduje dociśnięcie rurki polietylenowej do zewnętrznego kołnierza elektrody. Z zewnątrz elektroda jest dodatkowo izolowana elektrycznie (3,4) oraz posiada pierścień wzmacniający (5).

Podobnym rozwiązaniem do chińskiego patentu CN1358058A jest amerykański patent US20140083317A1 [22] (rys. 1.9), który był wcześniej zgłoszonym szwedzkim rozwiązaniem patentowym. Generator przedstawiony w patencie, podobnie jak chiński odpowiednik, przeznaczony jest do broni samoczynnej i samopowtarzalnej, gdzie wprowadzanie przewodu do wnętrza kapilary byłoby zbyt długotrwałe. W tym przypadku jednak podanie wysokiego napięcia z generatora (1) następuje najpierw na płytkę jonizatora (3), co powoduje jonizację gazu znajdującego się wewnątrz kapilary. Następnie włączenie napięcia na elektrodzie centralnej (2) powoduje wyładowanie pomiędzy elektrodami (2 i 4) i generację plazmy oraz jej wypływ przez dyszę (5).



Rys. 1.9. Generatora plazmy przedstawiony w amerykańskim patencie. 1 – generator impulsu elektrycznego, 2 – elektroda centralna, 3 – płytki jonizatora, 4 – elektroda, 5 – dysza [22]

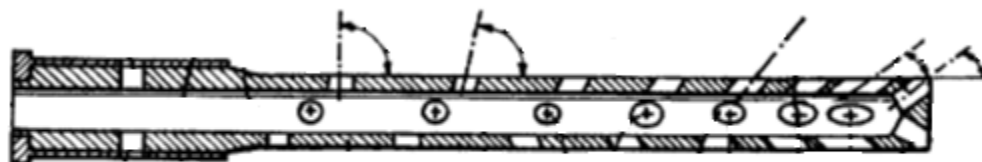
W patencie US20110155011A1 [23] (rys. 1.10) przedstawiono kolejne rozwiązanie generatora plazmy do broni samopowtarzalnej i samoczynnej. Różni się od poprzednich rozwiązań brakiem elementu jonizującego gaz znajdujący się wewnątrz rurki. Element ten zastąpiono elementem grzejnym połączonym z elektrodą (1). Początkowe nagrzewanie się tego elementu spowoduje częściowe odparowanie polietylenu, co ułatwi wyładowanie wewnątrz rurki. Rozwiązanie to wymaga jednak wymiany wkładu co pewien czas.



Rys. 1.10. Generator plazmy z elementem grzejnym. 1 – elektroda centralna z elementem grzejnym, 2 – zasilanie grzałki, 3 – kapilara, 4 – elektroda z dyszą, 5 – układ elektryczny [23]

Kolejnymi opatentowanymi rozwiązaniami są patenty związane z amunicją.

W patencie US5675115 [24] opisano rurkę do rozprowadzania plazmy wewnątrz łuski (rys.1.11).

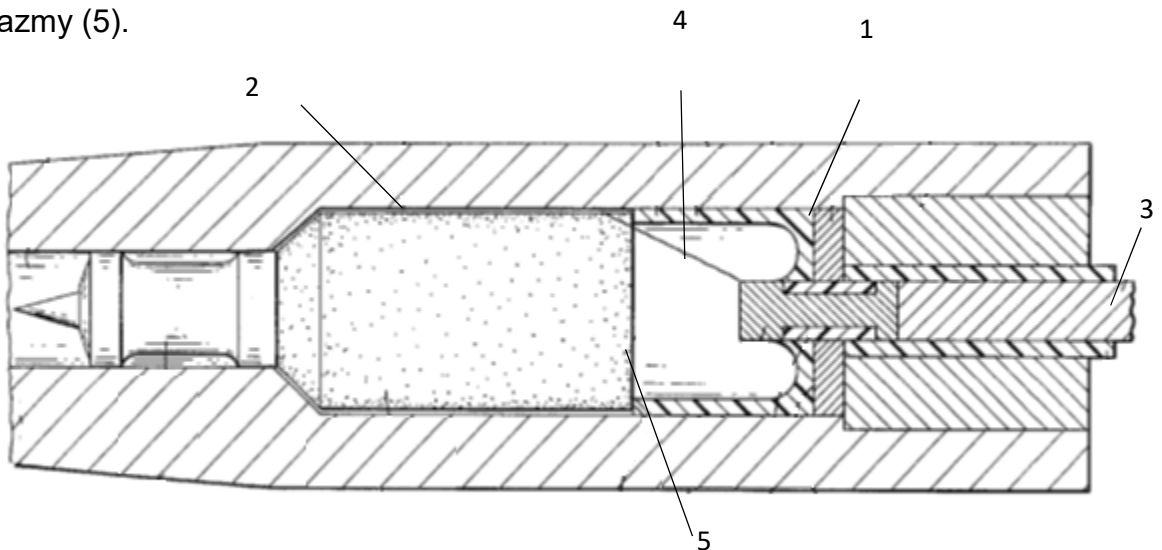


Rys. 1.11. Rurka do rozprowadzania plazmy [24]

Zbudowana jest ona podobnie do generatora typu piccolo-tube (rys.1.5), jednakże otwory położone dalej od generatora pochylone są pod coraz to mniejszymi kątami, ułatwiając wypływ plazmy i bardziej jej równomierne rozchodzenie się wewnątrz komory spalania.

Niemiecki patent (wygasły w 2017 roku) należący do Rheinmetal (DE19617895, US5898124A) [25] opisuje amunicję czołgową wyposażoną w generator plazmy w dnie łuski (rys.1.12). Łuska jest podzielona na dwie części. Część metalową (1) oraz zbudowaną ze spalającego się materiału (2).

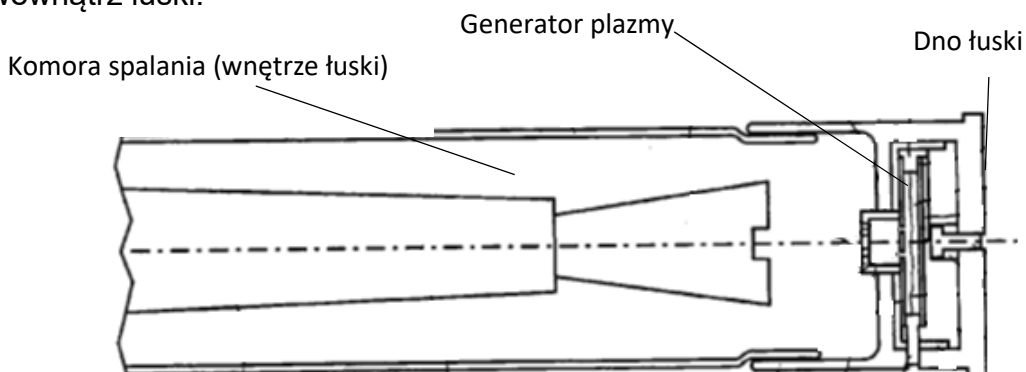
Generacja plazmy następuje poprzez podanie wysokiego napięcia na elektrodę centralną (3) oraz odparowanie miedzianego drutu (4). Po wygenerowaniu plazmy następuje przerwanie elementu oddzielającego materiał miotający od generatora plazmy (5).



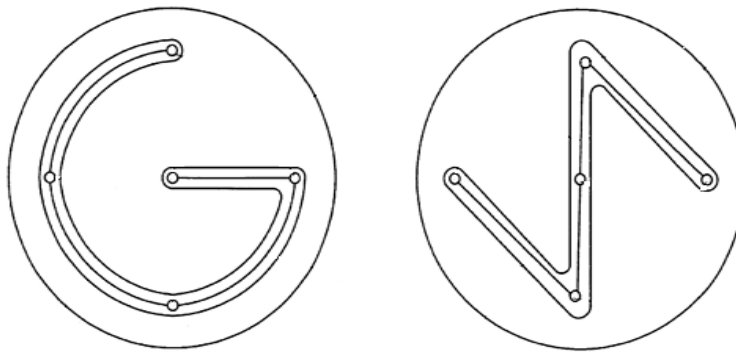
Rys.1.12. Amunicja czołgowa z generatorem plazmy. 1 – metalowe dno łuski, 2 – spalająca się część łuski, 3 – elektroda centralna, 4 – drut, 5 - membrana [25]

Wśród patentów dotyczących amunicji większość z nich skupia się na położeniu i mocowaniu generatora plazmy wewnątrz łuski.

W patencie US7059249B2 [26] pokazany jest generator w dnie łuski, jednak w ułożeniu poprzecznym do łuski (rys.1.13). W patencie tym pokazano także dwa ułożenia samego generatora plazmy (rys. 1.14). Na rzucie prostopadłym do osi łuski pokazano przebieg przewodu inicjującego generację plazmy przypominający literę G oraz literę N. Ma to na celu zmniejszenie objętości zajmowanej przez generator wewnątrz łuski.

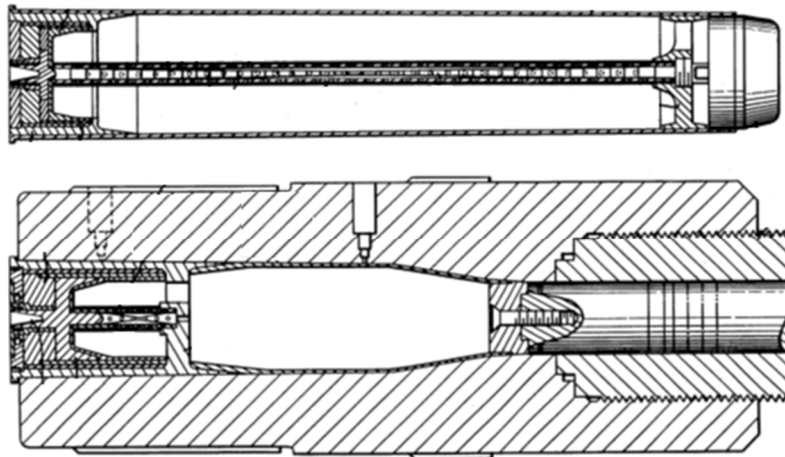


Rys. 1.13. Schemat ułożenia generatora plazmy w łusce [26]



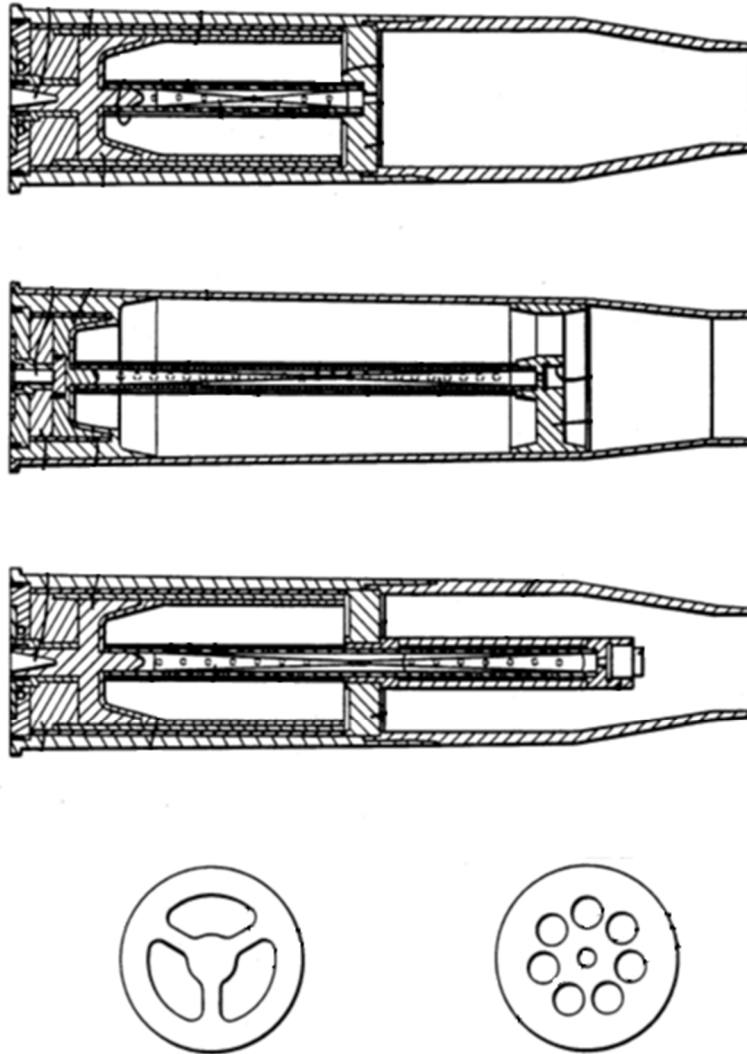
Rys. 1.14. Poprzeczne ułożenie generatorów plazmy [26]

Kolejnym patentem [27] (US5287791A) jest koncepcja całego układu miotającego wraz z różnymi wersjami generatora wewnątrz łuski (rys.1.15 oraz rys 1.16).



Rys. 1.15 Komora nabojowa wraz z różnymi konfiguracjami łusek [27]

W patencie przedstawione są różnego rodzaju zapłoniki plazmowe używane w zależności od konfiguracji amunicji. Oprócz plazmy do zapłonu zastosowano bliżej nieokreślony „płyn chemiczny pobudzony plazmą” (z ang. Plasma - ignited chemical fluid). Do rozprowadzania plazmy oraz „płyn chemiczny” zastosowano różnego rodzaju rurki typu piccolo-tube (rys. 1.16).



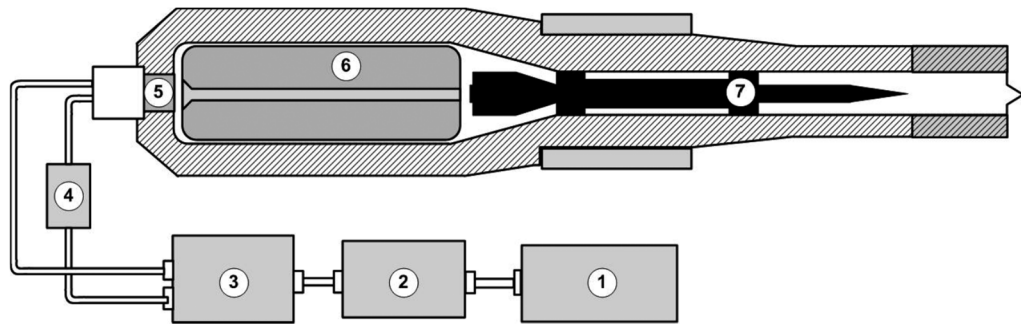
Rys.1.16. Różne konfiguracje amunicji do dział elektro-termo-chemicznych [27]

1.3 Zastosowanie generatorów plazmy w pirodynamice.

Przykładem zastosowania generatora plazmy w roli układu zapłonowego ładunku miotającego jest układ miotający typu ETC (ang. *Electro Thermal Chemical*).

Układy miotające typu ETC składają się z następujących głównych elementów (rys. 1.17):

- baterii kondensatorów,
- układu rozładowania,
- generatora plazmy,
- lufy z ładunkiem miotającym i pociskiem.



Rys. 1.17. Schemat układu miotającego typu ETC [28]:

1 – pierwszy stopień kondensatorów, 2 – drugi stopień kondensatorów, 3 – układ rozładowania, 4 – przełącznik, 5 – generator plazmy, 6 – ładunek miotający, 7 – pocisk

Na baterię kondensatorów składają się zazwyczaj wysokonapięciowe kondensatory o dużej pojemności. W zależności od układu miotającego, do którego wykorzystywany jest plazmowy układ zapłonowy, energia zgromadzona w kondensatorach zawiera się od kilku kJ do nawet kilkunastu MJ.

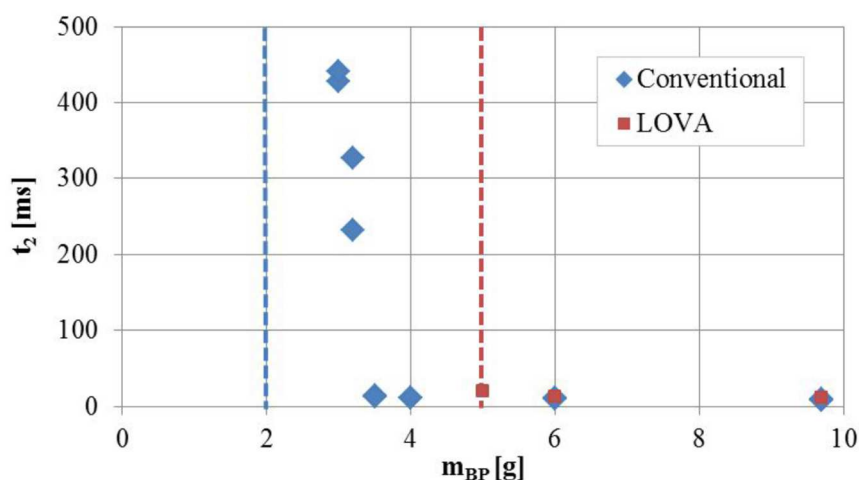
Układ rozładowania jest to zazwyczaj iskiernik o dużej sprawności lub specjalnie projektowane do tego celu układy tyrystorowe, których sprawność sięga nawet 99%.

Badania dotyczące zapłonu plazmowego prowadzone w czołowych ośrodkach na świecie zajmujących się techniką uzbrojenia, koncentrują się przede wszystkim na testach pirodynamicznych. Testy pirodynamiczne polegają na badaniu prochu w układzie miotającym, tj. w przestrzeni półzamkniętej z jedną ścianką ruchomą (w przeciwieństwie do badań pirostatycznych, w której komora jest o stałej, niezmienną objętości). Porównując wyniki badań różnych ośrodków można zauważyć przede wszystkim znaczące skrócenie czasu zapłonu i niższy rozrzut prędkości wylotowych pocisków przy zapłonie plazmowym, co ma znaczący wpływ na zadania balistyki zewnętrznej.

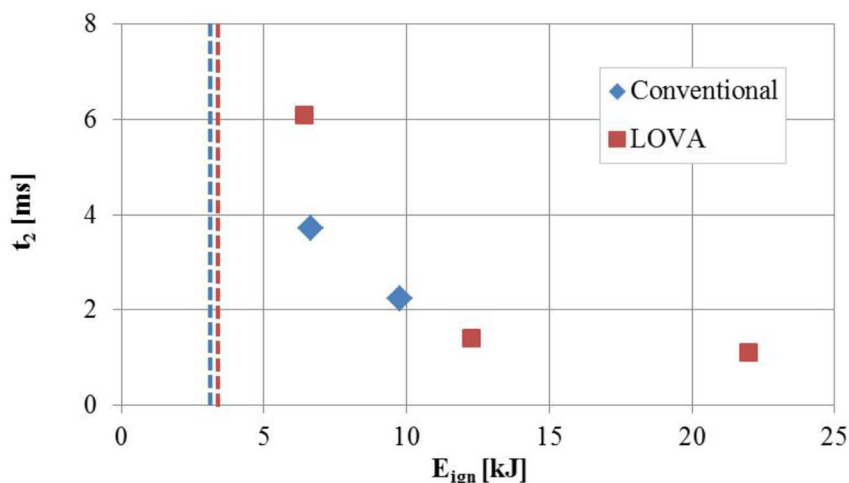
Jednym z ośrodków zajmującym się badaniami zapłonu plazmowego w układach pirodynamicznych jest Propulsion Physics Laboratory z Izraela [29]. W literaturze zostały opisane układy miotające kalibrów: 25 mm, 60 mm i 105 mm. Ponadto przedstawiono standardowy układ miotający kalibru 105 mm z zapłonem plazmowym i układem zasilania o energii maksymalnej równej 500 kJ. Wyniki badań wykazały, że zapłon plazmowy w porównaniu do zapłonu czarnoprochowego powoduje znacząco niższe ciśnienia maksymalne gazów prochowych w przestrzeni zapociskowej, przy jednoczesnym zachowaniu podobnej prędkości wylotowej pocisków.

W pracy [30] porównano zapłon prochów typu LOVA za pomocą prochu czarnego oraz zapłonu plazmowego. Przebadany został małowrażliwy materiał miotający na bazie heksogenu ze spoiwem CAB typu NL008. Badania wykonane zostały dla dwóch gęstości ładowania 500 kg/m^3 oraz 700 kg/m^3 oraz w trzech temperaturach: $+21$, -20 oraz -40°C . Dla porównania podobnym badaniom został proch trójbazowy, jednakże tylko przy gęstości ładowania 500 kg/m^3 .

Do badań wykorzystano 45 mm gładkolufowe stanowisko badawcze. Dla gęstości ładowania 500 kg/m^3 przy klasycznym materiale miotającym minimalna masa prochu czarnego, która umożliwiała zapłon to 2 gramy. Należy zauważyć, że wraz z obniżaniem masy prochu czarnego następowało wydłużanie czasu t_2 opóźnienia zapłonu. Dla prochu małowrażliwego graniczną masą prochu czarnego poniżej której nie następował jego zapłon było 5 gramów. Linie przerywane na rysunku 1.18 oraz 1.19 oznaczają granicę, poniżej której nie odnotowano zapłonu materiału miotającego.

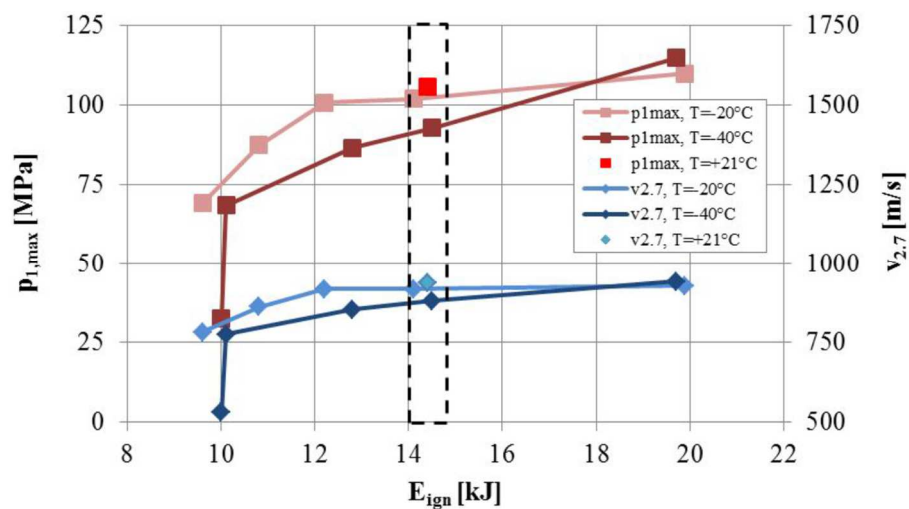


Rys. 1.18. Opóźnienie zapłonu (t_2) w funkcji masy prochu czarnego (m_{BP}) dla klasycznego materiału miotającego oraz dla materiału małowrażliwego. Badania przy gęstości ładowania 500 kg/m^3 [30]

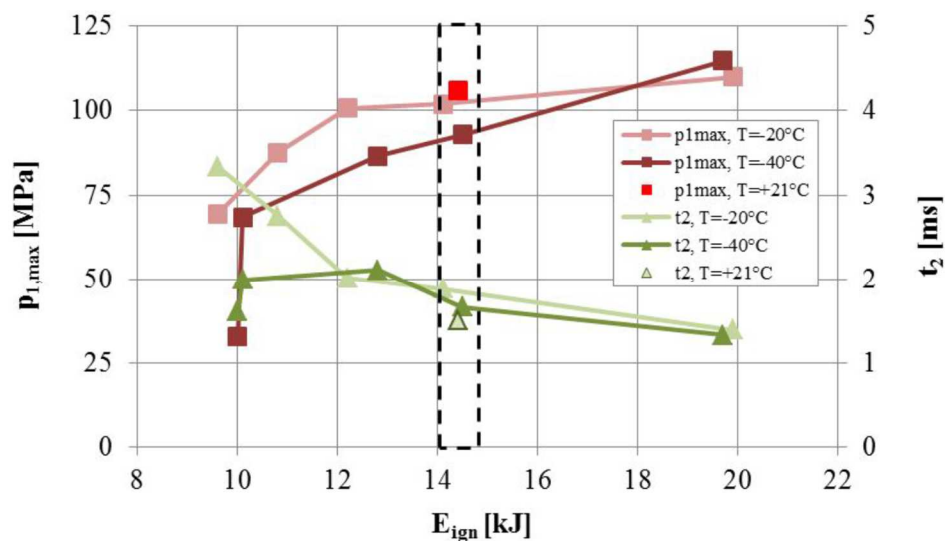


Rys. 1.19. Opóźnienie zapłonu (t_2) w funkcji energii plazmy E_{ign} dla klasycznego materiału miotającego oraz dla materiału małowrażliwego. Badania przy gęstości ładowania 500 kg/m^3 [30]

Powyższe badania przeprowadzone zostały dla temperatury prochu 21°C. Niższe temperatury prochów wymagały zastosowania większych energii wyładowania. Minimalną energią wyładowania dla temperatury -40°C było 10 kJ. Przebadany został także wpływ zapłonu na prędkość wylotową oraz ciśnienie maksymalne przy różnych energiach wyładowania dla zapłonu plazmowego. Badania przeprowadzono dla trzech temperatur prochu. Ciśnienie mierzone było wewnątrz komory spalania ($p_{1,max}$), a prędkość pocisków mierzona była w odległości 2,7 metra od wylotu lufy ($v_{2,7}$) (rys. 1.20). Optymalną energią wyładowania dla badanego układu miotającego została ustalona na poziomie 14 kJ, a niemalże pełną kompensację wpływu temperatury początkowej na ciśnienie maksymalne uzyskano przy wyładowaniach rzędu 20 kJ (rys. 1.21)



Rys. 1.20. Ciśnienie gazów oraz prędkość pocisku w funkcji energii zapłonu dla różnych temperatur małowrażliwego materiału miotającego. [30]



Rys. 1.21. Ciśnienie oraz czas opóźnienia zapłonu w funkcji energii zapłonu dla różnych temperatur małowrażliwego materiału miotającego [30]

Porównanie energii potrzebnej do zapłonu klasycznych wielokanalikowych materiałów miotających przy zastosowaniu zapłonu plazmowego oraz czarnoprochowego przedstawiono w [31]. Z przeprowadzonych badań wynika, że stosowanie zapłonu plazmowego powoduje bardziej równomierny zapłon poprzez swoją charakterystyczną nadciekłość plazmy. Przy tej samej energii przy zapłonie klasycznym i plazmowym, zapłon następuje szybciej przy zapłonie plazmowym. Zapłon następuje na dużo większej powierzchni wewnątrz kanalików jak i na powierzchni zewnętrznej ziaren badanego prochu. Nadciekły charakter plazmy umożliwia większą penetrację medium zapłonowego do wnętrza wąskich kanalików.

Kolejną unikalną właściwością zapłonu plazmowego jest obniżenie wpływu temperatury początkowej ziarna na ciśnienie maksymalne i prędkość wylotową pocisków. Przy zapłonie klasycznym z prochem czarnym, im niższa jest temperatura początkowa materiałów miotających tym niższa prędkość wylotowa pocisku. Związane jest to ze stratą części energii na rozgrzanie ziaren prochowych. Znacząca redukcja wpływu temperatury początkowej nastąpiła po zastosowaniu zapłonu plazmowego szczególnie w przedziale niskich wartości temperatury. Sprawdzone zostało to dla różnych energii wyładowania i przy energiach rzędu 30 kJ redukcja wpływu temperatury nadal była widoczna.

Szczególnie interesującym wynikiem pracy [15] jest wzrost sprawności procesu zapłonu wraz z gęstością ładowania. Wykazano, że ze standardowego działa 105 mm z zapłonem plazmowym uzyskano energię kinetyczną pocisku porównywalną do energii kinetycznej pocisku wystrzelonego z działa o kalibrze 120 mm. Przy okazji wpływ temperatury początkowej (10°C, 21°C, 52°C) został zredukowany do mniej niż 1% wartości prędkości wylotowej dla temperatury normalnej.

Interesujące badania przeprowadził również niemiecko – szwedzki zespół pod kierownictwem Denny Aberg, który opracował laboratoryjne stanowisko do badań pirodynamicznych wyposażone w 45 mm gładkolufowy układ miotający [32].

W eksperymencie wykorzystano komorę spalania o pojemności 795 cm³ oraz proch o oznaczeniu NL008. Jest to proch kompozytowy na bazie heksogenu o sile 1,146 MJ/kg. Wyniki badań z zapłonem plazmowym przedstawiono dla dwóch wartości temperatury: -20°C i temperatury normalnej oraz dla gęstości ładowania 500 kg/m³. Dla obu wartości temperatury uzyskano podobne wartości prędkości wylotowej. Dla niższej temperatury energia wyładowania wynosiła 19,9 kJ, a dla temperatury

normalnej 14,4 kJ. Opublikowane wyniki badań potwierdzają możliwość uzyskania podobnych prędkości wylotowych niezależnie od temperatury początkowej prochu.

W kolejnej pracy [33] przedstawiane zostały badania pirodynamiczne z wykorzystaniem działa 40 mm 40/70 KULSGR 95. W amunicji badawczej usunięto zapłonnik, aby można było wprowadzić impuls plazmy do wnętrza łuski. Strzelanie przeprowadzono przy niskich wartościach energii wyładowania, aby sprawdzić jaka jest minimalna wartość energii, przy której następuje zapłon. Pozwoliłoby to ograniczyć pojemność kondensatorów. Badania wykazały, że 15 kJ energii dostarczonej do komory spalania umożliwia pełny zapłon.

Niemiecki program badawczy jest najbardziej rozwiniętym i udokumentowanym w publikacjach programem rozwoju dział elektro-termo-chemicznych [34]. W programie tym mają zastosowania działa laboratoryjne o kalibrach 45 mm, 70 mm oraz 120 mm i 155 mm. Głównym działem wykorzystywanym w badaniach pirodynamicznych jest dział kalibru 120 mm i długości lufy 55 kalibrów.

Do strzelań wykorzystano proch kompozytowy oparty na Bu-NENA (N-butyl-N-nitrateoethyl nitramina). Dla początkowych temperatur prochu 50°C i 21°C uzyskano energię początkową pocisku ok. 14 MJ z możliwością uzyskania 15 MJ w szerszym zakresie temperatur (od – 40°C do 50°C). Związane to jest z niższym ciśnieniem maksymalnym uzyskiwanym przy zapłonie plazmowym. Do strzelań wykorzystywane są elementy standardowej amunicji ze spalającą się łuską i zmodyfikowanym denkiem. W denku amunicji wykonano przepust z izolacją wysokonapięciową i umieszczono trzy generatory typu CPG z umieszczonymi w środku dwiema przekładkami wykonanymi z wysokoenergetycznego materiału miotającego. Wykonane w ten sposób zapłonniki pozwalają na realizację zapłonu w większej objętości, co umożliwia wykorzystanie większych gęstości ładowania niż przy zapłonie konwencjonalnym. W układzie miotającym opartym na armacie 120 mm/L55 stosowano ładunki prochowe o masie do 9,5 kg pozwalającego na uzyskanie ciśnienia maksymalnego w lufie o wartości 670 MPa.

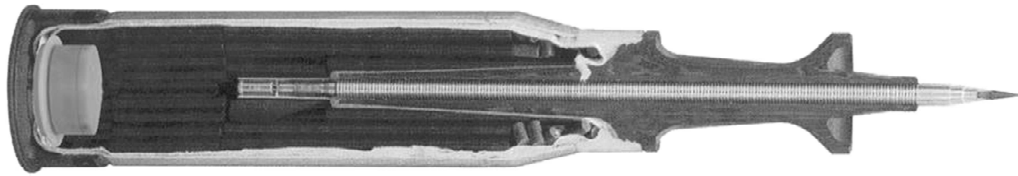
Kolejnymi badaniami wykonanymi przez niemiecki zespół z Rheinmetall W&M GmbH było badanie strzelaniem z działa 155 mm z 1 workiem ładunku modułowego [35]. Takie strzelanie z klasycznym zapłonikiem nie jest możliwe do zrealizowania ze względu na dużą objętość swobodną w komorze spalania. Powodowało to duży rozrzut prędkości wylotowej, a w granicznych przypadkach zgaśnięcie ładunku prochowego podczas poruszania się pocisku i spadek ciśnienia wewnątrz komory naboju.

Badania z zapłonem plazmowym przeprowadzono dla energii wyładowania od 5 kJ do 20 kJ. Zapłon uzyskano dla każdej energii wyładowania nawet przy ładunku maksymalnie odsuniętym od zapłonika. Czas narastania ciśnienia od momentu zapłonu do osiągnięcia ciśnienia maksymalnego wynosił około 120 ms dla energii wyładowania równej 5 kJ oraz 90 ms dla energii 10 kJ. Natomiast czasy od 10% do 90% ciśnienia maksymalnego dla różnych energii wyładowania były zbliżone i wynosiły średnio $26,5 \pm 3$ ms.

Następnym dużym układem miotającym opisanym w literaturze jest 120 mm działło laboratoryjne z Beijing Institute of Special Electromechanical Technology [36]. W artykule przedstawione zostały wyniki laboratoryjne strzelań dla różnych energii ładowania. Zmniejszanie energii wyładowania w komorze nabojeowej od 200 kJ do 20 kJ nie wykazało wpływu na opóźnienie czasu narastania ciśnienia oraz czasu trwania strzału.

Innym zastosowaniem układu miotającego z zapłonem plazmowym jest dwustopniowe działło hipersoniczne na gaz lekki opracowane w Kyushu Institute of Technology w Japonii [37]. Działło opracowywane zostało do badań oddziaływania cząstek materii poruszających się ze znacznymi prędkościami w przestrzeni kosmicznej z projektowanymi strukturami kosmicznymi. W pierwszym stopniu układu miotającego wykorzystywano jako paliwo azotan amonowy z pyłem aluminiowym i polioxymentylenem (w stosunku masowym odpowiednio 5:1:2). Do zapłonu tej mieszaniny zastosowano proch czarny, który dawał duży rozrzut czasu zapłonu (do 5 ms). Zapłon za pomocą specjalnie skonfigurowanego układu plazmowego umożliwił skrócenie czasu opóźnienia zapłonu do 400 μ s. Przy zapłonie czarnoprochowym uzyskano prędkość wylotową 2,79 km/s, a przy plazmowym 2,96 km/s. Zapłon plazmowy pozwolił także na podniesienie gęstości ładowania układu i wykorzystania 12 g materiału miotającego (8 g w układzie klasycznym) i uzyskanie prędkości wylotowej 3,98 km/s.

W raporcie [38] przedstawiono prototypową amunicję M829A2 kalibru 120 mm w której wykorzystano zapłonnik plazmowy (rys. 1.22). Amunicja ta jest przeznaczona do działa XM291, w którym wykorzystano układ elektryczny o maksymalnym napięciu ładowania równym 6,5 kV i energii zgromadzonej w kondensatorach około 100 kJ. Zapłonnik plazmowy składał się z kilku generatorów plazmy typu CPG ułożonych równolegle (rys. 1.23)



Rys. 1.22. Prototypowa amunicja M829A2 kalibru 120 mm z zapłonikiem plazmowym [38]



Rys. 1.23. Zapłonnik plazmowy wykorzystywany w amunicji czołgowej kalibru 120 mm M829A2 [38]

1.4. Podsumowanie

Wraz z rozwojem właściwości eksploatacyjnych amunicji w kierunku obniżenia wrażliwości na bodźce zewnętrzne zachodzi potrzeba poszukiwania efektywnych układów zapłonowych dla prochów małowrażliwych. Potrzeba ta obejmuje zarówno obszar badań pirostatycznych jak i pirodynamicznych.

W przypadku badań pirostatycznych konieczne jest opracowanie zarówno metod badań z wykorzystaniem zapłonu plazmowego oraz metod analizy wyników badań prochów pod kątem pozyskania informacji o wartościach charakterystyk energetyczno – balistycznych prochów jako danych wejściowych do modelowania pracy układów miotających z zapłonem plazmowym.

Najpopularniejszym układem generatora plazmy w badaniach pirostatycznych oraz w układach miotających jest układ CPG z kapilarą wykonaną z polietylenu o wysokiej gęstości. Rozwiązanie takie zapewnia niskie oddziaływanie gazów prochowych z plazmą oraz osłania wrażliwe miejsca łączenia metalowego drutu z elektrodami przed uszkodzeniami mechanicznymi.

Przegląd istniejących rozwiązań konstrukcyjnych generatorów plazmy nakierował autora na użycie układu o możliwie niskim napięciu na kondensatorach. Podyktowane to jest dwoma czynnikami:

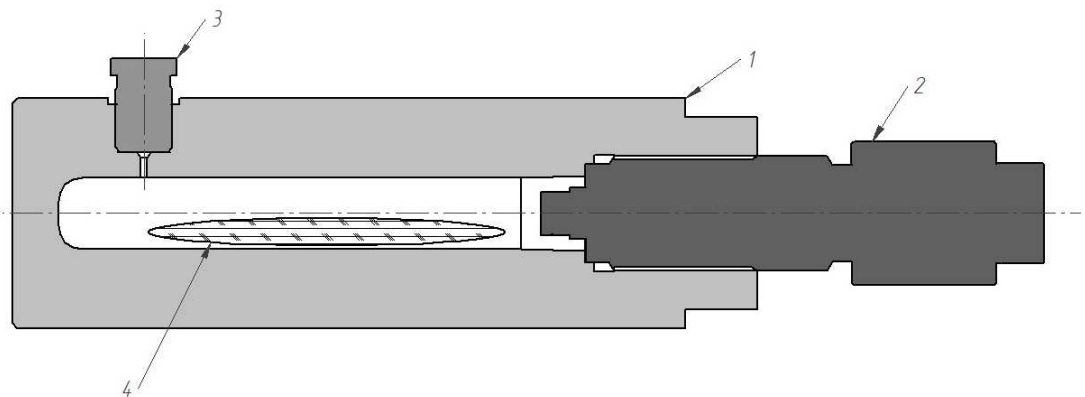
- 1) bezpieczeństwem użytkowników wykonujących badania oraz przyszłych użytkowników układów miotających;
- 2) dotychczasowe rozwiązania opierały się na wysokich energiach wyładowania, a niewiele jest doświadczeń z niskimi wartościami energii.

ROZDZIAŁ II

Opracowanie stanowiska badawczo-pomiarowego do badań pirostatycznych z wykorzystaniem generatora plazmy typu CPG

2.1. Koncepcja układu generacji plazmy

Autor rozprawy założył, że w opracowywanym stanowisku badawczo-pomiarowym do badań pirostatycznych z zapłonem plazmowym zostanie zastosowana – znajdująca się w Laboratorium Balistyki WAT – komora manometryczna przeznaczona do badań pirostatycznych z zapłonem czarnoprochowym przedstawiona schematycznie na rys. 2.1.



Rys. 2.1. Schemat komory manometrycznej: 1 – korpus, 2 – korek zamykająco-zapłonowy, 3 – przetwornik ciśnienia, 4 – badany proch

Na potrzeby badań będących przedmiotem rozprawy koniecznym było zaprojektowanie i wykonanie nowej wersji korka zamykająco-zapłonowego, który umożliwiłby zarówno realizację zapłonu plazmowego jak i zapłonu czarnoprochowego. W związku z tym sformułowane zostały następujące wymagania w stosunku do układu generującego plazmowy impuls zapłonowy:

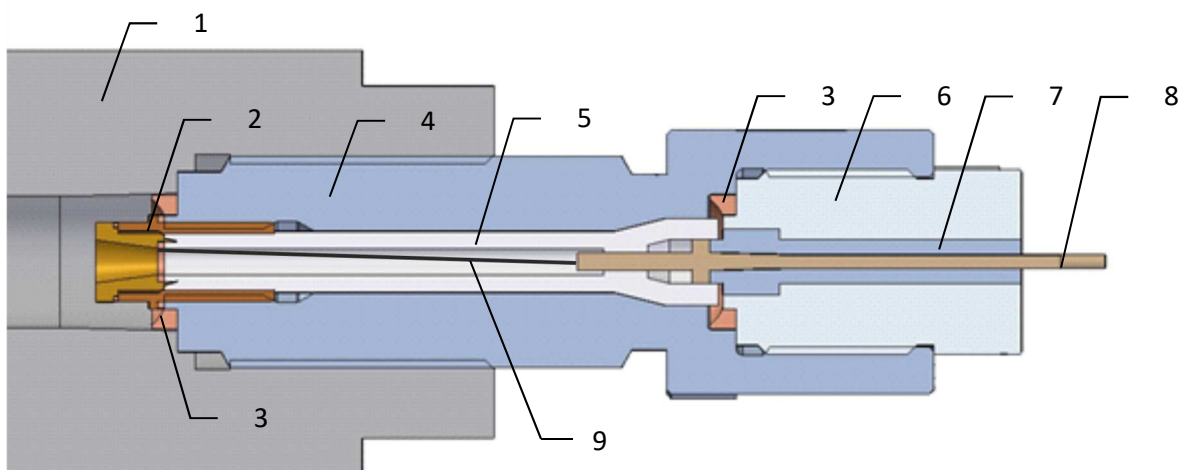
1. Generator plazmy powinien być częścią korka zamykająco-zapłonowego i powinien być tak skonstruowany, by umożliwić również realizację zapłonu czarnoprochowego.

2. Na podstawie analizy przeprowadzonej w rozdziale I ustalono, że generator plazmy zostanie wykonany w układzie osiowym jako kapilarowy generator plazmy (generator typu CPG).
3. Układ ładowania i rozładowania powinien pracować z możliwie niskim napięciem (do 4,5 kV) zapewniając przy tym powtarzalność impulsu zapłonowego.

2.2. Opis opracowanego układu generatora plazmy CPG

Do generacji plazmowego impulsu zapłonowego wykorzystano ideę układu CPG, którego schemat zaprezentowano na rys. 1.5 w rozdziale 1. Zaprojektowany i wykonany na potrzeby niniejszej pracy generator plazmy zaprezentowano na rys. 2.2 (schemat) i rys. 2.3 (wykonanie praktyczne).

Elementem inicjującym powstawanie plazmy jest drut (9) o długości ok. 100 mm. Izolację elektryczną zapewniają tulejka izolacyjną (5) wykonana z polietylenu o wysokiej gęstości (PE-HD 1000) oraz izolacja elektrody dodatniej (7) wykonana z tekstolitu. Uszczelnienie komory manometrycznej realizowane jest poprzez odkształcenie miedzianych uszczelek (3)



Rys. 2.2. Schemat generatora plazmy:

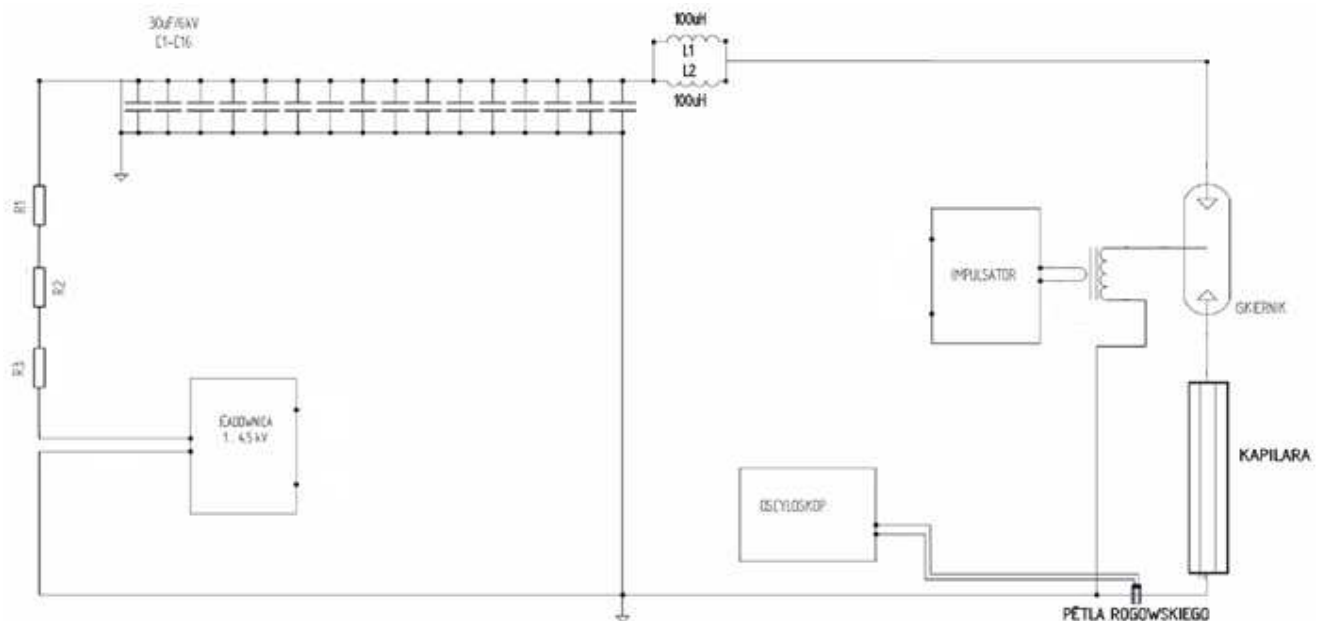
- 1 – korpus komory manometrycznej, 2 – elektroda ujemna (masowa), 3 – uszczelka,
 4 – korpus zapłonika, 5 – tulejka izolacyjna, 6 – korek, 7 – izolacja elektrody dodatniej (centralnej),
 8 – elektroda dodatnia (centralna), 9 – drut inicjujący



Rys. 2.3. Generator plazmy

Aby generator plazmy wykorzystać w roli korka zamykającego z zapłonem czarnoprochowym należy jeden przewód elektrycznej główki zapalczącej podłączyć do elektrody centralnej (8), drugi do elektrody masowej (2). Po podaniu napięcia przewidzianego przez producenta elektrycznej główki zapalczącej na elektrody nastąpi zapłon prochu czarnego w komorze manometrycznej.

Wspomagający generację plazmy układ elektryczny (rys. 2.4) składa się z 16 kondensatorów o pojemności $30\ \mu\text{F}$ każdy, z maksymalnym napięciem ładowania $6\ \text{kV}$. Do budowy układu do generacji plazmy zastosowano także ładownicę o napięciu ładowania $6\ \text{kV}$ oraz natężeniu prądu ładowania $300\ \text{mA}$. Do inicjacji rozładowania baterii kondensatorów posłużył iskiernik oraz zasilacz podający iskrę na jedną elektrodę iskiernika.



Rys. 2.4. Schemat elektryczny układu generatora plazmy

2.2.1. Wybór materiału inicjującego powstawanie plazmy w generatorze

Równocześnie z wyznaczaniem parametrów układu elektrycznego prowadzone były badania wpływu materiału, z którego powinien być wykonany drut w generatorze plazmy, na rozmiar obłoku generowanej plazmy. Rozmiar obłoku generowanej plazmy był określony za pomocą kamery do rejestracji procesów szybkozmiennych. Generator plazmy umieszczono w uchwycie mocującym a plazma była generowana do otwartej przestrzeni.

Do badania wybrano cztery materiały: miedź, żelazo, wolfram i nikiel. Właściwości fizyczne badanych materiałów przedstawione zostały w tabeli 2.1.

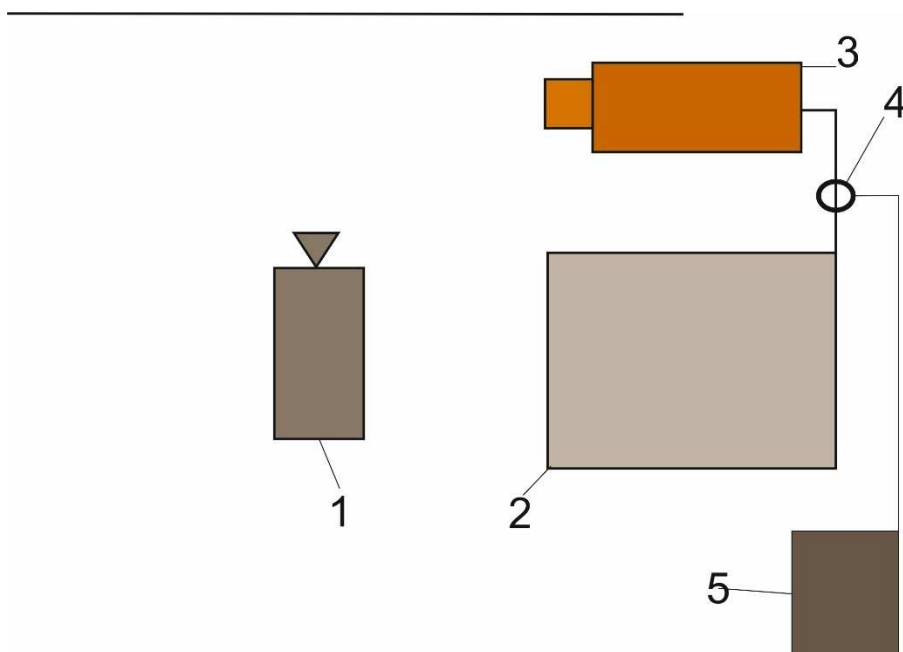
Tabela 2.1. Właściwości fizyczne materiałów stosowanych w generatorze plazmy

Parametr	Miedź	Żelazo	Wolfram	Nikiel
Symbol, liczba atomowa	Cu, 29	Fe, 26	W, 74	Ni, 28
Gęstość, kg/m ³	8920	7874	19250	8908
Temperatura topnienia, °C	1084,62	1538	3422	1455
Temperatura wrzenia, °C	2562	2861	5927	2913
Ciepło parowania, kJ/mol	300,3	349,6	824	370,4
Ciepło topnienia, kJ/mol	13,05	13,8	35,4	17,47
Ciepło właściwe, J/(kg·K)	380	449	130	440
Konduktywność, S/m	59,6×106	9,93×106	18,9×106	14,3×106

Wstępne badania eksperymentalne przeprowadzone zostały z użyciem przewodu miedzianego. Miedź ma dużą przewagę nad innymi materiałami ze względu na niską temperaturę topnienia i wrzenia. Ponadto ciepło właściwe oraz ciepło parowania i topnienia mają niskie wartości. Jest to ważne z punktu widzenia energii elektrycznej, która musi zostać zużyta na stopienie i odparowanie przewodu. Dopiero pozostała energia w układzie elektrycznym zamieniana jest na energię plazmy. Jednak podstawową wadą miedzi jest jej wysoka konduktywność. Im wyższa konduktywność danego materiału w generatorze plazmy, tym większe prawdopodobieństwo dyssypacji energii na innych elementach układu.

Przeprowadzone badania z wykorzystaniem kamery do rejestracji zdjęć z dużą częstotliwością wykazały znaczące różnice w generacji chmury plazmy dla różnych materiałów, z którego wykonany był drut w generatorze plazmy. Do badań wykorzystano kamerę Phantom v12.

Rejestracje realizowano z częstotliwością 44 025 klatek na sekundę przy czasie naświetlania pojedynczej klatki 1,99 μ s. Do pomiarów natężenia prądu płynącego w obwodzie wykorzystano pętle Rogowskiego założoną na przewód pomiędzy baterią kondensatorów, a generatorem plazmy (rys. 2.5).



Rys. 2.5. Schemat stanowiska do badań generatora plazmy. 1 – kamera Phantom v12, 2 – układ ładowania, 3 – generator plazmy, 4 – pętla Rogowskiego, 5 – oscyloskop

Podczas badania generatora plazmy z wykorzystaniem drutu miedzianego zastosowano drut o średnicy 0,7 mm. Baterię kondensatorów naładowano do napięcia 4 kV. Wyniki rejestracji (rys. 2.6) pokazały generację dużej chmury plazmy rozchodzącej się w powietrzu z prędkością ponad 600 m/s. Nie zarejestrowano stałych fragmentów drutu wydostającego się z generatora. Odparowaniu uległ niemal cały drut, pozostał jedynie fragment przy dyszy generatora plazmy.



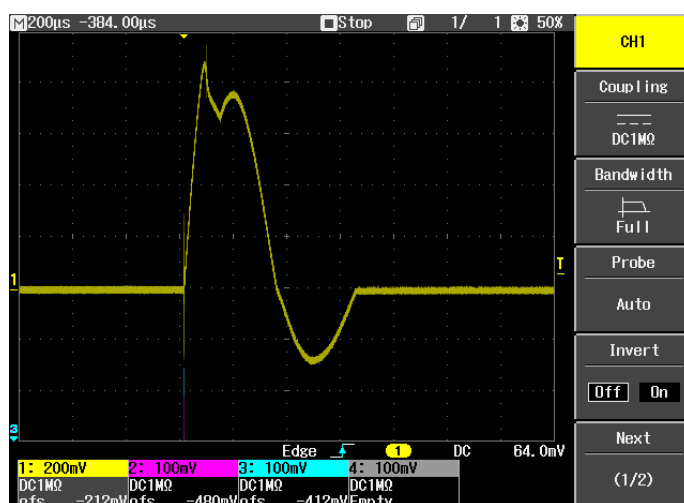
Rys. 2.6. Generacja plazmy z wykorzystaniem drutu miedzianego

Podczas testów drutu wolframowego zastosowano drut o średnicy 0,5 mm. Kondensatory zostały naładowane do napięcia 4 kV. W przypadku drutu z wolframu uzyskano niewielkie jarzenie się obłoku plazmy oraz dostrzeżono duże ilości materiału, który pozostał w formie gazowej lub w formie drobnych cząstek stałych (czerwona obwódka na rys. 2.7). Ilość energii, która została przekazana do generatora plazmy była niewystarczająca, aby w pełni odparować wolfram i wymusić jonizację gazów w komorze. Wolfram pomimo niskiej przewodności, która gwarantowała wydzielenie się energii na przewodniku, nie dawał satysfakcjonujących wyników. Zaobserwowano jedynie znacznie głośniejsze efekty dźwiękowe (huk) w przypadku wykorzystywania zapłonika z drutem wolframowym.



Rys. 2.7. Generacja plazmy z wykorzystaniem drutu wolframowego

Zarejestrowane przebiegi prądowe przy badaniu drutu wolframowego (rys. 2.8) pokazują, że po przerwaniu drutu nie nastąpiło pełne wyładowanie kondensatorów przez plazmę. Spadek natężenia prądu i powrót do oscylacji sugerują, że nastąpiło stopienie części materiału i zwarcie.



Rys. 2.8. Przebieg prądu przy badaniu drutu wolframowego

Kolejnym materiałem, który został wykorzystany w generatorze plazmy jako materiał inicjujący powstawanie plazmy był nikiel. Baterię kondensatorów naładowano do napięcia 4 kV, przy identycznej konfiguracji jak w przypadku badania drutu wolframowego. Podczas generacji chmury plazmy za pomocą drutu niklowego obraz zarejestrowany na kamerze szybkiej przedstawiał dużą chmurę zjonizowanego gazu. Jednakże po prześledzeniu filmu klatka po klatce, na zarejestrowanych zdjęciach można zauważyć fragmenty drutu, który nie został odparowany i opuścił generator w kawałkach (czerwona obwódka na rys. 2.9).



Rys. 2.9. Generacja plazmy z wykorzystaniem drutu niklowego

Czwartym badanym materiałem, z którego był wykonany drut w generatorze plazmy było żelazo. Materiał ten został wytypowany na podstawie zbliżonych wartości właściwości fizycznych do miedzi (tab. 2.1). Żelazo posiada jednak dużo niższą przewodność elektryczną, co pozwalałoby sądzić, że większa energia zostanie wydzielona w postaci plazmy. W badaniach zastosowano drut o średnicy 0,5 mm. Jednak podobnie jak w przypadku drutu niklowego i wolframowego, podczas badania nie nastąpiło całkowite odparowanie materiału i duże fragmenty drutu opuszczały generator (czerwona obwódka na rys. 2.10)



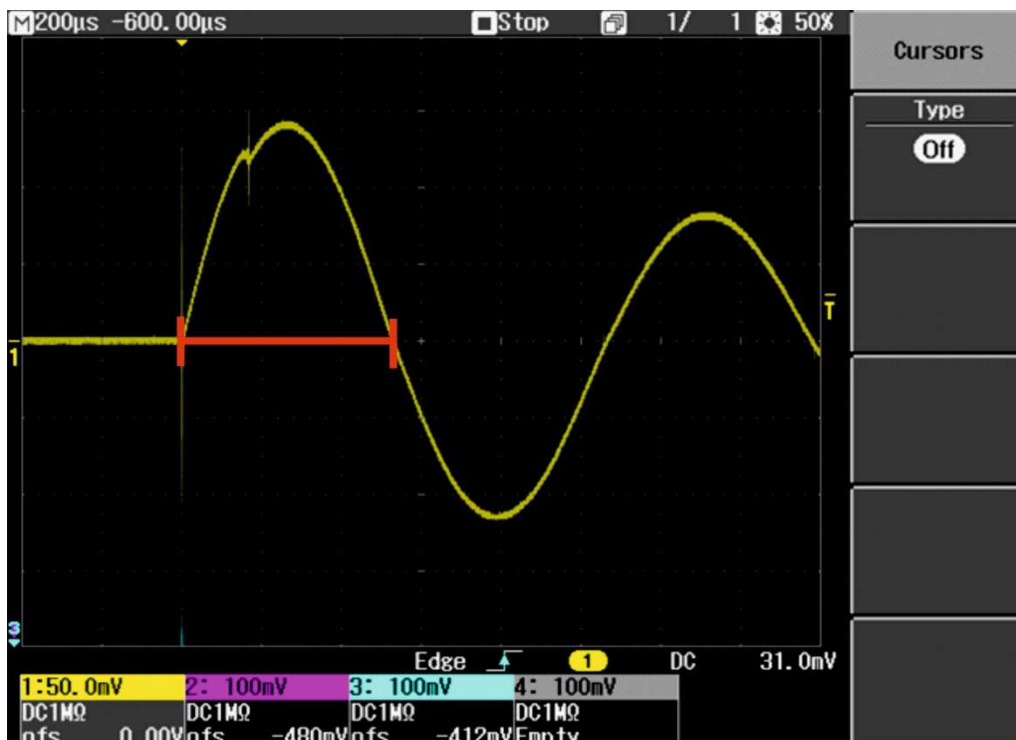
Rys. 2.10. Generacja plazmy z wykorzystaniem drutu żelaznego

Zastosowanie w generatorze plazmy różnych materiałów, które teoretycznie powinny dawać większą ilość energii wyładowanej w postaci plazmy, nie przyniosło oczekiwanych rezultatów, ponieważ duża część materiału pozostawała nieprzereagowana, co spowodowane było nierównomiernym nagrzewaniem się i odparowywaniem materiału. Pękanie drutu podczas wyładowania (por. rys. 1.2) powodowało odparowanie i jonizację gazów z fragmentów, które były inicjatorami pęknięcia. Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych można stwierdzić, że ze względu na wysoką przewodność przewodu miedzianego wraz z niskim ciepłem właściwym oraz niskimi temperaturami topnienia i wrzenia miedzi jest ona najlepszym spośród przebadanych materiałem inicjującym powstawanie plazmy w generatorach CPG. Znajduje to również potwierdzenie w doniesieniach literaturowych. Wysoka przewodność powoduje, że nawet podczas odparowania części materiału w punktach inicjujących pękanie, część prądu nadal przepływa przez nieodparowane fragmenty powodując dalsze nagrzewanie drutu. Z kolei niska wartość ciepła właściwego powoduje, że mniejsza część energii zgromadzonej w kondensatorach zużyta jest na odparowywanie materiału, a w związku z tym pozostała część energii przeznaczana jest na nagrzewanie plazmy.

2.2.2. Określenie warunków pracy opracowanego układu generatora plazmy

Badania wstępne układu generacji plazmy przeprowadzone zostały również pod kątem dopasowania układu zapłonika do oporności plazmy. Drut miedziany oraz inne przetestowane materiały, czyli nikiel, wolfram i żelazo posiadają niewielką oporność rzędu 1 Ω . Drut po odparowaniu ułatwia jonizację gazów, jednak zmienia on także oporność całego układu. Problem ten powodował niepełne rozładowanie baterii kondensatorów lub przeładowanie i powrót części ładunku na kondensatory poprzez przewód zerowy układu.

Przy skrajnym niedopasowaniu parametrów układu następowało kilkukrotne przeładowanie kondensatorów, co jest niepożądanym zjawiskiem ze względu na niewielką ilość energii, która została przekazana do plazmy. Do rozpalenia ziaren prochowych jest wykorzystywana część energii wynikająca z przebiegu napięcia (przedstawionego na oscylogramie – rys. 2.11) - tylko do momentu pierwszego przejścia przez zero (czerwona linia na rys. 2.11).



Rys. 2.11. Oscylogram natężenia prądu z rozładowania kondensatorów

Przejście na ujemne wartości napięcia spowodowane jest powrotem części energii na kondensatory. Przewodzenie prądu w tym wypadku realizowane jest już nie przez plazmę, a przez gaz znajdujący się w generatorze oraz cząsteczki węgla, które powstały w wyniku spalania części rurki polietylenowej.

Na żywotność układu elektrycznego oraz długość trwania impulsu plazmy znaczący wpływ ma indukcyjność w układzie. Zgodnie z poniższym wzorem częstotliwość drgań w układzie LC wynosi:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (2.1)$$

a okres trwania impulsu wyładowania wynosi:

$$T_i = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.2)$$

Po przekształceniach otrzymano wzór na okres impulsu rozładowania uwzględniający pojemność C oraz indukcyjność L :

$$T_i = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C} , \quad (2.3)$$

Im większa jest pojemność i indukcyjność układu tym dłuższy jest impuls rozładowania. Dodatkowo, aby uniknąć przeładowywania kondensatorów, należy

dobrac parametry układu elektrycznego w taki sposób, aby współczynnik ξ tłumienia był równy 1.

$$\xi = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (2.4)$$

Przy tak dobranym parametrze tłumienia okres T_i będzie równy całkowitemu czasowi rozładowania kondensatorów. Umożliwi to przekazanie większości energii z kondensatorów do plazmy.

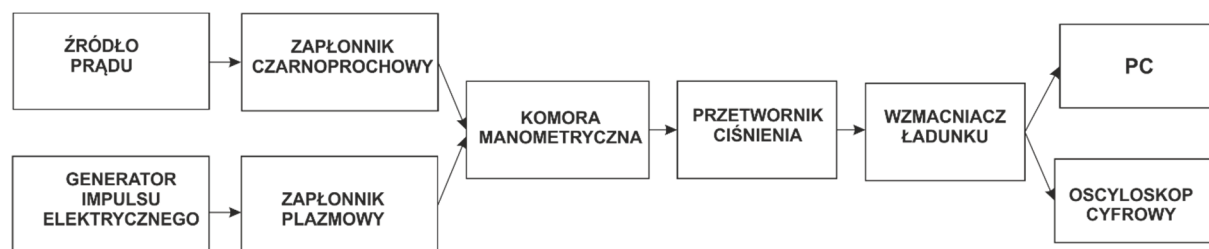
Mając na uwadze powyższy współczynnik tłumienia i okres impulsu, parametry układu generatora plazmy zostały tak dobrane, aby czas trwania był możliwie krótki. W początkowej fazie prowadzonych eksperymentów usunięta została indukcyjność z układu elektrycznego w celu generacji dużej mocy i uzyskania krótkich czasów rozładowania. Jednak w wyniku przeprowadzonych badań okazało się, że bardzo krótkie impulsy o czasie trwania poniżej 100 μ s nie powodowały zapalenia się ziaren prochowych, a jedynie ich przesunięcie wewnątrz komory spalania. Dodatkowy problem z niewielką indukcyjnością pokazuje wzór (2.4) opisujący tłumienie. Przy indukcyjności dążącej do zera oraz stałych parametrach pojemności oraz rezystancji uzyskujemy wysokie współczynniki tłumienia, które powodują obniżenie maksymalnej wartości prądu płynącego w obwodzie.

Początkowo dobrane parametry układu zakładały stałą rezystancję, pojemność i indukcyjność obwodu. Jediną rezystancją jaka wykorzystywana była w układzie rozładowania była rezystancja przewodów wysokiego napięcia łączących kondensatory z generatorem plazmy. Wprowadzenie każdej dodatkowej rezystancji, aby dopasować parametry układu, powodowałoby powstanie dzielnika mocy i większość energii wyładowywałaby się wówczas na rezystorze w postaci ciepła, a nie w plazmie. Dodatkowa rezystancja powodowałaby także ograniczenie maksymalnej wartości prądu rozładowania. Pierwsze doświadczenia pokazały jednak, że zarejestrowany przebieg prądu znacznie odbiega od zakładanego (rys. 2.11). Spowodowane to było bardzo krótkim czasem rozładowania, a co za tym idzie wysokimi częstotliwościami układu. W przypadku krótkiego czasu rozładowania, rzędu setek mikrosekund, należy rozpatrywać układ w kategorii urządzenia mikrofalowego i założyć powstawanie pojemności i indukcyjności na każdym elemencie układu, w szczególności na przewodach wysokoprądowych. Przewody ze względu na duży przekrój poprzeczny oraz dużą powierzchnię indukowały znaczące pojemności oraz indukcyjności w układzie. Wyznaczenie parametrów wyjściowych układu generatora

plazmy, który dawałby odpowiednio długi impuls jarzenia się plazmy oraz nie powodował przeładowania kondensatorów, przeprowadzone zostało doświadczalnie. Wykonano wiele wyładowań testowych, wykorzystując specjalne cewki do przebiegów szybkozmiennych, które umożliwiały pracę przy dużych wartościach natężenia prądu. Standardowe cewki dostępne na rynku nie wytrzymały tak dużych wartości natężenia prądu, rzędu kilkunastu kiloamperów, występujących w układzie i najczęściej w trakcie eksperymentu następowało ich rozwarstwienie. Podczas wyładowania w cewkach indukowało się pole elektromagnetyczne o wysokim natężeniu, powodujące odpychanie się sąsiednich zwojów cewki i jej pęknięcie. Dopiero zaprojektowanie i wykonanie specjalnych cewek, które były wykonane ręcznie i zalanie ich żywicą epoksydową o podniesionej wytrzymałości pozwoliło na ich bezpieczne i wielokrotne użytkowanie.

2.3. Stanowisko badawczo-pomiarowe

W celu realizacji badań pirostatycznych zestawiono układ badawczo - pomiarowy, którego schemat przedstawiono na rys. 2.12.

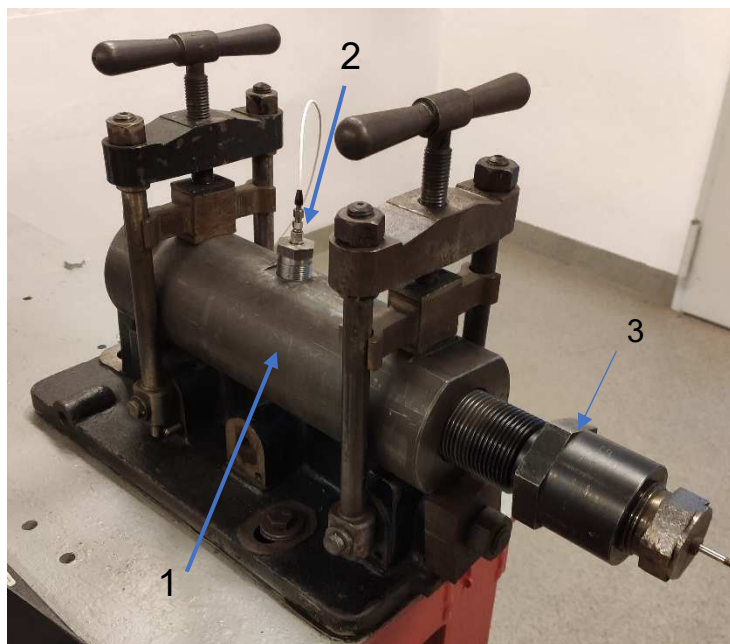


Rys. 2.12. Schemat stanowiska badawczo - pomiarowego do badań pirostatycznych

Głównymi elementami stanowiska badawczego są:

- komora manometryczna w postaci cylindrycznego naczynia grubościennego o pojemności 150 cm³ (rys. 2.13). Komora umożliwia spalanie materiału miotającego w stałej, zamkniętej objętości. W ścianie komory umiejscowiony jest czujnik ciśnienia. Komora zamykana jest korkiem wyposażonym w generator plazmy, z możliwością zastosowania zapłonika pirotechnicznego w postaci główki zapałczej z prochem czarnym,
- układ ładowania i rozładowania baterii kondensatorów wraz z baterią kondensatorów (rys. 2.14),

- piezoelektryczny czujnik ciśnienia zamieniający wielkość mechaniczną (ciśnienie) na ładunek elektryczny,
- wzmacniacz ładunku zamieniający proporcjonalnie wejściowe wartości ładunku na wartości napięcia wyjściowego,
- rejestrator w postaci komputera PC z przetwornikiem analogowo-cyfrowym lub oscyloskop TDS 2024 nr C101756.



Rys. 2.13. Widok komory manometrycznej: 1 – korpus komory, 2 – przetwornik ciśnienia, 3 – korek zamykająco - zapłonowy



Rys. 2.14. Elementy układu generacji plazmy: układ ładowania oraz rozładowania (po lewej) oraz bateria kondensatorów wraz z cewkami (po prawej)

Parametry techniczne elementów wykorzystanych do budowy stanowiska:

- generator impulsu elektrycznego:
 - pojemność bloku kondensatorów – 16x30 μF
 - indukcyjność elektryczna – 15 mH
 - impuls elektryczny: $U_{\text{max}} = 6 \text{ kV}$, $I_{\text{max}} = 20 \text{ kA}$
- piezoelektryczny czujnik ciśnienia 5QP 5000M nr 2106:
 - zakres pomiarowy – 6000 bar (600 MPa)
 - czułość – 2,29 pC/bar
 - nieliniowość – 0,3% FSO (full scale output)
- wzmacniacz ładunku elektrycznego TA-3/D nr J1233
 - nieliniowość < 0,05%.

2.4. Ocena dokładności układu pomiarowego

W wyniku spalania materiału miotającego w komorze manometrycznej następuje wzrost ciśnienia gazów powstałych ze spalania prochu. Ciśnienie to działa na element pomiarowy przetwornika ciśnienia. Ściskanie układu kryształów w czujniku ciśnienia powoduje pojawienie się ładunku elektrycznego, który następnie przekształcany jest przez wzmacniacz ładunku na proporcjonalne napięcie wyjściowe. Opisane jest ono liniową zależnością:

$$U_a = k_p \cdot k_w \cdot p \quad (2.5)$$

gdzie: k_p – czułość czujnika, k_w – charakterystyka przetwarzania wzmacniacza,
 p – ciśnienie działające na czujnik.

Ładunek elektryczny Q na wyjściu czujnika z ciśnieniem p związany jest zależnością:

$$Q = k_p \cdot p \quad (2.6)$$

Zależność pomiędzy ładunkiem, a napięciem opisuje się wzorem:

$$U_a = k_w \cdot Q \quad (2.7)$$

Przekształcając wzór 2.5 otrzymujemy:

$$p = \frac{U_a}{k_p \cdot k_w} \quad (2.8)$$

Wykorzystując wzór 2.8 do analizy błędów, otrzymujemy zależność na błąd systematyczny pomiaru ciśnienia:

$$f_p = \left| \frac{\delta p}{p} \right| = \left| \frac{\delta U_a}{U_a} \right| + \left| -\frac{\delta k_p}{k_p} \right| + \left| -\frac{\delta k_w}{k_w} \right|, \quad (2.9)$$

Jak wynika ze wzoru (2.9), na błąd systematyczny f_p będą miały wpływ składowe błędy liniowości toru pomiarowego:

$$\delta U_a = U_B \cdot (f_{W\dot{L}} + f_{PAC}), \quad (2.10)$$

gdzie: U_B – napięcie na wejściu wzmacniacza;

$f_{W\dot{L}}$ - błąd liniowości wzmacniacza ładunku;

f_{PAC} - błąd liniowości przetwornika analogowo-cyfrowego.

Podstawiając wzór (2.10) do wzoru (2.9) otrzymuje się wzór na względny systematyczny błąd układu pomiarowego:

$$f_p = \left[\frac{U_B}{U_a} \cdot (f_{W\dot{L}} + f_{PAC}) + f_{CP} + f_{W\dot{L}} \right] \%, \quad (2.11)$$

gdzie: f_{CP} – błąd czujnika piezoelektrycznego.

Podstawiając znane wartości błędów aparatury uzyskujemy maksymalny błąd pomiaru ciśnienia:

$$f_p = \left[\frac{U_B}{U_a} \cdot 0,07 + 0,3 \right] \%, \quad (2.12)$$

który dla $U_a = U_b$ wynosi 0,42%.

Proces spalania prochu jest zjawiskiem bardzo dynamicznym. Narastanie ciśnienia od ciśnienia atmosferycznego do kilkuset MPa trwa pojedyncze milisekundy. Rejestracja tak szybkozmiennego procesu wymaga sprawdzenia niezniekształcalności mierzonego sygnału pochodzącego od ciśnienia gazów prochowych:

$$t_m > t_E \quad (2.13)$$

gdzie: t_m - czas osiągnięcia wartości maksymalnej ciśnienia;

t_E - czas narastania przebiegu wg wzoru Shannona;

$$t_E = \frac{1}{2 \cdot f_{gg}}, \quad (2.14)$$

f_{gg} – górna częstotliwość graniczna.

Dla opracowanego układu pomiarowego najmniejszą częstotliwość graniczną posiada czujnik piezoelektryczny, którą można obliczyć z zależności:

$$f_{ggp} = 0,6 \cdot f_0 = 0,6 \cdot 240 \text{ kHz} = 144 \text{ kHz},$$

gdzie: f_0 – częstotliwość drgań własnych czujnika piezoelektrycznego wynosząca 240 kHz.

Warunek (2.13) należy sprawdzić dla elementu toru posiadającego najniższą częstotliwość graniczną, ze względu na to, że element ten będzie charakteryzował najdłuższy czas odpowiedzi na zadany sygnał. W zaprezentowanym układzie jest to czujnik piezoelektryczny. Wzmacniacz ładunku posiada częstotliwość graniczną równą 300 kHz, przetwornik A/C 1 MHz, natomiast częstotliwość graniczna oscyloskopu wynosi 40 MHz.

Układ pomiarowy, który zastosowany został w stanowisku badawczym przeznaczonym do badań pirostatycznych z wykorzystaniem zapłonu plazmowego i czarnoprochowego od wielu lat funkcjonuje w Laboratorium Balistyki i z powodzeniem wykorzystywany był w wielu pracach badawczych. Doświadczenia wyniesione z tych prac badawczych pokazały bardzo dużą powtarzalność uzyskiwanych wyników pomiarów.

2.5. Podsumowanie

W wyniku realizacji tego etapu rozprawy zestawiono stanowisko badawczo-pomiarowe umożliwiające przeprowadzenie badań będących przedmiotem rozprawy. Główny nacisk położono na opracowanie, wykonanie i przebadanie:

- a) podstawowego elementu korka zamykająco-zapłonowego komory manometrycznej w postaci generatora plazmy typu CPG
- b) niskonapięciowego układu ładowania i rozładowania.

W wykonanym układzie zastosowano 16 kondensatorów o pojemności 30 μF każdy. Bezpieczne napięcie ładowania ustalono na 4,5 kV co pozwala na pełne odparowanie drutu miedzianego o średnicy 0,7 mm. Opracowany układ posiada niskie napięcie ładowania co było założeniem autora dysertacji.

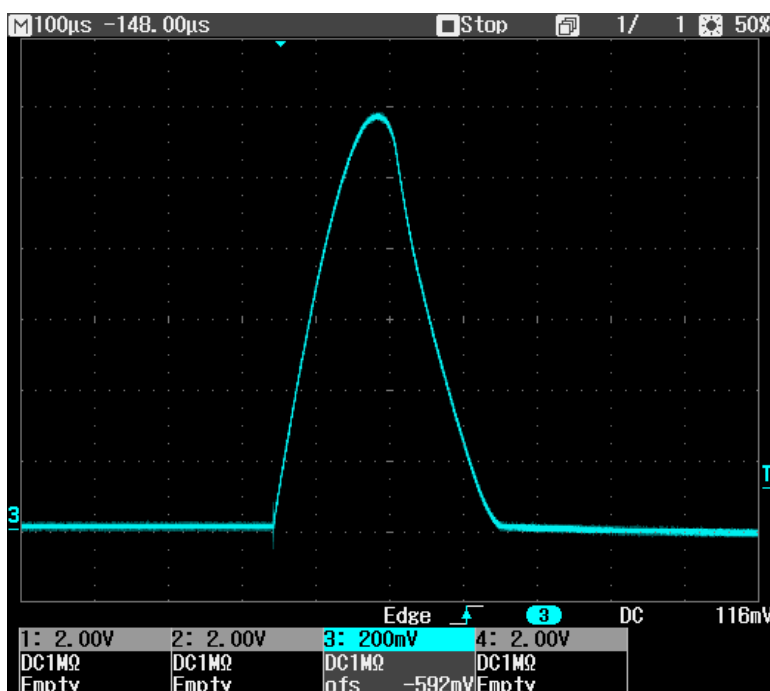
Po wprowadzeniu dodatkowej indukcyjności w obwód rozładowania uzyskano czas trwania impulsu elektrycznego na poziomie 300 μs przy pełnym rozładowaniu kondensatorów. Prąd w obwodzie rozładowania miał natężenie 12 kA.

Wartości parametrów opracowanego układu przedstawiono w tabeli 2.2.

Po dopasowaniu indukcyjności do pojemności i napięcia ładowania uzyskano przebieg prądowy przedstawiony na rys. 2.15 z jedną połówką „sinusoidy” o prądzie maksymalnym 12 kA oraz czasie osiągnięcia maksymalnej wartości natężenia prądu około 120 μs i całkowitym czasie trwania impulsu około 300 μs .

Tabela 2.2 Parametry układu generatora plazmy

Napięcie ładowania [kV]	4
Indukcyjność [mH]	50
Pojemność kondensatorów [μF]	480
Rezystancja obwodu ładowania [$\text{k}\Omega$]	100
Prąd maksymalny [kA]	12
Czas trwania impulsu elektrycznego [μs]	300
Materiał inicjujący plazmę w komorze	miedź



Rys. 2.15. Oscylogram z generacji impulsu prądowego w układzie dopasowanymi parametrami elektrycznymi

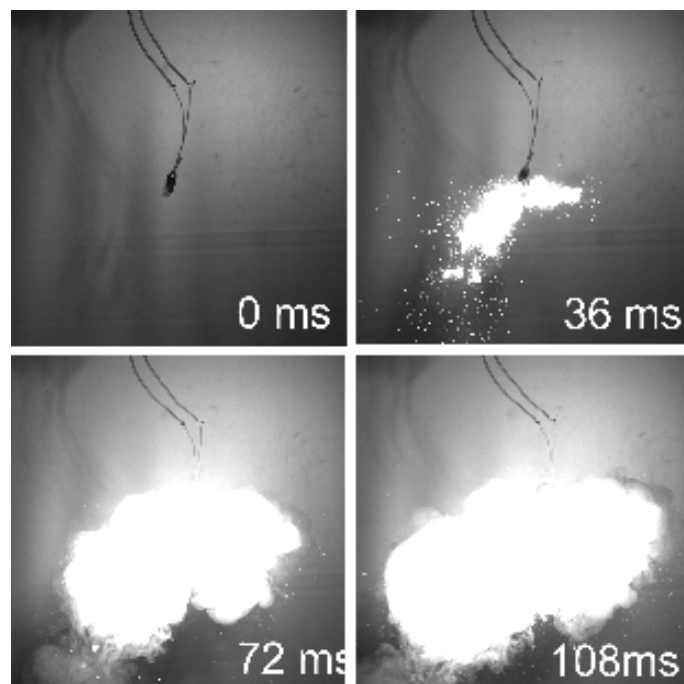
Na podstawie analizy literaturowej i porównania plazmowego układu zapłonowego opracowanego w Laboratorium Balistyki WAT z innymi układami plazmowymi można przyjąć, że temperatura wytwarzanej plazmy wynosi ok. 15 000 K.

ROZDZIAŁ III

Badania wstępne układów zapłonowych wykorzystujących proch czarny i plazmę jako medium zapłonowe

3.1. Czas generacji impulsu zapłonowego prochu czarnego i plazmy

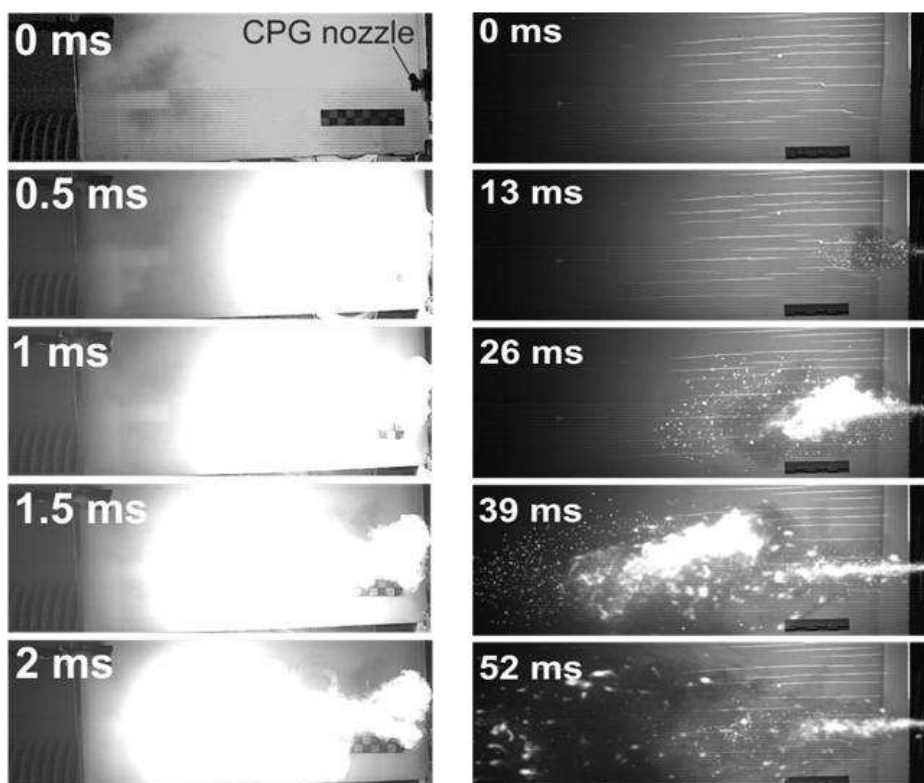
Porównano czasy generacji impulsu zapłonowego czarnoprochowego i plazmowego. Na rys. 3.1 pokazano poklatkowe zdjęcia z rejestracji kamerą do zdjęć szybkich procesu rozpalania się prochu czarnego umieszczonego w woreczku z tworzywa sztucznego. Proch czarny był zapalany główką zapalczą inicjowaną elektrycznie. Taki sposób zapłonu jest wykorzystywany tradycyjnie w badaniach pirostatycznych.



Rys. 3.1. Rozpalanie się woreczka z prochem czarnym wraz z główką zapalczą, stosowanych jako zapłonnik w badaniach pirostatycznych

Badania zostały przeprowadzone w otwartej przestrzeni pod ciśnieniem atmosferycznym. Wyraźnie widoczne są efekty w postaci żarzących się cząstek stałych (w 36 ms) które to wyprzedzają tworzenie się obłoku gorących gazów.

Na rys. 3.2 zaprezentowano porównanie faz tworzenia się impulsu plazmowego i czarnoprochowego generowanych w komorze o określonej objętości z możliwością przemieszczania się efektów poza komorę. Proces zapłonu, czyli podanie sygnału elektrycznego do obu układów zapłonowych, został uruchomiony w tym samym czasie.



Rys. 3.2. Porównanie czasów generacji: plazmy (po lewej) oraz gazów i gorących punktów powstałych z zapłonnika czarnoprochowego (po prawej)

Porównując efekty generacji obu impulsów zapłonowych widoczne jest znacznie szybsze tworzenie się obłoku plazmowego impulsu zapłonowego w stosunku do zapłonu czarnoprochowego. Można zauważyć, że rozpalanie się prochu w komorze przy zapłonie czarnoprochowym trwa kilkanaście ms a czas tworzenie obłoku plazmy jest rzędu dziesiątych części ms. Na etapie rozpalania się prochu czarnego zdążył się już uformować zasadniczy obłok pochodzący z zapłonu plazmowego.

3.2. Ciśnienie generowane przez układ plazmowy

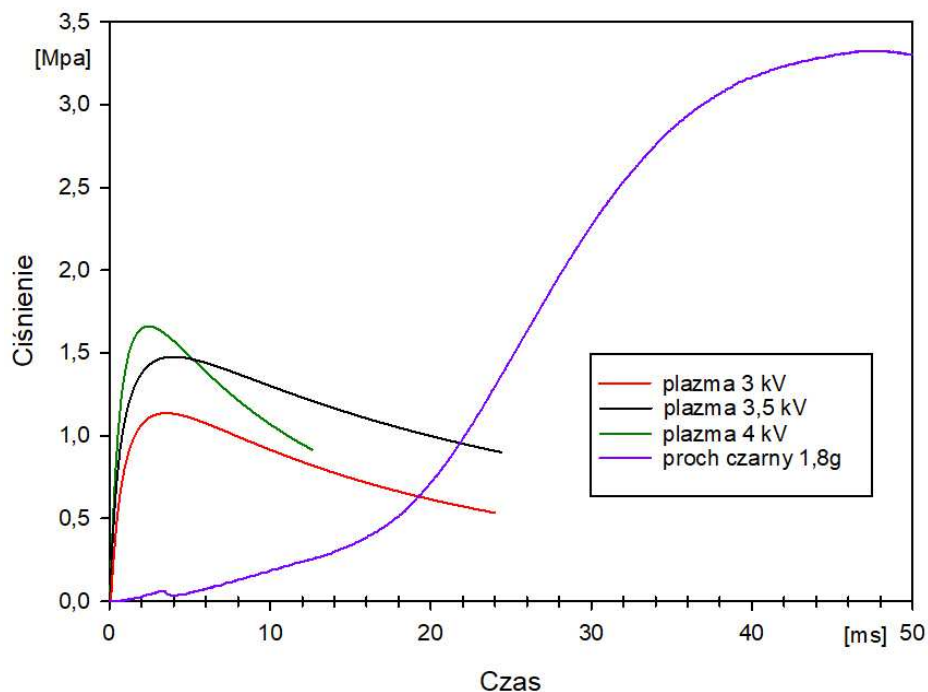
Przygotowanie opracowanego stanowiska do badań pirostatycznych i przeprowadzenie pomiarów generowanego ciśnienia w funkcji napięcia ładowania było celem kolejnego etapu badań. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem drutu miedzianego o średnicy 0,7 mm. Napięcie zmieniane było co 500 V w zakresie od 3 do 4 kV. W komorze nie znajdował się żaden materiał miotający.

Dla porównania w komorze spalono 1,8 g prochu czarnego (rys. 3.3). Masa prochu czarnego dobrana została tak, aby była ekwiwalentem energetycznym energii zgromadzonej w baterii kondensatorów o łącznej pojemności 630 μF naładowanych do napięcia 4 kV. Energia chemiczna uwalniana w czasie spalania 1 kg prochu czarnego jest równa 2,8 MJ. Przy wykorzystaniu 1,8 g prochu czarnego uzyskujemy energię 5 kJ. Dla kondensatorów zmagazynowana energia elektryczna równa jest:

$$E_{\text{kondensatora}} = \frac{1}{2}CU^2 \quad (3.1)$$

gdzie: C – pojemność kondensatorów,

U – napięcie na elektrodach kondensatora.

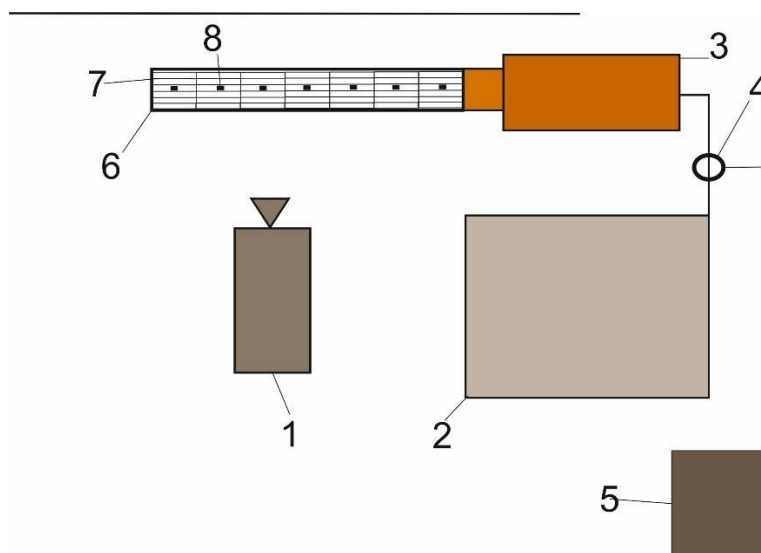


Rys. 3.3. Ciśnienie generowane przez plazmę

Dla napięcia 3 kV uzyskano ciśnienie 1,1 MPa, dla napięcia 3,5 kV ciśnienie 1,4 MPa oraz dla napięcia 4 kV ciśnienie 1,65 MPa. Proch czarny, przy tej samej energii wewnętrznej co plazma, spowodował powstanie ciśnienia o wartości ponad 3 MPa. Jednak czas rozpalania się prochu czarnego był dużo dłuższy. Ciśnienie maksymalne dla prochu czarnego osiągnięto po 46 ms, gdzie dla generacji plazmy ciśnienie maksymalne osiągnięto po około 2 ms. Warto zwrócić uwagę na szybkie opadanie krzywej ciśnienia plazmy w porównaniu z prochem czarnym. W momencie, gdy proch czarny osiąga maksimum ciśnienia, plazma przestała się już jarzyć, a wytworzone przez nią ciśnienie zaczyna spadać do zera. Plazma przez to, że nie posiada cząstek stałych, generuje wysokie ciśnienie jedynie przez nagrzewanie powietrza znajdującego się wewnątrz komory spalania. Powietrze po ochłodzeniu się do temperatury początkowej powinno powrócić do ciśnienia atmosferycznego.

3.3. Badania wpływu plazmy na powierzchnię wybranych materiałów

Efekty rozchodzenia się plazmy w gęsto ułożonych ziarnach prochu i jej oddziaływanie na powierzchnię tych ziaren przebadano na stanowisku badawczym zaprezentowanym na rys. 3.4.



Rys. 3.4. Schemat stanowiska badawczego. 1 – kamera Phantom v12, 2 – układ ładowania, 3 – generator plazmy, 4 – pętla Rogowskiego, 5 – oscyloskop, 6 – rurka z poliwęglanu, 7 – materiał niepalny, 8 – ziarna prochu

W eksperymencie tym generowana plazma była kierowana do wnętrza rurki (6) symulującej komorę spalania. Rurka wykonana była z poliwęglanu o średnicy wewnętrznej 26 mm. W rurce umieszczono w rzędach kołki drewniane (7). W każdym rzędzie umieszczono także ziarno prochu 5/7 cfl (8) (rys. 3.5). Kołki imitujące ziarna prochu miały średnicę 6 mm i długość 35 mm.



Rys. 3.5. Przygotowanie próbki z ziarnem prochowym pomiędzy drewnianymi kołkami

Przygotowane próbki połączone zostały z generatorem plazmy tak, aby dysza generatora znajdowała się wewnątrz rurki i plazma nie miała możliwości wydostania się na zewnątrz. Identyczne badania wykonane zostały dla układu z zapłonem z prochu czarnego. Masa prochu czarnego dobrana została tak, aby energia uwolniona w trakcie spalania wynosiła około 3,8 kJ.

W przypadku prochu czarnego nastąpiło osadzenie się resztek ze spalania prochu na pierwszych 3 rzędach kołków oraz nie zapaliło się żadne ziarno prochu (rys. 3.6).

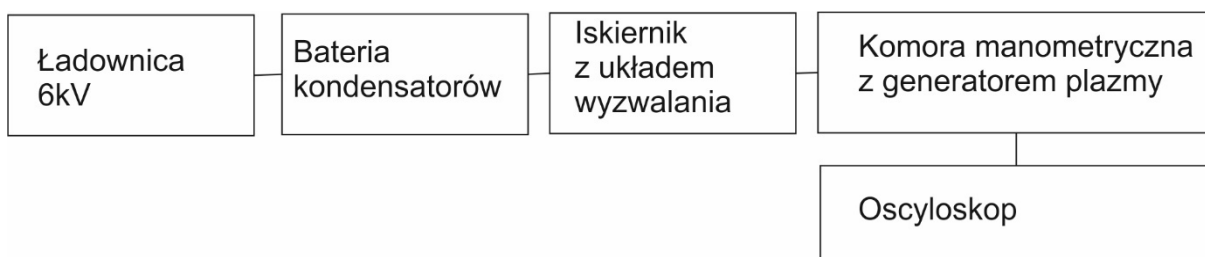


Rys. 3.6. Próbkę po teście z wykorzystaniem zapłonu czarnoprochowego

Układ elektryczny generatora plazmy został przygotowany tak, aby parametry elektryczne odpowiadały parametrom przedstawionym w tabeli 2.2. W kondensatorach zgromadzona została energia 3,84 kJ. W przypadku zapłonu

z generatorem plazmy przy pierwszym wyładowaniu nastąpiło spalanie pierwszych ziaren prochu. Przeprowadzono drugi eksperyment zmniejszając energię o połowę do wartości 1,9 kJ. Rejestracja wykazała brak spalonych ziaren prochowych pomiędzy kołkami, jedynie zostały one przesunięte w głąb komory poprzez wytworzone ciśnienie w generatorze plazmy. Na podstawie tego eksperymentu można wywnioskować, że energia od plazmy do powierzchni innych materiałów przekazywana jest ze znacznie większą sprawnością, co wpływać może także na zapłon miotających materiałów wybuchowych.

Kolejnym eksperymentem przeprowadzonym przy bardzo niskiej energii rozładowania było zaobserwowanie osadzania się par miedzi na ziarnach prochu. Doświadczenie to miało służyć sprawdzeniu, czy kondensujące pary miedzi mogą doprowadzić do zapłonu ziaren prochu. Podczas eksperymentu wykorzystano 8 kondensatorów o pojemności łącznej 240 μF przy napięciu 1,5 kV. Taka konfiguracja układu badawczego (rys. 3.7) pozwoliła wprowadzić na odparowanie drutu miedzianego przy zbyt niskiej energii, ale nie nastąpił zapłon ziaren. Ziarna pokryły się niewielką warstwą miedzi (rys. 3.8).



Rys. 3.7. Schemat układu badawczego wyładowania o niskiej energii



Rys. 3.8. Ziarna prochu 5/7 cfl pokryte warstwą miedzi

Na zdjęciu (rys. 3.8) są widoczne ziarna pokryte cienką warstwą miedzi (por. rys. 4.1), jednak sama gorąca miedź nie spowodowała zapalenia prochu. Można na podstawie tego wnioskować, że osiadające pary miedzi przy niskiej energii wyładowania spowodują jedynie podgrzanie wierzchniej warstwy prochu, jednak nie do temperatury zapłonu.

ROZDZIAŁ IV

Badania pirostatyczne materiałów miotających z wykorzystaniem opracowanego plazmowego układu zapłonowego

Zasadnicze badania pirostatyczne w których zastosowano zarówno zapłon czarnoprochowy jak i plazmowy zostały przeprowadzone z wykorzystaniem układu badawczo-pomiarowego opisanego w rozdziale 2.

Badania z zapłonem czarnoprochowym przeprowadzono stosując zapłonniki z prochem czarnym D2, którego zapłon inicjowany był elektryczną główką zapalczą. Masa prochu czarnego ω_{pcz} potrzebna do wytworzenia ciśnienia zapłonu $p_{zapł}$ o umownej wartości 3 MPa obliczana była osobno dla każdej gęstości ładowania (masy prochu badanego ω_p) z poniższej zależności

$$p_{zapł} = \frac{f_{pcz} \cdot \omega_{pcz}}{W_0 - \left(\frac{\omega_p}{\rho_p}\right) - \alpha_{pcz} \cdot \omega_{pcz}} \quad (4.1)$$

W badaniach z zapłonikiem plazmowym, w układzie generacji plazmy przyjęte zostały wartości parametrów tego układu ustalone podczas eksperymentów opisanych w rozdziale 2 i wymienione w tabeli 2.2.

Ze względu na wytrzymałość komory manometrycznej w badaniach stosowano takie masy prochu badanego, aby wytwarzane ciśnienie gazów prochowych w wyniku ich spalania nie przekraczało 300 MPa.

4.1. Materiał badawczy

Badania pirostatyczne przeprowadzono z wykorzystaniem prochu jednobazowego 5/7 cfl, dwubazowego JA-2 oraz małowrażliwego kompozytowego SC.

Jednobazowy proch 5/7 cfl (rys. 4.1) jest to proch produkcji polskiej stosowany m.in. w amunicji artyleryjskiej 23x152 mm przeznaczonej do zestawów przeciwlotniczych ZU-23-2 i ZSU 23-4.



Rys. 4.1. Proch 5/7 cfl

Proch 5/7 cfl jest typowym przedstawicielem prochów jednobazowych, które w składzie mają zazwyczaj co najmniej 90 % nitrocelulozy.

Skład chemiczny prochu 5/7 cfl przedstawiono w tabeli 4.1, natomiast opis geometrii ziaren prochowych zamieszczono w tabeli 4.2.

Tabela 4.1. Procentowy skład chemiczny prochu 5/7 cfl

Składnik	%
Nitroceluloza (13,2 % N)	92,67
Difenyloamina	1,0-2,0
Kamfora	1,4
Grafit	0,1
Cerezyzna	2,8
Substancje lotne	max. 3,8

Tabela 4.2. Charakterystyki geometryczne prochu 5/7 cfl

Parametr	Wartość	
kształt ziarna	walcowy	
liczba kanalików	7	
długość ziarna L [mm]	3,4	
średnica ziarna D [mm]	2,58	
średnica kanalika [mm]	0,18	
grubość warstwy palnej e_1 [mm]	0,255	
objętość ziarna $V_{0,p}$ [cm ³]	0,172	
powierzchnia ziarna $S_{0,p}$ [cm ²]	0,5112	
$V_{0,p} / S_{0,p}$ [cm]	0,336	
Charakterystyki geometryczne kształtu ziaren	χ	0,7592
	λ	0,1994
	μ	-0,0480

Zawarte w tabeli 4.2 wartości charakterystyk geometrycznych kształtu χ , λ , μ wykorzystywane są do opisu zależności między względną grubością spalonej warstwy ziarna z , a spaloną częścią ψ ziarna w postaci

$$\psi = \chi z(1 + \lambda z + \mu z^2) \quad (4.2)$$

Charakterystyki kształtu dla ziaren siedmiokanalikowych oblicza się korzystając ze wzorów:

$$\chi = \beta \left(1 + \frac{2D_7L}{D_2} \right), \quad \lambda = 2\beta L \frac{3L - D_7}{D_2 + 2D_7L}, \quad \mu = -\frac{6\beta^2 L^2}{D_2 + 2D_7L},$$

$$\beta = \frac{D - 3d}{4L}, \quad D_7 = D + 7d, \quad D_2 = D^2 - 7d^2$$

gdzie: D – średnica zewnętrzna ziarna,

d – średnica kanalika,

L – długość ziarna.

Proch JA-2 (rys. 4.2) jest prochem dwubazowym, wykorzystywanym do elaboracji 120 mm amunicji czołgowej o oznaczeniu M829A1/A2 (USA) z pociskiem APFSDS-T. W ramach pracy badano proch JA-2 z ziarnami o oznaczeniu LO5460. Proch JA-2 jest typowym przedstawicielem prochów dwubazowych. Prochy te oprócz nitrocelulozy zawierają również nitroglicerynę. Zawartość nitrogliceryny w prochach dwubazowych nie przekracza 40%.



Rys.4.2. Proch JA-2

Skład chemiczny prochu JA-2 przedstawiono w tabeli 4.3 natomiast opis geometrii ziaren zawarto w tabeli 4.4.

Tabela 4.3. Procentowy skład chemiczny prochu JA-2

Składnik	%
Nitroceluloza (13,2 % N)	59,5
Nitrogliceryna (NG)	14,9
Diethylene glycol dinitrate (DEGDN)	24,8
Akardyt II	0,7
MgO	0,05
Grafit	0,1 (0,05)

Tabela 4.4. Charakterystyki geometryczne prochu JA-2

Parametr	Wartość	
kształt ziarna	walcowy	
liczba kanalików	7	
długość ziarna L [mm]	14,15	
średnica ziarna D [mm]	8,78	
średnica kanalika [mm]	0,546	
grubość warstwy palnej e_1 [mm]	0,893	
objętość ziarna $V_{0,p}$ [cm ³]	0,833	
powierzchnia ziarna $S_{0,p}$ [cm ²]	6,780	
$V_{0,p} / S_{0,p}$ [cm]	0,123	
<i>Charakterystyki geometryczne kształtu ziaren</i>	χ	0,726
	λ	0,247
	μ	-0,0443

Małowrażliwy proch kompozytowy o roboczym oznaczeniu SC (rys. 4.3) jest nowym prochem opracowywanym w ramach projektu badawczo-rozwojowego NCBR o nr DOB-BIO8/05/01/2016 pt. „Opracowanie i wykonanie demonstratorów technologii krytycznych elementów do nowej generacji amunicji czołgowej 120 mm” realizowanego w Wojskowej Akademii Technicznej.



Rys. 4.3. Proch SC

Docelowo proch SC ma być polskim zamiennikiem prochu JA-2 w krajowej amunicji czołgowej. Jego głównym składnikiem energetycznym jest heksogen. Ze względu na trwające prace nad tym prochem, w tabeli 4.5 przedstawiony został tylko przybliżony skład prochu SC. Opis geometrii ziaren badanej kompozycji prochu SC zawarto w tabeli 4.6.

Tabela 4.5. Skład prochu SC

Składnik	%
Heksogen	ok. 80
Nitroceluloza (NC)	ok. 10
Dodatki	ok. 10

Tabela 4.6. Charakterystyki geometryczne prochu SC

Parametr	Wartość	
kształt ziarna	walcowy	
liczba kanalików	7	
długość ziarna L [mm]	8,7	
średnica ziarna D [mm]	6,3	
średnica kanalika [mm]	0,58	
objętość ziarna $V_{0,p}$ [cm ³]	0,255	
powierzchnia ziarna $S_{0,p}$ [cm ²]	0,341	
grubość warstwy palnej e_1 [mm]	0,57	
$V_{0,p} / S_{0,p}$ [mm]	0,746	
Charakterystyki geometryczne kształtu ziaren	χ	0,7637
	λ	0,1649
	μ	-0,0358

Autor dysertacji jest członkiem zespołu badawczego odpowiedzialnego w Wojskowej Akademii Technicznej za realizację w projekcie badań pirostatycznych oraz wyznaczenie charakterystyk energetyczno-balistycznych opracowywanych wariantów kompozycji prochu SC.

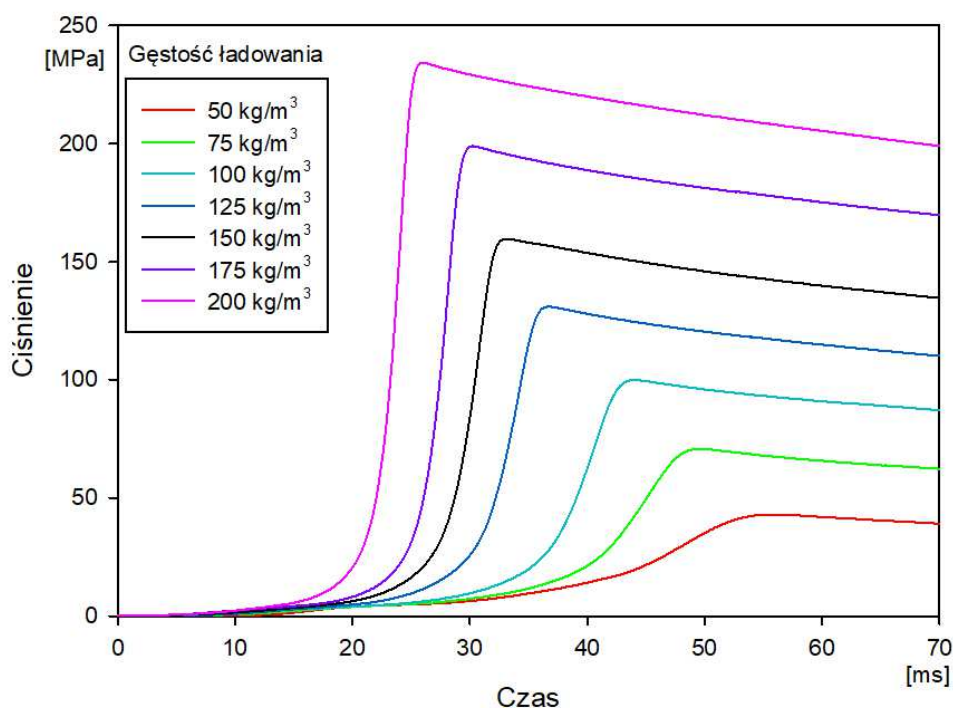
4.2. Wyniki badań pirostatycznych

4.2.1. Proch jednobazowy 5/7 cfl

Badania pirostatyczne prochu 5/7 cfl przeprowadzono dla gęstości ładowania w zakresie od 50 kg/m³ do 200 kg/m³ z krokiem co 25 kg/m³. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem zapłonu czarnoprochowego, a następnie przeprowadzono próby z zapłonem plazmowym dla tych samych gęstości ładowania. Ciśnienie p gazów

prochowych w funkcji czasu t , otrzymane w ramach przeprowadzonych badań prochu 5/7 cfl z zapłonikiem czarnoprochowym przedstawiono na rysunku 4.4.

Wykresy ciśnienia $p(t)$ przedstawiono od wartości 0,1 MPa. Ciśnienie 0,1 MPa przyjęte zostało przez autora za umowną wartość rozpoczęcia procesu spalania w komorze. W przypadku zapłonu czarnoprochowego było to równoznaczne z początkiem palenia się zapłonika. Przy zapłonie plazmowym ciśnienie tej wartości osiągnęte było w czasie krótszym niż 0,1 ms, stąd na prezentowanych wykresach $p(t)$ dla zapłonu plazmowego pojawiają się od razu wyższe wartości ciśnienia. Taką zasadę prezentacji wykresów $p(t)$ zastosowano zarówno dla prochu 5/7 cfl jak i dla dwóch pozostałych badanych prochów.

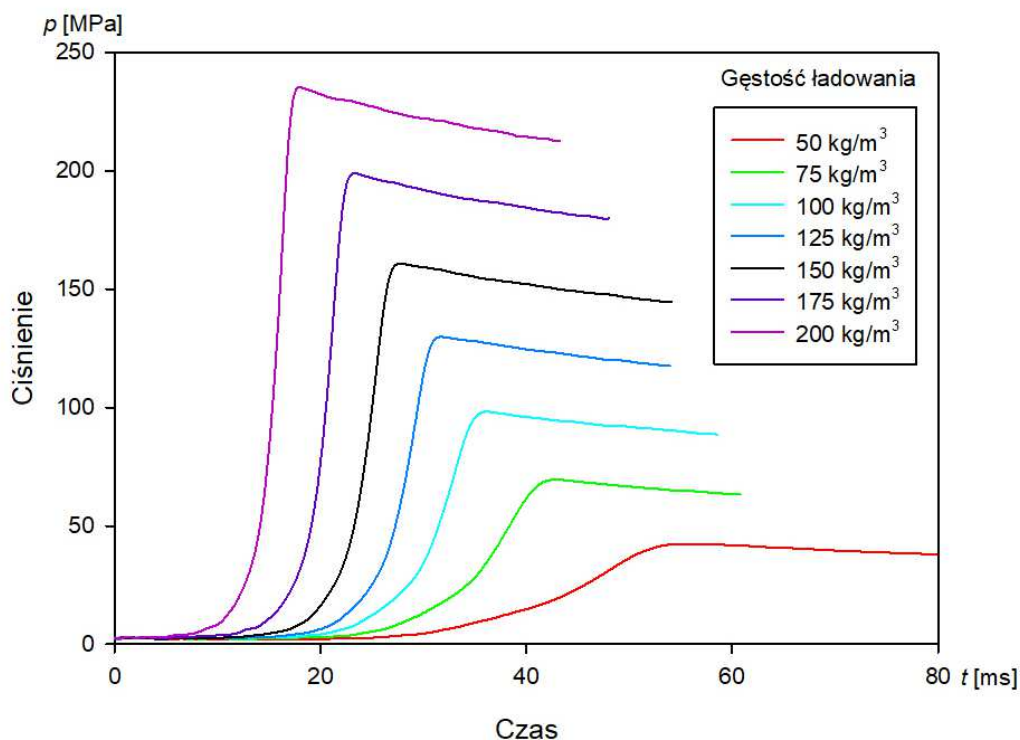


Rys. 4.4. Wykresy ciśnienia p w funkcji czasu t , przy zapłonie czarnoprochowym prochu 5/7 cfl

Wraz ze wzrostem gęstości ładowania (masy prochu w komorze spalania) wzrasta ciśnienie gazów prochowych oraz skróceniu ulega czas spalania badanego prochu. Wpływ na czas rozpalania się prochu mają m.in. ułożenie się ziaren prochu wewnątrz komory spalania jak i ułożenie woreczka z czarnym prochem wokół główki zapalczącej zapłonika. Zarówno w przypadku rozpalania się zapłonika czarnoprochowego jak i prochu wewnątrz komory związane to jest z sekwencyjnym rozpalaniem się kolejnych ziaren. Większa liczba ziaren położonych blisko źródła zapłonu (początkowo samej główki zapalczącej a w rezultacie całego zapłonika czarnoprochowego) skutkuje

szybszym dopływem gazów z rozpalonych już ziaren i przekazywaniem zapłonu na kolejne ziarna znajdujące się już pod pewnym ciśnieniem.

Przebieg ciśnienia p gazów prochowych (od wartości 0,1 MPa) w funkcji czasu t dla zapłonu plazmowego przedstawiono na rysunku 4.5. Porównując wykresy przedstawione na rys. 4.4 i 4.5 możemy zauważyć podobną zależność w przebiegach ciśnienia od gęstości ładowania zarówno przy zapłonie plazmowym jak i przy zapłonie czarnoprochowym.



Rys. 4.5. Wykresy ciśnienia p w funkcji czasu t , przy zapłonie plazmowym prochu 5/7 cfl

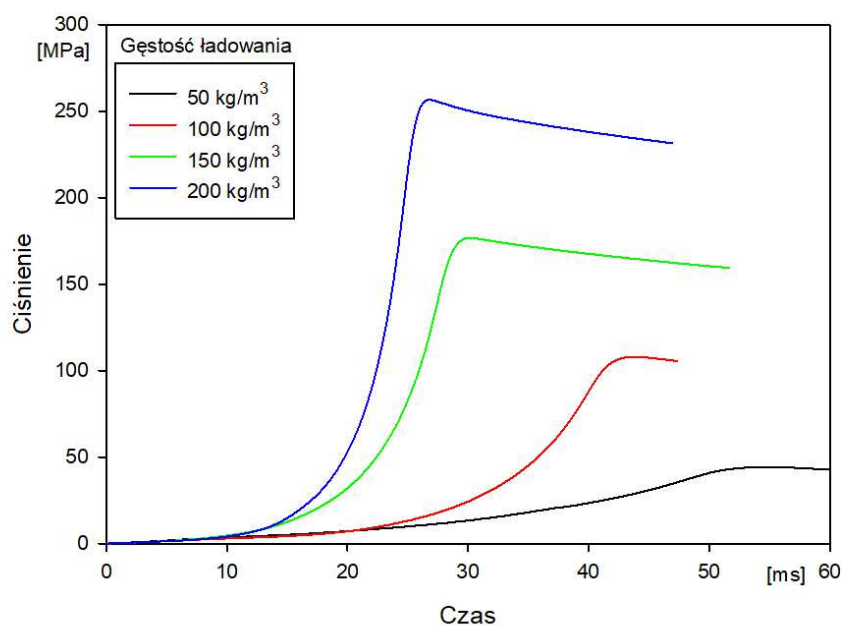
W tabeli 4.7 zestawiono wartości maksymalne ciśnienia gazów prochowych wraz z czasami ich osiągnięcia. Z danych zawartych w tabeli wynika (zarówno dla zapłonu czarnoprochowego jak i plazmowego), że im wyższa jest gęstość ładowania tym skróceniu ulegają czasy osiągnięcia ciśnienia maksymalnego. Jednakże dla zapłonu plazmowego czasy te są znacznie krótsze.

Tabela 4.7. Wyniki badań pirostatycznych prochu 5/7 cfl

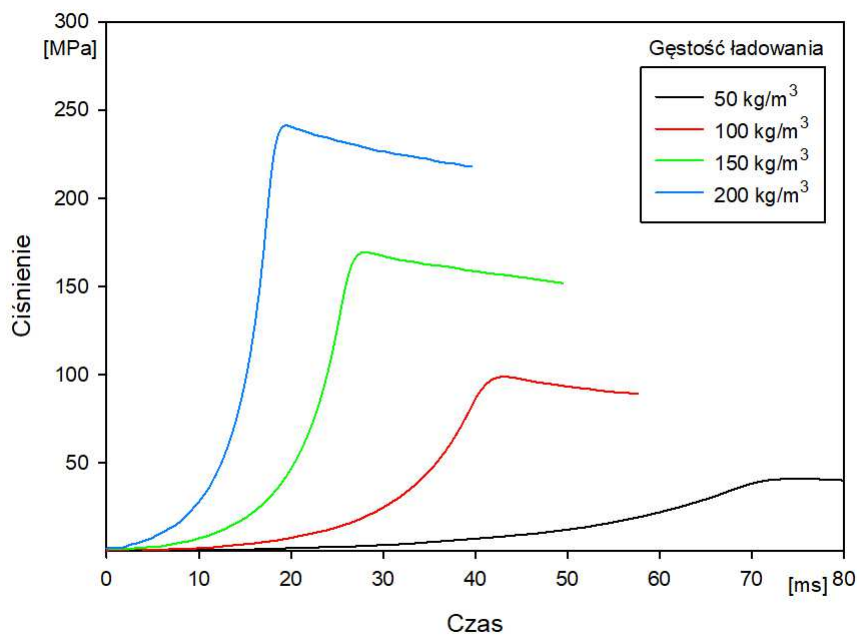
Gęstość ładowania Δ [kg/m ³]	Zapłon plazmowy		Zapłon czarnoprochowy	
	ρ_{\max} [MPa]	t_{\max} [ms]	ρ_{\max} [MPa]	t_{\max} [ms]
50	42,6	55,96	43,0	55,83
75	70,4	42,88	70,9	49,63
100	98,9	36,16	100,1	46,50
125	130,8	31,72	131,3	34,35
150	161,3	33,12	160,1	33,13
175	200,6	23,36	199,5	30,25
200	236,0	17,96	234,9	25,95

4.2.2. Proch dwubazowy JA-2

Dla prochu JA2 wykonano serię badań dla czterech gęstości ładowania dla obydwu metod zapłonu. Zmniejszenie liczby badań wynikało z doświadczeń zdobytych przy próbach z prochem 5/7 cfl. Przebiegi ciśnień od wartości 0,1 MPa przedstawiono na wykresach (rys. 4.6) – zapłon czarnoprochowy oraz (rys. 4.7) zapłon plazmowy. Wartości ciśnienia maksymalnego gazów prochowych dla poszczególnych gęstości ładowania wraz z czasem ich osiągnięcia przedstawiono w tabeli 4.8.



Rys. 4.6. Wykresy ciśnienia p w funkcji czasu t , przy zapłonie czarnoprochowym prochu JA-2



Rys. 4.7. Wykresy ciśnienia p w funkcji czasu t , przy zapłonie plazmowym prochu JA-2

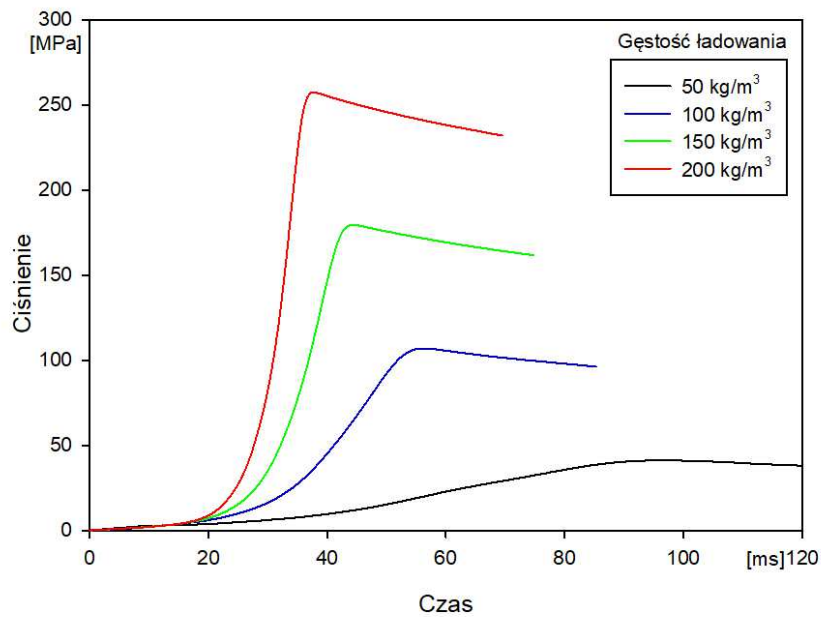
Porównując obydwie wykresy (rys. 4.6 i 4.7) oraz dane zawarte w tabeli 4.8 możemy zauważyć podobną jak dla prochu 5/7 cfl zależność w przebiegach i wartościach ciśnienia w zależności od gęstości ładowania zarówno przy zapłonie plazmowym jak i przy zapłonie czarnoprochowym.

Tabela 4.8. Wyniki badań pirostatycznych prochu JA-2

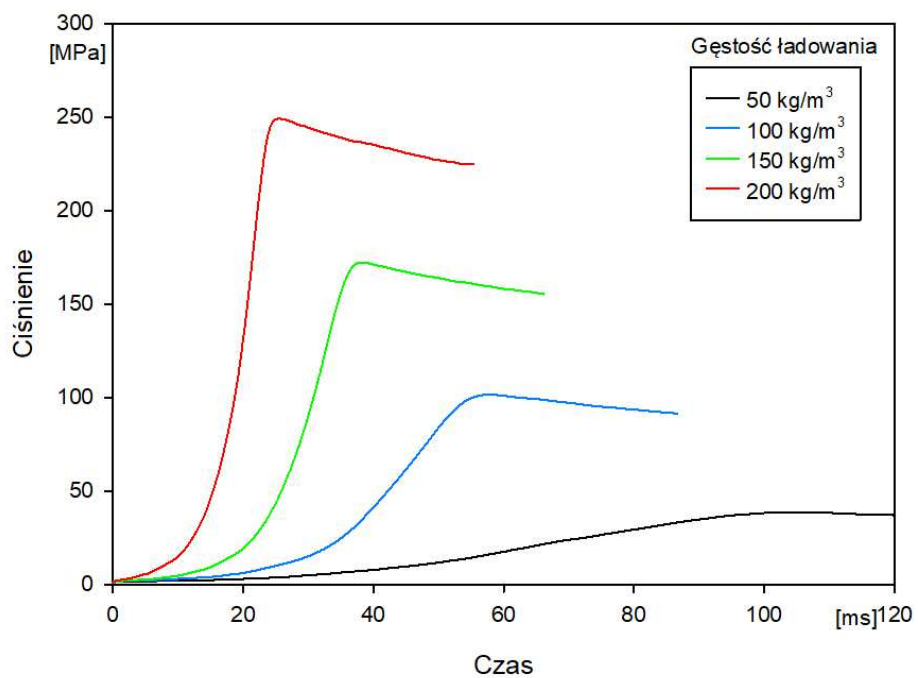
Gęstość ładowania Δ [kg/m³]	Zapłon plazmowy		Zapłon czarnoprochowy	
	p_{\max} [MPa]	t_{\max} [ms]	p_{\max} [MPa]	t_{\max} [ms]
50	41,7	75,16	44,3	54,84
100	99,2	43,16	108,2	43,76
150	170,4	28,00	177,2	30,20
200	243,4	19,52	245,1	24,20

4.2.3. Proch wielobazowy SC

Dla prochu SC wykonano dwie serie badań, po jednej dla każdego rodzaju zapłonu przy czterech gęstościach ładowania (rys. 4.8 – zapłon czarnoprochowy i rys. 4.9 – zapłon plazmowy).



Rys. 4.8. Wykresy ciśnienia p w funkcji czasu t , przy zapłonie czarnoprochowym prochu SC



Rys. 4.9. Wykresy ciśnienia p w funkcji czasu t , przy zapłonie plazmowym prochu SC

Wartości ciśnienia maksymalnego gazów prochowych wewnątrz komory manometrycznej dla poszczególnych prób oraz czasy ich osiągnięcia przedstawiono w tabeli 4.9.

Tabela 4.9. Wyniki badań pirostatycznych prochu SC

Gęstość ładowania Δ [kg/m ³]	Zapłon plazmowy		Zapłon czarnoprochowy	
	ρ_{\max} [MPa]	t_{\max} [ms]	ρ_{\max} [MPa]	t_{\max} [ms]
50	39,0	105,5	41,2	96,40
100	102,3	57,60	107,0	56,32
150	173,2	38,24	179,8	44,40
200	251,2	25,52	257,9	37,68

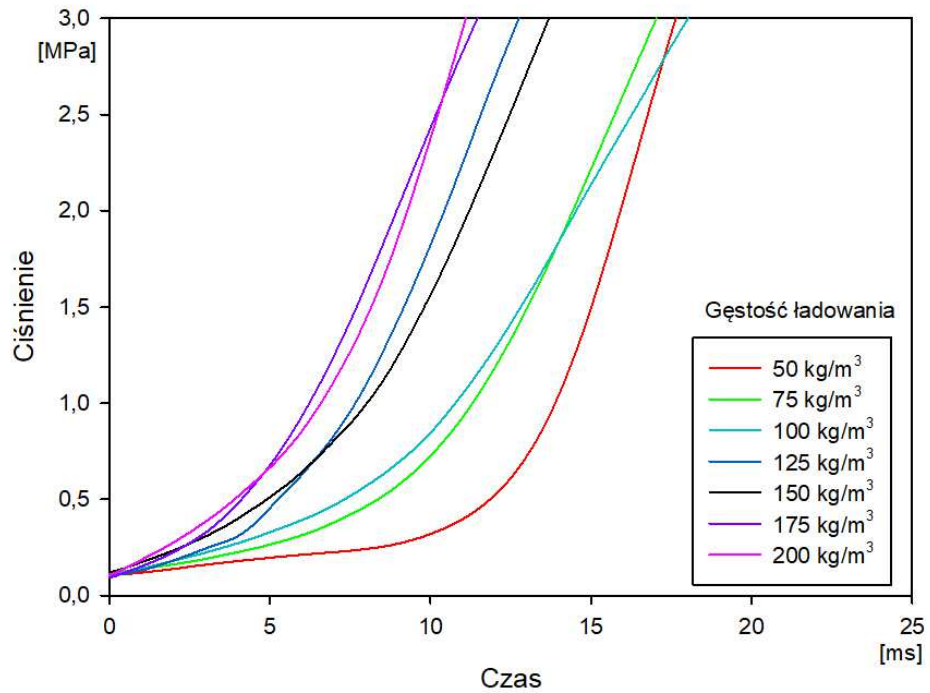
Porównując obydwie wykresy oraz dane zawarte w tabeli 4.9 możemy zauważyć podobną jak dla prochów 5/7 cfl oraz JA-2 zależność w przebiegach i wartościach ciśnienia od gęstości ładowania zarówno przy zapłonie plazmowym jak i przy zapłonie czarnoprochowym.

4.3. Obliczenia i analiza wyników badań pirostatycznych

4.3.1. Proch jednobazowy 5/7 cfl

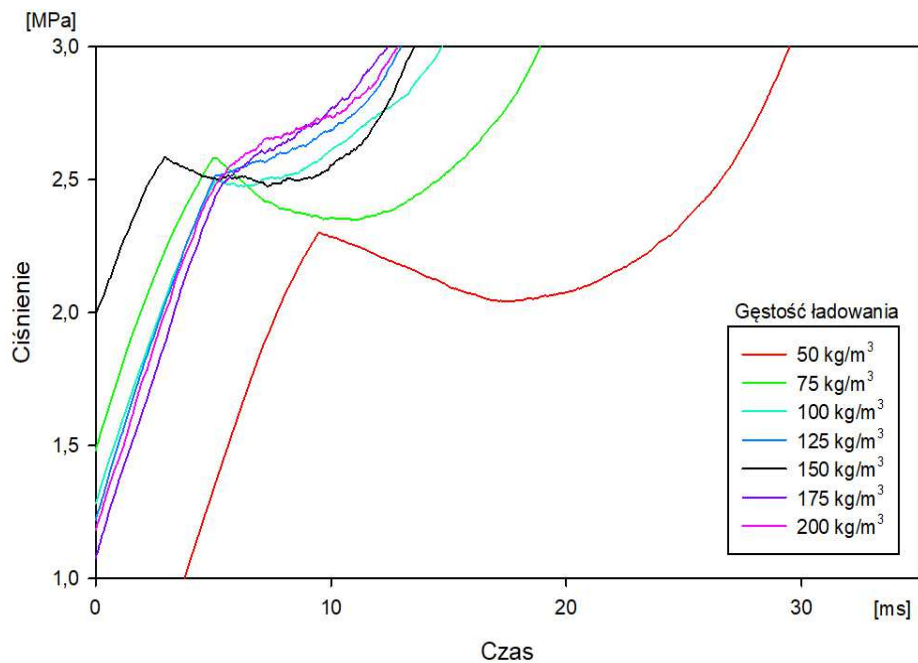
Porównano charakter narastania ciśnienia w zakresie do 3 MPa. Według Sieriebrakowa [39] wartość ta przyjmowana jest jako ciśnienie zapłonu z wykorzystaniem zapłonika czarnoprochowego. Dla prochu czarnego widoczne jest (rys. 4.10) nieznaczne powiązanie czasu osiągnięcia ciśnienia 3 MPa z gęstością ładowania. Dla gęstości ładowania $\Delta = 50 \text{ kg/m}^3$, $\Delta = 75 \text{ kg/m}^3$, $\Delta = 100 \text{ kg/m}^3$ czas osiągnięcia 3 MPa jest niemalże identyczny, dla kolejnych gęstości następuje skrócenie czasu osiągnięcia ciśnienia zapłonu o około 5 ms i dla gęstości równej $\Delta = 175 \text{ kg/m}^3$ i $\Delta = 200 \text{ kg/m}^3$ czas osiągnięcia ciśnienia zapłonu równy jest około 10 ms. Krótszy czas spowodowany jest zmniejszaniem się objętości swobodnej komory wraz ze wzrostem gęstości ładowania.

Z rys. 4.10 wynika, że czas osiągnięcia ciśnienia zapłonu (3 MPa) dla zapłonika czarnoprochowego zawiera się w przedziale (10 - 15) ms.



Rys. 4.10. Faza zapłonu dla zapłonika czarnoprochowego

Analizując przebiegi $p(t)$ z zapłonem plazmowym (rys. 4.11) można zaobserwować, że najdłuższy czas narastania ciśnienia do wartości 3 MPa osiągnięty został przy najniższej gęstości ładowania i kolejno dla wyższych gęstości ładowania czasy te ulegały skróceniu.

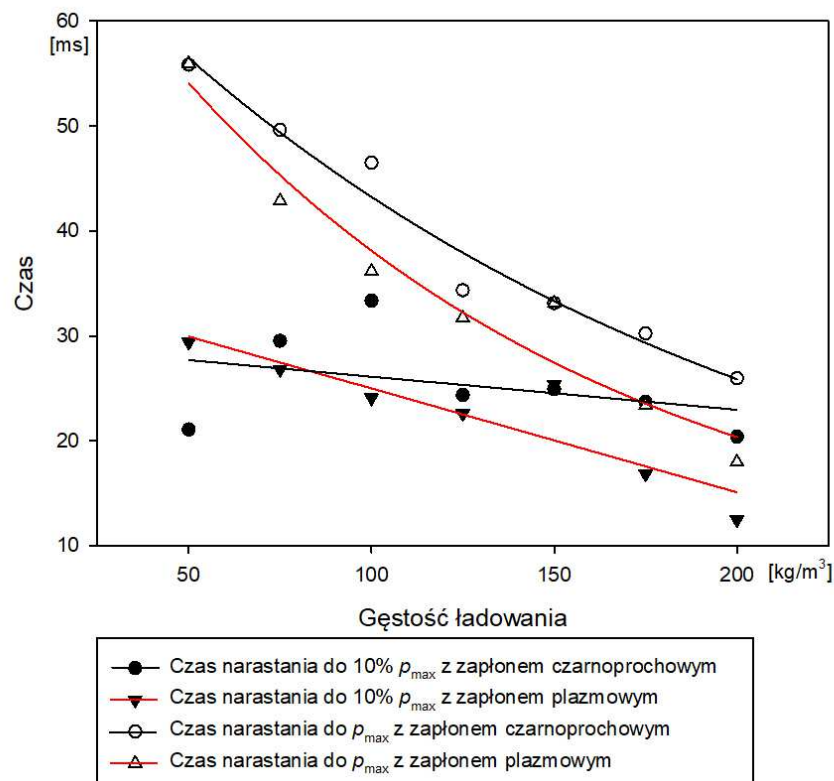


Rys. 4.11. Faza zapłonu dla zapłonika plazmowego

Dla gęstości ładowania 125 kg/m^3 i wyższych następuje duża zbieżność czasów i można przyjąć, że powyżej tej gęstości czas osiągnięcia ciśnienia 3 MPa nie zależy już od gęstości ładowania. Wyraźnie widoczne na wykresie lokalne maksima (rys. 4.11 – dla gęstości $\Delta = 50 \text{ kg/m}^3$, $\Delta = 75 \text{ kg/m}^3$, $\Delta = 100 \text{ kg/m}^3$) odpowiadają ciśnieniu od zapłonika plazmowego. Dla wyższych gęstości wyraźne lokalne maksimum zanika, ze względu na rozpalenie się większej ilości ziaren i równocześnie z zanikaniem ciśnienia od zapłonika plazmowego następuje wzrost ciśnienia od palącego się prochu.

Dla zapłonu plazmowego wyraźnie widoczne jest osiągnięcie ciśnienia ok. $2 - 3 \text{ MPa}$ niemalże natychmiast po podaniu sygnału zapłonowego. Ciśnienie to jest zależne od gęstości ładowania Δ i wynosi $2,3 \text{ MPa}$ przy $\Delta = 50 \text{ kg/m}^3$ oraz $2,8 \text{ MPa}$ przy $\Delta = 200 \text{ kg/m}^3$.

Wykresy zależności czasu osiągnięcia ciśnienia maksymalnego p_{max} , a także wartości $10\% p_{max}$ dla poszczególnych gęstości ładowania Δ przedstawiono na rysunku 4.12. Wyraźnie widoczna jest malejąca zależność czasu osiągnięcia p_{max} jak i $10\% p_{max}$ od gęstości ładowania a ponadto wyraźne jest powiększanie się różnicy pomiędzy tymi czasami wraz ze wzrostem gęstości ładowania.



Rys. 4.12. Czas osiągnięcia ciśnienia maksymalnego oraz $10\% p_{max}$ w komorze spalania w funkcji gęstości ładowania

Jednym z ważnych parametrów określających właściwości energetyczno-balistyczne prochu, oprócz siły prochu i kowolumenu, jest prędkość u jego spalania.

Przyjmując liniowe prawo prędkości spalania [39]:

$$u = u_1 p \quad (4.3)$$

gdzie: u_1 – współczynnik liniowego prawa prędkości spalania,

oraz wykorzystując definicję liniowej prędkości spalania:

$$u = \frac{de}{dt} \quad (4.4)$$

gdzie: e – bieżąca (chwilowa) grubość spalanej warstwy ziarna prochowego, otrzymujemy:

$$\frac{de}{dt} = u_1 p \quad (4.5)$$

Zakładając że koniec spalania (czas spalania t_k) nastąpi, gdy cała grubość warstwy palnej e_1 zostanie spalona to

$$e_1 = u_1 \int_{t_z}^{t_k} (p - p_z) dt \quad (4.6)$$

gdzie t_z – czas osiągnięcia ciśnienia zapłonu $p_z = 3$ MPa,

i wtedy otrzymujemy po przekształceniach wyrażenie na współczynnik u_1

$$u_1 = \frac{e_1}{\int_{t_z}^{t_k} (p - p_z) dt} \quad (4.7)$$

Na podstawie wzoru (4.7) obliczono współczynnik u_1 liniowego prawa prędkości spalania dla poszczególnych gęstości ładowania oraz dla obydwu metod zapłonu, a wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 4.10.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że współczynnik u_1 wyznaczony na podstawie badań z zapłonem plazmowym przyjmuje większe wartości o (0,005 - 0,071) mm/MPa·s w porównaniu z zapłonem czarnopochowym. Dla gęstości ładowania 100 kg/m³ jest to wzrost o 11%.

Tabela 4.10. Współczynnik u_1 liniowego prawa prędkości spalania

Gęstość ładowania Δ [kg/m ³]	Zapłon czarnoprochowy u_1 [mm/MPa·s]	Zapłon plazmowy u_1 [mm/MPa·s]
50	0,745	0,750
75	0,683	0,744
100	0,636	0,707
125	0,638	0,680
150	0,598	0,617
175	0,587	0,597
200	0,550	0,578

Według dokumentu standaryzacyjnego STANAG 4115 [39], który normuje w NATO procedury badania właściwości balistycznych prochów, prędkość spalania r opisuje się wzorem:

$$r = \frac{de}{dt} = \frac{de}{d\psi} \frac{d\psi}{dp} \frac{dp}{dt} \quad (4.8)$$

Poszczególne czynniki równania (4.8), oprócz dp/dt , który jest wyznaczany na podstawie zarejestrowanego podczas eksperymentu przebiegu ciśnienia $p(t)$, można opisać następującymi zależnościami:

$$\frac{de}{d\psi} = \frac{\Lambda_1}{S_1} \varphi \quad (4.9)$$

$$\frac{d\psi}{dp} = \frac{1}{p_{max}} \frac{1 + \left(\alpha - \frac{1}{\rho}\right) \frac{p_{max}}{f}}{\left[1 + \left(\alpha - \frac{1}{\rho}\right) \frac{p}{f}\right]^2} \quad (4.10)$$

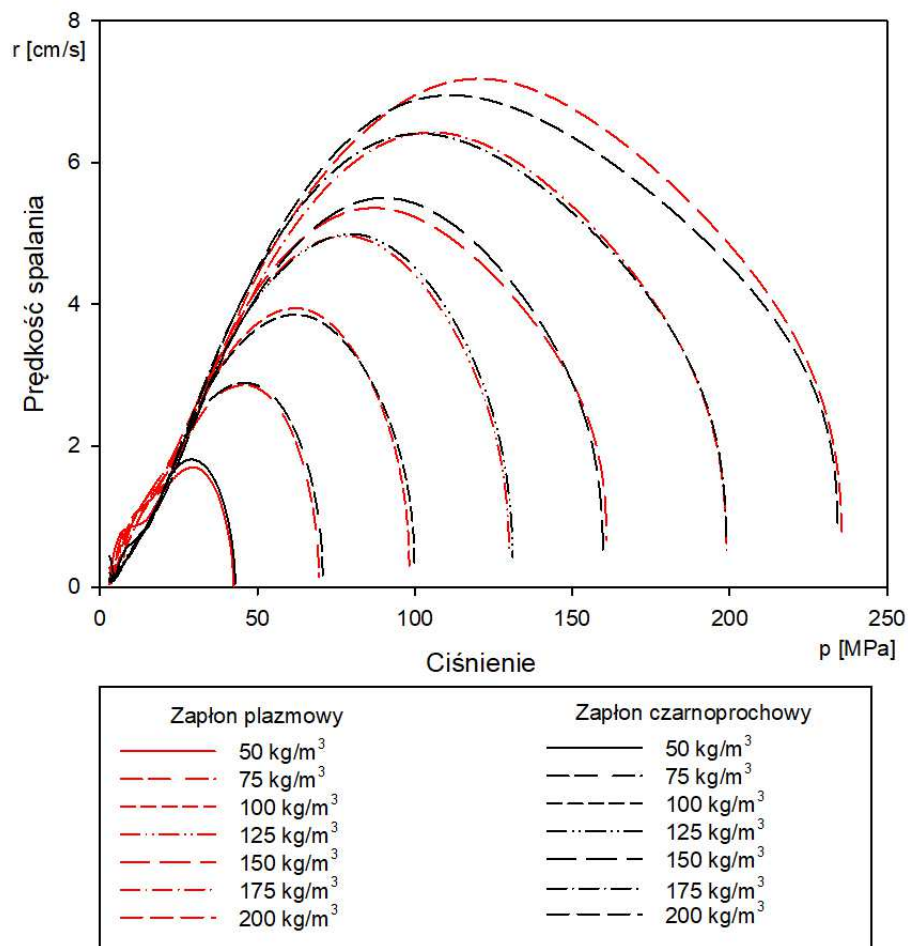
Wyznaczone według powyższej procedury wykresy prędkości spalania r dla prochu 5/7 cfl dla różnych gęstości ładowania, dla obu rodzajów zapłonu przedstawiono na rys. 4.13. Wykres prędkości spalania $r(p)$ (rys. 4.13) pokazuje niewielkie różnice pomiędzy zapłonem czarnoprochowym oraz zapłonem plazmowym. Pewną różnicę można zauważyć przy gęstości 200 kg/m³. Maksymalna wartość prędkości spalania dla zapłonu plazmowego wynosi 7,19 cm/s, a dla zapłonu

czarnoprochowego 6,95 cm/s. Jest to różnica mniejsza niż w przypadku współczynnika u_1 i wynosi 3,5 %.

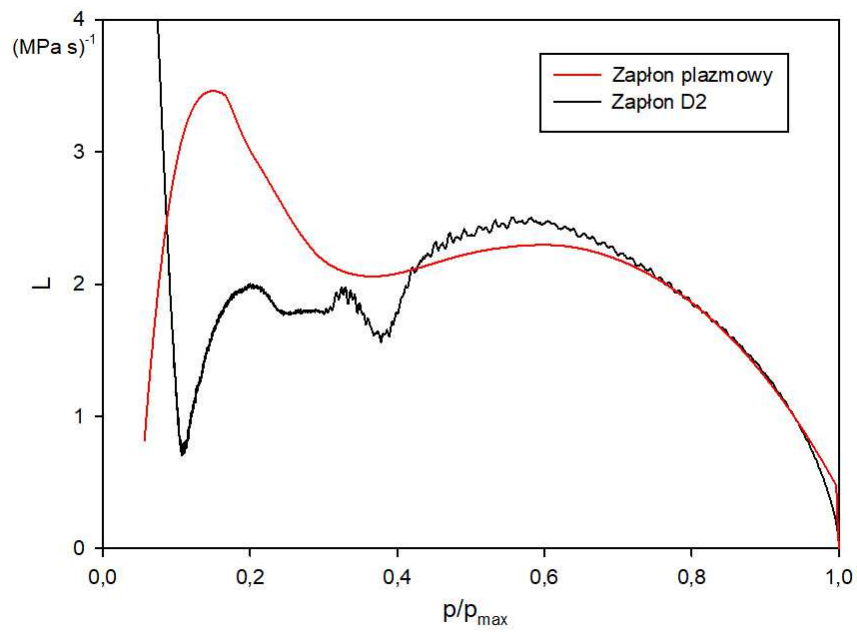
Inną wielkością charakteryzującą intensywność dopływu gazów (szybkość spalania ładunku prochowego) jest dynamiczna żywość prochu L , zdefiniowana w STANAG 4115 [39] poniższym wzorem

$$L = \frac{1}{p p_{\max}} \frac{dp}{dt} \quad (4.11)$$

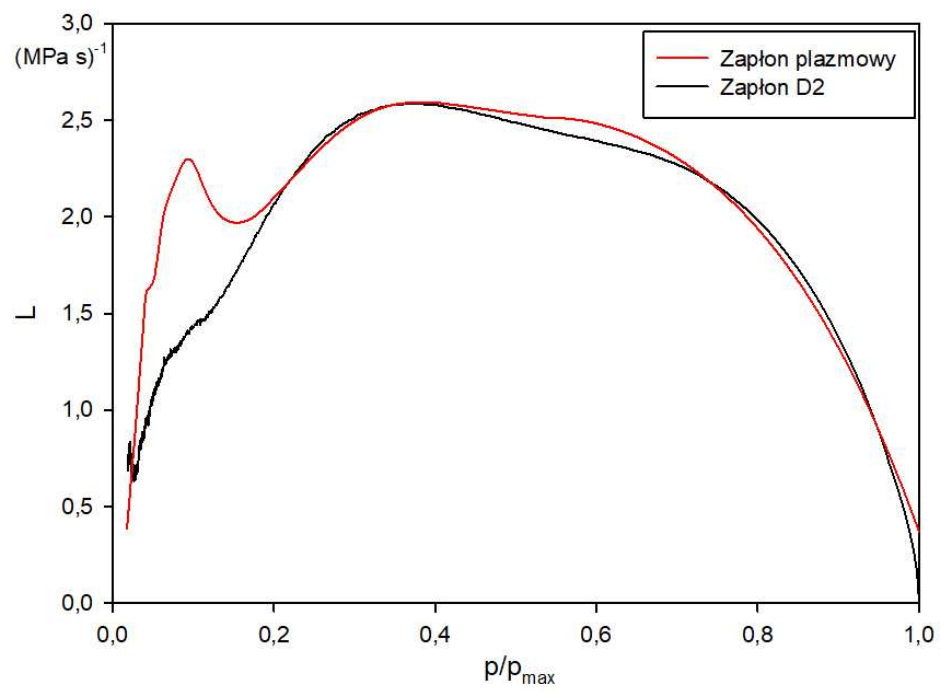
Na rysunkach 4.14 - 4.16 przedstawiono wykresy dynamicznej żywości prochu dla różnych wartości gęstości ładowania przy dwóch rodzajach zapłonu.



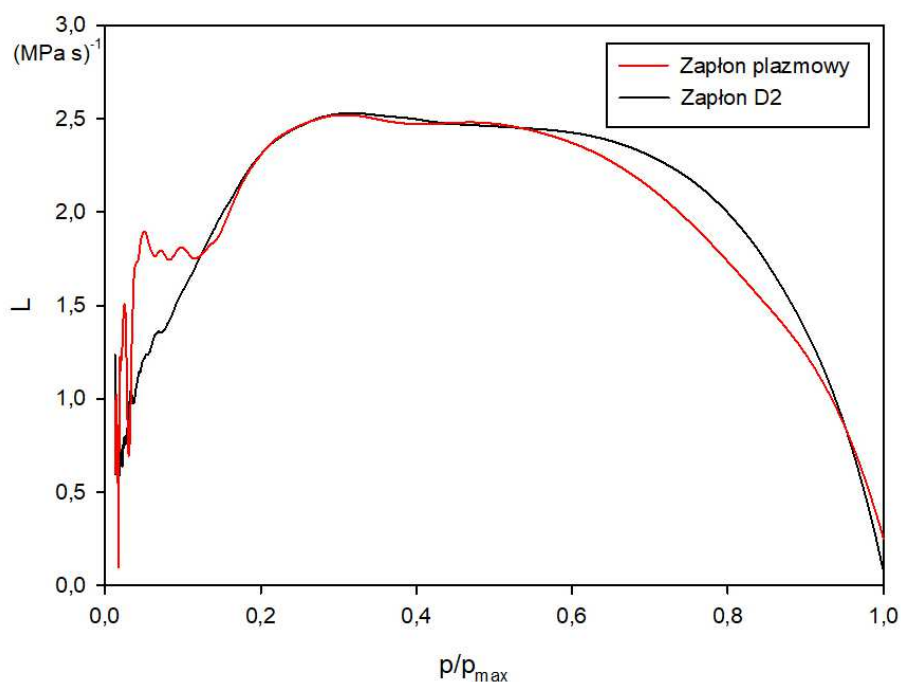
Rys. 4.13. Prędkość spalania r w funkcji ciśnienia p dla różnych gęstości ładowania Δ



Rys. 4.14. Dynamiczna żywiość L prochu dla gęstości ładowania 50 kg/m^3



Rys. 4.15. Dynamiczna żywiość L prochu dla gęstości ładowania 150 kg/m^3



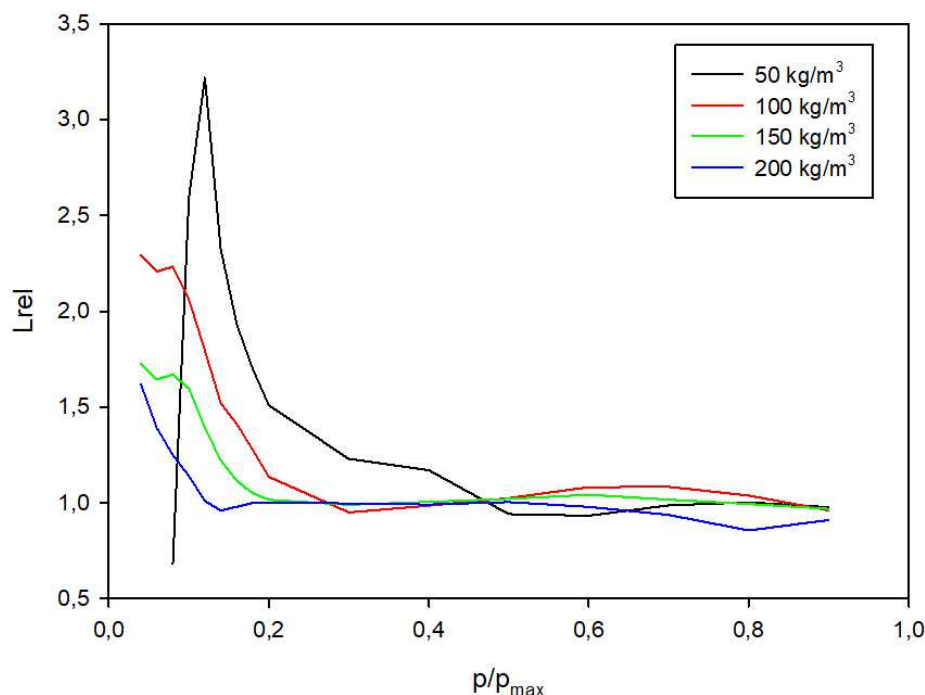
Rys. 4.16. Dynamiczna żywość prochu L dla gęstości ładowania 200 kg/m^3

Na szczególną uwagę zasługuje początkowa część każdego wykresu do wartości $0,2 p/p_{max}$. Bardzo duże wartości żywości na początku procesu spalania są skutkiem dużej warstwy przegrzanej prochu. Plazma oprócz wysokich temperatur powyżej $10\,000 \text{ K}$, generuje także dużą ilość promieniowania UV, co wpływa na wiązania N-N oraz N-O, powodując ich wzbudzenie i łatwiejszy rozpad. Jest to wyraźnie widoczne w przypadku prochów jednobazowych ze względu na dużą zawartość nitrocelulozy.

Aby porównać żywość prochu dla obu rodzajów zapłonu, wyznaczono względną żywość dynamiczną prochu (rys. 4.17). Względna żywość dynamiczna jest to stosunek żywości badanego prochu do wartości referencyjnej przy jednakowym stosunku p/p_{max} .

$$L_{rel} = \frac{L\left(\frac{p}{p_{max}}\right)}{L_{ref}\left(\frac{p}{p_{max}}\right)} \quad (4.12)$$

Jako wartość odniesienia przyjęto żywość dynamiczną wyznaczoną na podstawie badań z zapłonem czarnoprochowym. Z wykresu na rys. 4.17 wynika, że w początkowej fazie spalania prochu względna żywość dynamiczna przyjmuje wartości ponad 1,6 – krotnie większe niż przy zapłonie czarnoprochowym. Spowodowane jest to charakterystycznymi dla zapłonu plazmowego wysokimi żywościami w początkowej fazie palenia.



Rys. 4.17. Względna dynamiczna żywość dla zapłonu plazmowego w stosunku do zapłonu czarnoprochowego.

Widoczne na wykresach dynamicznej żywości (rysunki 4.14 - 4.16) wysokie w początkowej fazie spalania dla zapłonu plazmowego są efektem przegrzania wierzchniej warstwy prochu. Jest to warstwa prochu, która osiągnęła temperaturę większą niż temperatura rozkładu przed dotarciem do niej frontu spalania. Wiąże się to z generacją produktów gazowych pod powierzchnią ziarna prochowego. Im grubsza warstwa zostanie przegrzana tym szybciej zachodzi proces spalania w głąb ziarna prochu. Na przegrzanie wierzchniej warstwy prochu znaczny wpływ ma sposób zapłonu. Podjęto próbę oszacowania grubości przegrzanej warstwy prochu w początkowym okresie jego spalania. Przyjęto, że zakończenie spalania się warstwy przegrzanej prochu wyznacza na wykresie dynamicznej żywości lokalne minimum znajdujące się w przedziale $(0,1 - 0,3) p/p_{max}$.

W celu wyznaczenia grubości warstwy przegrzanej ziarna prochowego, wykorzystane zostanie równanie stanu gazów prochowych dla dowolnej chwili spalania, tzw. równanie pirostatyki [39], w postaci:

$$p_{\psi} = \frac{f \omega \psi}{W_0 - \frac{\omega}{\delta} - \omega \left(\alpha - \frac{1}{\delta} \right) \psi} \quad (4.13)$$

gdzie: f – siła prochu,

ω – masa prochu,

ψ – względna masa spalonego prochu,

W_0 – objętość komory spalania,

α – kowolumen,

δ – gęstość prochu.

Przekształcając wzór (4.13) względem ψ otrzymamy zależność $\psi(p_\psi)$:

$$\psi = \frac{p_\psi \left(\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta} \right)}{f - p_\psi \left(\alpha - \frac{1}{\delta} \right)} \quad (4.14)$$

Podstawiając za $f = \frac{p_m(1-\alpha\Delta)}{\Delta}$, otrzymujemy:

$$\psi = \frac{1}{1 + \left(\frac{1 - \alpha\Delta}{1 - \frac{\Delta}{\delta}} \right) \left(\frac{p_m - p_\psi}{p_\psi} \right)} \quad (4.15)$$

Obliczając wg wzoru (4.15) względną część ψ spalonego prochu oraz znając współczynniki (charakterystyki) kształtu prochu, możemy obliczyć względną grubość z spalonej warstwy ziarna prochu w momencie spalania warstwy przegrzanej. Korzystając z dwumianu wiążącego względną część ψ spalonego prochu ze względną grubością z spalonej warstwy ziarna:

$$\psi = \chi_1 z (1 + \lambda_1 z) \quad (4.16)$$

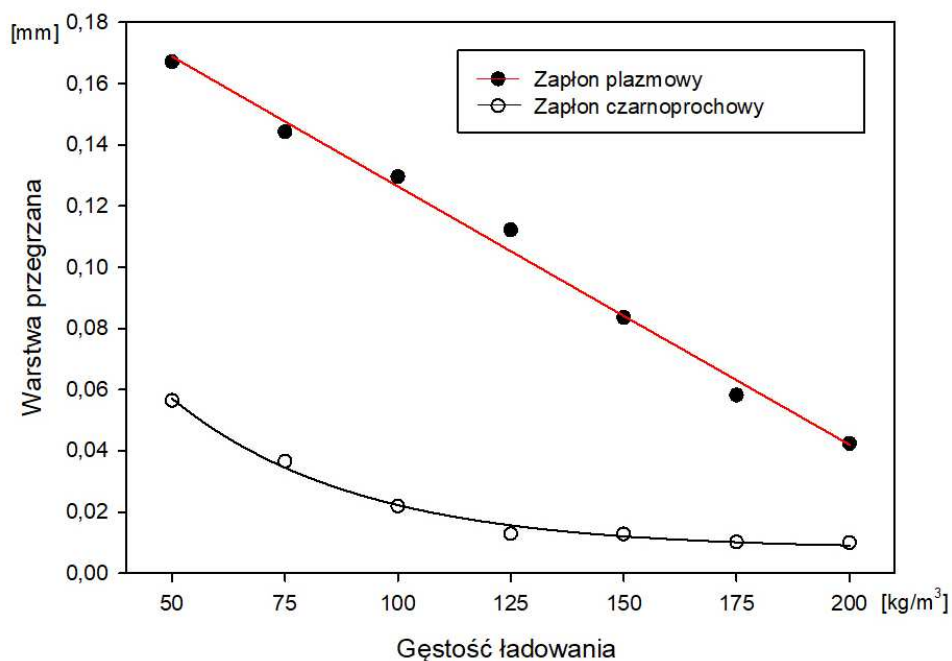
gdzie

$$\chi_1 = \chi \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) \quad (4.17)$$

$$\lambda_1 = \frac{\lambda + \frac{3}{2}\mu}{1 - \frac{\mu}{2}} \quad (4.18)$$

obliczono charakterystyki kształtu $\chi_1 = 0,7774$ i $\lambda_1 = 0,1224$, a następnie grubości warstwy przegrzanej (rys. 4.22, tabela 4.11). Ostatecznie grubość warstwy przegrzanej obliczono z zależności:

$$e_{\text{przegrzane}} = - \frac{\chi_1 - \sqrt{\chi_1(\chi_1 + 4\lambda_1\psi)}}{2\chi_1\lambda_1} \cdot e_1 \quad (4.19)$$



Rys.4.18. Grubość warstwy przegrzanej dla różnych rodzajów zapłonu

Jak wynika z rys. 4.18 oraz danych zawartych w tabeli 4.11, grubość warstwy przegrzanej dla zapłonu plazmowego jest kilkakrotnie wyższa niż dla zapłonu czarnoprochowego. Jest to spowodowane wyższą temperaturą plazmy, nadcieklymi własnościami plazmy oraz bardzo silnym promieniowaniem UV, które plazma emituje. Promieniowanie UV emitowane przez plazmę ma jednak wpływ na proch do momentu rozpalenia się ziaren. Gazy prochowe zawierające cząstki stałe są nieprzejrzyste, co ogranicza wpływ promieniowania w dalszej części procesu spalania. Tak duża grubość warstwy przegrzanej powinna redukować wpływ temperatury początkowej prochu na szybkość jego spalania.

Tabela 4.11. Grubość warstwy przegrzanej przy różnych metodach zapłonu

Gęstość ładowania Δ [kg/m ³]	Zapłon czarnoprochowy [μ m]	Zapłon plazmowy [μ m]
50	56,4	167,1
75	36,6	144,2
100	21,9	129,6
125	12,9	112,2
150	12,8	83,6
175	10,2	58,2
200	<<0,1	42,4

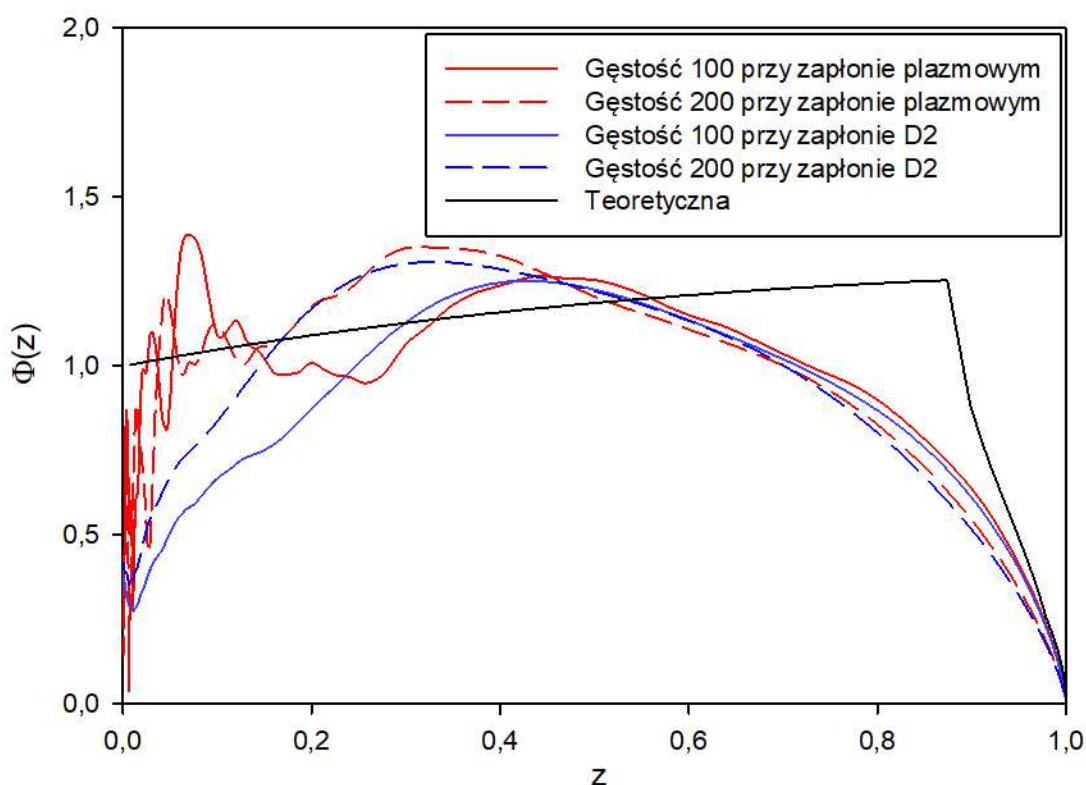
Według Sieriebriakowa [39] zmianę powierzchni spalania ziaren prochowych w trakcie spalania opisuje następująca zależność zwana funkcją kształtu:

$$\Phi(z) = 1 + 2\lambda z + 3\mu z^2 \quad (4.20)$$

Na jej podstawie można określić, czy spalanie danego prochu ma charakter progresywny (proch zwiększa swoją powierzchnię w czasie palenia), degresywny (proch zmniejsza powierzchnię w czasie palenia) czy też neutralny.

Dla ziaren siedmiokanalikowych wartość funkcji kształtu rośnie do momentu, w którym następuje rozpad ziarna. Po rozpadzie ziaren następuje gwałtowna zmiana z charakteru progresywnego na degresywny. Przy prawidłowym rozkładzie kanalików rozpad ten następuje przy spaleniu około 85 % ziarna ($\psi \approx 0,85$).

Funkcję kształtu dla prochu 5/7 cfl (teoretyczną i wynikającą z badań doświadczalnych) zaprezentowano na rys. 4.19.



Rys. 4.19. Funkcja kształtu $\Phi(z)$ dla różnych gęstości ładowania

Rzeczywisty przebieg funkcji kształtu określa się na podstawie rejestracji przebiegu ciśnienia w komorze manometrycznej. Różniczkując wzór 4.13 po czasie otrzymamy charakterystykę $\frac{dp}{dt} = f\left(\frac{d\psi}{dt}\right)$

Korzystając z zależności:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{S_1}{\Lambda_1} \frac{S}{S_1} u \quad (4.21)$$

przekształcając, otrzymujemy:

$$\frac{d\psi}{dp} \frac{dp}{dt} = \frac{S_1}{\Lambda_1} \frac{S}{S_1} u \quad (4.22)$$

a stąd:

$$\frac{d\psi}{dp} \frac{dp}{dt} \frac{\Lambda_1}{S_1} \frac{1}{u} = \frac{S}{S_1} \quad (4.23)$$

gdzie:

$d\psi/dp$ dane jest wzorem (4.10),

dp/dt jest pochodną zarejestrowanej krzywej eksperymentalnej,

u – jest szybkością spalania.

Ze wzoru (4.23) można wyznaczyć zatem charakterystykę kształtu opisaną w tym równaniu zależnością

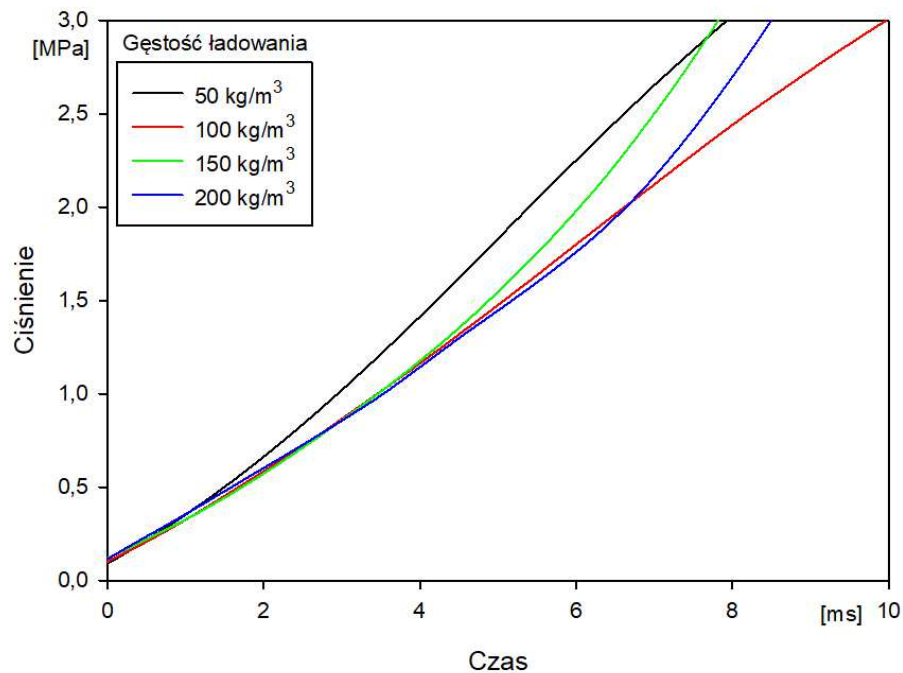
$$\Phi = \frac{S}{S_1} \quad (4.24)$$

Teoretyczna funkcja kształtu wynika z założenia o jednoczesnym rozpaleniu się na całej powierzchni wszystkich ziaren w komorze manometrycznej. Rzeczywista funkcja kształtu znacznie odbiega od teoretycznej funkcji kształtu (rys 4.19). W pierwszej części wykresu do wartości $z = 0,2$ spowodowane to jest stopniowym rozpalaniem się ziaren. Początkowo następuje rozpalanie się ziaren położonych bliżej zapłonika i następnie proces rozpalania przekazywany jest w głąb komory spalania, co widzimy jako wzrost powierzchni spalania. W przypadku zapłonu plazmowego jest on gwałtowniejszy i ma swoje maksimum w okolicy $z = 0,1$. W przypadku zapłonu czarnoprochowego proces rozpalania jest stopniowy. Stopniowe rozpalanie się ziaren prochowych jest także przyczyną różnic w przebiegach teoretycznej i rzeczywistej funkcji kształtu. Niejednoczesne rozpalenie się ziaren powoduje ich niejednoczesny rozpad i brak wyraźnego momentu przejścia od spalania progresywnego do degresywnego.

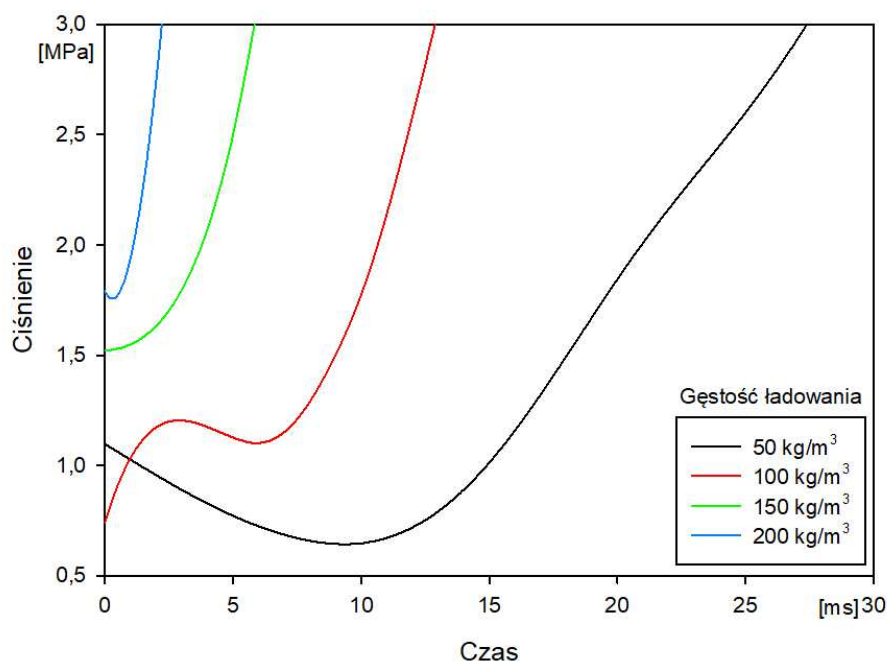
4.3.2. Proch dwubazowy JA-2

Podobne analizy dynamicznych charakterystyk spalania jak dla prochu 5/7 cfl wykonano również dla dwóch pozostałych prochów. Dla prochu JA-2 podstawą analiz były wyniki badań pirostatycznych zaprezentowane w punkcie 4.2.2. Przyjmując za umowne ciśnienie zapłonu o wartości 3 MPa można porównać wpływ zapłonu na początkową fazę spalania.

Czas osiągnięcia ciśnienia 3 MPa od ciśnienia 0,1 MPa dla zapłonika czarnoprochowego jest słabo zależny od gęstości ładowania (rys. 4.20). Z kolei dla zapłonika plazmowego (rys. 4.21) można zaobserwować wyraźną zależność pomiędzy gęstością ładowania, a czasem osiągnięcia ciśnienia 3 MPa. Wyraźnie widoczny dla niskich gęstości ładowania jest spadek ciśnienia w początkowej fazie. Jest to okres, w którym plazma ochładza się, a proch jeszcze nie został rozpalony. Jednak przy wyższych gęstościach ładowania efekt ten zanika.



Rys. 4.20. Faza zapłonu dla zapłonika czarnoprochowego

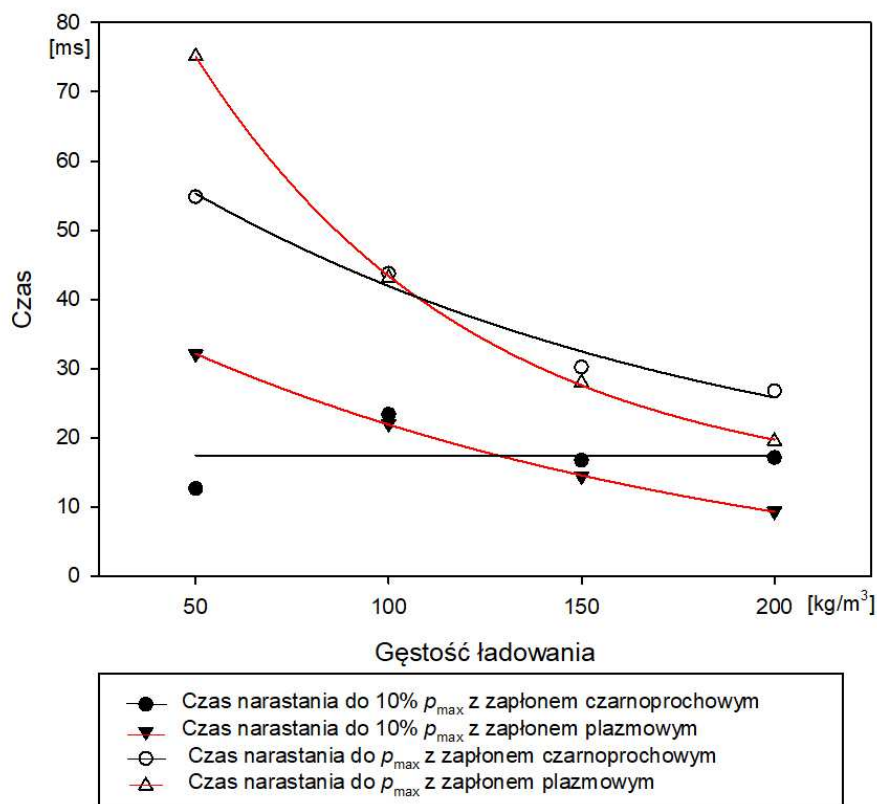


Rys. 4.21. Faza zapłonu dla zapłonika plazmowego

Porównując czasy osiągnięcia ciśnienia maksymalnego oraz ciśnienia równego 10% p_{\max} (rys. 4.22) widoczna jest powtarzająca się zależność zmniejszania się czasu wraz ze zwiększającą się gęstością ładowania dla zapłonu plazmowego. Jedynie dla gęstości $\Delta = 50 \text{ kg/m}^3$ zapłon prochem czarnym dał krótszy czas narastania zarówno do ciśnienia równego 10% p_{\max} jak i do ciśnienia maksymalnego. Dla zapłonu z prochem czarnym jest większy rozrzut w szczególności dla czasów osiągnięcia ciśnienia równego 10% p_{\max} .

Analizując wykresy zależności czasu narastania do p_{\max} od gęstości ładowania można zauważyć, że dla zapłonu plazmowego przyjmuje on charakter wykładniczy.

Parametrem, na który również ma wpływ rodzaj zapłonu jest współczynnik u_1 liniowego prawa prędkości spalania. Korzystając z wyprowadzonych wcześniej wzorów (3.1-3.5) wyznaczono wartości tego współczynnika dla poszczególnych gęstości ładowania. Wartość współczynnika dla gęstości ładowania $\Delta = 50 \text{ kg/m}^3$ przyjmuje wartość większą dla zapłonu czarnoprochowego, jednak dla pozostałych gęstości ładowania współczynnik u_1 przyjmuje wyższą wartość dla zapłonu plazmowego (tab. 4.12).



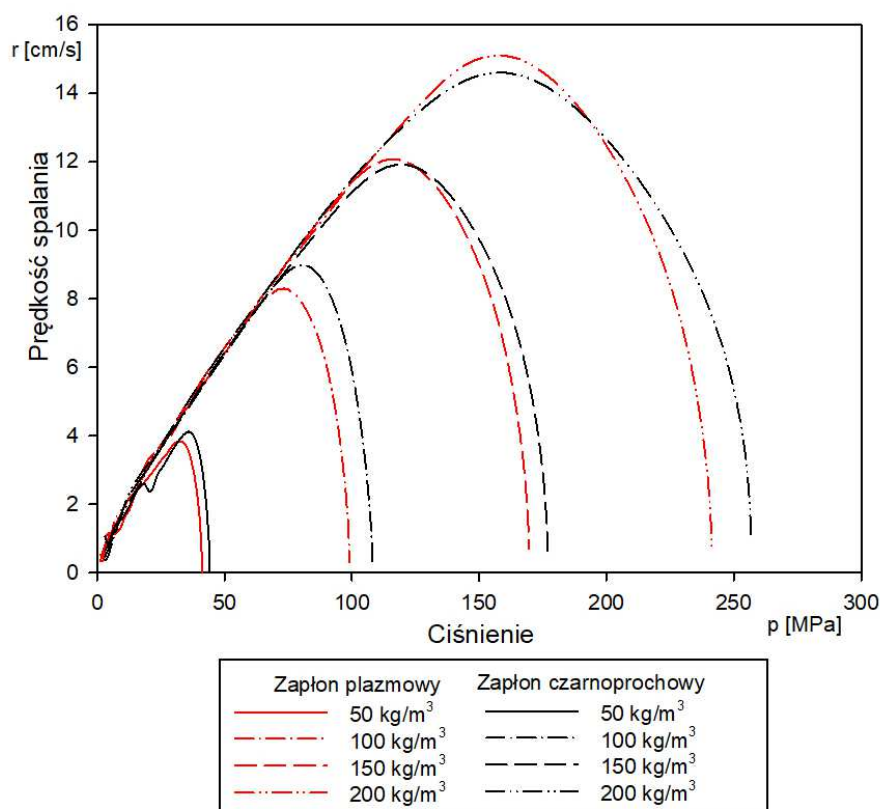
Rys. 4.22. Czasy narastania ciśnienia dla poszczególnych rodzajów zapłonu

Współczynniki u_1 liniowego prawa prędkości spalania są skorelowane z czasami narastania ciśnienia, stąd w przypadku prochu czarnego przy najmniejszej gęstości ładowania współczynnik liniowego prawa prędkości spalania u_1 przyjmuje większą wartość współczynnika.

Tabela 4.12. Współczynnik u_1 liniowego prawa prędkości spalania

Gęstość ładowania Δ [kg/m³]	Zapłon czarnoprochowy u_1 [mm/MPa·s]	Zapłon plazmowy u_1 [mm/MPa·s]
50	1,80	1,66
100	1,36	1,39
150	1,22	1,23
200	1,14	1,15

Wykresy prędkości spalania obliczonej według STANAG 4115 (rys. 4.23) nie wykazują znaczącej różnicy w zależności od sposobu zapłonu.

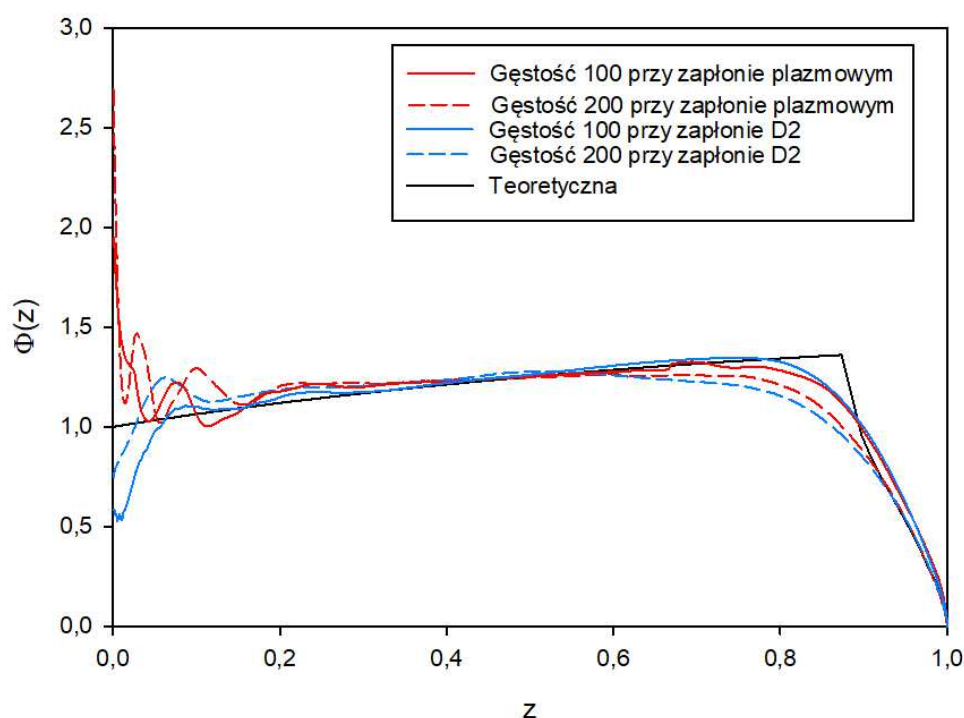


Rys. 4.23. Prędkość spalania r w funkcji ciśnienia p dla różnych gęstości ładowania

Podobnie jak w przypadku prochu 5/7 cfl nieznacznie większa prędkość spalania występuje przewaga dla gęstości ładowania 200 kg/m³. Jest to niemalże identyczna różnica wynosząca 3,5%.

Charakterystyczną cechą prochu JA-2 są bardzo podobne pod względem wymiarów geometrycznych ziarna, co przy innych prochach nie zawsze jest zachowane. Skutkiem precyzji wykonania ziaren prochu jest bardzo powtarzalna eksperymentalna funkcja kształtu. Porównując ją z teoretyczną funkcją, można obserwować zmianę powierzchni spalania ziaren prochowych.

Na rys. 4.24 przedstawiono funkcję kształtu dla prochu JA-2. Funkcja ta wyraża stosunek bieżącej powierzchni spalania do powierzchni początkowej ziarna w funkcji spalanej części prochu – z . Dla prochów progresywnych, a takimi są badane prochy o ziarnach siedmiokanalikowych, powierzchnia spalania rośnie do pewnej wartości z , następnie ziarno rozpada się na mniejsze fragmenty i następuje spalanie degresywne. Spalanie degresywne spowodowane jest tym, że ziarno po rozpadzie ma kształt mocno nieregularny z palącą się zewnętrzną powierzchnią. Spalanie następuje w głąb nieregularnego ziarna.

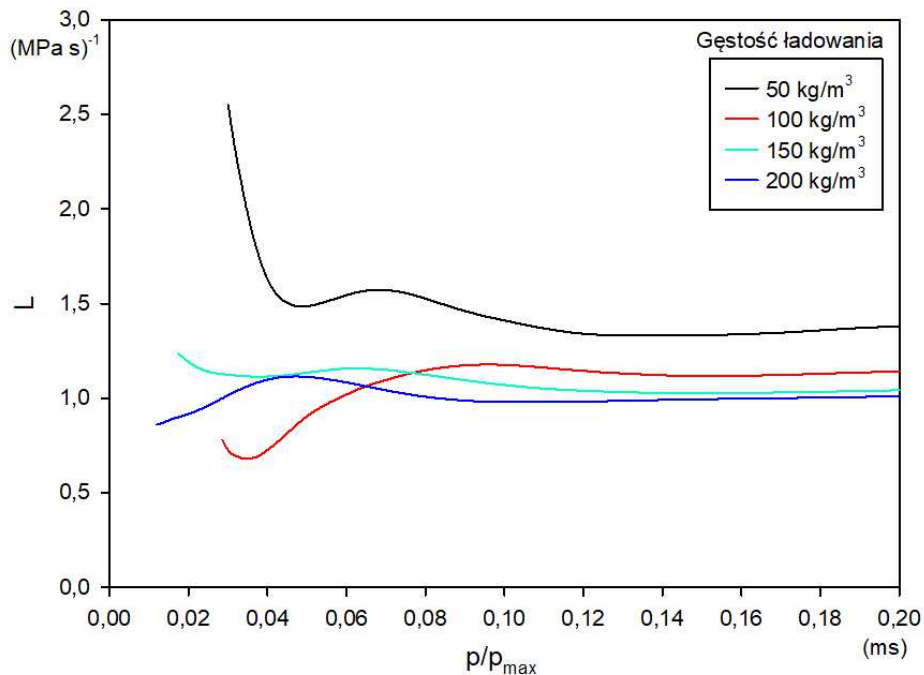


Rys. 4.24. Funkcja kształtu $\Phi(z)$ dla różnych gęstości ładowania

Zaobserwowany w początkowej fazie spalania wyskok rzeczywistej funkcji kształtu dla zapłonu plazmowego spowodowany jest przegrzaniem wierzchniej warstwy prochu. W przypadku zapłonu z prochem czarnym jest to nagrzewanie się na drodze konwekcji i przewodnictwa cieplnego, w przypadku zapłonu plazmowego nagrzewanie wierzchniej warstwy prochu dodatkowo potęguje silne promieniowaniem UV emitowane z obłoku plazmy. Promieniowanie UV w przypadku prochu JA-2 ma potwierdzony wpływ na zmianę właściwości powierzchni poprzez niewielkie spękania i znacząco zwiększa powierzchnię początkową ziarna. Ponadto promieniowanie UV powoduje przechodzenie wiązań azot – azot w stan wzbudzony, co ułatwia ich rozpad. Jednak wraz z rozpoczęciem się palenia materiału wybuchowego promieniowanie UV przestaje docierać do powierzchni ziaren.

Wykresy dynamicznej żywości prochu wykorzystano do obliczenia grubości warstwy przegrzanej ziaren. Początkowe wysoki żywości dynamicznej spowodowane są nagrzaniem wierzchniej warstwy prochu, później następuje spalenie się warstwy przegrzanej i powrót do spalania ze stałą warstwą nagrzanego prochu. W przypadku zapłonu plazmowego jest kilka faz spalania, które spowodowane są wpływem trzech czynników. Pierwszym z nich jest zmiana powierzchni ziarna pod wpływem

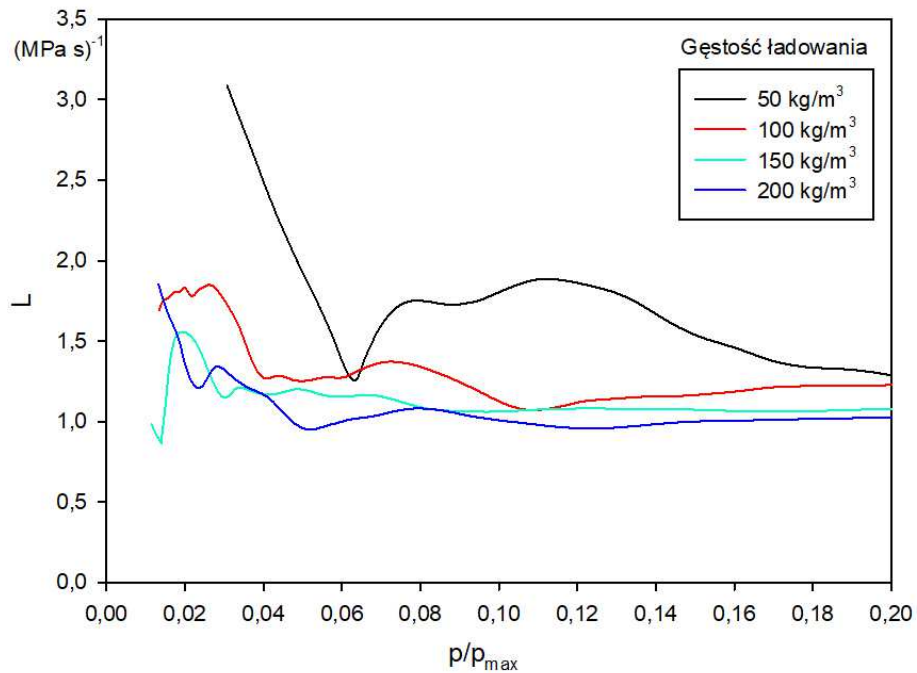
oddziaływania plazmy. Drugim czynnikiem jest wpływ promieniowania UV a ostatnim nagrzanie się prochu od gorącej plazmy wraz z kondensacją par miedzi na powierzchni ziaren. Przy zapłonie z prochem czarnym (rys. 4.25) występuje zazwyczaj jeden wyskok związany głównie z nagrzewaniem się powierzchni ziarna prochu na drodze przewodnictwa cieplnego.



Rys. 4.25. Dynamiczna żywość dla zapłonu czarnoprochowego

Na rys. 4.26 przedstawiono wpływ gęstości ładowania na dynamiczną żywość prochu przy zapłonie plazmowym. Z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że wraz z rosnącą gęstością ładowania spada wartość wyskoków w początkowej fazie spalania. Spowodowane jest to tym, że każda próba została przeprowadzona przy takiej samej energii zapłonu, czyli wraz ze wzrostem gęstości ładowania następowało zmniejszenie ilości energii przypadającej na powierzchnię ziaren prochowych. Dodatkowo szybsze rozpalenie się ziaren przy dużej gęstości ładowania powodowało zaprzestanie dopływu energii do powierzchni ziaren, gdyż gazy prochowe są nieprzejrzyste dla promieniowania UV.

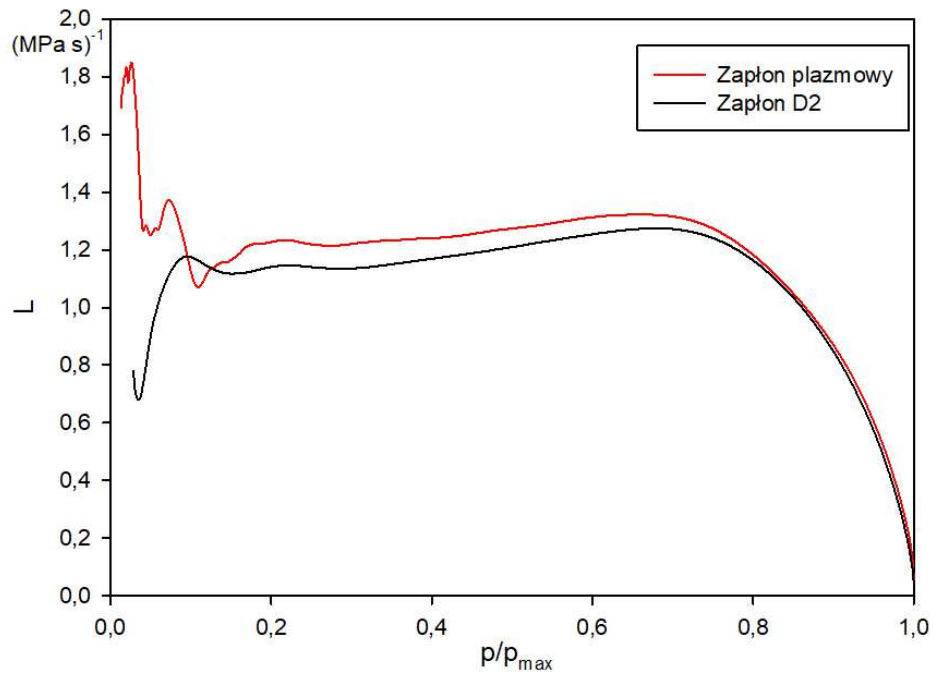
Porównując różnice żywości dynamicznej L w zakresie do wartości $0,2 p/p_{\max}$ uwidacznia się wpływ zapłonu na proces rozpalania się prochu.



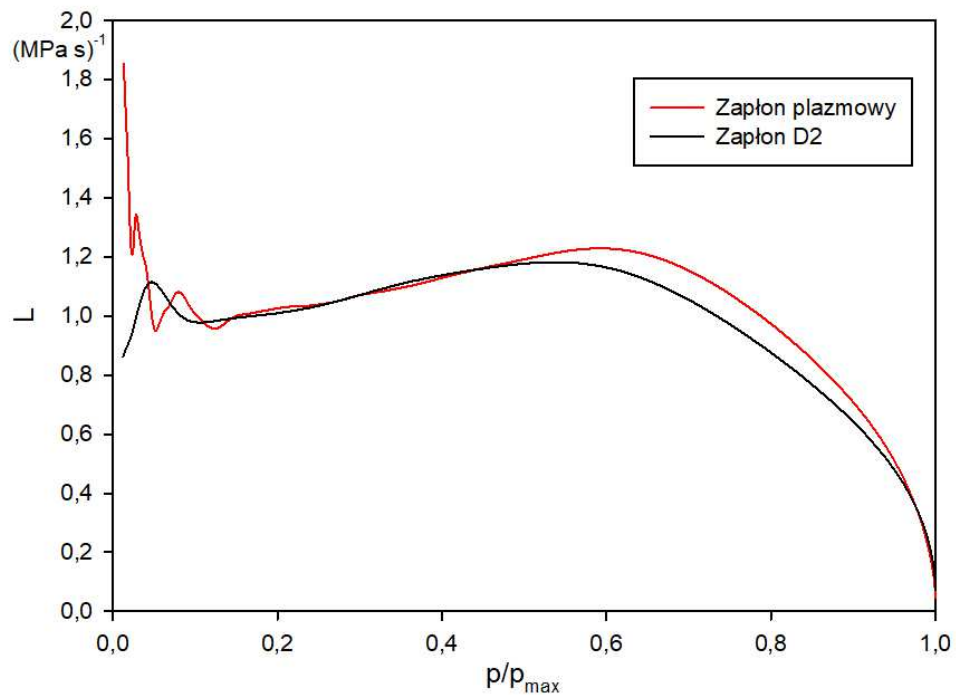
Rys. 4.26. Dynamiczna żywość dla zapłonu plazmowego

Na rys. 4.27 przedstawiono wykres dynamicznej żywości prochu JA-2 dla gęstości ładowania 100 kg/m^3 . Funkcja dynamicznej żywości jest liniowo zależna od funkcji kształtu. Różnice w dynamicznej żywości prochu występują przede wszystkim we wstępnej fazie spalania. Duże różnice występują do wartości ok. $0,2 p/p_{\max}$, co wynika z różnicy w mechanizmach rozpoczęcia procesu spalania prochu. Dla zapłonu prochem czarnym na wykresach żywości dynamicznej prochu widoczne jest początkowe rozpalenie się we wczesnej fazie spalania oraz późniejsze stałe zwiększanie się wartości żywości w czasie palenia aż do rozpadu ziarna, gdzie następuje spadek żywości.

Z kolei dla zapłonu plazmowego cechą charakterystyczną jest wyraźnie wyższa wartość początkowa żywości, następnie spadek w dwóch – trzech etapach i powolne zwiększanie się wartości żywości, aż do rozpadu prochu, który następuje w tym samym momencie (rys. 4.27) lub z niewielkim opóźnieniem (rys. 4.28) w porównaniu z zapłonem czarnoprochowym. Niewielkie opóźnienie osiągnięcia lokalnego maksimum wykresu żywości (rys. 4.28) wskazuje na rozpalenie się ziaren w komorze na większej powierzchni i bardziej równomierne rozpoczęcie procesu rozpadania na mniejsze fragmenty.

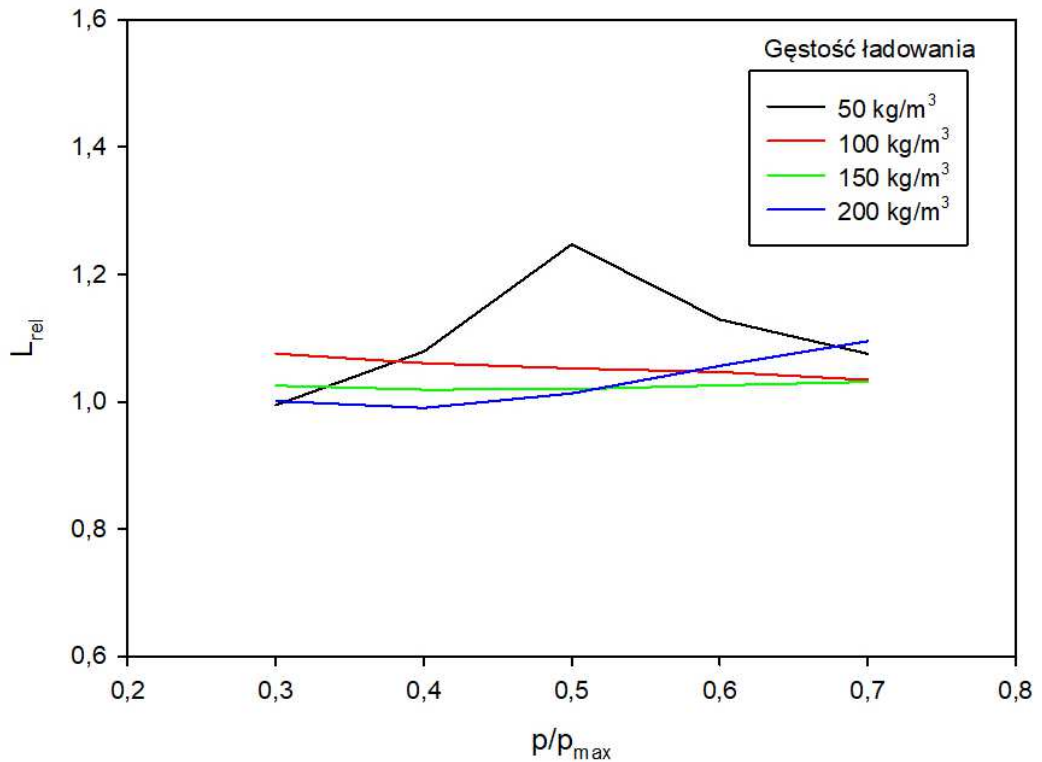


Rys. 4.27. Dynamiczna żywość prochu L dla gęstości ładowania $\Delta = 100 \text{ kg/m}^3$



Rys. 4.28. Dynamiczna żywość prochu L dla gęstości ładowania $\Delta = 200 \text{ kg/m}^3$

Aby porównać żywość dynamiczną prochu przy zapłonie z prochem czarnym oraz z zapłonem plazmowym wyznaczono wartości funkcji żywości względnej, gdzie za wartość odniesienia przyjęto żywość prochu JA-2 przy zapłonie z prochem czarnym (rys. 4.29).

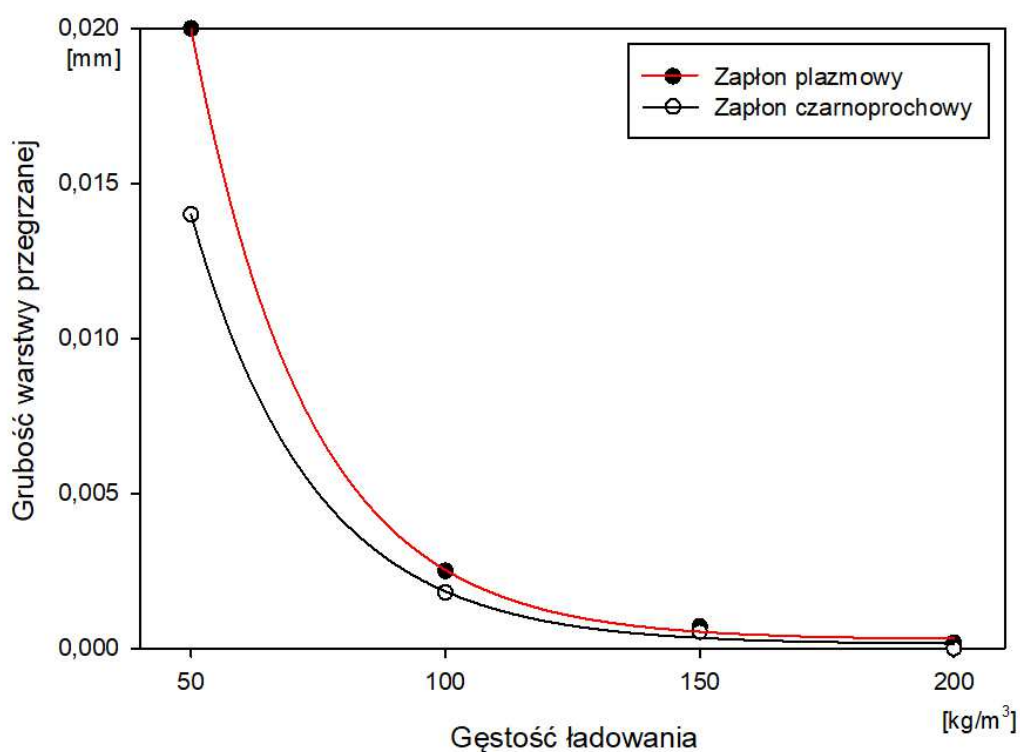


Rys. 4.29. Względna dynamiczna żywość dla zapłonu plazmowego i czarnoprochowego

Na podstawie wykresów przedstawionych na rys. 4.25 i rys. 4.26 obliczono z zależności 4.19 grubość warstwy przegrzanej dla różnych gęstości ładowania. Wyniki obliczeń dla zapłonu czarnoprochowego i zapłonu plazmowego zestawione zostały w tabeli 4.13 oraz przedstawione na rysunku 4.30.

Tabela 4.13. Grubość warstwy przegrzanej

Gęstość ładowania Δ [kg/m ³]	Zapłon czarnoprochowy [μ m]	Zapłon plazmowy [μ m]
50	14,0	20,0
100	1,8	2,5
150	0,5	0,7
200	$\ll 0,1$	0,2

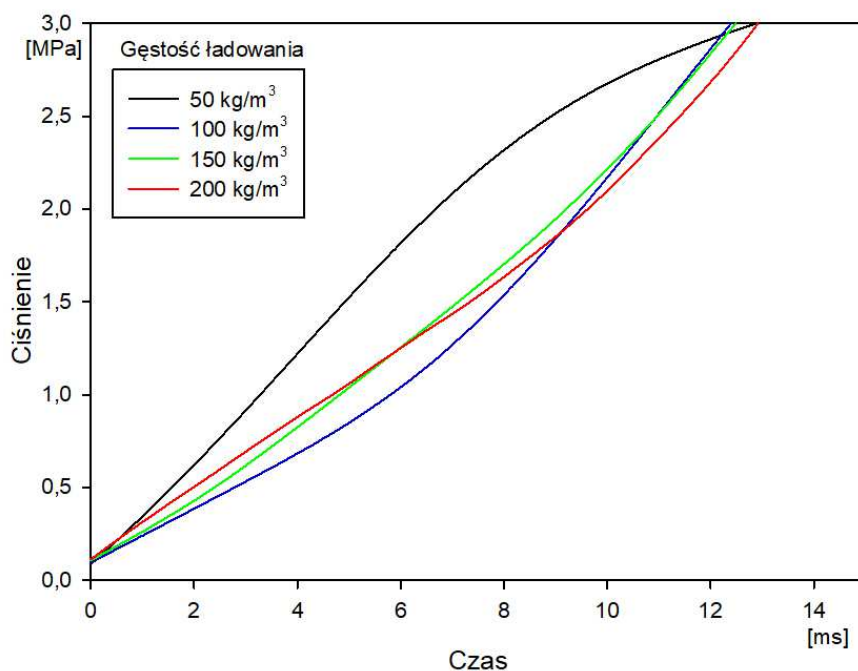


Rys. 4.30. Grubość warstwy przegrzanej

Niezależnie od gęstości ładowania grubość warstwy przegrzanej jest większa w przypadku zapłonu plazmowego.

4.3.3. Proch wielobazowy SC

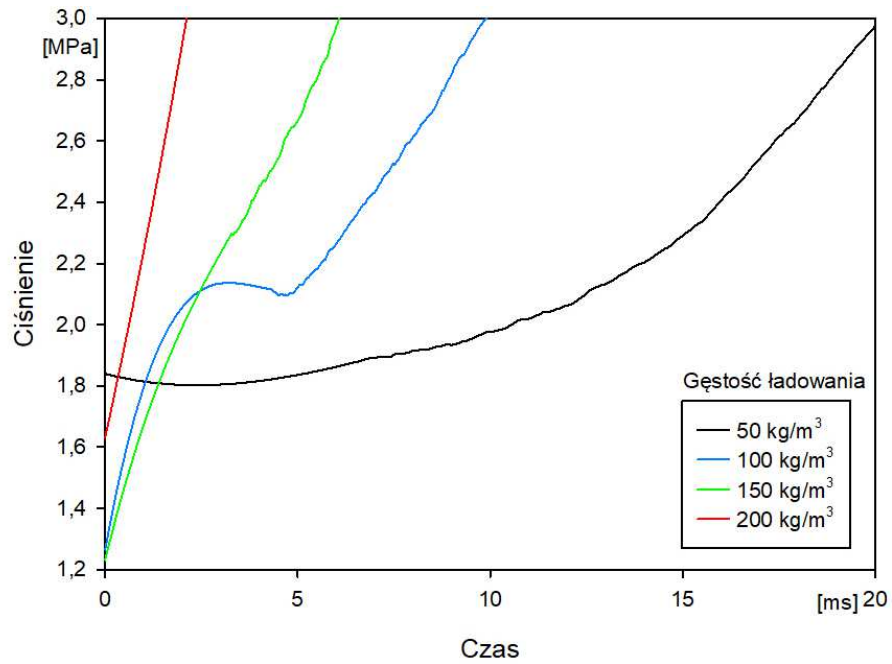
Podczas badania prochu SC zaobserwowano, że dla zapłonu czarnoprochowego czas osiągnięcia ciśnienia 3 MPa jest praktycznie niezależny od gęstości ładowania (rys. 4.31). Czas osiągnięcia ciśnienia 3 MPa od ciśnienia 0,1 MPa wynosił ok 12 ms i były niezależne od zastosowanej w eksperymencie masy prochu czarnego. Niewielkie różnice mogą być związane z ułożeniem się prochu wewnątrz komory spalania i różnym ułożeniem woreczka z główką zapalczą.



Rys. 4.31. Faza zapłonu dla zapłonika czarnoprochowego

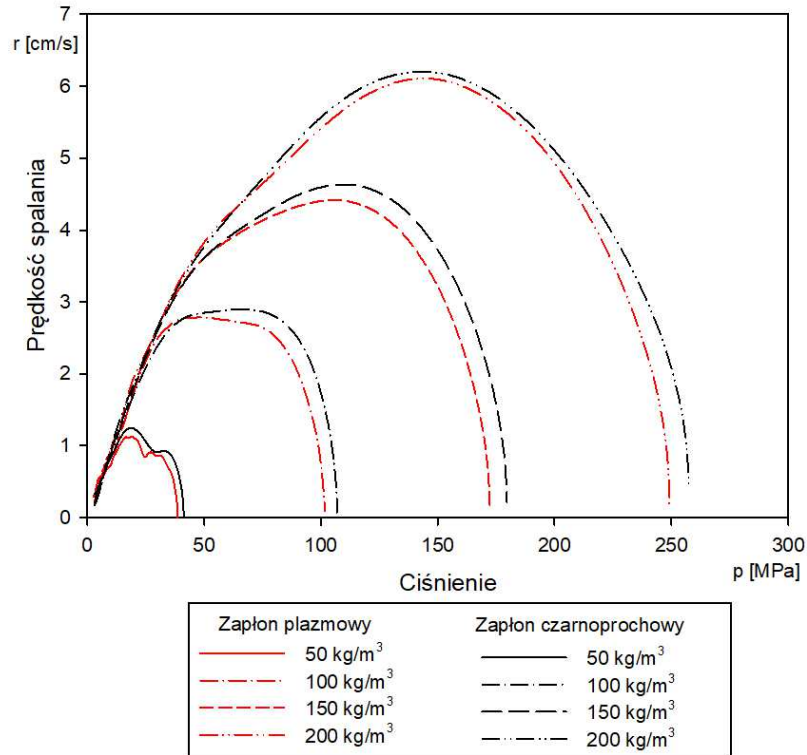
Przy zapłonie plazmowym, wysokotemperaturowe gazy przy kontakcie z chłodnymi elementami komory i prochu ulegają schłodzeniu co skutkuje obniżeniem ciśnienia. Szczególnie jest to widoczne na rys. 4.32 dla gęstości ładowania 50 i 100 kg/m³. Jednak nagłe rozpalenie się ziaren prochowych znajdujących się blisko wylotu generatora plazmy powoduje rozpalanie się dalszej części prochu. Przy zapłonie plazmowym wyraźnie widoczna jest zależność osiągnięcia ciśnienia 3 MPa od gęstości ładowania. Im wyższa gęstość ładowania, tym krótszy jest czas osiągnięcia ciśnienia 3 MPa. Zwiększenie gęstości ładowania z $\Delta = 50 \text{ kg/m}^3$ do $\Delta = 200 \text{ kg/m}^3$, powoduje skrócenie czasu spalania z ponad 20 ms do 2 ms.

Zależność czasu osiągnięcia ciśnienia 3 MPa od gęstości ładowania dla zapłonika plazmowego związana jest przede wszystkim z wartością objętości swobodnej, a także z ilością ziaren prochowych, które znajdują się w pobliżu dyszy generatora plazmy. Jedynie dla gęstości 50 kg/m³ czas osiągnięcia ciśnienia 3 MPa jest dłuższy dla zapłonu plazmowego niż dla zapłonu czarnoprochowego.



Rys. 4.32. Faza zapłonu dla zapłonika plazmowego

Porównując wykres prędkości spalania $r(p)$ (rys. 4.33) z wykresami wyznaczonymi dla dwóch poprzednich prochów, wyraźna jest tu nieregularność w przebiegach. Różnice widoczne są szczególnie przy małych gęstościach ładowania.

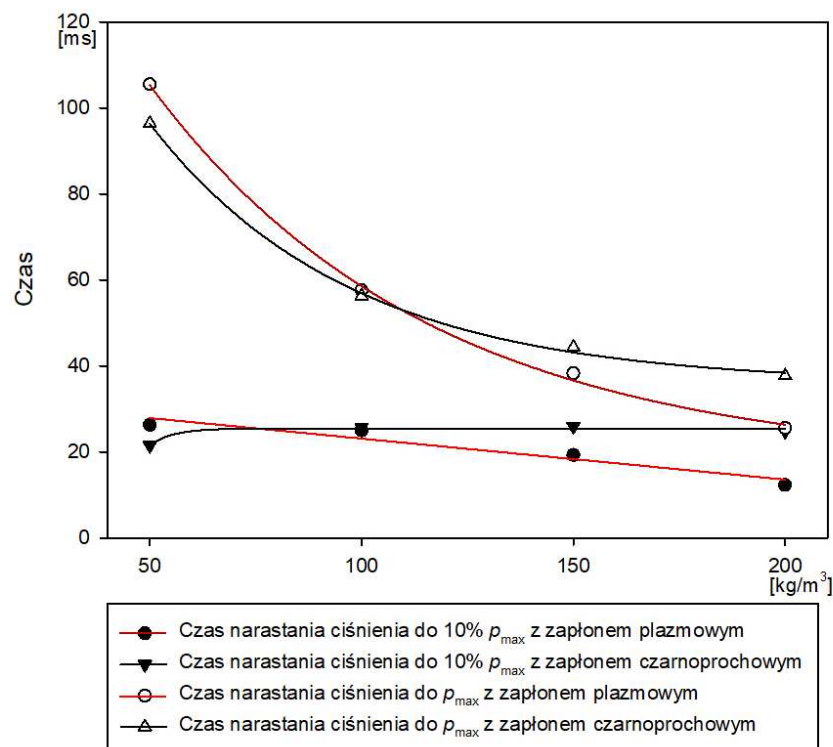


Rys. 4.33. Prędkość spalania r w funkcji ciśnienia p dla różnych gęstości ładowania

Przebieg przy gęstości ładowania 50 kg/m^3 niezależnie od rodzaju zapłonu wykazuje pewne anomalie a dla gęstości ładowania 100 kg/m^3 wykazuje plato, co nie było spotykane przy dwóch poprzednich prochach.

Na rys. 4.34 zamieszczono wykres czasów narastania dla poszczególnych rodzajów zapłonu. Porównując czasy osiągnięcia ciśnienia maksymalnego oraz ciśnienia równego $10\% p_{\max}$ zauważyć można, że tylko dla najmniejszej gęstości ładowania czasy są krótsze dla zapłonu czarnoprochowego. Przy zapłonie plazmowym otrzymane wartości czasów były niższe dla wyższych gęstości ładowania. Przy wysokich gęstościach ładowania część ziaren prochowych znajdująca się blisko wylotu z generatora plazmy zapalana jest natychmiast, stąd szybsze narastanie ciśnienia dla wysokich gęstości ładowania.

Współczynnik liniowego prawa prędkości spalania u_1 dla prochu kompozytowego wykazuje niewielkie różnice w zależności od zapłonu. Tak jak przy przebiegach ciśnienia wyższe wartości współczynnika u_1 dla zapłonu czarnoprochowego występują jedynie przy najniższej gęstości ładowania $\Delta = 50 \text{ kg/m}^3$. Dla innych gęstości nieznacznie wyższe wartości współczynnika u_1 występują dla zapłonu plazmowego.

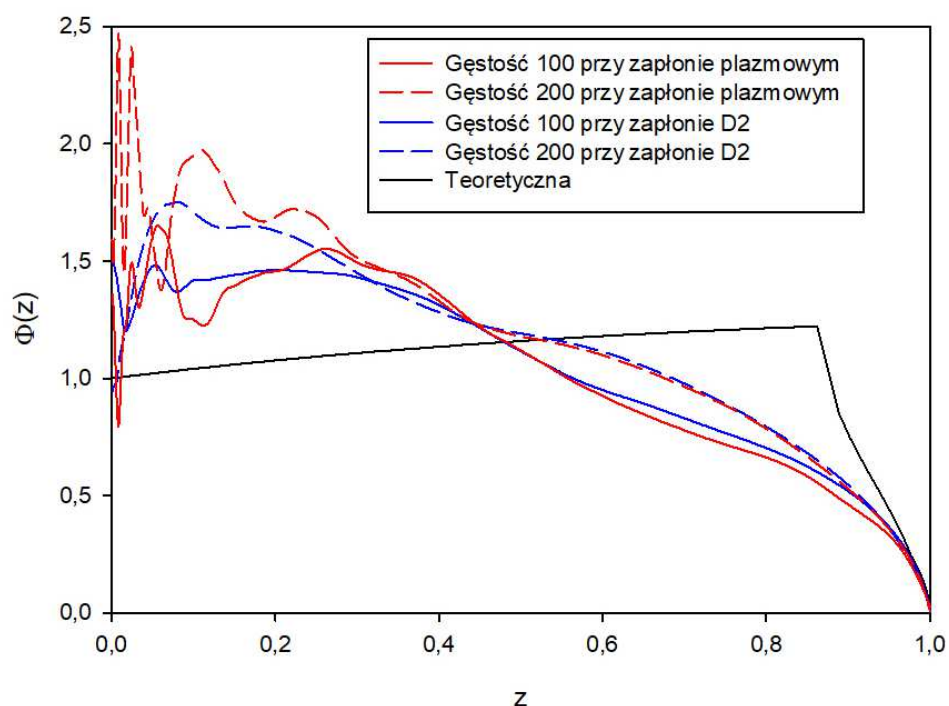


Rys. 4.34. Czasy narastania ciśnienia dla poszczególnych rodzajów zapłonu

Tabela 4.14. Współczynnik u_1 liniowego prawa prędkości spalania

Gęstość ładowania Δ [kg/m ³]	Zapłon czarnoprochowy u_1 [mm/MPa·s]	Zapłon plazmowy u_1 [mm/MPa·s]
50	0,60	0,58
100	0,54	0,54
150	0,52	0,53
200	0,51	0,52

Następnie dla badanego prochu SC wyznaczony została funkcja kształtu, której przebieg przedstawiono na rys 4.35. Znacznie odbiega ona od krzywej teoretycznej, chociaż proch SC jest również prochem 7 kanalikowym.

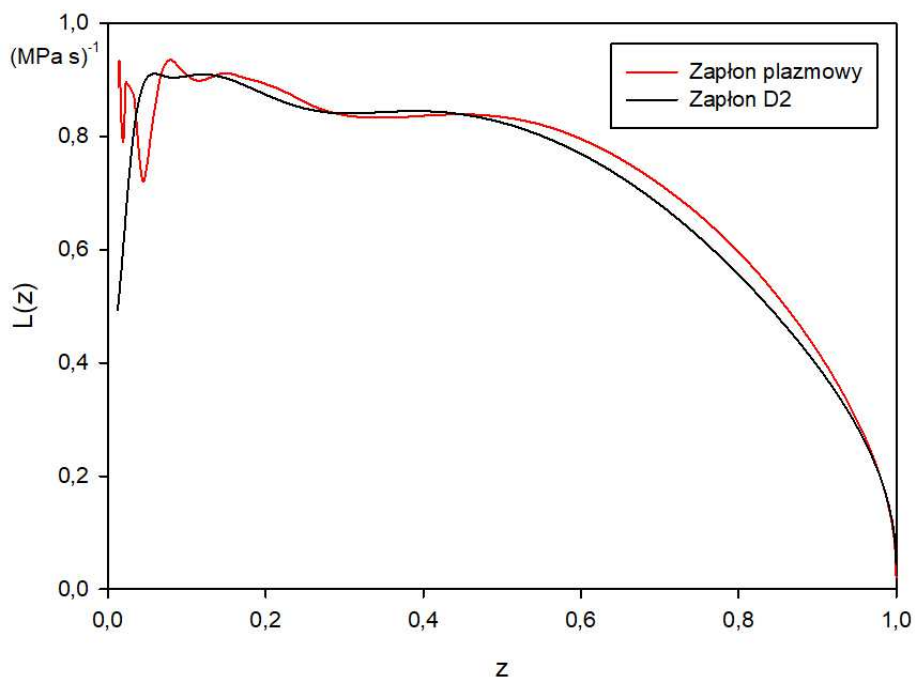


Rys. 4.35. Porównanie funkcji kształtu prochu SC dla zapłonu plazmowego i czarnoprochowego przy różnych gęstościach ładowania

Analiza krzywych funkcji kształtu wykazuje, że od początku spalania proch ten rozpala się na znacznie większej powierzchni niż zakłada to model teoretyczny. Po dosyć szybkiej pierwszej fazie palenia do wartości ok. 0,3 z, następuje faza degresywna. Faza ta prawdopodobnie spowodowana została przedwczesnym rozpadem ziaren. Ziarna z kształtu progresywnego, siedmiokanalikowego, zmieniły

swój kształt na degresywny. Jedną z przyczyn tego zjawiska może być niska wytrzymałość mechaniczna ziaren w podwyższonych temperaturach i ciśnieniach. Przy wysokiej temperaturze i ciśnieniu następuje kruszenie się ziaren, które przyjmują różne kształty degresywne [41].

Na rys. 4.36 przedstawiono przebieg dynamicznej żywości prochu SC dla zapłonu czarnoprochowego oraz zapłonu plazmowego. Największe różnice występują w początkowej fazie przebiegu funkcji. Przy zapłonie z prochem czarnym widać wyraźne narastanie krzywej, następnie palenie się ze stałą powierzchnią i powolny jej spadek. Przy zapłonie z generatorem plazmy, widoczna jest początkowa wysoka wartość (zapłon na dużej powierzchni), następnie spowolnienie procesu spalania i powrót do docelowej wartości żywości dynamicznej. Spadek żywości w początkowej fazie w przypadku prochu SC jest wyraźnie widoczny ze względu na inny skład prochu oraz dodatki do prochu, które obniżają jego wrażliwość na zapłon.



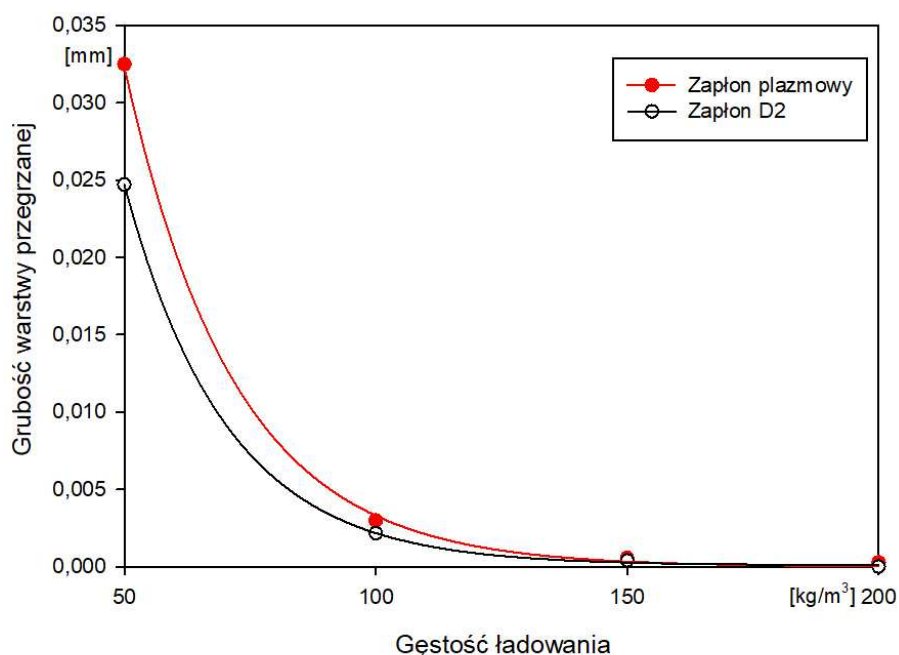
Rys. 4.36. Dynamiczna żywość prochu L dla gęstości ładowania 200 kg/m^3

Na podstawie wykresów dynamicznej żywości prochu wyznaczono grubość warstwy przegrzanej (tab. 4.15, rys. 4.37). Widoczna jest większa grubość warstwy przegrzanej dla zapłonu plazmowego. Grubość warstwy przegrzanej dla zapłonu plazmowego jest o około 50% większa niż dla zapłonu czarnoprochowego.

Tabela 4.15. Grubość warstwy przegrzanej

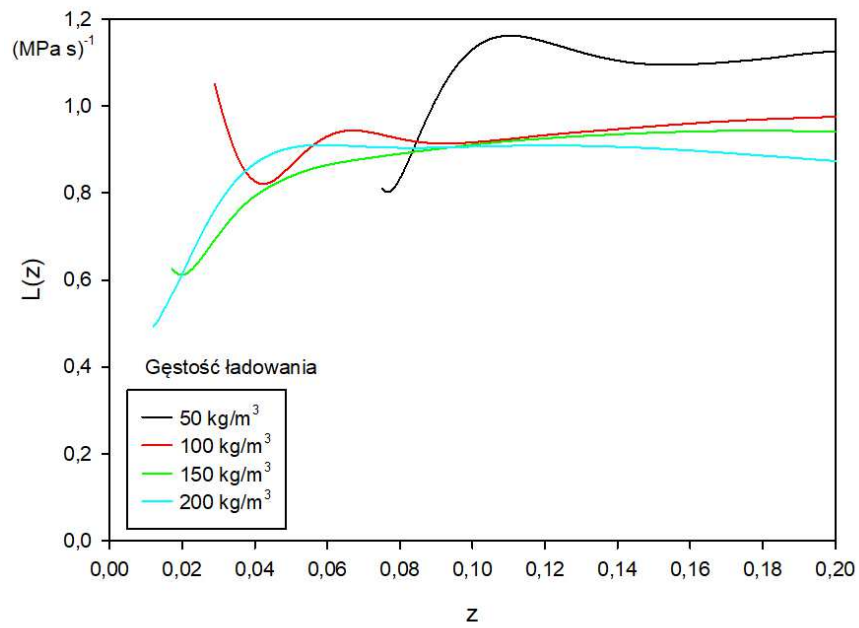
Gęstość ładowania Δ [kg/m ³]	Zapłon czarnoprochowy [μ m]	Zapłon plazmowy [μ m]
50	24,7	33,0
100	2,2	3,0
150	0,4	0,6
200	<<0,1	0,3

Dla zapłonu czarnoprochowego przy gęstości ładowania 200 kg/m³ niemożliwe stało się wyodrębnienie części wykresu która odpowiadałaby za warstwę przegrzaną. Podobnie jak w przypadku prochu JA-2 grubość warstwy przegrzanej ma większą wartość dla zapłonu plazmowego (rys. 4.36)

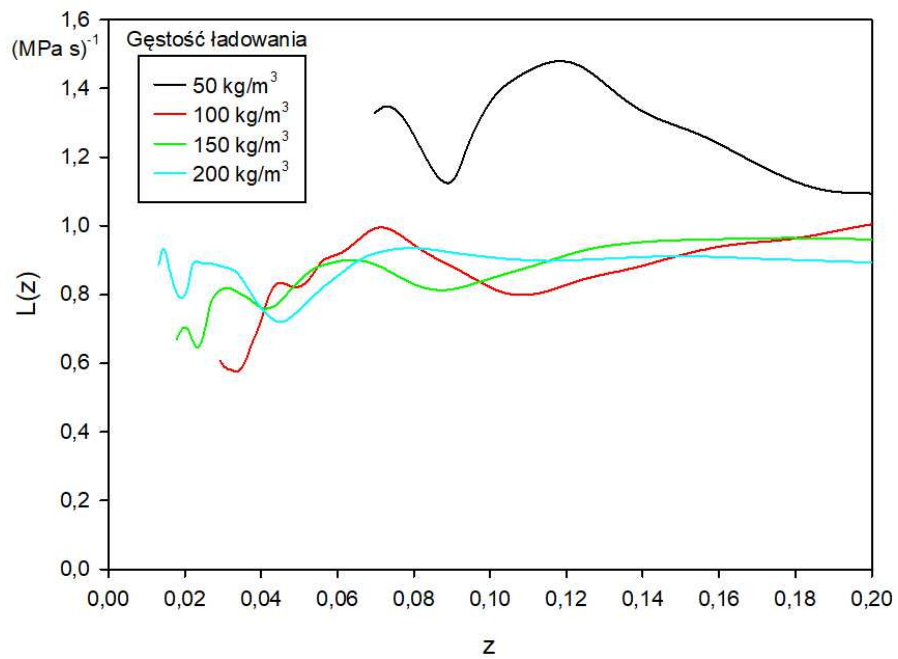


Rys. 4.37. Grubość warstwy przegrzanej

Wykresy żywości dynamicznej prochu w zakresie do 0,2 z pokazują proces rozpalania się ziaren. Dla zapłonu czarnoprochowego (rys 4.38) wartości są nieznacznie niższe w pierwszej fazie palenia niż dla zapłonu plazmowego (rys 4.39). Jedynie gęstość ładowania $\Delta = 50$ kg/m³ osiąga większe wartości przy zapłonie plazmowym niż przy zapłonie czarnoprochowym.

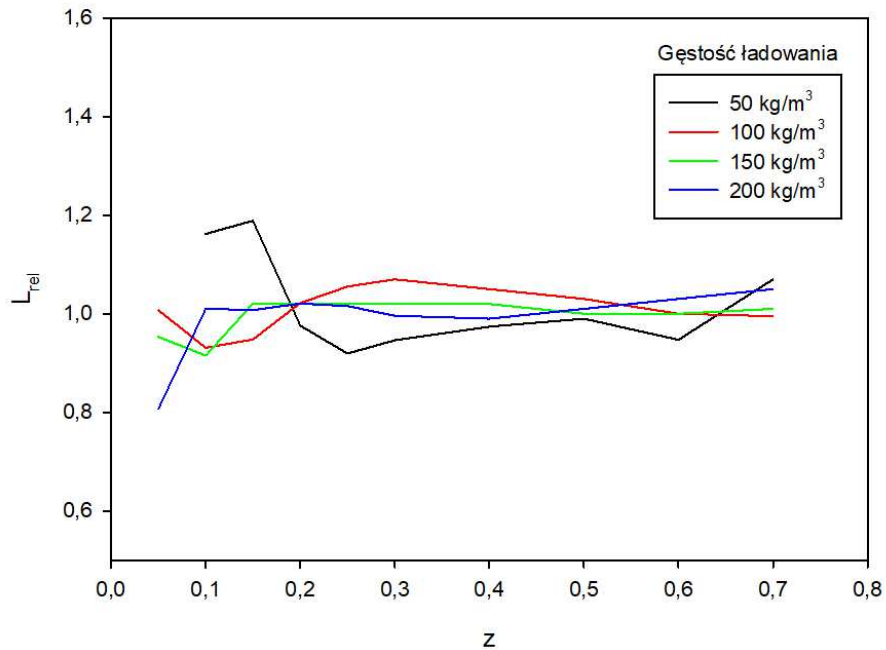


Rys. 4.38. Dynamiczna żywość dla zapłonu czarnoprochowego



Rys. 4.39. Dynamiczna żywość dla zapłonu plazmowego

Porównując wartości żywości dynamicznej dla obydwu zapłonów, otrzymujemy przedstawiony na rys. 4.40 wykres względnej żywości dynamicznej, gdzie żywością odniesienia jest żywość prochu z zapłonem czarnoprochowym.



Rys. 4.40. Względna dynamiczna żywość dla zapłonu plazmowego i czarnoprochowego

Wykres względnej żywości dynamicznej prochu SC wykazuje nieznaczny wzrost żywości dla gęstości ładowania powyżej 100 kg/m³, jednak brak jest jakichkolwiek zależności wzrostu. Spowodowane jest to niską wrażliwością prochu na pobudzenie oraz bardzo niską energią wyładowania stosowaną w układzie zapłonowym.

4.4. Dyskusja wyników badań

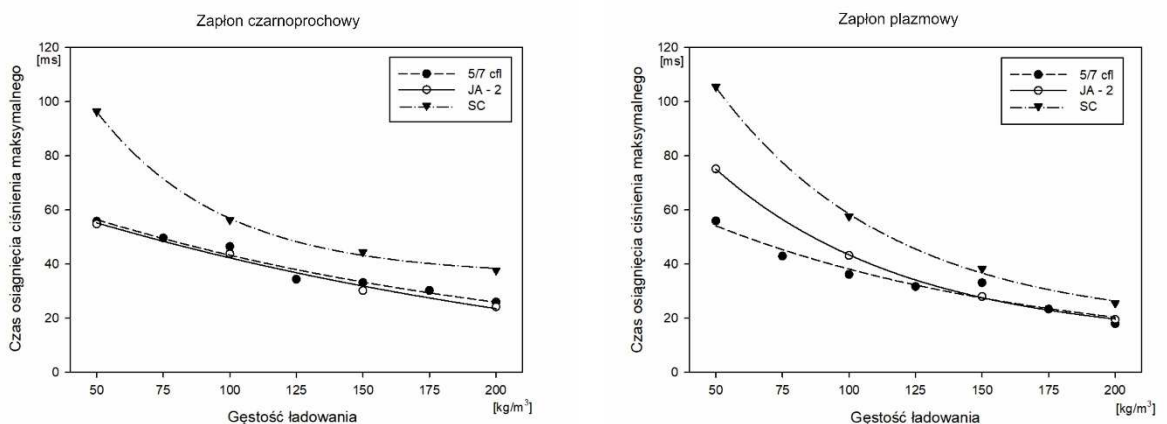
W rozdziale przedstawiono analizę wyników badań pirostatycznych reprezentantów prochów jedno-, dwu- i wielobazowego z wykorzystaniem zapłonu czarnoprochowego i plazmowego. Analiza przedstawionych wyników obejmowała w szczególności fazę zapłonu. Zaprezentowane wyniki obejmowały następujące analizy:

1. Przebiegu ciśnienia $p(t)$ do momentu osiągnięcia ciśnienia maksymalnego.
2. Przebiegu ciśnienie $p(t)$ do momentu osiągnięcia ciśnienia równego 10% ciśnienia maksymalnego.
3. Przebiegu ciśnienia $p(t)$ do wartości 3 MPa.
4. Wartości współczynnika u_1 liniowego prawa spalania.
5. Wartości prędkości spalania $r(p)$ wyznaczonej według STANAG 4115.
6. Funkcji kształtu.

7. Grubości przegrzanej warstwy prochu.
8. Dynamicznej żywości prochu L w całym zakresie spalania.
9. Dynamicznej żywości prochu L w zakresie $(0 - 0,2)$ z wraz z opisem fazy rozpalania się ziarna.
10. Względnej dynamicznej żywości prochu.

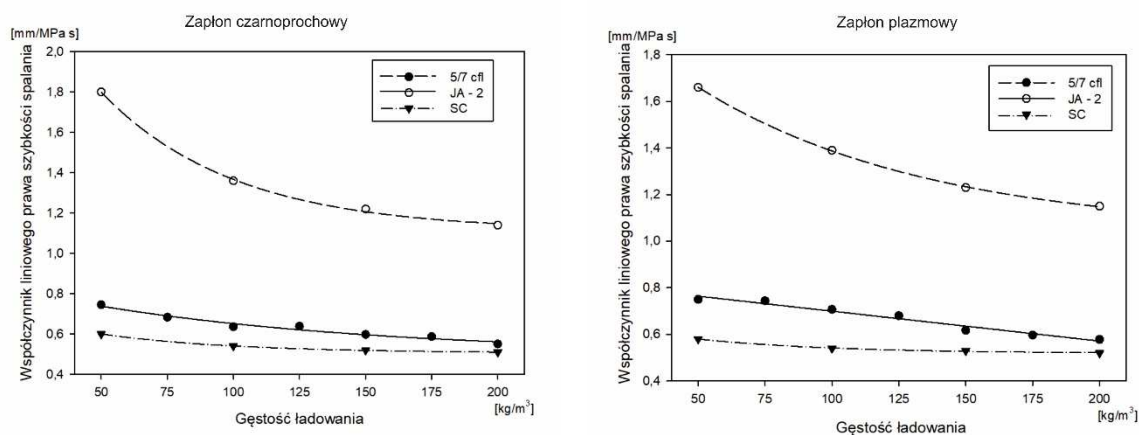
W powyższych analizach wpływ rodzaju zapłonu na przebiegi ciśnienia oraz obliczone charakterystyki zauważalny był głównie podczas pierwszej fazy spalania. Związane jest to z innym mechanizmem przekazywania energii (duża ilość energii przekazywana na drodze promieniowania UV), krótkim czasem oddziaływania plazmy z prochem oraz bardzo niską energią wyładowania w opracowanym układzie generacji plazmy.

Analizując wykresy czasu osiągnięcia ciśnienia maksymalnego dla zapłonu czarnoprochowego i zapłonu plazmowego (rys. 4.41) można zauważyć, że ulega skróceniu czas osiągnięcia ciśnienia maksymalnego wraz ze wzrostem gęstości ładowania, co jest normalnym zjawiskiem obserwowanym podczas badań pirostatycznych. Dla małych gęstości ładowania (50 kg/m^3) krótsze czasy osiągania ciśnienia maksymalnego obserwuje się dla zapłonu czarnoprochowego. W miarę wzrostu gęstości ładowania szybsze osiągnięcie ciśnienia maksymalnego obserwuje się dla zapłonu plazmowego. Największe różnice występują dla prochu 5/7 cfl oraz prochu SC przy gęstości ładowania równej 200 kg/m^3 co świadczy o większej skuteczności zapłonu. Dla obu tych prochów skrócenie czasu wynosiło ok. 30%. Dla prochu JA – 2 skrócenie czasu osiągnięcia ciśnienia maksymalnego wyniosło ok. 20%.



Rys. 4.41. Wykresy czasu osiągnięcia ciśnienia maksymalnego dla zapłonu czarnoprochowego i zapłonu plazmowego w funkcji gęstości ładowania

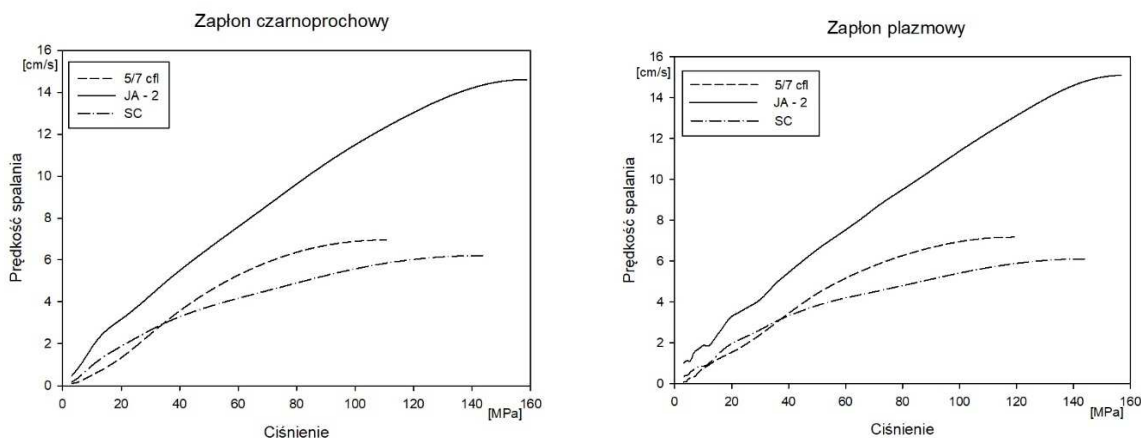
Porównując wpływ rodzaju zapłonu na współczynnik liniowego prawa prędkości spalania u_1 dla badanych prochów (rys. 4.42) można zauważyć, że nie ma istotnych różnic w wartościach u_1 dla zapłonu czarnoprochowego jak i zapłonu plazmowego. Zarówno dla zapłonu czarnoprochowego i dla zapłonu plazmowego następuje systematyczne obniżanie wartości u_1 wraz ze wzrostem gęstości ładowania.



Rys. 4.42. Wykresy współczynnika liniowego prawa prędkości spalania dla zapłonu czarnoprochowego i zapłonu plazmowego w funkcji gęstości ładowania

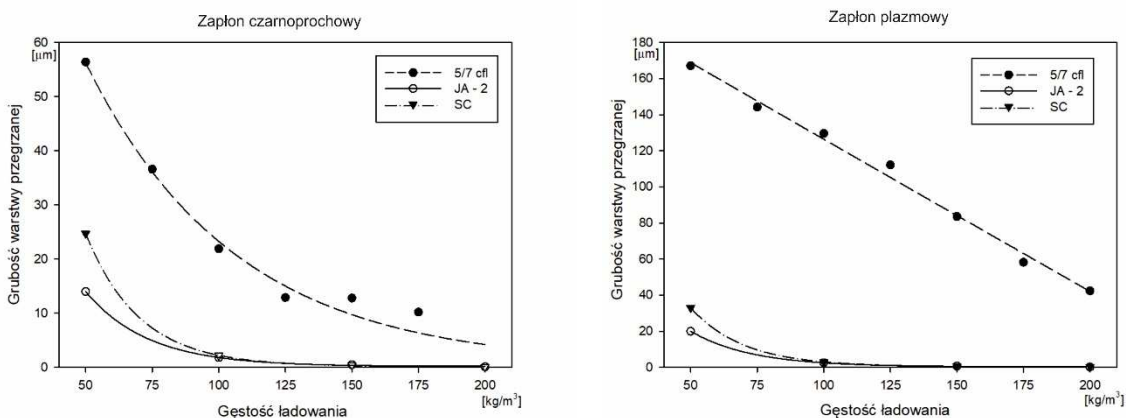
Jest to wynikiem wzrastającego impulsu ciśnienia wraz ze wzrostem gęstości ładowania. Obserwuje się znacznie większą wartość u_1 dla prochu JA – 2 w stosunku do prochu SC i 5/7 cfl. Według Sieriebrakowa [39] stosowanie liniowego prawa prędkości spalania jest ograniczone tylko dla tych prochów, dla których impuls ciśnienia nie zależy od gęstości ładowania i wtedy możliwe jest stosowanie wzoru 4.7 do wyznaczenia współczynnika u_1 . Zasadnym jest zatem wyznaczenie postaci prawa prędkości spalania według zależności (4.8) nie zakładając *a priori* jej postaci liniowej.

Na wykresach prędkości spalania $r(p)$ (rys. 4.43) opracowanych na podstawie zależności (4.8) zauważyć można ich nieliniowy charakter zmian. Obserwuje się nieznaczny wzrost prędkości spalania dla ciśnienia maksymalnego o ok. 3,5% w przypadku zapłonu plazmowego. Widoczne są również zmiany w prędkości spalania w początkowej fazie spalania.



Rys. 4.43. Wykresy prędkości spalania $r(p)$ dla gęstości ładownia $\Delta = 200 \text{ kg/m}^3$

Największe zauważalne różnice widoczne są na wykresach grubości warstwy przegrzanej (rys. 4.44). Obserwuje się systematyczne obniżanie grubości warstwy przegrzanej wraz z gęstością ładowania. Jest to spowodowane zmniejszaniem się stosunku czynnika nagrzewającego ziarna prochu do rosnącej powierzchni spalania ziaren. Największy wpływ rodzaju zapłonu widoczny jest dla prochu 5/7 cfl gdzie uzyskano około trzykrotnie wyższe wartości grubości warstwy przegrzanej. Jest to proch jednobazowy zawierający głównie nitrocelulozę. Dla pozostałych prochów wpływ jest mniejszy, ale też jest on znaczący. Podkreślić należy zmianę charakteru krzywej dla prochu 5/7 cfl z wykładniczego na liniowy.



Rys. 4.44. Wykresy grubości warstwy przegrzanej dla zapłonu czarnoprochowego i zapłonu plazmowego w funkcji gęstości ładownia

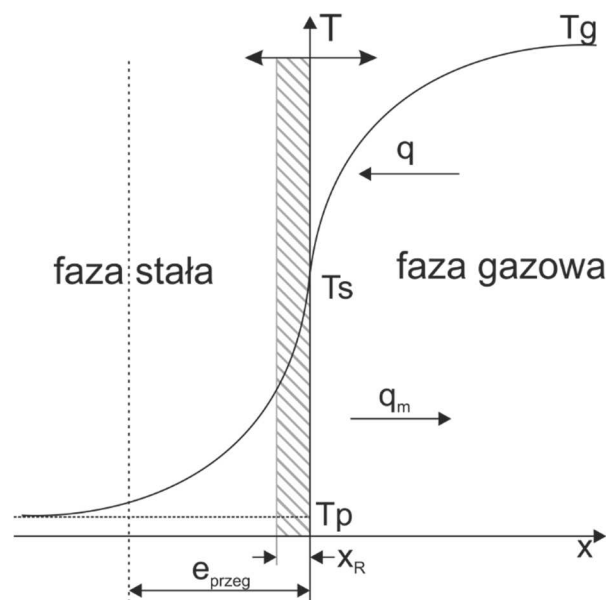
Z przeprowadzonych analiz wynika, że duży wpływ rodzaju zapłonu na dynamikę procesu spalania można zauważyć dla prochu 5/7 cfl, dla którego w przypadku zastosowania zapłonu plazmowego zaobserwowano skrócenie się czasu osiągnięcia ciśnienia maksymalnego nawet o 20%, wzrost współczynnika liniowego prawa

prędkości spalania u_1 o 10% oraz względną dynamiczną żywość wynoszącą nawet 3. Dla pozostałych prochów wpływ zapłonu nie był tak znaczący.

Zapłon plazmowy miał zdecydowany wpływ na charakter spalania prochów w pierwszej fazie spalania co widoczne jest na wykresach funkcji kształtu. Wpływ rodzaju zastosowanego zapłonu na całkowity czas spalania i prędkości spalania jest nieznaczny.

W porównaniu do danych literaturowych, w których wykorzystywane były dużo większe energie wyładowania, nie zaobserwowano w badaniach własnych tak dużego wpływu rodzaju zapłonu na charakterystyki spalania prochu.

Szczególną uwagę należy zwrócić na oszacowanie grubości warstwy przegrzanej. W klasycznym podejściu (wg. Zeldowicza – rys. 4.45) [42] grubość warstwy przegrzanej zależna jest od strumienia ciepła q docierającego do powierzchni ziarna.



Rys. 4.45. Schemat cieplnego modelu spalania materiałów miotających

Oddziaływanie cieplne fazy gazowej (zapłonika) na powierzchnię spalania można określać natężeniem strumienia cieplnego q .

$$q = \alpha_c(T_g - T_s), \quad (4.25)$$

gdzie:

α_c – współczynnik przejmowania ciepła,

T_g – temperatura gazów,

T_s – temperatura powierzchni ziarna.

Jednocześnie od powierzchni spalania wraz z masą produktów spalania odprowadzany jest strumień ciepła o natężeniu:

$$q_m = \rho \cdot c \cdot (T_s - T_p) \cdot u, \quad (4.26)$$

gdzie:

ρ – gęstość materiału miotającego (prochu),

c – ciepło właściwe materiału miotającego (prochu),

T_p – temperatura początkowa,

u – liniowa prędkość spalania.

W początkowym okresie spalania w strefie reakcji (x_R) strumień ciepła q pochodzi od zapłonika. Warstwa przegrzana (e_{przeg}), która powstała na skutek oddziaływania pochodzącego od zapłonika strumienia ciepła q z powierzchnią ziarna zostaje spalona szybciej niż wynikałoby to z liniowego prawa spalania. Na wykresach żywości dynamicznej (rys. 4.14 - 4.16, 4.27 – 4.28, 4.36) widoczne to jest w postaci „wysokoku” w początkowej fazie spalania. Wraz ze spalaniem się warstwy przegrzanej pochodzącej od impulsu cieplnego gazów powstałych ze spalania materiału zapłonika następuje spalanie ustalone i wyrównanie strumieni ciepła dochodzących do powierzchni ziarna i odchodzących od powierzchni ziarna $q_m = q$. W badaniach pirostatycznych z wykorzystaniem zapłonu czarnoprochowego wraz ze wzrostem gęstości ładowania strumień ciepła docierający do powierzchni ziarna ulega zmniejszeniu. Spowodowane jest to coraz mniejszą masą prochu czarnego wykorzystywaną w zapłonniku oraz większą masą prochu w komorze, a co za tym idzie większą sumaryczną powierzchnią ziaren prochu. Widoczne jest to na wykresach dynamicznej żywości, jak i funkcji kształtu gdzie dla niskich gęstości ładowania można zaobserwować wyższe wartości w początkowym etapie spalania (charakterystyczne wysoki), które dla gęstości ładowania $\Delta = 200 \text{ kg/m}^3$ nie występują.

W przypadku zapłonu plazmowego oprócz warstwy przegrzanej pochodzącej od strumienia ciepła powstaje dodatkowa warstwa przegrzana pobudzona promieniowaniem UV. Powstaje ona na skutek wypromieniowywania przez plazmę dużych ilości energii w postaci promieniowania UV. Promieniowanie UV oddziałujące z powierzchnią prochu wnika w głąb ziarna i pobudza wiązania N-N, które ulegają łatwiejszemu rozbiciu. Głębokość wnikania promieniowania UV zależna jest od składu chemicznego prochu.

Pojawienie się dodatkowej warstwy przegrzanej widoczne jest na wykresach dynamicznej żywości i na funkcjach kształtu w postaci charakterystycznych wysokoków.

W zależności od rodzaju ziarna są one bardziej lub mniej widoczne. Dobrą absorpcją promieniowania UV charakteryzuje się proch 5/7 cfl, na którym wysoki były wyraźnie widoczne. Spowodowane jest to niższą temperaturą gazyfikacji nitrocelulozy niż nitrogliceryny.

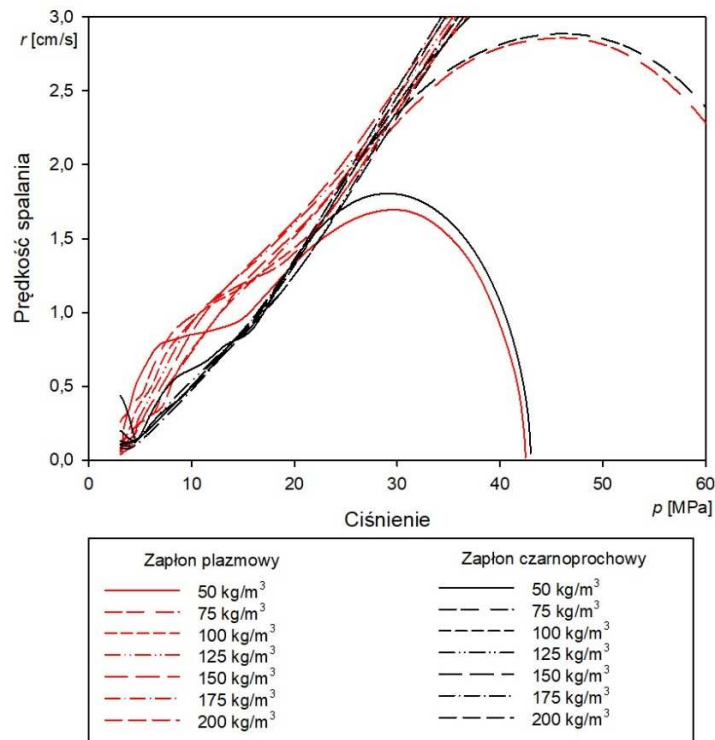
Wprowadzając za S.Toreckim [42] zależność na liniowe prawo prędkości spalania opisujące je w sposób jakościowy:

$$u = \frac{q}{\rho \cdot c \cdot (T_s - T_p)} \quad (4.27)$$

widoczna jest liniowa zależność pomiędzy strumieniem ciepła dostarczonym do powierzchni ziarna q a prędkością spalania u . W przypadku zapłonu plazmowego zależność ta powinna być opisana jako:

$$u = \frac{q + q_{UV}}{\rho \cdot c \cdot (T_s - T_p)} \quad (4.28)$$

Wpływ promieniowania UV widoczny jest tylko w okresie początkowym, ponieważ dostarczanie promieniowania UV zostaje zatrzymane wraz z wygaśnięciem plazmy. Widoczne jest to szczególnie wyraźnie na rysunku 4.46 w początkowej fazie spalania, gdzie prędkość spalania $r(p)$ przyjmuje wyższe wartości. Po spalaniu warstwy prochu na którą oddziaływało promieniowanie UV, prędkość spalania zależna jest tylko od strumienia ciepła dostarczonego od produktów spalania.



Rys. 4.46. Prędkość spalania $r(p)$ dla różnych gęstości ładowania Δ w początkowej fazie spalania prochu

Podsumowanie końcowe i wnioski

Głównym celem rozprawy było zbadanie wpływu zapłonu plazmowego na dynamikę procesu spalania materiałów miotających. Cel ten zrealizowano wykonując porównawcze badania pirostatyczne trzech rodzajów prochów (jedno-, dwu- i wielobazowego), podczas których do zapłonu wykorzystano proch czarny (metoda tradycyjna) oraz impuls plazmowy generowany przez - wykonany w ramach rozprawy - niskoenergetyczny plazmowy układ zapłonowy.

W pracy przedstawiono oryginalne wyniki badań pirostatycznych przeprowadzonych z zapłonem plazmowym. W dotychczasowych badaniach pirostatycznych z zapłonem czarnoprochowym skupiano się przede wszystkim na wyznaczeniu charakterystyk energetyczno-balistycznych (siła prochu, kowolumen gazów prochowych, współczynniki prawa spalania) potrzebnych do modelowania zjawisk pirodynamicznych. W niniejszej dysertacji autor wiele uwagi poświęcił analizie wpływu rodzaju zapłonu na początkowy etap procesu spalania, do tej pory nie opisywanej w literaturze przedmiotu.

Przedstawiony w pracy, opracowany i przebadany układ do realizacji badań pirostatycznych z zapłonem plazmowym jest pierwszym w Polsce tego typu układem.

Przeprowadzone badania eksperymentalne z niskoenergetycznym zapłonem plazmowym i klasycznym (czarnoprochowym) oraz analiza otrzymanych wyników pozwalają na sformułowanie m.in. następujących wniosków:

1. Plazmowy układ zapłonowy zmienia charakter wczesnej fazy spalania prochu.

Duża dawka energii jest przekazywana do prochu w bardzo krótkim czasie, co powoduje znaczne przegrzanie wierzchniej warstwy ziaren prochu. Promieniowanie UV powstałe podczas wyładowania elektrycznego wzbudza wiązania azot – azot, które ulegają łatwiejszemu rozpadowi podczas spalania. Szczególnie widoczne jest to dla prochu jednobazowego, którego głównym składnikiem energetycznym jest nitroceluloza. Zaobserwowane zjawiska występują pomimo bardzo niskich energii stosowanych w przedstawionym układzie. Konsekwencją większej grubości warstwy przegrzanej jest wzrost

prędkości spalania i dynamicznej żywości prochu w początkowej fazie spalania, w porównaniu do zapłonu czarnoprochowego.

2. **Przy energii na poziomie 4 kJ dostarczanej pod postacią plazmy, wyraźny jest wpływ składu badanych prochów na dynamikę ich spalania.**
3. **W celu uzyskania powtarzalności procesu zapłonu podczas realizowanych badań pirostatycznych, wystarczającym okazało się dostarczenie energii rzędu pojedynczych kJ.** Wytworzenie w plazmowym układzie zapłonowym wyższych wartości energii przybliży zapłon i spalanie prochu do modelu geometrycznego oraz zmniejszy wpływ temperatury początkowej prochu na prędkość jego spalania.
4. **Plazmowe układy zapłonowe charakteryzują się wysoką powtarzalnością chwili zapłonu,** co może znaleźć zastosowanie w technice MRSI (ang. Multiple Rounds Simultaneous Impact) polegającej na wystrzeleniu z jednego działa kilku pocisków o różnych prędkościach wylotowych i różnych trajektoriach, docierających do celu w tym samym czasie.

Według wiedzy autora, opracowany i opisany w niniejszej rozprawie plazmowy układ zapłonowy jest układem o najniższej energii wyładowania wykorzystywanym w badaniach pirostatycznych w zamkniętej komorze o pojemności 150 cm³. W niniejszej pracy przedstawiono po raz pierwszy na świecie wykresy dynamicznej żywości prochów dla różnych rodzajów zapłonu.

W przyszłości autor zamierza kontynuować prace badawcze dotyczące tematyki przedstawionej w niniejszej dysertacji i zbadać wpływ zapłonu plazmowego na spalanie prochów w różnych temperaturach początkowych. Planuje się także wykonanie stanowiska do badań pirodynamicznych oraz przebadanie wpływu rodzaju zapłonu na zjawisko strzału.

Bibliografia

- [1] D. Grune, D. Hensel, *Combustion Behavior of LOVA-Solid-Propellant by Ignition with Hot Plasma Gases and its Influence on the Interior Ballistic Cycle*, 17th International Symposium on Ballistics, Midrand, South Africa, 1998.
- [2] Z. Xiao, A. Xue, S. Ying, W. He, F. Xu and B. Hou, *Experimental Studies of Propellant Loading Parameters and Plasma Flow-Field Interactions*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 1, ss. 514-517, 2009.
- [3] D. Melnik, M. Sudai, C. Goldenberg, R. Akimi, L. Perelmutter, D. Zoler, B. Zingerman; *ETC Technology Development at Soreq NRC, Israel*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 35, no. 1, ss. 31-36, 1999.
- [4] R. Alimi, A. Borenstein, C. Goldenberg, L. Perelmutter, A. Pokryvailo, N. Shafir, S. Wald, E. Weiss, D. Zoler, M. Shapira; *ETC Research at Soreq NRC, Israel*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 37, no. 1, ss. 11-15, 2001.
- [5] J. M. Lombard, B. Baschung, A. Carrière, P. André, *Modelling of Classical and ETC Manometric Closed Vessel Tests*, 34th International conference of Institute Chemistry Technology, Pfinztal, Germany, ss. 1 – 10, 2003.
- [6] M. J. Taylor, *Plasma Propellant Interactions in an Electrothermal-Chemical Gun*, PhD Thesis, Royal Military Collage of Science, Cranfield 2002.
- [7] J. Michalski, J. Janiszewski, Z. Leciejewski, W. Pichola, Z. Surma, *Closed vessel equipped with capillary plasma generator as the new method of propellant's ignition and pirostatic investigation*. Materiały Wysokoenergetyczne, tom 4, ss.21-26, 2012.
- [8] J. Michalski, Z. Leciejewski, *Closed Vessel Investigation of Propellant Ignition Process with Using Capillary Plasma Generator*. Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, tom 6, ss. 19-26, 2015.
- [9] B. Fikus, Z. Leciejewski, R. Trębiński, J. Michalski, Z. Surma, *Wstępne analizy wymagań balistycznych prochów LOVA do amunicji czołgowej nowej generacji*. Materiały Wysokoenergetyczne, tom. 9, ss. 105 – 116, 2017.
- [10] C. Pochrybniak, A. Horodeński, K. Namyślak, Z. Leciejewski, Z. Surma, J. Michalski. *Koncepcja magnetohydrodynamicznego zapłonika plazmowego do inicjowania zapłonu mało-wrażliwych materiałów wybuchowych*. Problemy Techniki Uzbrojenia, R. 46 z. 143, ss. 17-28, 2017.

- [11] M. Czyżewska, B. Fikus, Z. Leciejewski, J. Michalski, Z. Surma, R. Trębiński, *Ballistic Analysis of Polish Low-Vulnerability Gun Propellants*. Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa. Tom 9 (3), ss. 75-92, 2018.
- [12] R. Trębiński, Z. Leciejewski, Z. Surma, J. Michalski, *Comparative analysis of the effects of gunpowder and plasma ignition in closed vessel tests*. Defence Technology, Vol. 15, 5, ss. 668-673, 2019.
- [13] J. D. Powell, A. E. Zielinski; *Theory and Experiment for an Ablating-Capillary Discharge and Application to Electrothermal-Chemical Guns*, Raport Army Ballistic Research Lab., Aberdeen Proving Ground, 1992.
- [14] Y. Jin, B. Li, “*Energy Skin Effect of Propellant Particles in Electrothermal-Chemical Launcher*”, IEEE Transactions on plasma science, vol. 41, no. 5, ss. 1112-1116, May 2013.
- [15] M. J. Taylor, *Ignition of Propellant by Metallic Vapour Deposition for an ETC Gun System*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, vol 26, 3, ss.137-143, 2001.
- [16] Z. Xiao, S. Ying, F. Xu; *Response of TEGDN Propellants to Plasma Ignition with the Same Magnitude of Ignition Energy as Conventional Igniters in an Interrupted Burning Simulator*, Propellants, Explosives, Pyrotechnics, vol.40, 4, ss. 484 - 490, 2015.
- [17] R. Chew; *Plasma Generation Using an Alternating Current Plasma Generator*. Energy & Environment 6, no. 4, ss. 391 - 395, 1995.
- [18] N. Shafir, D. Zoler, S. Wald and M. Shapira; *Reliable, highly reproducible plasma injectors for electrothermal and electrothermal-chemical launchers*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 1, ss. 355-359, 2005.
- [19] M. J. Taylor, *Mechanisms Leading to the Enhancement of Gas Generation Rates in ETC Guns*, 12th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Snowbird, UT, USA, ss. 318-323, 2004.
- [20] L. Kufu, Q. Shihong, X. Shengguo, *patent chiński*, **CN1358058A**, 07.10.2002.
- [21] R. Li; S. Jia; X. Li, *patent chiński*, **CN102361528B**, 28.11.2012.
- [22] D. Aberg, F. Olsson, *patent amerykański*, **US20140083317A1**, 27.03.2014.
- [23] O. Stark, M. Lofgren, L. P. Svanberg, *patent amerykański*, **US20110155011A1**, 02.08.2011.
- [24] J. Hershkowitz, R. King, D. Chiu, *patent amerykański*, **US5675115**, 07.10.1997.

- [25] H. Krumm, T. Weise, F. Venier, G. Stoeffler, *patent niemiecki*, **DE19617895** 26.02.1998.
- [26] A. Chaboki, R. A. McPeak, M. R. Triviski, St. R. Zelenak, *patent amerykański*, **US7059249B2**, 13.06.2006.
- [27] A. Chaboki, J. P. Warren, *patent amerykański*, **US5287791A** 22.02.1994.
- [28] Z.K. Leciejewski, S. Cudziło; *Trends in Development of Propellants in Aspects of Requirements of Future Gun Propellant System*, *Materiały Wysokoenergetyczne*, tom 3, ss. 64 - 71, 2011.
- [29] D. Zoler, N. Shafir, D. Forte, E. Kot, A. Ravid, S. Wald, M. Sudai, *Study of Plasma Jet Capabilities to Produce Uniform Ignition of Propellants, Ballistic Gain, and Significant Decrease of the „Temperature Gradient”*, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 1, ss. 322-328, 2007.
- [30] A. Sättler, D. Åberg, D. Rakus, R. Heiser, *45 mm ETC Gun Firing with a CAB-Lova Gun Propellant*. 28th International Symposium on Ballistics, Atlanta, GA, ss. 486 - 497, 2014.
- [31] Z. Xiao, S. Ying, F. Xu. *Response of TEGDN Propellants to Plasma Ignition with the Same Magnitude of Ignition Energy as Conventional Igniters in an Interrupted Burning Simulator*, *Propellants Explosives Pyrotechnics*, vol.40 ss. 484-490, 2015.
- [32] D. Aberg, P. Hermansson, A. Sattler, D. Rakus; *Plasma Ignition Response for LOVA Gun Propellant at Low Loading Densities*, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol 43, No.5 ss. 1316-1320, 2009.
- [33] D. Aberg, L.P. Svanberg, F. Olsson; *ETC 40-mm Gun Firings in the Low-Input-Energy Regime*, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol 39, No.1 ss. 374-377, 2011.
- [34] TH. H. G. G. Weise, H. Maag, G. Zimmermann, N. Eisenreich, H. Derlich; *National Overview of the German ETC Program*, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol 39, No.1, ss. 35-38, 2003.
- [35] TH. H. G. G. Weise, H.-K. Haak; *ETC Plasma Ignition for Modular Artillery Charges*, 12th Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Snowbird, UT, USA, ss. 334-337, 2004.
- [36] F. Yao, J. Li, Y. Gui, P. Liu, Ch. Yu, J. Dong, M. Zhang, P. Yan; *Development of 120-mm Electro-Thermal Chemical Launcher*, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol 45, No.1, ss. 1-4, 2009.

- [37] Y. Akahoshi, J. Kitagawa, T. Koura, S. Fukushige, M. Tadoka; *Development and Evaluation of TSLGG – Application of an ETC Gun System to its First Stage*, IEEE Transactions on Magnetics, vol 43, No.1, ss. 279-283, 2007.
- [38] J. Dyvik, J. Herbig, R. Appleton, J. O'Reilly and J. Shin, *Recent Activities in Electrothermal Chemical Launcher Technologies at BAE Systems*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43, no. 1, ss. 303-307, 2007.
- [39] M. Sieriebriakow, *Balistyka wewnętrzna*, MON, Warszawa 1955
- [40] STANAG 4115, Edition 2. *Definition and Determination of Ballistic Properties of Gun Propellants*, Military Agency for Standardization, 30.06.1997.
- [41] R. Trębiński, J. Janiszewski, Z. Leciejewski, Z. Surma, K. Kamińska, *On Influence of Mechanical Properties of Gun Propellants on Their Ballistic Characteristics Determined in Closed Vessel Tests*, 13, 3243, Materials 2020.
- [42] S. Torecki, *Silniki rakietowe*, WKŁ, Warszawa 1984.

Spis tabel

Tabela	str.
Tabela 1. Opublikowane wyniki badań pirostatycznych.	10
Tabela 2.1. Właściwości fizyczne materiałów stosowanych w generatorze plazmy	36
Tabela 2.2. Parametry układu generatora plazmy	48
Tabela 4.1. Skład chemiczny prochu 5/7 cfl	57
Tabela 4.2. Charakterystyki geometryczne prochu 5/7 cfl	57
Tabela 4.3. Skład chemiczny prochu JA-2	59
Tabela 4.4. Charakterystyki geometryczne prochu JA-2	59
Tabela 4.5. Skład prochu SC	60
Tabela 4.6. Charakterystyki geometryczne prochu SC	60
Tabela 4.7. Wyniki badań pirostatycznych prochu 5/7 cfl	63
Tabela 4.8. Wyniki badań pirostatycznych prochu JA-2	64
Tabela 4.9. Wyniki badań pirostatycznych prochu SC	66
Tabela 4.10. Współczynnik u_1 liniowego prawa prędkości spalania	70
Tabela 4.11. Grubość warstwy przegrzanej przy różnych metodach zapłonu	76
Tabela 4.12. Współczynnik u_1 liniowego prawa prędkości spalania	81
Tabela 4.13. Grubość warstwy przegrzanej	87
Tabela 4.14. Współczynnik u_1 liniowego prawa prędkości spalania	92
Tabela 4.15. Grubość warstwy przegrzanej	94

Spis rysunków

Rysunek	str.
Rys. 1 Wykresy ciśnienia gazów prochowych dla prochu dwubazowego (po lewej) i LOVA (po prawej) z wykorzystaniem zapłonu klasycznego i plazmowego	9
Rys. 1.1. Porównanie mechanizmów zapłonu plazmowego i tradycyjnego	14
Rys. 1.2. Porównanie ziaren prochowych po inicjacji klasycznym zapłonem czarnoprochowym oraz zapłonem plazmowym przy jednakowej energii zapłonu	15
Rys. 1.3. Zdjęcia rentgenowskie pękającego drutu i powstawania plazmy	16
Rys. 1.4. Schemat ideowy generatora plazmy typu Current Injection (rysunek własny)	16
Rys. 1.5. Schemat ideowy generatora plazmy typu Piccolo Tube (rysunek własny)	17
Rys. 1.6. Schemat ideowy generatora plazmy typu CPG (rysunek własny)	17
Rys. 1.7. Rozwiązanie patentowe kapilarowego generatora plazmy	19
Rys. 1.8. Opatentowane rozwiązanie uszczelnienia elektrody	19
Rys. 1.9. Generatora plazmy przedstawiony w amerykańskim patencie	20
Rys. 1.10. Generator plazmy z elementem grzejnym	21
Rys. 1.11. Rurka do rozprowadzania plazmy	21
Rys. 1.12. Amunicja czołgowa z generatorem plazmy	22
Rys. 1.13. Generator plazmy w położeniu poprzecznym	22
Rys. 1.14. Poprzeczne ułożenie generatorów plazmy	23
Rys. 1.15. Komora naboju wraz z różnymi konfiguracjami łusek	23
Rys. 1.16 Różne konfiguracje amunicji do dział elektro-termo-chemicznych	24
Rys. 1.17. Schemat układu miotającego typu ETC	25
Rys. 1.18. Opóźnienie zapłonu (t_2) w funkcji masy prochu czarnego (m_{BP}) dla klasycznego materiału miotającego oraz dla materiału małowrażliwego. Badania przy gęstości ładowania 500 kg/m^3	26
Rys. 1.19. Opóźnienie zapłonu (t_2) w funkcji energii plazmy E_{ign} dla klasycznego materiału miotającego oraz dla materiału małowrażliwego. Badania przy gęstości ładowania 500 kg/m^3	26
Rys. 1.20. Ciśnienie gazów oraz prędkość pocisku w funkcji energii zapłonu dla różnych temperatur małowrażliwego materiału miotającego	27

Rys. 1.21. Ciśnienie oraz czas opóźnienia zapłonu w funkcji energii zapłonu dla różnych temperatur mało-wrażliwego materiału miotającego	27
Rys. 1.22. Prototypowa amunicja M829A2 kalibru 120 mm z zapłonikiem plazmowym	31
Rys. 1.23. Zapłonnik plazmowy wykorzystywany w amunicji czołgowej kalibru 120 mm M829A2	31
Rys. 2.1. Schemat komory manometrycznej	33
Rys. 2.2 Schemat generatora plazmy	34
Rys. 2.3. Generator plazmy	35
Rys. 2.4. Schemat elektryczny układu generatora plazmy	35
Rys. 2.5. Schemat stanowiska do badań generatora plazmy	36
Rys. 2.6. Generacja plazmy z wykorzystaniem drutu miedzianego	36
Rys. 2.7. Generacja plazmy z wykorzystaniem drutu wolframowego	38
Rys. 2.8. Przebieg prądu przy badaniu drutu wolframowego	38
Rys. 2.9. Generacja plazmy z wykorzystaniem drutu niklowego	39
Rys. 2.10. Generacja plazmy z wykorzystaniem drutu żelaznego	39
Rys. 2.11. . Oscylogram z rozładowania kondensatorów	41
Rys. 2.12. Schemat stanowiska badawczo - pomiarowego do badań pirostatycznych	43
Rys. 2.13. Widok komory manometrycznej	44
Rys. 2.14. Elementy układu generacji plazmy: układ ładowania oraz rozładowania (po lewej) oraz bateria kondensatorów wraz z cewkami (po prawej)	44
Rys. 2.15. Oscylogram z generacji impulsu prądowego w układzie dopasowanymi parametrami elektrycznymi	48
Rys. 3.1. Rozpalanie się woreczka z prochem czarnym wraz z główką zapalczą stosowaną jako zapłonnik w badaniach pirostatycznych	49
Rys. 3.2. Porównanie czasów generacji: plazmy (po lewej) oraz gazów i gorących punktów powstałych z zapłonika czarnoprochowego (po prawej)	50
Rys. 3.3. Ciśnienie generowane przez plazmę	51
Rys. 3.4 Schemat stanowiska badawczego	52
Rys. 3.5. Przygotowanie próbki z ziarnem prochowym wewnątrz	53
Rys. 3.6. Próbką po teście z wykorzystaniem zapłonu czarnoprochowego	53

Rys. 3.7. Schemat układu badawczego wyładowania o niskiej energii	54
Rys. 3.8. Ziarna prochu 5/7 CFL pokryte warstwą miedzi	54
Rys. 4.1. Proch 5/7 cfl	57
Rys.4.2. Proch JA-2	58
Rys. 4.3. Proch SC	59
Rys. 4.4. Wykresy ciśnienia p w funkcji czasu t , przy zapłonie czarnoprochowym prochu 5/7 cfl	61
Rys. 4.5. Wykresy ciśnienia p w funkcji czasu t , przy zapłonie plazmowym prochu 5/7 cfl	62
Rys. 4.6. Wykresy ciśnienia p w funkcji czasu t , przy zapłonie czarnoprochowym prochu JA-2	63
Rys. 4.7. Wykresy ciśnienia p w funkcji czasu t , przy zapłonie plazmowym prochu JA-2	64
Rys. 4.8. Wykresy ciśnienia p w funkcji czasu t , przy zapłonie czarnoprochowym prochu SC	65
Rys. 4.9. Wykresy ciśnienia p w funkcji czasu t , przy zapłonie plazmowym prochu SC	65
Rys. 4.10. Faza zapłonu dla zapłonika czarnoprochowego	67
Rys. 4.11. Faza zapłonu dla zapłonika plazmowego	67
Rys. 4.12. Czas osiągnięcia ciśnienia maksymalnego oraz 10 % p_{\max} w komorze spalania w funkcji gęstości ładowania	68
Rys. 4.13. Prędkość spalania r w funkcji ciśnienia dla różnych gęstości ładowania	71
Rys. 4.14. Dynamiczna żywość L prochu dla gęstości ładowania 50 kg/m ³	72
Rys. 4.15. Dynamiczna żywość L prochu dla gęstości ładowania 150 kg/m ³	72
Rys. 4.16. Dynamiczna żywość prochu L dla gęstości ładowania 200 kg/m ³	73
Rys. 4.17. Względna dynamiczna żywość dla zapłonu plazmowego w stosunku do zapłonu czarnoprochowego.	74
Rys.4.18. Grubość warstwy przegrzanej dla różnych rodzajów zapłonu	76
Rys. 4.19. Funkcja kształtu $\Phi(z)$ dla różnych gęstości ładowania.	77
Rys. 4.20. Faza zapłonu dla zapłonika czarnoprochowego	79
Rys. 4.21. Faza zapłonu dla zapłonika plazmowego	80
Rys. 4.22. Czasy narastania ciśnienia dla poszczególnych rodzajów zapłonu	81

Rys. 4.23. Prędkość spalania r w funkcji ciśnienia p dla różnych gęstości ładowania	82
Rys. 4.24. Funkcja kształtu dla gęstości ładowania $\Delta = 200 \text{ kg/m}^3$	83
Rys. 4.25. Dynamiczna żywość dla zapłonu czarnoprochowego	84
Rys. 4.26. Dynamiczna żywość dla zapłonu plazmowego	85
Rys. 4.27. Dynamiczna żywość prochu L dla gęstości ładowania $\Delta = 100 \text{ kg/m}^3$	86
Rys. 4.28. Dynamiczna żywość prochu L dla gęstości ładowania $\Delta = 200 \text{ kg/m}^3$	86
Rys. 4.29. Względna dynamiczna żywość dla zapłonu plazmowego i czarnoprochowego	87
Rys. 4.30. Grubość warstwy przegrzanej	88
Rys. 4.31. Faza zapłonu dla zapłonika czarnoprochowego	89
Rys. 4.32. Faza zapłonu dla zapłonika plazmowego	90
Rys. 4.33. Prędkość spalania r w funkcji ciśnienia p dla różnych gęstości ładowania	90
Rys. 4.34. Czasy narastania ciśnienia dla poszczególnych rodzajów zapłonu	91
Rys. 4.35. Porównanie funkcji kształtu prochu SC dla zapłonu plazmowego i czarnoprochowego przy różnych gęstościach ładowania	92
Rys. 4.36. Dynamiczna żywość prochu L dla gęstości ładowania $\Delta = 200 \text{ kg/m}^3$	93
Rys. 4.37. Grubość warstwy przegrzanej	94
Rys. 4.38. Dynamiczna żywość dla zapłonu czarnoprochowego	95
Rys. 4.39. Dynamiczna żywość dla zapłonu plazmowego	95
Rys. 4.40. Względna dynamiczna żywość dla zapłonu plazmowego i czarnoprochowego	96
Rys. 4.41. Wykresy współczynnika liniowego prawa prędkości spalania dla zapłonu czarnoprochowego i zapłonu plazmowego w funkcji gęstości ładowania	97
Rys. 4.42. Wykresy czasu osiągnięcia ciśnienia maksymalnego dla zapłonu czarnoprochowego i zapłonu plazmowego w funkcji gęstości ładowania	98
Rys. 4.43. Wykresy grubości warstwy przegrzanej dla zapłonu czarnoprochowego i zapłonu plazmowego w funkcji gęstości ładowania	99
Rys. 4.44. Schemat cieplnego modelu spalania materiałów miotających	100
Rys. 4.13. Prędkość spalania $r(p)$ w funkcji ciśnienia p dla różnych gęstości ładowania Δ w początkowej fazie spalania prochu	102