

Łukasz Habera

Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Andrzej Papliński

Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

Zenon Wilk, Piotr Koślik

Instytut Przemysłu Organicznego, Warszawa – Oddział w Krupskim Młynie

Laserowe inicjowanie detonacji perforatora – badania w zbiorniku balistycznym

Wprowadzenie

Współczesne systemy inicjujące detonacje materiałów wybuchowych (MW) można podzielić na trzy grupy: elektryczne, elektroniczne i nieelektryczne. Szeroko rozpowszechniony w przemyśle górniczym i wydobywczym system elektrycznego inicjowania środków strzałowych bazuje na zapalniku elektrycznym, który składa się ze spłonki detonującej i mostkowego zespołu zapalczego. Zespół zapalczy stanowi układ dwóch elektrod połączonych cienkim mostkiem elektrycznym z odpowiednio dobranego drutu oporowego, który jest następnie pokryty masą zapalającą. Tak skonstruowaną główkę zapalczą podłącza się do przewodów strzałowych i umieszcza w łusce spłonki detonującej. Powstały w ten sposób zapalnik elektryczny pobudza się impulsem elektrycznym z zapalarki.

Drugą grupę stanowią systemy elektroniczne [4, 7], które w odróżnieniu od systemu elektrycznego realizują detonację zwłoczną z pominięciem masy pirotechnicznej, zastąpionej układem elektronicznym pozwalającym na zaprogramowanie zwłoki zapalnika z dokładnością do jednej lub kilku milisekund i odpalenie ich nawet w kilkutyśycznej populacji. Ponadto na system elektronicznego inicjowania detonacji MW składają się dwa niezbędne do prowadzenia robot strzałowych urządzenia: Logger – pozwalający na zaprogramowanie czasów opóźnień zapalników i Blaster – przekazujący zapalnikom informacje i sterujący odpaleniem.

Trzecią grupę stanowi system nieelektryczny, zwany systemem ciągłego inicjowania wybuchu, który różni się

od systemu elektrycznego zastosowaniem rurki detonującej o nazwie Nonel[®]. Nonel[®] jest to polietylenowa rurka o średnicy ok. 3 mm napyłona wewnątrz cienką warstwą oktogenu i pyłu aluminiowego. Inicjowanie następuje poprzez iskrę elektryczną, która wywołuje w rurce wybuch przemieszczający się z prędkością ok. 2000 m/s.

Trójwarstwowa budowa rurki umożliwia podtrzymanie detonacji wewnątrz rurki bez jednoczesnego jej naruszenia ani zainicjowania znajdujących się w pobliżu materiałów wybuchowych lub innych rurek detonujących. Przemieszczająca się fala uderzeniowa dociera w zapalniku do materiału inicjującego, doprowadzając do jego wybuchu w sposób podobny jak w zapalnikach elektrycznych.

Jednocześnie prowadzone są rozległe badania podatności materiałów wysokoenergetycznych różnych grup na inicjację impulsem laserowym [1, 2, 3, 5, 6]. W przypadku lasera energia do próbek dostarczana jest w postaci bodźca elektromagnetycznego. Ze względu na precyzję oddziaływania promienia laserowego na wybrany fragment ładunku materiału wybuchowego oraz możliwość doboru, w szerokim zakresie, wielkości energii oddziaływania na materiał wybuchowy inicjacja laserowa stanowi obiecujący sposób kontrolowanego pobudzania ładunku wybuchowego. Nowe systemy laserowego inicjowania detonacji (tzw. światłowodowe i z użyciem półprzewodnikowych diod laserowych) proponuje się obecnie również w górnictwie, szczególnie w sytuacji zagrożenia gazowego i pyło-

wego, oraz w głębokich odwiertach wydobywczo-poszukiwawczych. W oddziale Instytutu Przemysłu Organicznego w Krupskim Młynie w ostatnich latach realizowany jest program badań wrażliwości na promieniowanie laserowe materiałów wybuchowych i pirotechnicznych za pomocą wiązki skupionej promienia laserowego oraz za pomocą systemu laserowego światłowodowego [8, 9]. W związku z uzyskaniem pozytywnych rezultatów dotychczasowych prac podjęto kontynuację badań aplikacyjnych nowej

metody inicjowania promieniowaniem laserowym, np. dotyczących nowego typu zapalnika lub nowego systemu inicjowania ładunków MW. W prezentowanej pracy przedstawiono wspólne badania Instytutu Nafty i Gazu oraz Instytutu Przemysłu Organicznego w Warszawie – Oddział w Krupskim Młynie nad możliwością zastosowania inicjowania laserowego środków strzałowych w perforatorach stosowanych w górnictwie otworowym nafty i gazu.

Cel badań

Zespół badawczy postawił sobie za cel zweryfikowane hipotezy, czy laserowe inicjowanie środków strzałowych stosowanych w przemyśle naftowym może stanowić realną alternatywę dla powszechnie stosowanych elektrycznych systemów inicjowania detonacji. W tym celu zaadaptowano istniejące stanowisko badawcze na potrzeby przeprowadzenia prób strzałowych z wykorzystaniem lasera, jako źródła energii do wywołania detonacji.

Przedmiotem badań był doświadczalny układ systemu odpalania lontu detonującego i ładunków kumulacyjnych osiowo-kierunkowych, które są stosowane w perforatorach korpusowych typu PRS. W badaniach zastosowano środki strzałowe (lont detonujący i ładunki kumulacyjne) nominalnie przeznaczone do tych perforatorów, których producentem jest Instytut Przemysłu Organicznego – Oddział w Krupskim Młynie.

Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze składa się z trzech wyróżnionych elementów (rysunki 1 i 2), którymi są:

- wysokociśnieniowa komora balistyczna w formie grubościennego stalowego zbiornika osadzonego w ziemi (rysunek 1) – masywna konstrukcja pozwala na bezpieczne przeprowadzanie badań detonacji MW i spalania materiałów pędnych (paliw),
- układ rejestrujący przebieg zmian ciśnieniowych w komorze balistycznej, składający się z trzech czujników piezoelektrycznych i tensometrycznych wraz z oscyloskopem cyfrowym,

- zespół inicjowania detonacji – na ogół jest to przejście przewodów linii strzałowej przez pokrywą komory do jej wnętrza; na potrzeby przedmiotowych badań, elektryczna linia strzałowa została zastąpiona przewodem światłowodowym, a zapalarkę elektryczną zastąpił laser o długości fali 1064 nm wraz z urządzeniem sterującym – generatorem impulsów laserowych typu Spectra-Laser® (rysunek 2).



Rys. 1. Otwarta komora balistyczna – przygotowanie stanowiska badawczego i próbek do badań strzałowych



Rys. 2. Zbiornik balistyczny z autonomicznym rejestratorem ciśnienia i systemem generującym impulsy laserowe

- 1) światłowód wielomodowy przechodzący do komory balistycznej, 2) źródło światła – głowica laserowa, 3) generator impulsów laserowych typu Spectra-Laser®, 4) oscyloskop, 5) wzmacniacz sygnału analogowego

Układ badawczy

Próbkami przeznaczonymi do badań strzałowych były fragmenty konstrukcji perforatora korpusowego typu PRS-114, stosowanego do udostępniania horyzontów ropy i gazonośnych. Układ taki (rysunek 3) składa się z ładunku kumulacyjnego (typ ŁOKT-H-Fe-33-150 z wkładką proszkową miedzianą o naważce heksogenu 16 g) osadzonego na aluminiowej żerdzi nośnej umocowanej w rurze stalowej



Rys. 3. Wewnętrzna część układu badawczego fragmentu perforatora – ładunek kumulacyjny osadzony na aluminiowej żerdzi nośnej wraz z lontem detonującym; centralizatory o kształcie okrągłym, zapewniające osiowe położenie w rurze perforatora

o średnicy 114 mm za pomocą dwóch (górnego/dólnego) aluminiowych centralizatorów. W górnym centralizatorze nawiercono otwór ($\varphi = 7$ mm) umożliwiającą doprowadzenie do ładunku lontu detonującego heksogenowego w powłoce ołowianej (typ LDT-RDX-150 o gramaturze MW wynoszącej 20 g/mb).



Rys. 4. Ostateczny kształt badanego modelu umieszczonego w komorze balistycznej – fragment perforatora został ułożony wzdłużnie na dziesięciu stalowych płytkach o grubości 10 mm każda. Płytki (test standardowy – stal St3) znajdują się w osi działania strumienia kumulacyjnego, co umożliwia późniejszą ocenę skuteczności działania ładunku

Przebieg badań

Kluczowym kierunkiem badań było wykonanie testów sprawnościowych w warunkach laboratoryjnych, w komorze balistycznej, zastąpienia elektrycznego (standardowego) sposobu inicjowania detonacji środków strzałowych w perforatorze na rzecz laserowego wzbudzenia detonacji. Cel ten realizowano poprzez zastąpienie klasycznego zapalnika elektrycznego wzbudzanego impulsem elektrycznym z zapalarki „inicjatorem” połączonym przewodem światłowodowym z wyjściem światła głowicy laserowej o długości fali 1064 nm. Jak pokazano na rysunku 4, „inicjator” detonacji przypomina wyglądem zapalnik nieelektryczny, z tą różnicą, iż w miejsce rurki detonacyjnej jest zastosowany światłowód. W badaniach sprawnościowych zastosowano partię testową inicjatorów z światłowodem wykonaną w ramach odrębnych tematów badawczych prowadzonych w Oddziale Instytutu Przemysłu Organicznego w Krupskim Młynie. W ich zespołach spłonkowych jako główny materiał wybuchowy zastosowano oktogon (HMX).

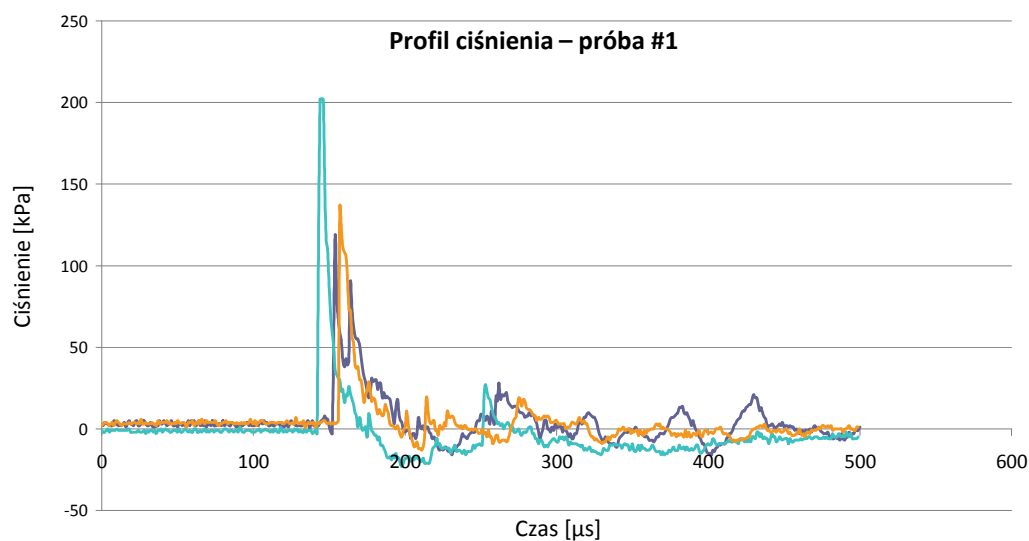
Zastosowany generator impulsów laserowych typu Spectra-Laser® sprzężony z komputerem umożliwia kon-

figurowanie podstawowych parametrów pracy głowicy, takich jak: 1) moc impulsu laserowego w zakresie 1÷2000 mW, 2) szerokość pojedynczego impulsu laserowego w zakresie 50 μ s–3 s; 3) wybór trybu pracy pomiędzy działaniem ciągłym a generowaniem pojedynczych impulsów o zadanych wartościach. Docelowo przyjęto następujące zestawienie parametrów układu:

- moc minimalna: 1000 mW (zwiększana o 100 mW w przypadku próby negatywnej),
- stała szerokość impulsu laserowego: 250 ms (dobrana arbitralnie),
- powierzchnia bezpośredniego działania lasera: 0,785 mm² (wynika z zastosowania światłowodu o średnicy 1 mm),
- tryb pracy lasera: generowanie pojedynczego impulsu.

PRÓBA I

Po umieszczeniu modelu strzałowego w komorze balistycznej i sprawdzeniu linii pomiarowej czujników rejestratora ciśnienia rozpoczęto eksperyment od wygenerowania



Rys. 5. Profil ciśnienia zarejestrowany w pierwszym eksperymencie

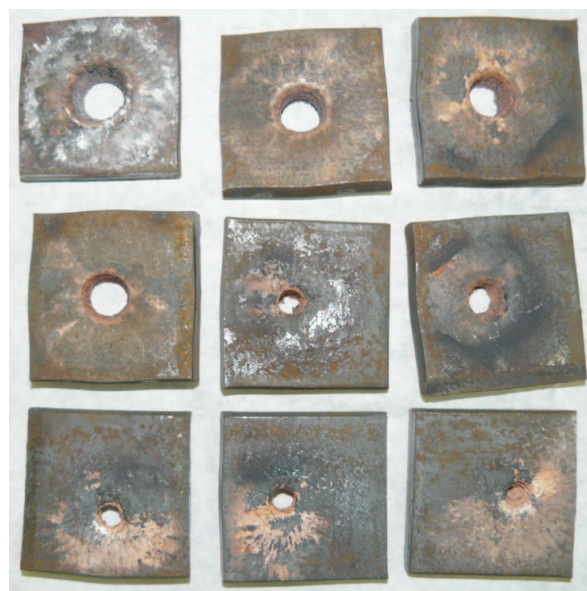
impulsu laserowego o mocy 1000 mW. Zgodnie z przyjętymi założeniami impuls taki charakteryzuje się energią $E = 0,25$ J i gęstością energii $\Psi_E = 3,18 \times 10^{-3}$ [J/cm²], jednak okazał się być zbyt słaby, by zainicjować detonację. W dalszym toku eksperymentu zwiększano moc impulsu laserowego o stałą wartość równą $\Delta p = 100$ mW. Detonację zaobserwowano dopiero dla mocy $P_{det} = 1900$ mW, której odpowiada energia impulsu $E_I = 0,475$ J o gęstości strumienia $\Psi_E = 6,05 \times 10^{-3}$ [J/cm²]. Zarejestrowany profil ciśnienia przedstawiono na rysunku 5.

Kształt krzywych przebiegu ciśnienia jest typowy dla detonacji pojedynczego ładunku kumulacyjnego, z charakterystycznym pikiem w momencie wybuchu i następującym po nim gwałtownym spadkiem ciśnienia. Dalsze drgania rozchodzą się i wytlumiają, a obserwowane wartości podciśnienia spowodowane są reakcją ścian komory balistycznej, która jest zbiornikiem zamkniętym.

Przestrzeliny płytek stalowych wyjętych z komory po jej odprężeniu i przewietrzeniu pokazano na rysunku 6. Strumień kumulacyjny przebił osiem testowych płytek stalowych, zatrzymując się na dziewiątej, wyraźnie ją wgłębiając. Średnica otworu wlotowego wynosi $D_{in} = 18,52$ mm, końcowa zaś $D_{out} = 6,6$ mm.

PRÓBA II

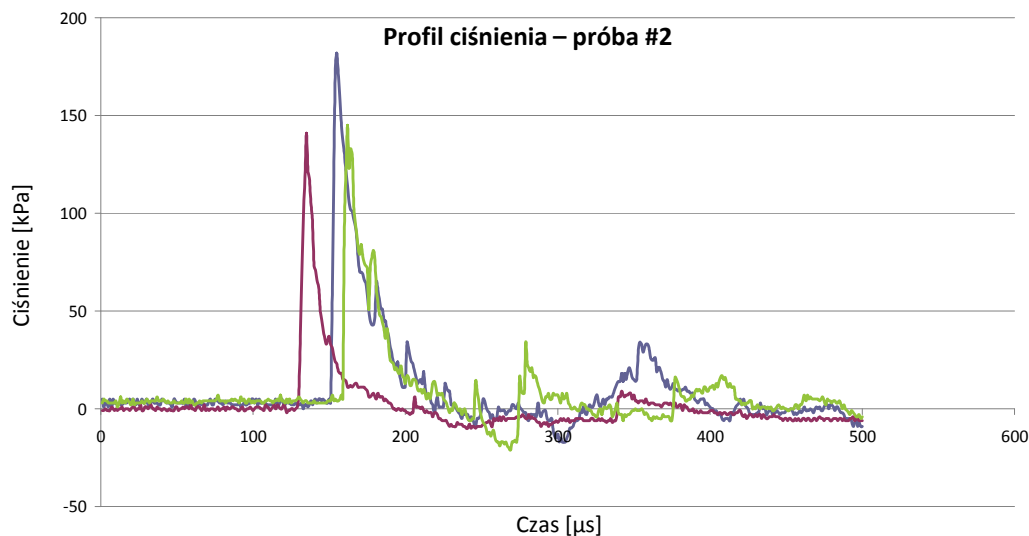
Wykorzystując spostrzeżenia z pierwszej próby detonacyjnej, które wyraźnie wskazują poziom energii niezbędnej do zainicjowania detonacji, przystąpiono do kolejnego eksperymentu, generując impuls laserowy o mocy $P_{start} = 1850$ mW i zwiększając jego moc (przy próbie negatywnej) o stałą wartość równą $\Delta p = 10$ mW. Podstawo-



Rys. 6. Widok przestrzelin stalowych płytek w wyniku działania strumienia ładunku kumulacyjnego

we kalkulacje pokazują, iż energia impulsu początkowego wyniosła $E_I = 0,462$ J, a gęstość energii $\Psi_E = 0,589$ J/mm². Trzeci wygenerowany w tej próbie impuls laserowy daje już pozytywny efekt – układ detonuje przy mocy impulsu $P_{det} = 1870$ mW, której odpowiada energia impulsu $E_I = 0,468$ J o gęstości strumienia $\Psi_E = 0,595$ J/mm². Zarejestrowany profil ciśnienia przedstawiono na rysunku 7.

Profil zmiany ciśnienia jest bliźniaczo podobny do uprzednio zarejestrowanego w próbie pierwszej: gwałtowny pik ciśnienia (poniżej 200 kPa) i bardzo szybki spadek zawierający się w przedziale 70÷50 μs. Dalsze tłumienie i towarzyszące mu nieznaczne wartości podciśnienia obserwowane były do 500 μs po detonacji.



Rys. 7. Profil ciśnienia zarejestrowany w drugim eksperymencie

W próbie drugiej przestrzelono również osiem płytek stalowych, przy czym średnica otworu w płytce pierwszej wyniosła $D_{in} = 17,7$ mm, końcowej zaś $D_{out} = 6,0$ mm.

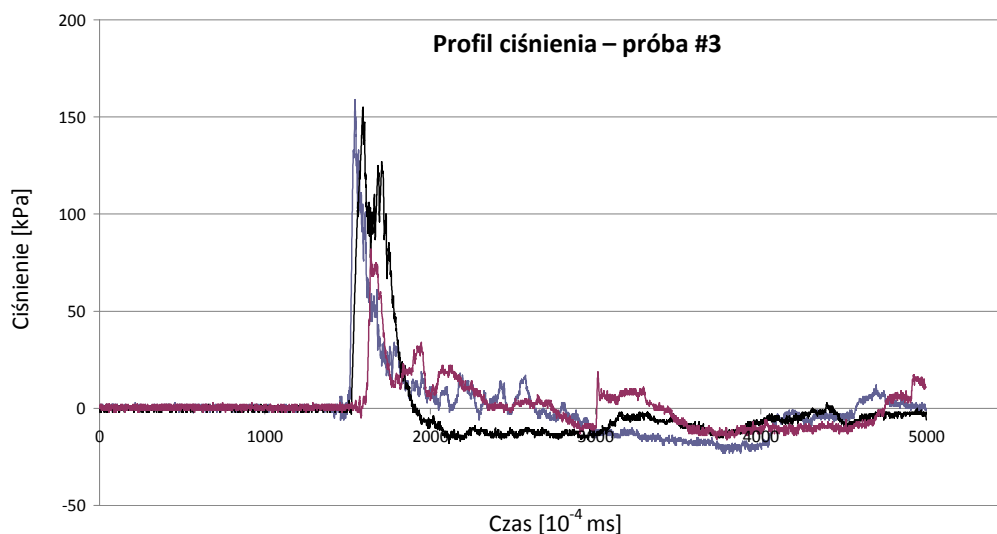
PRÓBA III

Przystępując do trzeciego eksperymentu, operowaliśmy już w bardzo wąskim przedziale mocy lasera. Na podstawie wyników wcześniejszych prób zakres ten zawęziliśmy do interwału $1860 \text{ mW} < P_{det} \leq 1870 \text{ mW}$. Minimalna rozdzielczość generatora impulsów laserowych Spectra-Laser® to $\Delta p^{\min} = 1 \text{ mW}$, dlatego trzecią próbę rozpoczęto z mocą lasera $P_{start} = 1861 \text{ mW}$ i zdecydowano ją zwiększać (w przypadku próby negatywnej) o minimalną możliwą wartość, czyli $\Delta p = 1 \text{ mW}$. Detonację ładunku kumulacyjnego odnotowa-

no przy mocy impulsu $P_{det} = 1866 \text{ mW}$, której odpowiada energia $E_l = 0,466 \text{ J}$ o gęstości strumienia $\Psi_E = 5,19 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$. W próbie trzeciej energia strumienia kumulacyjnego pozwoliła na przebicie ośmiu płytek stalowych o grubości 10 mm każda, tworząc maksymalny otwór wlotowy o średnicy $D_{in} = 19,0$ mm oraz wylotowy równy $D_{out} = 5,3$ mm. Zarejestrowany profil ciśnienia przedstawiono na rysunku 8.

W trzecim eksperymencie wyznaczono ostatecznie (z dokładnością do $\pm 1 \text{ mW}$) minimalną moc lasera niezbędną do zadziałania inicjatora, następnie detonacji lontu i ładunku kumulacyjnego wewnątrz testowego układu odcinka perforatora.

Tę wartość energii minimalnej, określoną dla partii testowej inicjatorów, nazywa się impulsem inicjującym lub bodźcem inicjującym.



Rys. 8. Profil ciśnienia zarejestrowany w trzecim eksperymencie

Podsumowanie

1. Adaptowano komorę balistyczną na stanowisko do badań laserowego zapłonu materiałów wybuchowych i paliw pędných.
2. Zbadano możliwość inicjowania lontu i ładunków kumulacyjnych w modelach perforatora rurowego typu PRS 114.
3. Pomyślnie przeprowadzono próby strzałowe z użyciem partii testowej inicjatorów laserowych, używając światła lasera 1064 nm o mocy sterowanej do 2000 mW.
4. Dla przyjętego układu próbnego i partii testowej inicjatorów określono zakres wartości gęstości energii lasera dostarczonej do światłowodu, która wywołuje ich zadziałanie.
5. Badania sprawnościowe potwierdziły, że laserowy system inicjowania detonacji z powodzeniem mógłby zastąpić powszechnie stosowany w przemyśle naftowym system elektrycznego odpalania perforatorów.
6. Nowy system wymaga zastosowania w perforatorze głowicy odpalającej z autonomicznym modułem laserowym z możliwością sterowania np. sygnałem sterowniczym z powierzchni lub za pomocą impulsu ciśnienia.

Literatura

- [1] Aduiev P., Belokurov G. M., Krechetov A. G., Nelyubina N. V., Nurmukha-metov D. R.: *Sensitivity of a mechanical mixture of pentaerythrite tetranitrate and Ni-C nanoparticles to explosion initiation by laser pulses*. „Fizika Goreniya i Vzryva”, vol. 45, no. 1, 2009, s. 59–63.
- [2] Ahmad S. R., Russell D. A., Leach C. J.: *Studies into Laser Ignition of Unconfined Propellants*. „Propellants, Explosives and Pyrotechnics” 2001, vol. 26, issue 5, s. 235–245.
- [3] Ahmad S. R., Russell D. A.: *Laser Ignition of Pyrotechnics – Effects of Wavelength, Composition and Confinement*. „Propellants, Explosives and Pyrotechnics” 2005, vol. 30, issue 2, s. 131–139.
- [4] Bernard T.: *How has electronic initiation changed the rules of blast design*. Proceedings of the thirty-first Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Orlando, USA, February 6–9, 2005.
- [5] Cudziło S., Szmigielski R.: *Otrzymywanie i badanie niektórych chloranów (VII) di-(R-1,2,4-trzd-N¹N²) miedzi (II)*. Biuletyn WAT 2000, nr 12, s. 5–17.
- [6] Cudziło S.: *Współczesne i przyszłe materiały wybuchowe*. „Wiadomości Chemiczne” 2008, nr 62, s. 1017–1036.
- [7] Rosenstock W.: *Advanced Electronic Blasting Technology AEBT, breaking 3,205,000 tonnes of ore within a millisecond*. Proceedings of the thirtieth Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, Orlando, USA, February 1–4, 2004.
- [8] Wilk Z., Cieślicka-Nikolczuk K., Koślik P.: *Badania nad otrzymywaniem materiałów wybuchowych wrażliwych na promieniowanie laserowe oraz nad modyfikowaniem ich właściwości – Badania aplikacyjne zdolności inicjowania MW laserem*. Sprawozdanie z pracy badawczej EMC 063600013, IPO Warszawa/Krupski Młyn, 2010.
- [9] Wilk Z., Nikolczuk K., Koślik P.: *Badania wrażliwości materiałów wysokoenergetycznych na promieniowanie laserowe – Etap I*. Sprawozdanie z pracy badawczej EMC 083600013, IPO Warszawa/Krupski Młyn, 2011.



Mgr inż. Łukasz HABERA – asystent, ukończył Wydział Wiertnictwa Nafty i Gazu Akademii Górniczo-Hutniczej, pracuje w Pionie Poszukiwań Złóż Węglowodorów Instytutu Nafty i Gazu w Krakowie. Zajmuje się metodami stymulacji złóż, prowadzi prace badawcze w dziedzinie termodynamiki gazu ziemnego, sekwestracji CO₂ i materiałów wysokoenergetycznych stosowanych w przemyśle naftowym.



Andrzej PAPLIŃSKI – profesor nadzwyczajny Wojskowej Akademii Technicznej, absolwent kierunku Fizyka Techniczna. Zakład Inżynierii Bezpieczeństwa w Wydziale Mechatroniki i Lotnictwa WAT. Specjalista w zakresie mechaniki wybuchu, modelowania balistyki wewnętrznej, numerycznej analizy składu chemicznego i parametrów spalania i detonacji materiałów wybuchowych.



Mgr inż. Piotr KOŚLIK – specjalista badawczo-techniczny w Instytucie Przemysłu Organicznego w Warszawie Oddział w Krupskim Młynie. Zajmuje się badaniami poligonowymi materiałów wybuchowych stosowanych w ładunkach kumulacyjnych perforatorów oraz modelowaniem numerycznym zjawiska wybuchu i spalania paliw wysokoenergetycznych.



Dr inż. Zenon WILK – absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej, specjalność Przetwarzanie i Użytkowanie Energii. Studia podyplomowe: Chemia – Technologia Materiałów Wybuchowych. Kierownik Oddziału Instytutu Przemysłu Organicznego w Krupskim Młynie. Realizował wiele projektów w zakresie materiałów wybuchowych dla górnictwa otworowego.