

ppłk dr inż. Jacek BORKOWSKI  
dr inż. Marcin NITA  
kpt. mgr inż. Radosław WARCHOŁ  
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

## **OCENA PRZYDATNOŚCI LASEROWEGO SPOSOBU INICJOWANIA DO WYZNACZANIA PARAMETRÓW OPÓŹNIACZY PIROTECHNICZNYCH**

**Streszczenie:** W pracy zbadano wybrane parametry pirotechnicznych układów opóźniających inicjowanych promieniowaniem laserowym. Wyznaczono między innymi wpływ mocy promieniowania laserowego oraz wielkości oświetlanej powierzchni na uzyskiwane czasy opóźnienia oraz czasy opóźnienia zapłonu. Oszacowano również wielkość mocy progowej niezbędnej do zainicjowania masy opóźniającej. W badaniach wykorzystano laser CO<sub>2</sub> pracujący w trybie impulsowym.

Słowa kluczowe: laser CO<sub>2</sub>, inicjowanie promieniowaniem laserowym, pirotechniczny układ opóźniający

## **A STUDY OF USING LASER IGNITION IN EXAMINATION OF PYROTECHNIC DELAY DEVICE**

**Abstract:** A behavior (delay times, values of power thresholds and delays of ignition) of pyrotechnic delay devices used in ammunition has been experimentally studied depending on spot diameter of an irradiation and the laser radiation power. The measures were performed in open and close circuit. The the source of energy was CO<sub>2</sub> laser, in the pulse mode.

Keywords: ignition using laser CO<sub>2</sub>, pyrotechnic delay devices

### **1. Wstęp**

Od układów opóźniających stosowanych w środkach bojowych (ŚB) wymaga się wygenerowania sygnału wyjściowego z pewnym, ściśle określonym opóźnieniem w stosunku do sygnału wejściowego. Sygnałem tym może być np. strumień ognia, impuls elektryczny, zwolnienie iglicy. Działanie takie podyktowane jest koniecznością zapewnienia poprawności lub bezpieczeństwa działania danego środka bojowego.

Wyróżniamy wiele różnorodnych układów zdolnych do wypracowania czasu zwłoki np. mechaniczne, pirotechniczne, elektroniczne, chemiczne, jednakże najpopularniejszymi obecnie są pirotechniczne układy opóźniające (PUO). Charakteryzują się one prostą budową, niewielkimi gabarytami oraz gwarantują powtarzalność czasów opóźnienia. PUO umieszcza się w łańcuchu ogniowym ŚB, gdzie ich zadaniem jest przyjęcie impulsu ogniowego od np. spłonki zapalającej, wypracowanie określonego czasu opóźnienia, a następnie skuteczne przekazanie impulsu ogniowego na następny element w łańcuchu ogniowym np. spłonkę pobudzającą lub wzmacniacz. Na [Fot. 1] przedstawiono przykłady PUO znajdujących się we

współczesnych środkach bojowych, m.in. w zapalnikach, raketach, przeciwpancernych pociskach kierowanych, granatach ręcznych, nabojach granatnikowych.



**Fot. 1. Konstrukcje pirotechnicznych układów opóźniających stosowanych w ŚB będących na wyposażeniu WP.**

Proces inicjowania pirotechnicznych mieszanin opóźniających w PUO może być realizowany na wiele sposobów. Do chwili obecnej najistotniejsze z praktycznego punktu widzenia, a zarazem najprostsze metody wykorzystywały płomień np. pochodzący z lontu prochowego lub elektrycznej główki zapalczącej. Równie popularne było i nadal jest inicjowanie za pomocą spłonki zapalającej działającej od bodźca mechanicznego (np. uderzenia iglicy). Pewne znaczenie praktyczne mają również metody, w których czynnikiem inicjującym jest gorące powietrze, wyładowanie elektryczne, ogrzewanie przeponowe. Najmniejszy odsetek stanowią metody chemiczne bazujące np. na reakcjach nieorganicznych kwasów utleniających z substancjami bogatymi w węgiel jak również inicjowanie laserowe. Inicjowanie wiązką promieniowania laserowego mimo wielu zalet nie jest szeroko rozpowszechnione, głównie z powodu wysokiej ceny modułów laserowych. Jednak wszędzie tam gdzie wymagane jest dostarczenie ściśle określonej ilości energii (na przykład do wielu punktów jednocześnie lub w ściśle zadanych odstępach czasowych) laserowe metody inicjowania pełnią bardzo ważną funkcję. Wykorzystanie światłowodów umożliwia inicjowanie układów pirotechnicznych znajdujących się w dużej odległości od źródła światła przy jednoczesnej eliminacji zagrożenia ze strony prądów błądzących i elektryczności statycznej. Rozpowszechnienie tanich w produkcji impulsowych diod laserowych umożliwia miniaturyzację układów inicjowania a zastosowanie elektronicznych modułów sterujących gwarantuje możliwość generowania impulsów laserowych o zadanych parametrach. Właściwości te decydują o coraz częstszym wykorzystaniu laserowych układów inicjowania w badaniach PUO znajdujących się w środkach bojowych.

Jak wykazali autorzy prac [1,2], proces inicjowania promieniowaniem laserowym może bazować na różnych zjawiskach fizykochemicznych. W zależności od gęstości dostarczanej energii, charakteru impulsu, rodzaju otoczki oraz pobudzanego ośrodka, proces dekompozycji może być zainicjowany w sposób uderzeniowy lub termiczny. W efekcie różnić się mogą parametry wyjściowe badanych układów.

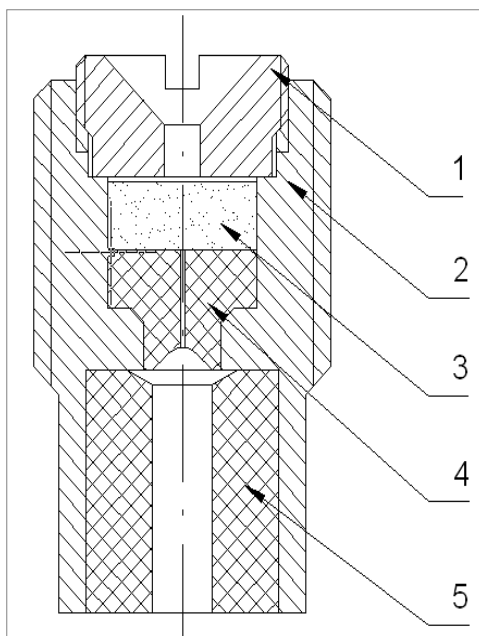
W niniejszej pracy wyznaczono wpływ wartości mocy promieniowania laserowego dostarczanego do próbki PUO na uzyskiwany czas opóźnienia oraz na zdolność inicjowania

kolejnych elementów układu ogniowego. Badano również zależność tych parametrów od wielkości oświetlanej powierzchni. W tym celu wykorzystano laser CO<sub>2</sub>.

Wybrana przez autorów tematyka dotycząca oceny wpływu wiązki promieniowania, a w tym jej geometrii, na parametry inicjowanych PUO nie była wcześniej podejmowana.

## 2. Przedmiot badań

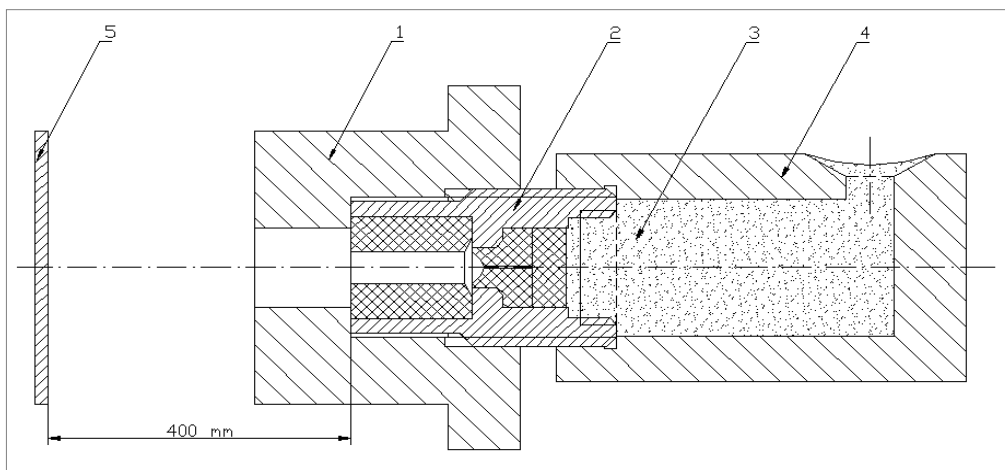
Przedmiotem badań był pirotechniczny układ opóźniający (Rys. 1) stosowany między innymi w zapalniku głowicowym W-429Je przeznaczonym do uzbrajania 125 mm pocisków odłamkowo - burzących.



**Rys. 1. PUO z zapalnika W-429Je; 1 – dławik, 2 – korpus, 3 – ładunek zapalający, 4 – ładunek opóźniający, 5 – ładunek wzmacniający**

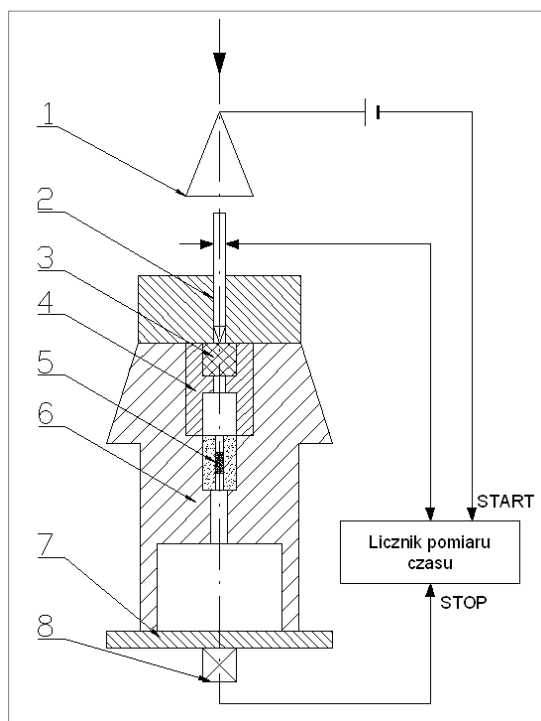
PUO znajduje się w łańcuchu ogniowym zapalnika pomiędzy spłonką zapalającą a spłonką pobudzającą. W przypadku nastawy zapalnika na „Z” (zwłoka) PUO powoduje wybuch pocisku z opóźnieniem od 0,027 do 0,063 s. PUO Składa się z korpusu, dławika oraz masy wodoodpornej SC-1. Układ pirotechniczny składa się z trzech ładunków: zapalającego, opóźniającego i wzmacniającego płomień. Ładunki zapalający i opóźniający wprasowane są stałymi siłami bezpośrednio w korpus, natomiast ładunek wzmacniający płomień prasowany jest w postaci tulejki w oddzielnym przyrządzie, a następnie wciśnięty w korpusu opóźniacza. Gotowy PUO poddawany jest laboratoryjnym badaniom zakładowym sprawdzającym parametry jego pracy:

1. Sprawdzeniu na przerzut ognia. Badanie wykonywane jest w celu stwierdzenia czy PUO ma wystarczająco silny strumień wylotowy do zapalenia kolejnego elementu łańcucha ogniowego. Badanie wykonuje się na stanowisku przedstawionym na rysunku 2. PUO zapalany jest prochem czarnym (inicjowany drutem żarowym), powstały strumień wylotowy powinien zapalić proch czarny, naklejony na metalowej lub kartonowej płycie w odległości 400 mm od końca PUO.



**Rys. 2. Przyrząd do badania zdolności zapalania opóźniaczy pirotechnicznych do zapalników W-429Je.; 1 – gniazdo opóźniacza, 2 – opóźniacz, 3 – ładunek zapalający, 4 – komora spalania, 5 - płytkę z prochem czarnym**

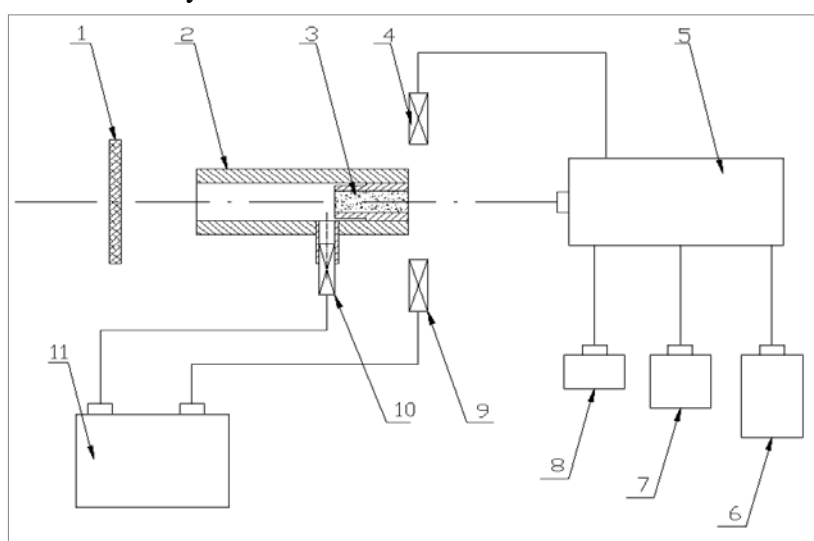
2. Sprawdzeniu czasu palenia się opóźniaczy na specjalnie przygotowanym stanowisku badawczym (Rys. 3). Czas ten powinien wynosić  $0,027 \pm 0,063$  s. PUO wkręca się w gniazdo w specjalnie przygotowanym korpusie przyrządu. Nad PUO umieszcza się mechanizm uderzeniowy z oryginalną słonką zapalającą, która nakłuwana jest iglicą. Pod korpusem przyrządu umieszcza się fotodiode, osłoniętą szybą ochronną. Styki iglicy i fotodiody połączone są z licznikiem pomiaru czasu. W chwili uderzenia ciężarka w iglicę następuje zadziałanie słonki zapalającej i jednocześnie uruchomienie licznika pomiaru czasu. Po zapaleniu się opóźniacza, od słonki zapalającej, z odpowiednim opóźnieniem czasowym, następuje przemieszczenie ognia w kierunku fotodiody i zatrzymanie licznika.



**Rys. 3. Stanowisko badawcze do mierzenia czasu palenia się opóźniaczy pirotechnicznych; 1 – ciężarek, 2 – iglica, 3 – słonka zapalająca, 4 – obsada słonki zapalającej, 5 – badany opóźniacz, 6 – korpus przyrządu, 7 – szyba ochronna, 8 – fotodioda.**

### 3. Metodyka badań

Proces inicjowania zapłonu masy wodoodpornej SC-1 realizowano za pomocą lasera CO<sub>2</sub> firmy CTL/Laser Instruments, model CTL-1407 o mocy maksymalnej wynoszącej 7 W, generującego promieniowanie o długości fali 10,6 μm. Pracą i parametrami lasera sterowano za pomocą układu mikroprocesorowego. Do naprowadzania promienia laserowego, który jest niewidzialny dla oka ludzkiego, stosowano promieniowanie widzialne pochodzące z czerwonego lasera pilota jednoznacznie wskazującego miejsce zapłonu. Do rejestracji momentu zapłonu masy wodoodpornej SC-1 oraz czasu opóźnienia wykorzystano oscyloskop Rigol model DS1052E połączony z fotodiodami. Pierwszy fotoelement umieszczono tak, by rejestrowały sygnał informujący o momencie zapłonu, drugi natomiast wskazywały pojawienie się płomienia za opóźniaczem. Aby sygnał z pierwszej fotodiody nie zawierał sygnału pochodzącego od wiązki lasera użyto fotoelementu pracującego w zakresie widzialnym. Druga fotodioda pracowała w zakresie podczerwieni. Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 4.



**Rys. 4. Schemat stanowiska do badania opóźniaczy pirotechnicznych; 1 – płytka z prochem czarnym, 2 – rura aluminiowa, 3 – opóźniacz pirotechniczny, 4 – fotodioda wyłączająca laser, 5 – laser, 6 – zasilacz lasera, 7 – panel kontrolny, 8 – wyzwalacz, 9 – fotodioda VIS, 10 – fotodioda IR, 11 – oscyloskop**

Zdolność do zapalania kolejnego elementu łańcucha ogniowego badano zgodnie z wymaganiami zawartymi w Dokumentacji Technicznej [5]. W tym celu użyto płytek kartonowych o wymiarach 90 x 90 mm, pokrytych jednostronnie prochem czarnym. Badania obejmowały wyznaczenie wpływu mocy promieniowania oraz średnicy wiązki na maksymalną odległość PUO od płytki z prochem, przy której następuje jeszcze jego zapłon.

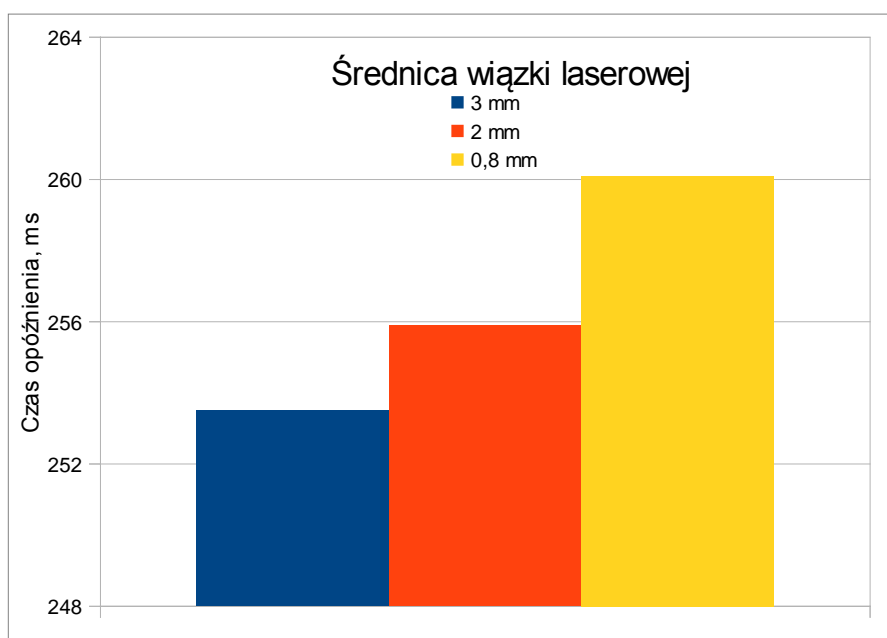
### 4. Przebieg badań

W pierwszym etapie badań wyznaczono minimalną wartość energii promieniowania laserowego niezbędnego do zapłonu masy SC-1. Pomiar wykonano oświetlając masę wiązka laserową o średnicy 0,8, 2 i 3 mm. Analiza czasu oddziaływania promieniowania laserowego na masę pozwoliła na wyznaczenie energii zapłonu. Otrzymane zależności energii zapłonu i gęstości mocy od mocy lasera i średnicy wiązki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

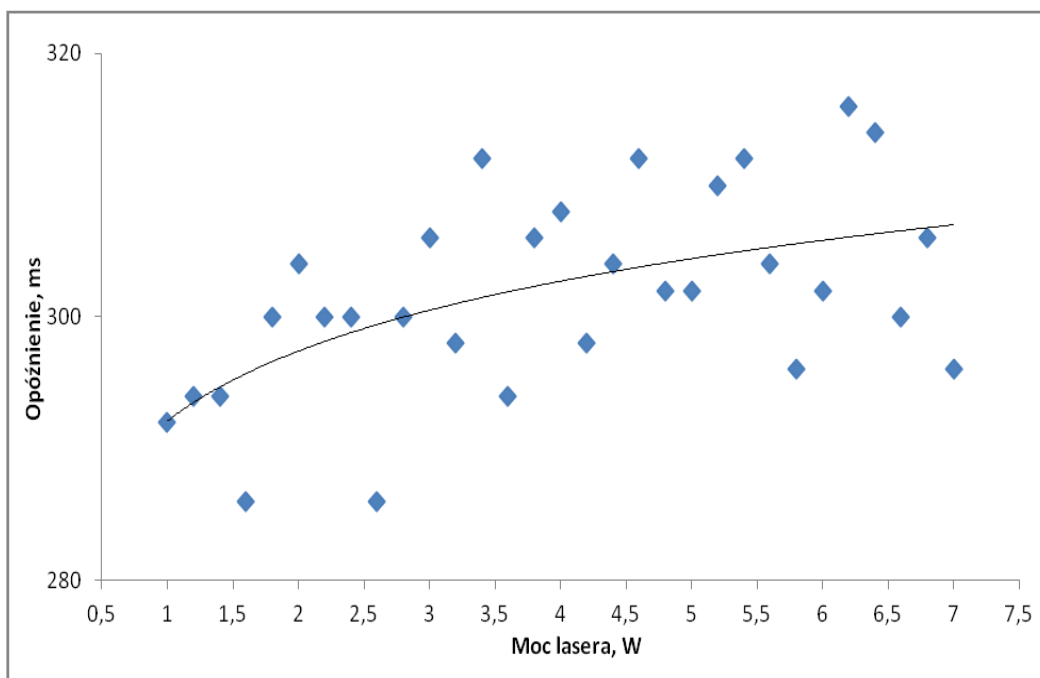
Średnica wiązki laserowej, mm	Minimalna moc lasera, W	Energia zapłonu, mJ	Gęstość mocy, W/mm <sup>2</sup>
0,8	1	290	1,99
2	1,2	379	0,382
3	1,6	788	0,226

Kolejno zbadano wpływ średnicy wiązki promieniowania laserowego na uzyskiwany czas opóźnienia PUO. Zmianę średnicy wiązki uzyskiwano przez zmianę odległości PUO od soczewki lasera. Moc lasera w każdym przypadku wynosiła 5 W. Wszystkie pomiary wykonano na jednej partii PUO. Otrzymane wyniki (wartości średnie) przedstawiono na rysunku 5.



**Rys. 5. Zależność uzyskiwanego czasu opóźnienia od średnicy wiązki laserowej.**

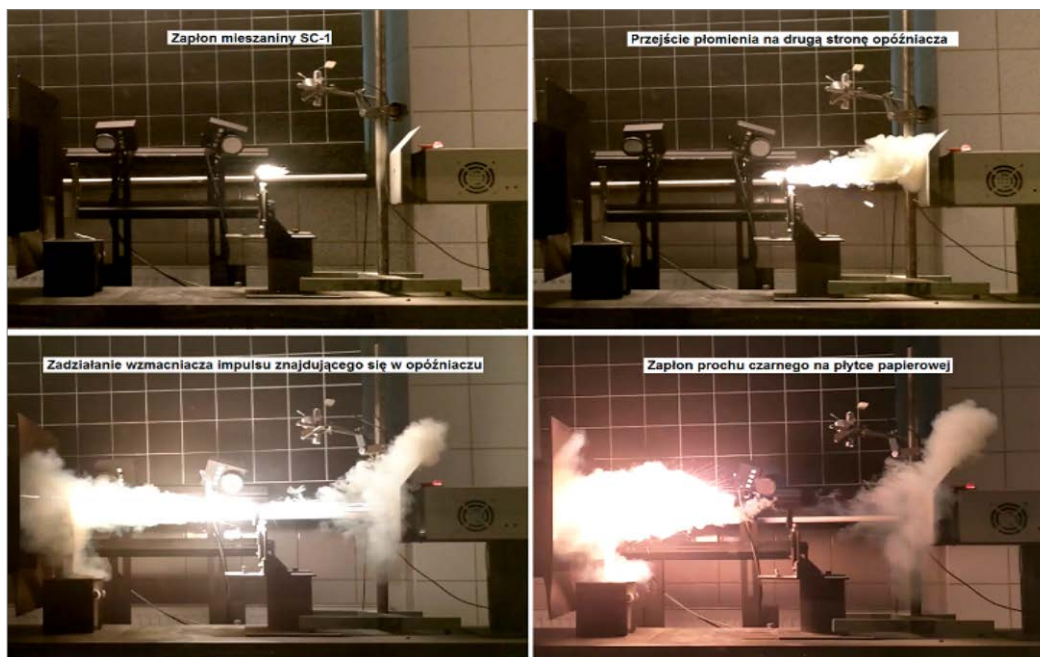
Pomiary czasu opóźnienia w funkcji mocy lasera wykonano z uchwytem opóźniacza oddalonym na odległość 30 cm od soczewki lasera, co odpowiadało wiązce o średnicy 0,8 mm. W takich warunkach mieszanina pirotechniczna ulegała zapłonowi po oświetleniu mocą 1 W i dostarczeniu 290 mJ energii. Różnica pomiędzy kolejnymi nastawami mocy wynosiła 0,2 W, natomiast wartość maksymalna wynikała ze znamionowej mocy wykorzystywanego lasera (7 W). Otrzymane wyniki zaprezentowano na wykresie (Rys.6). Dla lepszego zobrazowania szukanej zależności na wykres naniesiono również linię trendu.



**Rys. 6. Zależność czasu opóźnienia od mocy lasera.**

Analizę wpływu mocy lasera na uzyskiwany czas opóźnienia wykonywano kilkakrotnie, na kilku różnych partiach opóźniaczy i przy różnych średnicach wiązki laserowej. Za każdym razem obserwowano zależności jak na rysunku 6. Bez względu na rodzaj partii PUO zanotowano zwiększenie się uzyskiwanego czasu opóźnienia po zwiększeniu wartości mocy wiązki.

Pomiar wpływu wartości mocy lasera oraz średnicy generowanej przez niego wiązki laserowej na zdolność zapalania prochu czarnego znajdującego się na płytkach papierowych prowadzono w układzie otwartym. Wykorzystywany w badaniach układ przedstawiono na rysunku 7.



**Rys. 7. Badanie wpływu średnicy wiązki laserowej oraz mocy lasera na zdolność do zapalania prochu czarnego naniesionego na papierową płytkę.**

Próby dla danej nastawionej mocy powtarzano dwukrotnie, natomiast dla danej średnicy wiązki dziesięciokrotnie. Nie zaobserwowano żadnej korelacji pomiędzy wybranymi wielkościami charakteryzującymi promień laserowy a otrzymanymi wynikami (odległością płytki przy której następował zapłon prochu).

## 5. Wnioski

Do oceny przydatności laserowego sposobu inicjowania pirotechnicznych układów opóźniających oraz wyznaczania ich parametrów wykorzystano PUO zawierające masę SC-1. Proces zapłonu masy SC-1 inicjowano wiązką laserową z zakresu podczerwieni (długość fali 10,6  $\mu\text{m}$ ).

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują, że minimalna moc potrzebna do zainicjowania masy SC-1 wzrasta wraz ze zwiększaniem średnicy wiązki laserowej. Jednocześnie zwiększa się też ilość energii koniecznej do zainicjowania zapłonu. Jednakże wraz ze zwiększaniem pola powierzchni oświetlanego obszaru maleje gęstość mocy wymagana do zapłonu. Zjawisko to jest wynikiem termicznego sposobu inicjowania (niewielkie gęstości mocy, długie czasy oddziaływania promieniowania z próbką), którego przebieg zależy od intensywności transportu ciepła do kolejnych warstw ładunku pirotechnicznego oraz materiału jego obudowy. Oświetlenie praktycznie całej powierzchni czołowej masy SC-1 skutkuje zmniejszeniem się wymaganej gęstości energii, gdyż odbiór ciepła może odbywać się wyłącznie przez wewnętrzne warstwy mieszaniny.

Analiza wyników pomiaru wpływu średnicy wiązki promieniowania laserowego na uzyskiwane czasy opóźnienia wskazuje, że taka zależność istnieje. Zwiększenie się czasu opóźnienia obserwowane jest, gdy oświetlana powierzchnia jest wielokrotnie mniejsza od powierzchni czołowej mieszaniny pirotechnicznej. Wraz ze zwiększeniem średnicy wiązki czas opóźnienia opóźniacza maleje. Zależność ta w pierwszym przypadku wynika z konieczności rozprzestrzenienia się fali spalania po całej powierzchni ładunku, a w dalszych etapach wnika w jego głąb. Natomiast, gdy średnica wiązki jest zbliżona do średnicy ścieżki opóźniacza zainicjowanie spalania jest prawdopodobne w wielu punktach jednocześnie, a tym samym proces zapalania się całej warstwy powierzchniowej trwa krócej.

Zwiększanie mocy lasera powoduje natomiast wydłużenie czasu opóźnienia PUO. Spostrzeżenie to jest niesprzeczne z doniesieniami literaturowymi dotyczącymi inicjowania promieniowaniem laserowym materiałów wybuchowych inicjujących i kruszących. Jest to zależność wynikająca z częściowej ablacji przypowierzchniowej warstwy ładunku pirotechnicznego oświetlanego promieniowaniem laserowym. W efekcie przekazanie energii laserowej do dalszych warstw oraz jej zapłon staje się utrudniony.

Nie zaobserwowano natomiast korelacji pomiędzy wartością mocy lasera, ani też średnicą generowanej przez niego wiązki laserowej na zdolność zapalania prochu czarnego przez badane PUO. Prawdopodobnie dzieje się tak z powodu obecności w konstrukcji przedmiotowych opóźniaczy wzmacniacza impulsu wyjściowego.

Mając na uwadze powyższe dane można stwierdzić, że metoda laserowego inicjowania jest przydatna do oceny pomiaru czasu opóźnienia PUO, o ile jest wykorzystywana w sposób umiędzyn. Okazuje się bowiem, że zarówno średnica padającej na próbkę wiązki promieniowania laserowego jak też nastawa mocy lasera mają wpływ na uzyskiwane interwały czasowe, a więc na wyniki końcowe. Tak więc dany typ PUO powinien być badany w określonych (na drodze doświadczenia) warunkach.



## Literatura

- [1] Bourne N. K., On the laser ignition and initiation of explosives, Proc. R. Soc. Lond. A, 475, 2001, 1401-1426
- [2] De Young L., Nguyen T., Waschl J., Laser Ignition of Explosives, Pyrotechnics and Propellants: A Review DSTO, Technical Report, DSTO-TR-0068, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Melbourne (Australia), 1995
- [3] Roos E., Benterou J., Lee R., Roeske F., Stuart B., Femtosecond laser interaction with energetic materials. SPIE's Int. Symp. "High-Power Laser Ablation" 2002, Taos, NM, 24.04.2002.
- [4] Cozzi F., Balasini A., DeLuca L. T.; Solid propellant combustion stability by laser radiation modulation. Symposium on "Small Rocket Motors and Gas Generators for Land, Sea and Launched Weapon Systems " RTO-MP-23, Corfu, Greece, 1999.
- [5] Zapalnik głowicowy W-429Je, Album Nr 0-328-1, Nr rys. 4-024069"12"L
- [6] Beck M. W., Brown M. E., Cawthorne D., Pyrotechnic Delay Composition, ChemSA June 1984.
- [7] Conkling J. A., Chemistry OF Pyrotechnics - Basic Principles and Theory, New York 1985
- [8] Masa wodoodporna SC-1, TWT nr. 256-53