

### **Recenzja**

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Pytlika zatytułowanej:  
**„Kompleksowe oznaczanie parametrów detonacji zapalników”**

#### **Podstawa wykonania recenzji**

Podstawa prawna: zgodna ze stanem prawnym, określonym w art. 13 ust. 1 Ustawy z dn. 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (t. J. Dz. U. z 2017 r., poz. 1789 z późn. zm).

Recenzja została sporządzona na zlecenie Dyrektora Głównego Instytutu Górnictwa – Państwowego Instytutu Badawczego Jarosława Zagórowskiego z dn. 2 sierpnia 2024 r.

#### **Przedmiot recenzji**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska autorstwa mgr inż. Mateusza Pytlika, która była realizowana w Głównym Instytucie Górnictwa – Państwowym Instytucie Badawczym. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Jan Drzewiecki, a promotorem pomocniczym dr inż. Jacek Sobala.

#### **Wybór tematu i określenie problematyki badawczej**

Materiały wybuchowe do użytku cywilnego wykorzystywane są w górnictwie, w pracach wyburzeniowych, inżynierskich oraz przy drażeniu tuneli. Zapotrzebowanie na materiały wybuchowe i środki strzałowe w gospodarkach krajów uprzemysłowionych zwiększa się z uwagi na rosnące zapotrzebowanie na surowce mineralne. W Polsce zużycie zapalników utrzymuje się na niezmiennym od 20 lat poziomie ok. 10–12 mln sztuk rocznie. W celu uzyskania wysokiej efektywności robót strzałowych, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiego poziomu bezpieczeństwa prac, niezbędnym jest zapewnienie powtarzalności deklarowanych parametrów MW oraz zapalników, które stanowią podstawowy środek inicjujący detonację MW. Aktualnie w górnictwie systemy inicjujące materiały wybuchowe muszą spełniać wymagania Dyrektywy 2014/28/UE oraz odpowiadającym jej normom zharmonizowanym dotyczącym materiałów wybuchowych do użytku cywilnego. Powtarzalność parametrów określonych w ww. normach jest niezbędna, aby roboty strzałowe były wykonywane w sposób prawidłowy i bezpieczny. Zapewnienie jakości zapalników jest możliwe dzięki przeprowadzaniu badań typu UE oraz zapewnieniu jakości procesu produkcji zgodnie z normą [PN-EN 13763] zharmonizowaną z ww. Dyrektywą. Do przeprowadzenia badań upoważnianie są jedynie jednostki notyfikowane posiadające potwierdzone kompetencje oraz możliwości badawcze w danej dziedzinie. Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy od maja 2004 r. jest jednostką notyfikowaną w zakresie Dyrektywy [2014/28/UE] (wcześniej 93/15/WE) i prowadzi badania w zakresie MW do użytku cywilnego, w tym: MW kruszących, zapalników i przekaźników, lontów detonujących, pobudzaczy i wielu innych. Stosowanie w górnictwie zapalników elektrycznych, nieelektrycznych oraz elektronicznych na etapie ich dopuszczania i produkcji wymaga przeprowadzenia licznych badań parametrów technicznych, zgodnie z odpowiednimi normami. Jest to proces bardzo czasochłonny i kosztowny.

Tematyka badań zapalników związana jest od wielu lat z Kopalnią Doświadczalną „Barbara”, która jest obecnie częścią GIG-PIB. Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy, prowadzi oprócz badań zapalników badania powypadkowe w celu określenia, czy materiały wybuchowe spełniały wymagania określone w europejskich normach zharmonizowanych.

W tym właśnie obszarze wpisuje się recenzowana rozprawa, w której Doktorant podjął się tematu zaprojektowania oraz opracowania metody kompleksowego badania zapalnika pozwalającej na określenie wymaganych normą ilości jego parametrów w trakcie pojedynczego badania. Jest to celowe i uzasadnione nie tylko ze względów ekonomicznych, ale również skraca czas badań oraz pozwala wyznaczyć nowe, istotne parametry techniczne, które wpływają na bezpieczeństwo robót strzałowych.

Ze względu na wagę omawianego zagadnienia, wybór tematu opiniowanej rozprawy doktorskiej należy więc uznać za w pełni prawidłowy. W opinii recenzenta tematyka niniejszej pracy nie tylko, że jest wciąż aktualna, lecz niezmiernie ważna z uwagi na potencjał aplikacyjny.

W mojej ocenie przyjęte przez Doktoranta główne założenia pracy były w pełni słuszne, zaś podstawowy cel i teza zostały sformułowane prawidłowo. Zdaniem recenzenta problematyka badawcza pracy jest niezwykle ważna ze względu na poruszone w niej nowe aspekty poznawcze i aplikacyjne.

### **Struktura i strona edytorska rozprawy**

Pod względem formalnym praca ma klasyczny układ treści. Rozprawa doktorska zawiera stronę tytułową z wszystkimi istotnymi danymi, spis treści, streszczenie w języku angielskim, wykaz skrótów, nazw i pojęć użytych w pracy, wprowadzenie, cel i zakres pracy, część literaturową, badania własne zawierające również część eksperymentalną i dyskusję wyników, wnioski oraz bibliografię.

Rozprawa doktorska liczy 127 stron, zawiera 60 rysunków i 21 tabel, które są udokumentowaniem przeprowadzonych badań. Cytowana literatura obejmuje 96 pozycji właściwie dobranych i związanych z tematyką rozprawy. Struktura pracy jest przejrzysta i spójna, dobrze koreluje z koncepcją i zakresem wykonywanych badań. Pod względem edytorskim, stwierdzam, że praca została napisana poprawnie. Pojawiają się rzadko błędy edytorskie, których nawet nie wymieniam i które nie umniejszają wartości pracy. Zauważyłem błędne numery rysunków w tekście na str. 39 rys. 3.14 powinno być rys. 3.13 i na str. 65 rys. 4.8a powinno być rys. 4.9a.+ Podsumowując, zaprezentowana struktura pracy w pełni odpowiada oczekiwaniom stawianym rozprawom doktorskim.

### **Ocena merytoryczna pracy**

Tytuł rozprawy doktorskiej odpowiada zaprezentowanym wynikom badań. W pierwszym rozdziale Doktorant dokonał wprowadzenia do tematu swojej pracy doktorskiej. Przedstawił problem jaki istnieje w zakresie badań zapalników do materiałów wybuchowych do użytku cywilnego i jaka jest możliwość jego rozwiązania.

Kolejny rozdział to cel i zakres pracy. Doktorant sformułował następującą tezę: „istnieje możliwość wykonania stanowiska badawczego oraz zaprojektowania dla niego systemu pomiarowego umożliwiających oznaczanie wartości wielu parametrów zapalnika w trakcie jego detonacji”.

Aby udowodnić powyższą tezę Doktorant sformułował następujące cele pracy:

- opracowanie systemu pomiarowego zapewniającego jednoczesne oznaczenie kilku parametrów podczas detonacji jednego zapalnika,
- zbadanie zapalników elektrycznych oraz elektronicznych w warunkach ciśnienia hydrostatycznego,

- analiza parametrów użytkowych zapalników pod wpływem ciśnienia dynamicznego,
- weryfikacja uzyskanych wyników, w porównaniu do wyników uzyskanych z innych metod badawczych.

Sformułowany został również cel użytkarny rozprawy, którym było opracowanie nowej metody oceny jakości zapalników, poprzez jednoczesne określenie następujących użytkowych parametrów: czas opóźnienia, odporność na ciśnienie hydrostatyczne, odporność na ciśnienie dynamiczne, równoważnik zdolności inicjowania, charakterystyki elektryczne zapalników elektrycznych.

Część literaturowa licząca 39 stron została umieszczona w trzecim rozdziale rozprawy doktorskiej. Doktorant omówił w niej stan wiedzy w obszarze środków inicjujących materiały wybuchowe. Została przedstawiona historia rozwoju środków inicjujących poczynając od prochu czarnego po zapalniki elektryczne, nieelektryczne i elektroniczne. W dalszej części tego rozdziału opisano budowę i właściwości różnych rodzajów środków inicjujących takich jak: lont prochowy; spłonki, lonty detonujące; zapalniki elektryczne, nieelektryczne i elektroniczne. Przedstawiono zalety oraz wady inicjowania MW poprzez zapalniki elektryczne, nieelektryczne i elektroniczne. W dalszej kolejności Doktorant opisał metody badań zapalników. Wymienił 25 norm zharmonizowanych oraz jeden standard techniczny, które określają wymagania oraz sposób badań zapalników. Doktorant zaznaczył, że wymienione normy nie zapewniają możliwości przebadania wszystkich parametrów użytkowych oraz bezpieczeństwa dla różnych typów zapalników. Doktorant przeprowadził analizę metod normowych i opisanych w literaturze polskiej oraz zagranicznej. Opisał różne metody wyznaczenia równoważnika zdolności inicjowania, oznaczenia dokładności czasu opóźnienia, odporności zapalników na ciśnienie hydrostatyczne, odporności zapalników na ciśnienie dynamiczne.

Oceniając całokształt części literaturowej rozprawy z całym przekonaniem stwierdzam, że dobór materiału w tej części pracy został przeprowadzony właściwie, a sposób jej przedstawienia oceniam jako klarowny i jasny. Opracowanie literaturowe zawiera najistotniejsze informacje, które pozwalają umieścić tematykę pracy na tle aktualnego stanu wiedzy.

Kolejne rozdziały zawierają opisy przeprowadzonych badań własnych i dyskusję uzyskanych wyników. Czwarty rozdział zatytułowany jest „Charakterystyka opracowanej metody badawczej”. W tej części badań przeprowadzono testy detonacji zapalnika w zbiorniku z wodą, do których wykorzystano przezroczysty pojemnik z tworzywa sztucznego wypełniony wodą i w którym centralnie, w odległości 150 mm od ścianek naczynia umieszczano zapalnik elektryczny natychmiastowy. Do rejestracji zjawiska detonacji w stanowisku testowym użyto szybkiej kamery. Na podstawie przedstawionego testu Doktorant stwierdził, że fala uderzeniowa dotrze do ścianek zbiornika po 0,1 ms od detonacji zapalnika a optymalnym umiejscowieniem czujnika jest środek komory. Dodatkowo Doktorant zaobserwował powstanie pęcherza gazu, który osiąga ściankę obiektu po ok. 3,1 ms.

Celem przeprowadzenia badań wpływu ciśnienia hydrostatycznego na niezawodność zapalnika, Doktorant zaprojektował i zbudował stanowisko badawcze. W pracy przedstawił schemat konstrukcyjny i opis stanowiska badawczego oraz zdjęcia gotowego stanowiska badawczego. Według niego nowa metodyka badań pozwoli również w sposób wiarygodny określić wpływ ciśnienia hydrostatycznego oraz fali uderzeniowej na poprawność pracy zapalnika.

**W założeniu podczas badań zapalnik lub wiązka zapalników powinna znajdować się centralnie w osi komory. Według rysunku 4.5 zapalniki elektryczne w postaci wiązki są mocowane do elektrod w nakrętce za pomocą elastycznych przewodów elektrycznych i tak zanurzone w wodzie w komorze stanowiska badawczego co nie gwarantuje centralnego ich usytuowania podczas przeprowadzenia badań. Czy takie centralne**

**ulozenie zapalników jest koniecznie wymagane i czy nie można by wprowadzić jakiegoś rozwiązania konstrukcyjnego aby to osiągnąć?**

W dalszej części pracy został opisany zastosowany system pomiarowy w wersji 1 i zmodyfikowany w wersji 2. Układ pomiarowy składał się z modułowego wzmacniacza pomiarowego, piezorezystancyjnych czujników ciśnienia zaprojektowanych przez firmę KULITE specjalnie do pomiarów ciśnienia wywołanego detonacją materiałów wybuchowych oraz programów do rejestracji danych pomiarowych. Początkowo, w celu weryfikacji stanowiska, umieszczano tylko jeden zapalnik elektryczny w osi komory. Analizie pomiarowej poddano tylko pierwszy pik ciśnienia, który nie był obciążony błędem wynikającym z nakładania się fal ciśnienia. Wersja 2 układu pomiarowego różniła się od wersji 1 tym, że zmieniono kanał, w którym montowano czujnik, na kanał o większej średnicy otworu, tzn. 20 mm. Dodatkowo zmieniono czujnik, który cechował się podobną charakterystyką, ale większą średnicą membrany wynoszącą 10,9 mm (poprzednio 8,1 mm).

Piąty rozdział rozprawy doktorskiej zatytułowany „Weryfikacja metody badawczej” poświęcony został badaniom, które miały na celu zweryfikowanie zbudowanego stanowiska badawczego do oznaczenia dokładności czasu zadziałania zapalnika, równoważnika energii uderzeniowej zapalnika i równoważnika energii pęcherza gazu. W pierwszej kolejności Doktorant zweryfikował metodę pomiaru oznaczania dokładności zadziałania zapalników. Wykonał oznaczenie dla 20 zapalników elektronicznych z czasem opóźnienia 3750 ms. Na podstawie zarejestrowanych przebiegów określił czas zadziałania zapalnika, który interpretował jako różnicę pomiędzy sygnałem inicjującym zapalnik a początkiem przyrostu ciśnienia. W pomiarach uwzględnił opóźnienie wynoszące 0,1 ms, które odzwierciedla czas, jaki fala uderzeniowa potrzebuje na pokonanie dystansu od zapalnika do czujnika ciśnienia. Podsumowując wyniki Doktorant stwierdza, że uzyskał zbliżoną dokładność, jak dla metody rozwarciowej oraz z wykorzystaniem szybkiej kamery, a różnice pomiędzy pomiarami wynikają głównie z niedokładności samego układu elektronicznego zapalnika.

**Doktorant w opisach przeprowadzonych doświadczeń używa nazwy jednego z parametrów „wstępne ciśnienie” w komorze badawczej np. wynosiło 0 MPa. Według mnie powinno to być określane jako nadciśnienie panujące w komorze badawczej.**

**Czy różnice w pomiarach mogą wynikać także z nie osiowego umieszczenia zapalnika w komorze pomiarowej?**

W celu weryfikacji metody oznaczania równoważnika energii uderzeniowej Doktorant odniósł się do wyników przedstawionych w jednej z publikacji, w których badania przeprowadzono z wykorzystaniem spłonki wzorcowej ZnT. Do badań Doktorant wykorzystał zapalnik elektryczny natychmiastowy w łusce miedzianej i przeprowadził 20 prób dla różnych warunków początkowych. Nadciśnienie wstępne w komorze wynosiło 0 MPa oraz 1 MPa. Dla każdej z wykonanych prób określił maksymalne ciśnienie oraz obliczył całość dla pierwszego impulsu ciśnienia. Porównując wyniki z uzyskanymi w pracy Wilk i in. [2009], Doktorant stwierdził, że uzyskał o wiele większe rozrzuty wyników, niż dla metody opisanej w europejskich normach zharmonizowanych. W szczególności duże rozrzuty wyników uzyskał dla parametru jakim jest ciśnienie maksymalne. Zdaniem Doktoranta wynika to z faktu, że zastosowany układ jest zamkniętym, co generuje o wiele większe zakłócenia oraz wiąże się to z prawie dwukrotnie mniejszą odległością pomiędzy czujnikiem a zapalnikiem.

W celu weryfikacji metody oznaczania równoważnika energii pęcherza gazu Doktorant przeprowadził obliczenia dla tych samych prób, co wykonał do oznaczania równoważnika energii uderzeniowej. Jednakże nie udało mu się obliczyć równoważnika energii pęcherza gazu dla serii badań, gdzie nadciśnienie wstępne wyniosło 1 MPa. Stwierdził, że spowodowane to było zarejestrowanymi drganiami harmonicznymi tłumionymi. Porównując wyniki zawarte w pracy Wilk i in. [2009] z uzyskanymi przez siebie stwierdził, że te ostatnie charakteryzują się nieporównywalnie większymi rozrzutami, niż w metodzie opisanej w europejskiej normie

zharmonizowanej. Przyczyną tego był zamknięty układ komory badawczej, umiejscowienie czujnika ciśnienia oraz interferencja fal.

**Szkoda, że Doktorant nie umieścił przykładowych wykresów przebiegu ciśnienia w czasie dla tych pomiarów.**

Kolejnym etapem prowadzonych prac przez Doktoranta opisanych w rozdziale 6 było sprawdzenie odporności zapalników na falę uderzeniową. Parametr ten jest szczególnie istotny w przypadku stosowania zapalników elektronicznych, gdyż one są w większym stopniu narażone na uszkodzenie w wyniku działania fali uderzeniowej generowanej z detonacji MW. W trakcie badań Doktorant określił różnice w odporności na falę uderzeniową pomiędzy zapalnikiem elektrycznym natychmiastowym a zapalnikiem elektronicznym, różnicę pomiędzy zastosowaniem łuski aluminiowej i miedzianej oraz wpływem ciśnienia hydrostatycznego na odporność zapalnika na falę uderzeniową. Badania prowadzono w skonstruowanym stanowisku badawczym z zastosowaniem systemu pomiarowego nr 2. Fala uderzeniowa generowana była poprzez detonację zapalnika elektrycznego natychmiastowego o masie PETN 650 mg w łusce miedzianej. Wartość ciśnienia fali uderzeniowej wpływającego na badany zapalnik Doktorant regulował poprzez zmianę odległości między zapalnikiem elektrycznym a badanym zapalnikiem.

**W podrozdziale 6.2 na str. 85 znajduje się opis wyników badań zapalników elektrycznych w łusce aluminiowej natomiast w tekście na tej stronie jak zapalnik badany określany jest zapalnik elektroniczny? To samo jest w opisie wyników badań zapalników elektrycznych w łusce miedzianej w podrozdziale 6.3 na str. 87.**

**Pytanie do Doktoranta ile prób zostało przeprowadzonych dla takich samych warunków? W jednej próbie zapalnik może ulec uszkodzeniu a w kolejnej nie przeprowadzonych w takich samych warunkach. Wykonanie większej liczby prób w danych warunkach umożliwiło by oznaczenie prawdopodobieństwa uszkodzenia zapalnika.**

Siódmy rozdział rozprawy doktorskiej zatytułowany „Tensometryczny czujnik pomiaru zdolności wykonania pracy” poświęcony został badaniom nad znalezieniem alternatywnego sposobu wyznaczenia równoważnika zdolności inicjowania oraz oznaczenia dokładności opóźnienia z uwagi na szybkie zużycie stosowanych w opracowanym stanowisku badawczym czujników ciśnienia przy ich wysokim koszcie. Doktorant zaobserwował, że płytka bezpieczeństwa zamontowana w komorze badawczej za każdym razem podlega deformacji w podobny sposób. Doktorant wpadł na pomysł, że po zastosowaniu grubszej płytki oraz wykonania jej ze stali o dobrej sprężystości, można w prosty sposób wykorzystać ten element konstrukcji jako czujnik ciśnienia w komorze badawczej. Doktorant do pomiaru odkształcenia w czasie zastosował metodę tensometrii oporowej. Doktorant wykonał czujnik tensometryczny dobierając odpowiednie elementy i zamontował go do komory badawczej. Przeprowadził wzorcowanie statyczne tensometrycznego czujnika. Następnie zweryfikował metodę pomiaru oznaczania dokładności zadziałania zapalników. W celu porównania czujnika tensometrycznego do czujników ciśnienia użytych wcześniej wykonał oznaczenia dla 20 zapalników elektronicznych w takich samych warunkach jak w próbach z czujnikami ciśnienia. Porównując wyniki stwierdził, że uzyskał zbliżoną dokładność jak dla metody z czujnikiem ciśnienia. Następnie zweryfikował metodę oznaczania równoważnika energii uderzeniowej. Po przeprowadzeniu badań stwierdził, że wyniki równoważnika energii uderzeniowej przy zastosowaniu czujnika tensometrycznego cechują się o wiele mniejszym rozrzutem niż dla czujnika ciśnienia.

**Doktorant nie podał jaka żywotność była tego czujnika tensometrycznego?**

W kolejnym rozdziale 8 umieszczony został schemat postępowania w opracowanej przez Doktoranta metodzie badawczej w zależności od typ zapalników, liczby zapalników dostępnych do badań czy wymaganych parametrów zapalnika do oznaczania. Założenia

przyjętej metody badawczej umożliwiają oznaczenie parametrów detonacji zapalników przy jednej próbie badawczej.

Na zakończenie rozprawy, Doktorant sformułował wnioski. Zdaniem recenzenta są one sformułowane prawidłowo. Wyniki zawarte w rozprawie są dobrze opracowane i udokumentowane. Zawierają szereg interesujących i ważnych informacji, zarówno z technologiczno-aplikacyjnego jak i z naukowego punktu widzenia. Oceniając część doświadczalną rozprawy z całym przekonaniem stwierdzam, że wykonane zostały badania, które pozwalają na wyciągnięcie głównych i dobrze udokumentowanych wniosków. Wszystkie eksperymenty zostały przeprowadzone bardzo starannie i prawidłowo, a interpretacja wyników nie budzi wątpliwości recenzenta. Sformułowana na wstępie teza badawcza została zweryfikowana poprawnie, a sposób opracowania wyników wskazuje na dużą wiedzę Doktoranta w zakresie tematyki, jaką poruszył w swoim doktoracie.

### **Uwagi i pytania do Doktoranta**

Poza komentarzami, które zamieściłem w tekście (powyżej) mam jeszcze kilka pytań do których proszę Doktoranta aby się odniósł podczas publicznej obrony:

- Ile parametrów zapalnika można oznaczyć jednocześnie na opracowanym stanowisku badawczym w trakcie jednej jego detonacji?
- Dzięki skonstruowanemu stanowisku badawczemu i opracowanej nowej metodzie badawczej o ile ulegnie zmniejszeniu ilość wykonywanych prób i skrócony zostanie czas kompleksowego badania zapalnika?
- Czy według nowej metody badawczej prowadzone są już badania zapalników, jeżeli nie to co jest wymagane aby dopuścić ją do standardowych badań?
- Jakie rozwiązania konstrukcyjne komory badawczej mogły by zwiększyć dokładność przeprowadzanych badań, czy można by zmniejszyć lub uniknąć efektu nakładania się odbitych fal ciśnienia?

### **Wniosek końcowy**

Uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Mateusza Pytlika zawiera obszerny materiał eksperymentalny. Stwierdzam, że przyjęty w pracy cel został osiągnięty i potwierdzony uzyskanymi wynikami. Końcowe wnioski trafnie opisują i podsumowują przeprowadzone prace. Doktorant uzyskał wyniki o znaczeniu poznawczym, które w mojej ocenie posiadają potencjał aplikacyjny. Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, eksperymentalnych i aplikacyjnych oraz korzystania z nowoczesnych narzędzi i metod badawczych, niezbędnych w zakończonej sukcesem realizacji doktoratu.

Reasumując, uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa mgr inż. Mateusza Pytlika pt.: „Kompleksowe oznaczanie parametrów detonacji zapalników” spełnia wszystkie warunki stawiane przez art.13-ty ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dziennik Ustaw z dn. 14.03.2003 wraz z późniejszymi zmianami) oraz art. 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dn. 20 lipca 2018 r. (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn. zm.), wnoszę więc do Rady Naukowej Głównego Instytutu Górniczego – Państwowego Instytutu Badawczego o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Mateusza Pytlika do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

*P. Maksimowski*

dr hab. inż. Paweł Maksimowski, prof. uczelni