

Wpływ ciśnienia okólnego na dynamikę spalania wybranych materiałów wysokoenergetycznych

Impact of circular pressure on the dynamics of burning of the selected high-energy materials



Dr hab. inż. Jan Drzewiecki, prof. GIG)*



Mgr inż. Mateusz Pytlik)*

Treść: Skutecznymi metodami profilaktyki tapaniowej i metanowej są metody destrukcji ośrodka skalnego będącego źródłem energii sejsmicznej, bądź metanu oraz, coraz częściej, obu tych zagrożeń jednocześnie. Praktyka wskazuje, że stosowanie materiałów wybuchowych (MW) może obniżyć poziom tych zagrożeń, jednak ich skuteczność jest ograniczona do bezpośredniego otoczenia otworów strzałowych. W ostatnich latach trwają intensywne prace zmierzające do opracowania nowych MW (materiałów wysokoenergetycznych) o zadanej dynamice przyrostu ciśnienia produktów gazowych w zamkniętej oraz metod wiertniczych wspomagających techniki strzałowe poprzez wykonywanie w otworach szczelin osłabiających ośrodek skalny. O skuteczności działania tego rodzaju technik profilaktycznych decydują niszczące i penetrujące działania gazów odstrzałowych w określonych warunkach środowiska. Dla opracowania nowych materiałów wysokoenergetycznych, które spełniałyby niezbędne kryteria dynamiki przyrostu ciśnienia gazów opracowano w Głównym Instytucie Górnictwa i wykonano specjalnie do tego celu przystosowane stanowisko badawcze. Pozwala ono zmieniać ciśnienie hydrostatyczne w otoczeniu badanego materiału zanurzonego w wodzie. W artykule przedstawiono wyniki badań materiałów wysokoenergetycznych zmierzających do określenia wpływu ciśnienia okólnego na dynamikę spalania. Należy podkreślić, że badane materiały wysokoenergetyczne były mieszaninami związków chemicznych zapewniających otrzymanie zadanych parametrów dynamiki ich spalania. Jest to szczególnie istotne dla uzyskania efektu intensywnego zeszcelinowania pokładu węgla. Wyniki prac otwierają nowe możliwości wykorzystania stałych paliw wysokoenergetycznych, opracowania nowatorskich rozwiązań konstrukcji ładunków MW oraz sposobów ich inicjacji.

Abstract: Effective measures of tremor and methane prevention include methods of destruction of rock mass being a source of seismic energy, or methane, and currently more and more often of both threats at the same time. Previous experience has indicated that the use of explosive materials can reduce these risks, however, the effectiveness is limited to the immediate surroundings of the blast holes. In recent years, intensive work has been carried out including solutions to develop new explosives (high-energy materials) with set dynamics of pressure growth of gas products in a closed space, and drilling methods supporting blasting techniques by making holes in the gaps that would weaken the rock mass. The effectiveness of these prevention measures is determined by destructive and penetrating activity of afterdamp under certain environmental conditions. In order to develop new high-energy materials that would meet the necessary criteria of dynamics of gas pressure growth, a test stand has been developed in the Central Mining Institute. It can be used to measure the hydrostatic pressure present in the vicinity of the tested material immersed under water. This paper presents the results of the test on high-energy materials aimed at determining the impact circular pressure has on the combustion dynamics. It should be noted that the tested high-energy materials included a mixture of compounds ensuring that the selected parameters of combustion dynamics will be obtained. It is particularly essential when the research activities are aimed at obtaining an intense fracking of coal bed. The results have revealed new possible application of high-energy solid fuels, developing innovative solutions for explosives structure and their initiation.

Słowa kluczowe:

materiały wysokoenergetyczne, stanowisko badawcze, dynamika spalania

Key words:

high-energy materials (propellants), test stand, dynamic of burning

*) Główny Instytut Górnictwa, Katowice

1. Wprowadzenie

Rosnąca głębokość prowadzenia eksploatacji pokładów węgla oraz jej skrępowanie decyduje o zintensyfikowaniu zagrożeń naturalnych, w tym: metanowego (Drzewiecki 2004; Krause, Smoliński 2013), tapaniami, klimatycznego czy zawałowego (Kabiesz 2014). Konsekwencją tego jest konieczność uzyskania pewności, że stosowanie aktywnych środków profilaktycznych będzie charakteryzować skuteczne i efektywne ich działanie w warunkach wysokich wartości ciśnienia, wynikającego z głębokości zalegania eksploatowanych warstw.

Dotychczasowe metody aktywnej profilaktyki zagrożeń górniczych wykorzystują między innymi MW dla osłabienia górotworu w otoczeniu wyrobisk górniczych. Materiał tego typu ma za zadanie zniszczenie skały, co dokonuje się w bezpośrednim otoczeniu otworu strzałowego, natomiast jego skuteczność zeszcelinowania środowiska skalnego jest ograniczona. Wskazują na to wyniki badań prowadzonych w kopalniach, które dokumentują ograniczony do kilku średnic otworu zasięg gęstej sieci wytwarzanych szczelin (Ostiadel, Szumny 2013; Koniczek i in. 2011). Jak z powyższego wynika stosowanie górniczych MW nie gwarantuje wytworzenia gęstej i rozległej sieci spękań, co jest niezbędne także dla pozyskania metanu z pokładu węgla.

Z tych powodów rozpoczęto badania, których celem jest opracowanie nowych rodzajów materiałów palnych o deflagacyjnej charakterystyce spalania. Tego typu materiały i nowe konstrukcje ładunków, pozwolą wykonać w pokładzie węgla znacznie większe strefy intensywnego zeszcelinowania od dotychczasowych, powstałych z użyciem górniczych materiałów wybuchowych.

Dla opracowania nowych rodzajów materiałów palnych o deflagacyjnej charakterystyce spalania zastosowano opracowaną w Zakładzie Tapani i Mechaniki Górotworu GIG

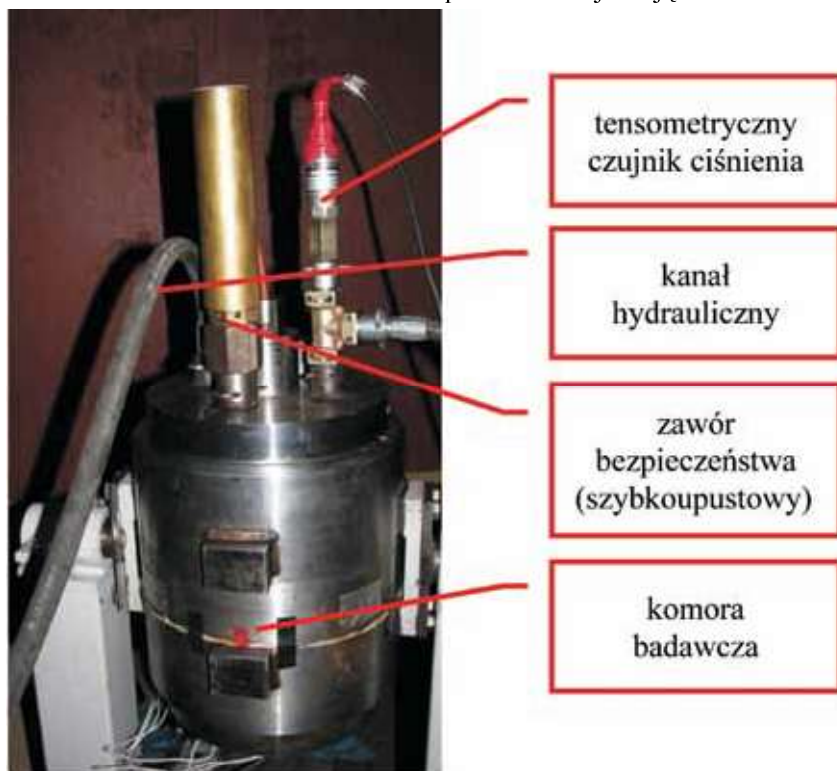
komorę badawczą pozwalającą identyfikować proces spalania badanego materiału w środowisku o zadanej wartości ciśnienia okólnego. Należy podkreślić, że ewentualnie przyszłe konstrukcje ładunków MW o deflagacyjnej charakterystyce spalania, np. stałe paliwa heterogeniczne, mogą pracować w środowisku wysokich ciśnień oraz w wysokiej temperaturze, co wynika np. z głębokości.

Wstępne oceny możliwości uzyskania oczekiwanych wyników stosowania tego rodzaju materiałów wymagają określenia dynamiki ich spalania. Jest to niezbędne dla wprowadzenia zmian w ich składzie chemicznym, które umożliwią dostosowanie dynamiki procesu spalania do wytrzymałości niszczonego środowiska.

2. Stanowisko badawcze

Wszystkie prace z MW przeprowadzono w bunkrze strzałowym na terenie Głównego Instytutu Górniczego Kopalni Doświadczalnej Barbara, co jest niezbędne dla uniknięcia zagrożenia wynikającego z dynamiki procesu. Badania dynamiki spalania ładunków materiału wybuchowego o deflagacyjnym charakterze spalania wykonano na stanowisku badawczym, którego zasadniczym elementem jest grubościenna stalowa komora badawcza, pozwalająca zadawać zmienne ciśnienie cieczy w otoczeniu ładunku, rys. 1 (Drzewiecki, Myszkowski 2015). Jest ona wyposażona w szybokupustowy zawór bezpieczeństwa, kanał zasilający oraz tensometryczny czujnik ciśnienia. W momencie spalania materiału rejestrowana jest wartość ciśnienia cieczy w komorze badawczej, za pomocą czujnika zlokalizowanego w bliskiej odległości od badanego ładunku.

W skład stanowiska badawczego wchodzi: pompa hydrauliczna o maksymalnym ciśnieniu tłoczenia 100 MPa i wydajności 0,5 l/min, rozdzielnia zasilająca oraz aparatura pomiarowo-rejestrująca.



Rys. 1. Komora do badań materiałów wybuchowych (Drzewiecki, Myszkowski 2015)

Fig. 1. Test stand for testing explosives (Drzewiecki, Myszkowski 2015)

Do pomiarów zastosowano tensometryczny wzmacniacz pomiarowy firmy HBM typu MGCplus (rys. 4), którego maksymalna częstotliwość próbkowania wynosi $f_p = 19,2$ kHz, do którego podłączono tensometryczny czujnik ciśnienia typu P3MBP BlueLine, o zakresie pomiarowym 500 MPa (klasa 0,3).

Specyfikacja stosowanego czujnika ciśnienia:

- nominalne ciśnienie 500 MPa,
- klasa dokładności 0,3,
- nominalna czułość napięciowa wynosi 1,001 mV/V,
- częstotliwość drgań własnych > 100 kHz,
- nominalny zakres temperaturowy: $-10^{\circ}\text{C} \div 80^{\circ}\text{C}$.

Inicjacja ładunków następowała przy użyciu niskonapięciowego źródła prądu stałego, co było niezbędne dla uniknięcia zakłóceń sygnału pomiarowego będących wynikiem stosowania typowej zapalarki górniczej. Moment odpalania rejestrowano równoległe z pomiarem ciśnienia na oddzielnym kanale wzmacniacza pomiarowego MGCplus.

3. Przygotowanie materiału do badań

Badane stałe paliwa heterogeniczne, w zależności od zadanego czasu spalania, były mieszaniną następujących składników:

- chloran(VII) amonu
- poli(butadien-co-kwas akrylowy-co-akrylonitryl) PBAN+utwardzacz
- plastyfikator
- glin

Ładunki stałego paliwa heterogenicznego charakteryzowały się następującymi parametrami fizycznymi:

- masa - około 20 g,
- średnica - 40 mm,
- gęstość - $1,61 \text{ g/cm}^3$.

Przed zasadniczymi badaniami w komorze badawczej, określono zdolność do inicjowania wykonanych ładunków w warunkach normalnych, w temperaturze 20°C i ciśnieniu atmosferycznym, wykorzystując zespoły zapalcze do zapalnika elektrycznego klasy 0,2 A. Testy wykazały, że zadany impuls elektryczny inicjował ładunki, które w tych warunkach spalały

się w czasie ok. 20 sekund. Należy podkreślić, że czas spalania tego typu materiałów ulega skróceniu wraz ze wzrostem ciśnienia w jego otoczeniu, co też było przedmiotem badań.

Forma użytkowa materiału była przygotowana poprzez zalewanie i sieciowanie masy w podwyższonej temperaturze. Kolejno, usieciowany ładunek był cięty na mniejsze fragmenty w celu utworzenia docelowej formy użytkowej. W kanale wewnętrzny ładunku wprowadzono 0,5 g masy zapalczej, w której umieszczono główkę zapalczą zespołu, którą inicjowano proces spalania. Wykonano następujące rodzaje ładunków:

- ładunki bez inhibitora rys. 2a,
- ładunki z inhibitorem rys. 2b.

3. Wyniki badań

Zgodnie z założoną metodą badań, kolejne ładunki inicjowane były w szczelnej komorze badawczej w środowisku wodnym, przy zadanych zmiennych wartościach ciśnienia wody. Powyższe miało na celu określenie wpływu tego ciśnienia na dynamikę spalania. Wykonane badania oraz uzyskane wyniki pomiarów tego parametru, dla różnych składów stałych paliw heterogenicznych wskazują, jak zmienia się dynamikę procesu spalania dla zadanych składów chemicznych badanego materiału. Są one jednocześnie informacją, jaką modyfikację składu mieszaniny MW należy wprowadzać, aby sterować dynamiką jego spalania.

Istniejące metody określania prędkości spalania w komorze balistycznej (mikrosilniku) paliwa heterogenicznego. nie pozwalają na symulację warunków jego stosowania w otworze wykonanym w skale/pokładzie dla jej zeszcelinowania. Metody te nie uwzględniają zmiennych warunków ciśnienia okólnego w otoczeniu stałego paliwa heterogenicznego oraz faktu, że szczelność ośrodka zostaje częściowo utracona w momencie przełamania skały (w przypadku komory badawczej właściwości górotworu może symulować odpowiednia nastawa zaworu hydraulicznego). Tego typu informacje są niezbędne dla ustalenia kryterialnych wartości dynamiki spalania ich stosowania dla szczelinowania ośrodka skalnego charakteryzującego się różnymi parametrami mechanicznymi, w tym pokładów węgla.



a) ładunek bez inhibitora
a) solid fuel without inhibitor



b) ładunek z inhibitorem
b) solid fuel with inhibitor

Rys. 2. Przykładowe ładunki paliwa stałego
Fig 2. Examples of solid fuel samples

3.1. Paliwo bez inhibitora

W próbach badawczych przedstawionych na wykresie rys. 3, przy ciśnieniu wstępnym p_w wynoszącym w przybliżeniu 5 MPa, 8,6 MPa, 13,9 MPa i 20,9 MPa zastosowano zawór przelewowy o nastawie 39,1 MPa. W próbach badawczych przy ciśnieniu wstępnym p_w wynoszącym 21,9 MPa miejsce na zawór przelewowy zostało zaslepione.

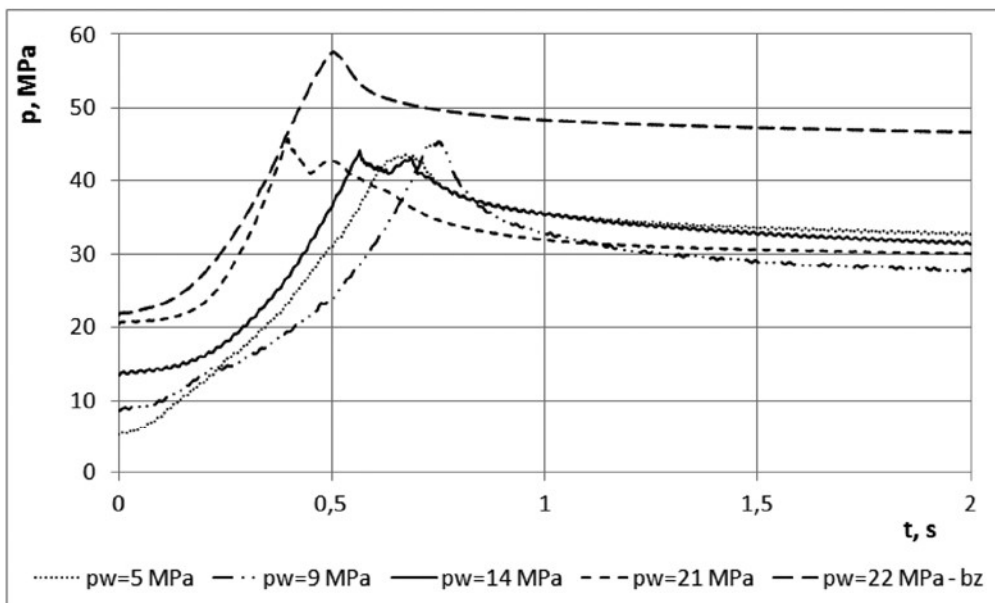
Dla próby badawczej przy ciśnieniu wstępnym p_w wynoszącym 21,9 MPa określono pełny przebieg spalania się paliwa i osiąga wartość ciśnienia w maksymalnym punkcie 58 MPa. W pozostałych próbkach badawczych, przy badaniu których zastosowano zawór przelewowy, można zaobserwować gwałtowny spadek ciśnienia, mimo dalszego palenia się paliwa. Przebiegi te odzwierciedlają warunki szczelinowania skały o przykładowej wartości 39,1 MPa, a otwarcie się zaworu można interpretować jako szczelinowanie skały. Maksymalny czas palenia się próbek badawczych nie przekraczał 0,75 s.

3.2. Paliwo z inhibitorem

Podczas prób paliwa z inhibitorem nie zaobserwowano otwarcia się zaworu dla próbek odpalanych przy ciśnieniu wstępnym w przybliżeniu 7 MPa oraz 10 MPa, co potwierdzają nagrania wykonane przy użyciu szybkiej kamery. Maksymalny czas palenia próbek wynosił 1,54 s, zatem był prawie dwukrotnie dłuższy niż czas spalania paliwa bez inhibitora.

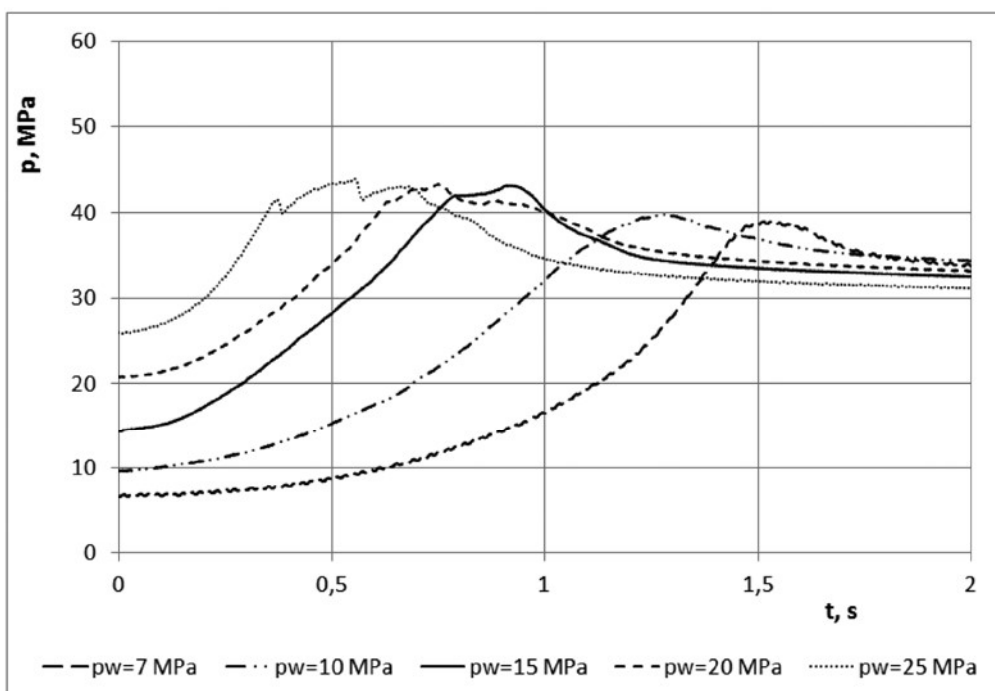
3.5. Zestawienie wyników badań

Interesującym, z punktu widzenia opracowania nowych technik prac profilaktycznych tapaniowej i metanowej z użyciem ładunków stałych paliw heterogenicznych, jest dynamika narastania ciśnienia w komorze badawczej. Proces ten charakteryzują zależności pomiędzy prędkością spalania a ciśnieniem wstępnym, rys. 5 oraz, pomiędzy ciśnieniem wstępnym a okresem narstania ciśnienia, rys. 6. Zmianę prędkość spale-



Rys. 3. Przebiegi ciśnienia dla prób badawczych ładunku bez inhibitora

Fig 3. Pressure course of solid fuel with inhibitor tests



Rys. 4. Przebiegi ciśnienia dla prób badawczych ładunku bez inhibitora

Fig 4. Pressure course of solid fuel without inhibitor tests

nia paliwa można zdefiniować jedynie w przedziale czasu, od momentu inicjacji tego procesu do momentu otwarcia zaworu szybkoopustowego, zatem do dalszych analiz powyższe zależności określono dla 50% czasu narastania ciśnienia. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

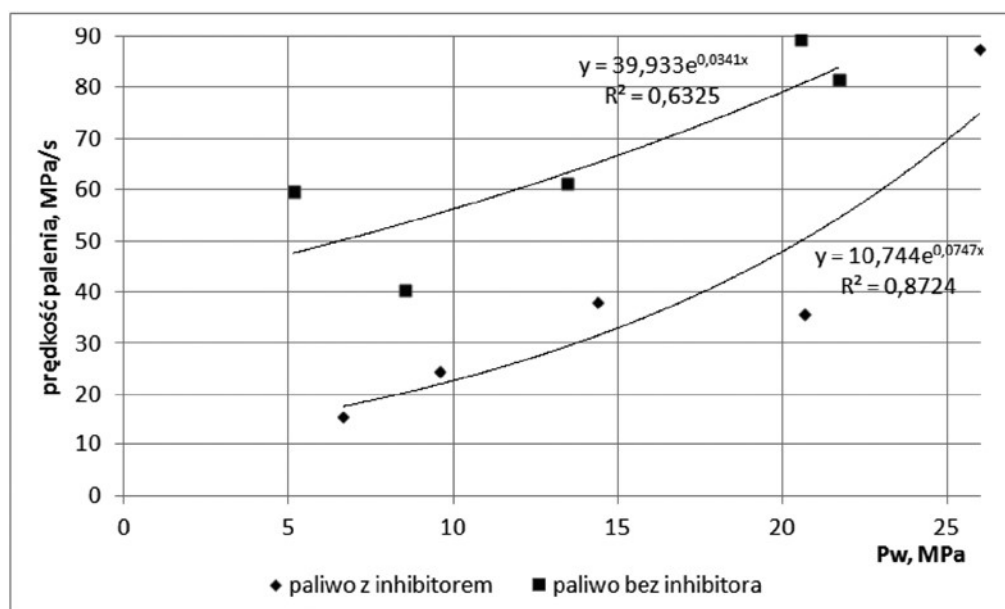
Zakładając, że prędkość spalania dla analizowanych próbek jest ustalona dla 50% czasu narastania ciśnienia, to opisana jest ona funkcją temperatury początkowej oraz ciśnienia wstępnego działającego na paliwo (Szczepczak i in. 2009). Z wykresów przedstawionych na rys. 5 i rys. 6 wynika,

Tabela 1. Wyniki badań próbek badawczych
Table 1. The results of samples' tests

Typ paliwa	Ciśnienie wstępne, Pw, MPa	Prędkość palenia paliwa w 50% czasu narastania ciśnienia, MPa/s	Okres narastania ciśnienia, T, s
Bez inhibitora	5,16	59,9	0,673
Bez inhibitora	8,53	40,4	0,753
Bez inhibitora	13,43	61,3	0,688
Bez inhibitora	20,52	89,3	0,505
Bez inhibitora	21,70	81,7	0,502
Z inhibitorem	6,67	15,8	1,535
Z inhibitorem	9,60	24,6	1,2825
Z inhibitorem	14,39	38,1	0,916
Z inhibitorem	20,68	35,7	0,751
Z inhibitorem	25,97	87,5	0,681

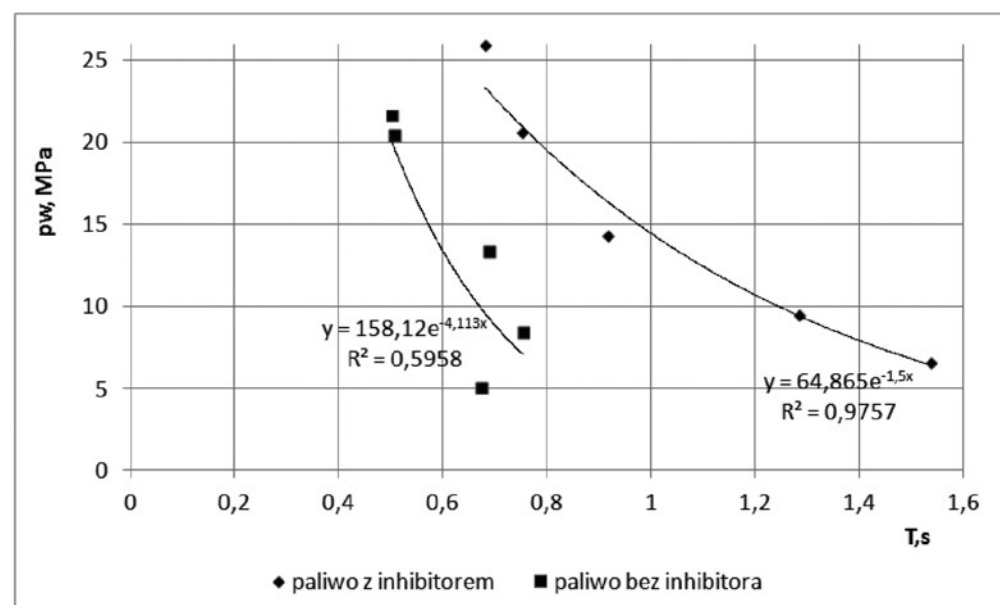
Rys. 5. Zależność pomiędzy prędkością palenia w środkowym okresie przebiegu, a ciśnieniem wstępnym

Fig. 5. The relation between burning velocity in the middle of the period and the initial pressure



Rys. 6. Zależność pomiędzy ciśnieniem wstępnym i okresem narastania ciśnienia

Fig. 6. The relation between the initial pressure and the period of pressure rise



że wraz z narastaniem ciśnienia wstępnej prędkość spalania rośnie (równocześnie okres narastania ciśnienia maleje) oraz prędkość palenia jest szybsza dla paliwa bez inhibitora.

Dla wzrastającego ciśnienia wstępnego, większą dynamiką skracania czasu palenia oraz większymi prędkościami spalania wykazuje się próbka z inhibitorem. Świadczy to o tym, że na paliwo bez inhibitora ciśnienie ośrodka ma mniejszy wpływ, niż na paliwo z inhibitorem, co wynika z konstrukcji ładunku (powierzchnie czynne są mniejsze).

6. Wnioski

Przedstawione wyniki są podsumowaniem serii wstępnych badań mających na celu określenie wpływu ciśnienia okólnego na dynamikę spalania wybranych materiałów o deflagacyjnej charakterystyce spalania. Tego typu materiały są stosowane między innymi jako stałe paliwo heterogeniczne, natomiast w niedalekiej przyszłości będą wykorzystane w szerszym zakresie dla celów cywilnych, także w górnictwie skalnym i podziemnym. Stosowanie tego typu materiałów w górnictwie podziemnym będzie możliwe w przypadku, kiedy zostaną opracowane ich składy chemiczne oraz konstrukcje ładunków dedykowane dla konkretnych celów produkcyjnych oraz kiedy uzyskają one stosowne dopuszczenia. Środowisko w jakim będą one stosowane niejednokrotnie charakteryzuje się pełnym zawodnieniem, wysokim ciśnieniem oraz wysoką temperaturą. W tym kontekście opracowanie nowej jakości materiałów o deflagacyjnej charakterystyce utleniania wymaga w pierwszej kolejności przeprowadzenia szeregu prób ich inicjowania, zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i warunkach dołowych. Opracowane w GIG do tego celu nowe stanowisko badawcze daje takie możliwości badawcze. Wynik prac w tym zakresie, przeprowadzonych dla dużej populacji różnego rodzaju mieszanin palnych o deflagacyjnej charakterystyce utleniania, wskaże jak na dynamikę procesu spalania, tj. szybkości przyrostu ciśnienia produktów gazowych w warunkach przestrzeni zamkniętej oraz ich pracę (energię) wpływa ciśnienie w otoczeniu ładunków.

Analizowane w artykule badania prowadzono na próbkach o masie około 20 g w środowisku wodnym, w którym ciśnienie okólne zmieniano od wartości ciśnienia otoczenia do 25 MPa.

Dotychczasowa analiza wyników pozwala stwierdzić, że materiały pędne zachowują swoją zdolność do wykonania pracy w środowisku wodnym, także w warunkach podwyższonego ciśnienia okólnego. Problemy z inicjacją niektórych próbek (rozwiązane poprzez odpowiednie zabezpieczenie przed ciśnieniem hydrostatycznym) wynikały z konieczności stosowania masy zapalczącej z główką zapalczą. Powszechnie stosowaną metodą inicjacji jest zapalnik elektryczny połączony z lontem ołowianym, która nie była stosowana z uwagi na małe próbki badawcze oraz niewielką komorę spalania (zakłócenie przebiegu badań oraz uszkodzenie stanowiska badawczego).

Dynamika przyrostu ciśnienia uwarunkowana jest temperaturą początkową, ciśnieniem wstępnym oraz chwilo-

wym ciśnieniem okólnym. Zakłada się, że oszacowanie tej dynamiki dla badanych materiałów pozwala ocenić czy będą one spełniać warunki niezbędne dla opracowania technologii górniczych zarówno eksploatacyjnych, jak i prewencyjnych zagrożeń górniczych. Należy podkreślić, że nowe technologie strzelnicze wymagają stosowania materiałów, które potrafią zapewnić silnie spękaną strukturę skały poprzez nadanie produktom gazowym zdolności penetrujących przy jednoczesnym ograniczeniu ich zdolności kruszących. Należy jednak wyraźnie podkreślić, że żadna z dotychczas technologii strzelniczych, zarówno z użyciem MW, jak i materiałów o zadanych parametrach prędkości spalania nie zapewni uzyskania gęstej sieci spękań o dużym zasięgu. W tym celu należy każdy otwór strzałowy odpowiednio „spręparować” (Myszkowski 1996) przez wykonanie w nim zespołu szczelin inicjujących ukierunkowaną propagację gazów. W tym zakresie w GIG prowadzone są intensywne prace zmierzające do opracowania nowych konstrukcji urządzeń wiertniczych.

Dotychczasowe wyniki badań są obiecujące i będą kontynuowane dla różnych środków strzałowych. Otwierają one nowe obszary badań materiałów palnych, pędnych i wybuchowych dla opracowania nowych rodzajów ładunków oraz ich konstrukcji, co docelowo pozwoli zwiększyć efektywność ich stosowania i poprawi skuteczność metod profilaktyki zagrożeń górniczych.

Literatura

- DRZEWIECKI J. 2004 – Metanowość ścian a postęp eksploatacji [Methane emission from longwalls and its relationship to advance rate]. Archives of Mining Sciences, 49 (2), s. 271-284
- DRZEWIECKI J., MYSZKOWSKI J. 2015 – Research of explosives in an environment of high pressure and temperature using a new test stand. Journal of Sustainable Mining, Vol. 14, No. 4, Katowice, s. 188-194.
- KABIESZ, J. 2014 – Raport roczny (2013) o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego. Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- KONIECEK P., KONECNY P. and PTACEK J. 2011 – Destress Rock Blasting as a Rockburst Control Technique, In Proceedings of the 12th International Congress on Rock Mechanics, 18-21 October 2011, Taylor & Francis Group, Beijing, s. 1221-1226.
- KRAUSE E., SMOLIŃSKI A. 2013 – Analysis and assessment of parameters shaping methane hazard in longwall areas. Journal of Sustainable Mining, Vol. 12, No. 1, Katowice, s. 13-19.
- MYSZKOWSKI J. 1996 – Ukierunkowane szczelinowanie skał techniką strzelniczą. Prace Naukowe GIG, Seria Konferencje, Katowice.
- OSTIADEL W., SZUMNY M. 2013 – Strefa spękań w podziemnych przodkowych robotach strzelniczych, Materiały Wysokoenergetyczne IPO, t. 5, Warszawa, s. 36-44.
- SZYMCZAK K., GAWOR T., WOLSZAKIEWICZ K. 2009 – Metodyka badań liniowej szybkości spalania stałych paliw raketowych, Materiały Wysokoenergetyczne IPO, t. 1, Warszawa, s. 107-116.

Artykuł wpłynął do redakcji – grudzień 2016

Artykuł akceptowano do druku 15.02.2017