

Łukasz Habera

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

Piotr Koślik

*Instytut Przemysłu Organicznego w Warszawie, Oddział w Krupskim Młynie*

## Badania poligonowe propelantów obciążonych materiałem podsadzkowym

Artykuł poświęcony jest ocenie zdolności zapłonu paliw prochowych obciążonych materiałem podsadzkowym w postaci piasku kwarcowego. Istotą badań było przeprowadzenie serii eksperymentów strzałowych z wykorzystaniem wytłoczonych segmentów paliwowych ze zmienną zawartością piasku kwarcowego. W tym celu przygotowano stanowiska betonowe na poligonie, wykonano fragmenty odcinka perfogenerators, zaprasowano pierścienie paliwowe ze zmienną ilością propanu oraz przeprowadzono badania strzałowe na tychże modelach. Ocenie poddano fakt samej inicjacji paliwa oraz wielkość i charakter spękań wywołanych spalaniem paliwa w atrapie otworu wiertniczego.

Słowa kluczowe: szczelinowanie gazowe, paliwa modyfikowane, materiał podsadzkowy kwarcowy.

### Shooting experiments of propellants with embedded proppant material

Shooting experiments on a fire-ground constituted the main part of the research. In order to strengthen the effect of fracture propping, the research team developed a method of joining the propellants with proppants in single, monolithic form, which shall enable to perform gas fracturing jobs with the immediate release of the proppants. The research involved selecting an appropriate proppant material, constructing experimental models and performing a number of fire-ground shooting experiments with use of proppant-loaded propellant materials.

Key words: gas fracturing, modified propellants, proppant material.

### Wstęp

Szczelinowanie z zastosowaniem paliw prochowych może być uznawane za tanią alternatywę dla konwencjonalnego szczelinowania hydraulicznego w okolicznościach, w których nie są dostępne ciężkie urządzenia pompowe, istnieje zagrożenie naruszenia konstrukcji odwiertu w trakcie obróbki albo koszt tradycyjnego zabiegu nie znajduje uzasadnienia.

Możliwe zastosowania szczelinowania z wykorzystaniem gazów prochowych obejmują: (1) wstępne szczelinowanie przed konwencjonalnym szczelinowaniem hydraulicznym w celu zmniejszenia ciśnienia zapoczątkowania szczeliny oraz ryzyka niepożądanego propagacji szczeliny; (2) poprawę chłonności, co może być również użyteczne do powrotnego zatłaczania w trakcie testów otworu; (3) stymula-

cję wydobywania z otworów ropnych i gazowych. Uważa się, że szczeliny utworzone pod działaniem gazów prochowych samoczynnie zapobiegają ich zamykaniu się na skutek dyslokacji ścinającej, do której dochodzi z powodu dynamicznego charakteru oddziaływania gazów prochowych na skałę w trakcie propagacji szczeliny. Eksperymenty laboratoryjne i terenowe wykazały, że wywieranie ciśnienia w otworze drogą spalania paliw pędnych może być skutecznie wykorzystywane do tworzenia wielu szczelin w skałach otaczających otwór. Niniejsza praca to próba wprowadzenia do zabiegu szczelinowania gazowego materiału podsadzkowego, jako dodatkowego elementu zapobiegającego zacieśnianiu się powstałych szczelin.

### Modele badawcze

Próbkami przeznaczonymi do badań strzałowych były fragmenty konstrukcji perfogeneratora korpusowego stosowanego do udostępniania horyzontów ropo- i gazonośnych [1]. Układ taki (rysunek 1) składa się z ładunku kumulacyjnego z wkładką miedzianą o naważce heksogenu 16 g, osadzonego na aluminiowej żerdzi nośnej umocowanej w rurze stalowej o średnicy 89 mm za pomocą dwóch (górze/dół) aluminiowych centralizatorów [2]. W górnym centralizatorze nawiercono otwór ( $\varphi = 7$  mm) umożliwiającą doprowadzenie lontu detonacyjnego heksogenowego (RDX) w powłoce ołowianej. Istotą konstrukcji perfogeneratora jest płaszcz propelantowy nasuwany na korpus tradycyjnego rurowego perforatora [3, 4]. Do badań poligonowych przygotowano cztery zestawy odcinka perfogeneratora z różnymi płaszczami paliwowymi. Fragmenty płaszcza paliwowego wykonano



Rys. 1. Zestawy odcinków perfogeneratora uzbrojonych w paliwo prochowe typu Szafir/Szmaragd ze zmieniającą się zawartością materiału podsadzkowego

z mieszanki paliwa typu Szafir/Szmaragd metodą zaprasowania matrycowego z dodatkiem piasku kwarcowego w ilości od 5% do 30% udziału wagowego.

### Przebieg badań poligonowych

Zasadniczym celem badania było stwierdzenie bądź wykluczenie zapłonu i spalania propelantu obciążonego materiałem podsadzkowym oraz próba oszacowania wpływu podsadzki na proces szczelinowania na podstawie analizy spękań i deformacji modeli strzałowych.

#### Test pierwszy. Propelant bez dodatku podsadzki

Eksperyment strzałowy polegał na zainicjowaniu spalania propelantu i wykonaniu szczelinowania gazami prochowymi przygotowanego stanowiska betonowo-stalowego. Odcinek testowy perfogeneratora uzbrojono w płaszcz paliwa wykonany metodą prasowania granulatu propelantów typu Szafir/Szmaragd bez udziału podsadzki. Odpalenie generatora

ciśnienia z propelantem wolnym od materiału podsadzkowego miało dać możliwość dalszego porównania efektów strzałów z różną zawartością podsadzki. Do pierwszego testu przygotowano płaszcz paliwa z zaprasowanej mieszanki granulacyjnej propelantów typu Szafir i Szmaragd. Uzyskany pierścień paliwowy charakteryzował się masą  $m_1 = 235,3$  g, wysokością wypraski  $h_1 = 49,16$  mm oraz gęstością  $\rho_1 = 1,55$  g/cm<sup>3</sup>.

Przedstawiony na rysunku 2 model perfogeneratora wyposażony w płaszcz paliwowy został uzbrojony w ładunek kumulacyjny szesnastogramowy oraz heksogenowy lont detonujący w osłonie ołowianej. Linię strzałową dopełniał zapalnik elektryczny bezzwłoczny. Kompletny i uzbrojony fragment perfogeneratora umieszczono w betonowo-stalowej atrapie

odcinka otworu wiertniczego i zaślepiono trzydziestokilogramowym walcem stalowym służącym do powstrzymania nagłej ucieczki gazów prochowych.

Wyjęta z modelu strzałowego rura korpusowa uwidaczniała otwór wykonany przez ładunek kumulacyjny, zaś oględziny wnętrza atrapy wykazały brak jakichkolwiek pozostałości paliwa. Wniosek jest następujący: doszło zarówno do detonacji ładunku kumulacyjnego, jak i spalania paliwa.

#### Test drugi. Propelant + 5% podsadzki

Test strzałowy polegał na zainicjowaniu spalania propelantu i wykonaniu szczelinowania gazami prochowymi przygotowanego stanowiska betonowo-stalowego. Odcinek testowy perfogeneratora uzbrojono w płaszcz paliwa wykonany metodą prasowania granulatu propelantów typu



Rys. 2. Rezultat strzału w eksperymencie pierwszym. Widoczne liczne spękania i szczeliny. Wyraźny otwór perforacyjny i szczelina w jego osi





Rys. 3. Widok uzbrojonego perfogeneratora. Zastosowano płaszcz paliwa z zaprasowanej mieszanki granulacyjnej propelantów typu Szafir i Szmaragd z dodatkiem materiału podsadzkowego w ilości 5% udziału wagowego

Szafir/Szmaragd z dodatkiem piasku kwarcowego w ilości 5% udziału masowego. Przygotowany do testu szczelinowania pierścień paliwa cechowały następujące parametry: masa  $m_2 = 253,6$  g, wysokość wypraski  $h_2 = 52,23$  mm oraz gęstość  $\rho_2 = 1,57$  g/cm<sup>3</sup>. Skompletowany zestaw strzałowy zaprezentowano na rysunku 3.

W wyniku odpalenia perfogeneratora w modelu betonowym zaobserwowano powstanie wyraźnych szczelin i spękań. Największa szczelina pojawiła



Rys. 5. Widok uzbrojonego perfogeneratora. Zastosowano płaszcz paliwa z zaprasowanej mieszanki granulacyjnej propelantów typu Szafir i Szmaragd z dodatkiem 20% materiału podsadzkowego



Rys. 4. Efekt szczelinowania w eksperymencie trzecim

się w osi działania strugi kumulacyjnej, nieco mniejsza jest przesunięta o ~120 stopni. Widoczne są jeszcze dwie mniejsze szczeliny, powstałe niemal prostopadle do siebie, jednak ich zasięg radialny jest wyraźnie krótszy. Zeszczelinowany model poddano oględzinom na obecność materiału podsadzkowego w nowo powstałych szczelinach, jednak nie dostrzeżono żadnych jego śladów. Analiza spękań atrapy odcinka odwiertu pozwala stwierdzić, że test przebiegł pomyślnie, a oczekiwany efekt w postaci zeszczelinowania „strefy przyodwiertowej” jest wyraźny i zadowalający.

Nie zaobserwowano negatywnego wpływu obecności podsadzki w płaszczu propelantowym, czego najlepszym potwierdzeniem jest całkowite spalenie paliwa i wykonanie pracy gazów prochowych.

### Test trzeci. Propelant + 20% podsadzki

Test poligonowy polegał na zainicjowaniu spalania propelantu i wykonaniu szczelinowania gazami prochowymi przygotowanej atrapy odcinka otworu wiertniczego. Tak jak w dwóch poprzednich eksperymentach odcinek testowy perfogeneratora uzbrojono w płaszcz paliwa prochowego (propelantem), który swój cylindryczny kształt zawdzięcza

metodzie zaprasowania. Do testu trzeciego przygotowano mieszankę propelantów typu Szafir/Szmaragd z dodatkiem piasku kwarcowego w ilości 20% udziału masowego. Zastosowany pierścień paliwa cechował się następującymi parametrami: masa  $m_3 = 257,3$  g, wysokością wypraski  $h_3 = 49,33$  mm oraz gęstością  $\rho_3 = 1,71$  g/cm<sup>3</sup>. Skompletowany zestaw strzałowy, w tym pierścień paliwowy, zaprezentowano na rysunku 5.

Na rysunku wyraźnie widać otwór perforacyjny na rurze okładzinowej i ślady kanału perforacyjnego w części betonowej. Powstała dwuskrzydłowa szczelina zorientowana 180/180 stopni miary kątowej, zapoczątkowana kanałem perforacyjnym. Śladów materiału podsadzkowego nie dostrzeżono.



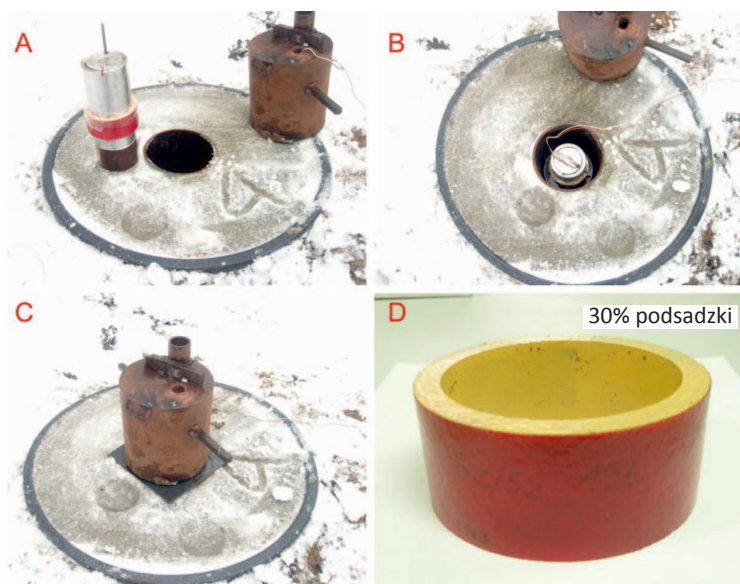
Rys. 6. Efekt odpalenia generatora na modelu nr 3



**Test czwarty. Propelant + 30% podsadzki**

Serię badań poligonowych zamyka eksperyment czwarty. Przygotowany odcinek testowy perfogeneratora uzbrojono w płaszcz paliwa prochowego obciążonego 30-proc. udziałem materiału podsadzkowego w postaci piasku kwarcowego. Zaprasowana mieszanka granulatu paliwa typu Szafir/Szmaragd z dodatkiem piasku posiadała następujące właściwości: masa  $m_4 = 256,8$  g, wysokość wypraski  $h_4 = 50,0$  mm oraz gęstość  $\rho_4 = 1,73$  g/cm<sup>3</sup>. Przygotowany zestaw strzałowy przedstawiono na rysunku 7.

Rozrzut gruntu, w którym była posadowiona atrapa odwiertu, świadczy jednak o tym, że część gazów prochowych uwolniła się bez wykonania pracy użytkowej. Negatywną obserwacją płynącą z testu jest fakt, że wydobyto z dna otworu liczne rozkruszone fragmenty paliwa, które nie zostało spalane. Zebrane fragmenty propelantowego pierścienia ważyły sumarycznie 38 g, a ich długość to średnio 1,5 cm. Wśród niespalonych części paliwa, jak i w powstałych szczelinach nie dostrzeżono obecności piasku kwarcowego, który – zaprasowany w propelancie – stanowił materiał podsadzkowy.



Rys. 7. Widok układu badawczego na poligonie strzałowym; A – atrapa odcinka odwiertu w postaci zacementowanej rury okładzinowej, B – model perfogeneratora umieszczony w otworze i uzbrojony zapalnikiem elektrycznym, C – zamknięcie wylotu rury okładzinowej blachą stalową i walcem o masie 30 kg, D – propelant w formie zaprasowanego pierścienia z 30-proc. udziałem piasku kwarcowego



Rys. 8. Efekt testu czwartego; A – duża szczelina dwuskrzydłowa mocniej rozwarta w osi działania ładunku kierunkowego, B – niewielki rozrzut gruntu, wskazujący, że nastąpiła częściowa ucieczka gazów prochowych dolną częścią modelu betonowego, C – wyjęta po strzale rura korpusowa z widoczną dobrą jakością perforacją, D – wydobyte z dna resztki niespalonego pierścienia paliwowego

**Podsumowanie**

1. Przeprowadzono badania skuteczności działania pierścieni paliwowych zawierających materiał podsadzkowy w modelowym urządzeniu perfoszczelinującym w warunkach poligonowych.
2. Wykonano próbki paliw do badań w urządzeniu perfoszczelinującym w postaci pierścieni z dodatkami podsadzki w formie piasku kwarcowego. Spalone w testach paliwa zostały obciążone materiałem podsadzkowym w zakresie 0÷30% (5%, 20%, 30%) udziału masowego. Uzyskane gęstości pierścieni paliwowych zamykały się w przedziale od  $\rho_1 = 1,55$  g/cm<sup>3</sup> do  $\rho_4 = 1,73$  g/cm<sup>3</sup>.
3. Na poligonie strzałowym wykonano atrapy odcinka otworu

- wiertniczego składającego się z zacementowanej rury okładzinowej wkopanej w ziemię do poziomu gruntu. We wszystkich testach poligonowych z wykorzystaniem propelantów doszło do pomyślnego zainicjowania paliwa prochowego w formie płaszczowej. We wszystkich testach rezultatem odpalenia propelantu było powstanie kilku wyraźnych szczelin w betonowej atrapie otworu wiertniczego.
4. W wyniku przeprowadzonych testów stwierdzono poprawność działania modelu oraz przenoszenie zapłonu pomiędzy elementami perfogeneratora.
5. Negatywną obserwacją płynącą z testu nr 4 jest fakt, że wydobyto z dna otworu liczne rozkruszone fragmenty paliwa,

które nie zostało spalone. Zebrane fragmenty propelantowego pierścienia ważyły sumarycznie 38 g, a ich wielkość to średnio 1,5 cm. Wśród niespalonych części paliwa, jak i w powstałych szczelinach nie dostrzeżono obecności piasku kwarcowego, który – zaprasowany w propelancie – stanowił materiał podsadzkowy.

6. Choć wszystkie pierścienie paliwowe zostały pomyślnie zainicjowane i uzyskano wyraźne szczeliny na modelu betonowym, to jednak należy ograniczyć ilość propantu do poziomu poniżej 30% udziału masowego z uwagi na wyraźne zakłócenie procesu spalania, co pokazuje rezultat testu czwartego.

Prosimy cytować jako: *Nafta-Gaz* 2016, nr 5, s. 301–315, DOI: 10.18668/NG.2016.05.01

Artykuł nadesłany do Redakcji 10.11.2015 r. Zatwierdzony do druku 8.03.2016 r.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Badania nowoczesnych propelantów przeznaczonych dla dojrzałych złóż konwencjonalnych* – praca INiG – PIB na zlecenie MNiSW; nr zlecenia: 64/ST, nr archiwalny: DK-4100-64/2015.

## Literatura

- [1] Frodyma A., Godzik E., Habera Ł.: *Perfo-szczelinowanie. Testy wybranego rozwiązania technologicznego do budowy kompleksowego urzędnia perforująco-szczelinującego*. Materiały INiG – PIB, 2014.
- [2] Habera Ł., Frodyma A., Koślik P., Wilk Z.: *Nowoczesne urządzenie perforująco-szczelinujące – koncepcja i badania poligonowe*. *Nafta-Gaz* 2014, nr 5, s. 301–306.
- [3] Habera Ł., Frodyma A., Wilk Z., Koślik P.: *Badania poligonowe zapłonu paliw prochowych stosowanych w perfogeneratorach*. *Nafta-Gaz* 2012, nr 3, s. 180–183.
- [4] Wolszakiewicz T.: *Badania balistyczne i wytrzymałościowe stałych paliw raketowych w aspekcie prawidłowości ich zapłonu oraz możliwości wystąpienia sytuacji awaryjnych pracy silników raketowych*. Instytut Przemysłu Organicznego, Warszawa 2013.



Dr inż. Łukasz HABERA  
Adiunkt w Zakładzie Techniki Strzelniczej.  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A  
31-503 Kraków  
E-mail: [lukasz.habera@inig.pl](mailto:lukasz.habera@inig.pl)



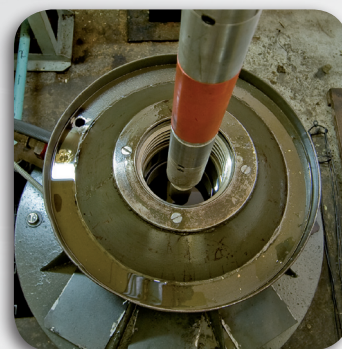
Mgr inż. Piotr KOŚLIK  
Specjalista badawczo-techniczny w Instytucie  
Przemysłu Organicznego w Warszawie Oddział  
w Krupskim Młynie.  
ul. Zawadzkiego 1  
42-693 Krupski Młyn  
E-mail: [piotr.koslik@ipo.waw.pl](mailto:piotr.koslik@ipo.waw.pl)

## OFERTA

### ZAKŁAD TECHNIKI STRZELNICZEJ

Zakres działania:

- konstrukcja urządzeń strzelniczych, przeznaczonych do udostępniania poziomów ropo- i gazonośnych;
- opracowywanie technologii i metod prowadzenia prac udostępniających, przy wykorzystaniu własnych rozwiązań konstrukcyjnych sprzętu strzelniczego;
- konstrukcja urządzeń strzelniczych, przeznaczonych do prac specjalnych i rąnkowych w otworach wiertniczych (korki detonacyjne, ładunki o działaniu pionowym, obcinacze rur okładzinowych i płuczkowych);
- przywracanie cyrkulacji w odwiercie – uwalnianie przewodu wiertniczego;
- intensyfikacja oraz stymulacja przepływu medium do odwiertu (uszczelnianie strefy przyotworowej złoża prochowymi generatorami ciśnienia);
- badania atestacyjno-wytrzymałościowe sprzętu strzałowego;
- małoseryjna produkcja urządzeń strzelniczych (perforatory, korki detonacyjne, obcinacze do rur).



**Kierownik:** mgr inż. Antoni Frodyma  
**Adres:** ul. Bagrowa 1, 30-733 Kraków  
**Tel:** 12 61 77 473  
**Faks:** 12 653 16 65  
**E-mail:** [antoni.frodyma@inig.pl](mailto:antoni.frodyma@inig.pl)

