



## Oznaczenie intensywności oddziaływania temperatury otoczenia na temperaturę materiałów wybuchowych

### Determination the impact of ambient temperature to the temperature of explosives

Dr inż. Michał Szastok \*)

**Treść:** Temperatura, w jakiej znajduje się MW (materiał wybuchowy) podczas składowania, transportu i użytkowania, jest bodźcem, na który producent i użytkownik MW mają tylko ograniczony wpływ. Dopóki wszystkie elementy pozwalające utrzymać ją w żądanym zakresie działają poprawnie, MW powinien zachowywać swoje własności przez cały okres przydatności do użycia. Sytuacje awaryjne, choć zdarzają się niezwykle rzadko, nie mogą być całkowicie wykluczone, a temperatura MW przekraczając wartości przewidziane przez producenta, może negatywnie wpłynąć na proces detonacji podczas prac strzałowych. Granice zakresu temperatur, w których prowadzi się prace strzałowe ulegają ciągłemu rozszerzaniu. Eksploatacja złóż głębokich – wobec wyczerpywania zasobów kopalin na mniejszych głębokościach – oznacza konieczność użytkowania górniczych MW w górotworze, którego temperatura nierzadko osiąga wartość ponad 60°C. Jednocześnie proces podnoszenia się średniej temperatury na Ziemi sprawił również, że osiągalne stały się kopaliny w Arktyce. Mogą być one eksploatowane tylko metodami odkrywko- wymi – warto jednak zaznaczyć, że na terenach występowania wiecznej zmarzliny średnia roczna temperatura powietrza wynosi nie więcej niż -11°C. W artykule przedstawiono wyniki oznaczania zmiany temperatury wewnątrz naboju MW podczas jego składowania w temperaturach ekstremalnych. Badanie miało na celu określenie czasu, po jakim temperatura wnętrza naboju MW zrówna się z temperaturą otoczenia. Badaniami objęto sześć materiałów wybuchowych zróżnicowanych pod względem bezpieczeństwa wobec pyłu węglowego i metanu (skalne, metanowe specjalne), oraz składu chemicznego (nitroestrowe, amonowo-saetrzane, emulsyjne). Uzyskane wyniki wskazują, że intensywność oddziaływania temperatury otoczenia na materiały wybuchowe zależy zarówno od średnicy naboju, jak i jego składu chemicznego.

**Abstract:** The temperature at which the explosive stays during storage, transport and usage is the incentive for which the producer and user have only a limited influence. As long as all elements allowing to keep it in the desired range work correctly, explosive should keep its properties throughout the shelf life. Emergency situations, although they are extremely rare, cannot be completely ruled out, and the explosive's temperature exceeding the values provided by the producer may adversely affect to the detonation process during blasting operations. The range of temperatures at which blasting works are carried out are continuously expand. Exploitation of deep deposits - in the face of depletion of mineral resources at lower depths - means the necessity of using explosives in the rock mass, where temperature often reaches the value of over 60°C. At the same time, the process of raising the average temperature on the Earth also made minerals in the Arctic become achievable. They can be exploited only by opencast methods - it is worth noting, that in areas where permafrost occurs, the average annual air temperature is no more than -11°C. The article presents the results of determining the temperature change inside the cartridge of the explosive during its storage at extreme temperatures. The research aimed to determine the time after which the internal temperature of the cartridge of the explosive equals the ambient temperature. The research covered six explosive materials different in terms of safety against coal dust and methane (rock, special methane), chemical composition (nitroester, ammonium-nitrate, emulsion). The obtained results indicate that the intensity of ambient temperature influence on explosives depends both on the diameter of the cartridge and its chemical composition.

#### Słowa kluczowe:

materiały wybuchowe, temperatura

#### Keywords:

explosives, temperature

### 1. Wprowadzenie

Materiały wybuchowe, poprzez swoją zdolność do gwałtownej przemiany termodynamicznej, uznaje się za substancje metastabilne. Metastabilność to cecha delikatnej równowagi stanów – stany są stabilne dla małych odchyżeń od położenia równowagi, ale większe wychylenie powoduje zmianę stanu i przejście do równowagi pełnej lub ewentualnie innego stanu metastabilnego.

W materiałach wybuchowych przemianę egzotermiczną można zainicjować poprzez oddziaływanie szeregu inicjujących bodźców zewnętrznych. Minimalna ilość energii dostarczona do ładunku materiału wybuchowego, która wywołuje wybuchową przemianę, nazywa się impulsem inicjującym lub bodźcem inicjującym. Im mniejsza jest energia wymagana do rozpoczęcia przemiany wybuchowej, tym układ jest wrażliwszy. Stosowanie MW o dużej wrażliwości jest w górnictwie niewskazane ze względów bezpieczeństwa – dlatego używa się MW o możliwie małej wrażliwości, przez co do rozpoczęcia chemicznej reakcji wybuchowej niezbędna jest odpowiednio wysoka energia.

\*) Główny Instytut Górnictwa, Katowice

Sulima-Samujłło (1968) bodźce zewnętrzne – w wyniku ich oddziaływania zainicjowana może być reakcja wybuchowa – w zależności od ich charakteru podzielił na bodźce:

- mechaniczne (uderzenie, nakłucie, tarcie),
- ciepłe (ogrzanie, płomień),
- wybuchowe (energia wybuchu innego MW),
- elektryczne (żarzenie, wyładowanie, elektrostatyka).

Doskonałym przykładem obrazującym różną wrażliwość na poszczególne bodźce są wyniki prac Kohlera i Meyera (1993), których przedmiotem badań był azydek ołowiu. Wybucho on pod wpływem niewielkich bodźców mechanicznych, tzn. tarcia  $0,1 \div 1,0$  N i/lub uderzenia  $2,5 \div 4,0$  J, a jest mało wrażliwy na płomień i ogrzewanie (temperatura zapłonu  $320 \div 360^\circ\text{C}$ ). Z kolei trójnitrorezorcynian ołowiu ma odwrotne właściwości – jest bardzo wrażliwy na bodźce termiczne, a słabo wrażliwy na bodźce mechaniczne. Jak wykazał Maranda (2004) detonację jodku azotu ( $\text{NI}_3$ ) można wywołać wskutek potarcia ptasim piórkiem, a do zainicjowania detonacji w azotanie(V) amonu konieczne są pobudzające o masie kilkuset gramów, wykonane z wysokoenergetycznego materiału wybuchowego.

Ze względu na swój specyficzny charakter i skalę zniszczeń, jakie mogą powstać przy niewłaściwym obchodzeniu się z MW, ich użytkownicy zobowiązani są do zapewnienia im właściwych warunków zarówno podczas stosowania, jak i magazynowania oraz transportu. Zapewnienie właściwych warunków dla MW polega w głównej mierze na określeniu wrażliwości na bodźce zewnętrzne, mogące pobudzić go do wybuchu oraz wyeliminowaniu możliwości pojawienia się takich bodźców. W związku z tym producenci MW, oprócz ogólnych informacji dotyczących wymiarów, właściwości fizycznych, przeznaczenia i sposobu inicjowania MW, w specyfikacjach technicznych swoich produktów podają także informacje o warunkach i maksymalnym okresie przechowywania.

Na poniższym diagramie (rys. 1.) przedstawiono etapy życia MW. Uproszczając, można powiedzieć, że MW jest produkowany, a następnie magazynowany i używany. Należy jednak zwrócić uwagę, że magazynowanie dotyczy co najmniej dwóch miejsc (magazyn producenta i magazyn użytkownika), a każdy etap – poza produkcją – zawsze poprzedzony jest transportem.

„Użycie”, będące ostatnią fazą życia MW, trwa – w stosunku do pozostałych etapów – dość krótko. Czas trwania pozostałych etapów życia MW, łącznie – a nawet pojedynczo – jest zdecydowanie dłuższy. Na ogół jednak, użytkownicy MW koncentrują się właśnie na tym ostatnim etapie i ewentualnych bodźcach, które mogą wtedy wystąpić, natomiast pozostałe etapy, mimo że trwają znacznie dłużej, nie są rozpatrywane równie szczegółowo.

Temperatura, w jakiej znajduje się MW podczas składowania, transportu i użytkowania, jest bodźcem, na który producent i użytkownik MW mają tylko ograniczony wpływ. Dopóki wszystkie elementy pozwalające utrzymywać ją w żądanym zakresie działają poprawnie, MW powinien zachowywać swoje własności przez cały okres przydatności do użycia. Sytuacje awaryjne, choć zdarzają się niezwykle

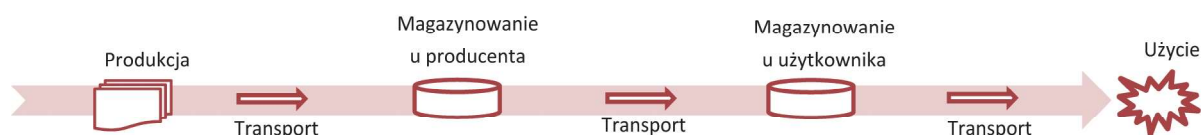
rzadko, nie mogą być całkowicie wykluczone, a temperatura MW przekraczając wartości przewidziane przez producenta, może negatywnie wpłynąć na proces detonacji podczas prac strzałowych.

Granice zakresu temperatur, w których prowadzi się prace strzałowe ulegają ciągłemu rozszerzaniu. Eksploatacja złóż głębokich – wobec wyczerpywania zasobów kopalin na mniejszych głębokościach – oznacza konieczność użytkowania górniczych MW w górotworze, którego temperatura nierzadko osiąga wartość ponad  $60^\circ\text{C}$ . Według Pawłowskiego (2002) temperatura w krajowych odwiertach na głębokości  $2 \div 4$  km może wynosić nawet  $200^\circ\text{C}$ . Z kolei podczas fali długotrwałych tropikalnych upałów, które nawiedziły Polskę w 2015 roku, przez ponad tydzień temperatura powietrza w ciągu dnia nie spadała poniżej  $30^\circ\text{C}$ . W tym czasie wprowadzono 21. stopień zasilania, czyli ograniczenia w dostarczaniu i poborze energii elektrycznej. Choć w odkrywkowych zakładach górniczych materiały wybuchowe emulsyjne luzem są używane najczęściej, to jednak dla zapewnienia prawidłowej inicjacji stosuje się tam ładunki udarowe w postaci MW nabojujących. Nie sposób stwierdzić jak ww. warunki atmosferyczne wpłynęły na parametry materiałów wybuchowych użytkowanych we wspomnianym okresie w odkrywkowych zakładach górniczych, bowiem ze względu na jednoczesne odpalania wielu etworów strzałowych nie da się zweryfikować powstania ewentualnych niewypałów. Warto jednak zaznaczyć, że wraz z dalszym podnoszeniem się średniej temperatury powietrza w Europie, takie anomalie pogodowe mogą pojawiać się coraz częściej i trwać coraz dłużej.

Proces podnoszenia się średniej temperatury na Ziemi sprawił również, że osiągalne stały się kopaliny w Arktyce. Mogą być one eksploatowane tylko metodami odkrywkowymi – warto jednak zaznaczyć, że na terenach występowania wiecznej zmarzliny średnia roczna temperatura powietrza wynosi nie więcej niż  $-11^\circ\text{C}$ . Choć w Polsce zimy nie są śnieżne, to jednak okresowo fale zimnego powietrza napływają do naszego kraju. Średnia temperatura dobową w okresie największych mrozów, 7 stycznia 2017 roku, była nawet o 14 stopni niższa od normy wieloletniej i wyniosła  $-15^\circ\text{C}$ .

Ze względu na warunki górniczo-geologiczne i wartość stopnia geotermicznego, problematyka prowadzenia prac strzałowych w górotworze o podwyższonej temperaturze nie stanowiła zainteresowania badaczy zagranicznych. Możliwość wykonywania robót strzałowych w caliznie węglowej o podwyższonej temperaturze była przedmiotem pracy Charewicza i Plewika (1963). W swoich badaniach, wobec ówczesnych ograniczeń aparaturowych, skupili się na oddziaływaniu wysokiej temperatury na zdolność inicjalną zapalnika, wyznaczając dla MW jedynie czas konieczny do osiągnięcia temperatury  $50^\circ\text{C}$  (50 minut) i  $60^\circ\text{C}$  (ponad 2 godziny).

Z kolei Weiszer (2003) wykazał, że przy specjalistycznych pracach strzałowych nie można wykluczyć wystąpienia nawet bardzo ekstremalnych temperatur, np. przy pracach wyburzeniowych prowadzonych w odlewniach metali należy liczyć się z temperaturami elementów konstrukcyjnych do  $850^\circ\text{C}$ .



Rys. 1. Etapy życia MW (opracowanie własne)

Fig. 1. Explosive lifecycle (own data)

Narażenie MW na oddziaływanie temperatur spoza zakresu przewidzianego przez producenta, stanowi bezsprzecznie okoliczności sprzyjające podjęciu prac, umożliwiających oznaczenie intensywności oddziaływania temperatury otoczenia na temperaturę materiałów wybuchowych.

## 2. Przedmiot i metodyka badań

Badaniami objęto sześć materiałów wybuchowych zróżnicowanych pod względem bezpieczeństwa wobec pyłu węglowego i metanu (skalne, metanowe, specjalne) oraz składu chemicznego (nitroestrowe, amonowo-saetrzane, emulsyjne). Wybór MW do badań poprzedzono szczegółową analizą dotyczącą ich składu i zakresu stosowania. Podstawowym kryterium tej oceny było zapewnienie bezpieczeństwa podczas narażenia MW na działanie ekstremalnych temperatur. Realizacja pracy stanowiła bowiem nie tylko wyzwanie od strony technicznej i organizacyjnej – ze względu na dużą pracochłonność prac, ale również z uwagi na konieczność zapewnienia bezpieczeństwa badaczom manipulującym MW o temperaturze spoza zakresu stosowania.

Ze względu na brak zgody producentów na użycie nazw handlowych badanych MW, każdemu z nich nadano odpowiedni symbol. Ich charakterystyczne cechy ujęto poniżej:

- **AMS-1** – MW amonowo-saetrzany, skalny, o gęstości ok. 1,1 g/cm<sup>3</sup>, średnicy naboju  $\varnothing$ 32 mm i zawartości m.in.: saletry amonowej (>80%), aluminium (<10%), mieszanki nitrogliceryny/nitroglikolu (<10%),
- **AMS-2** – MW amonowo-saetrzany, metanowy-specjalny, o gęstości ok. 1,1 g/cm<sup>3</sup>, średnicy naboju  $\varnothing$ 32 mm i zawartości m.in.: saletry amonowej (>50%), chlorku sodu (>20%), mieszanki nitrogliceryny/nitroglikolu (<10%),
- **DYN-1** – MW nitroestrowy, skalny, o gęstości ok. 1,4

g/cm<sup>3</sup>, średnicy naboju  $\varnothing$ 32 mm i zawartości m.in.: saletry amonowej (>60%), mieszanki nitrogliceryny/nitroglikolu (<20%),

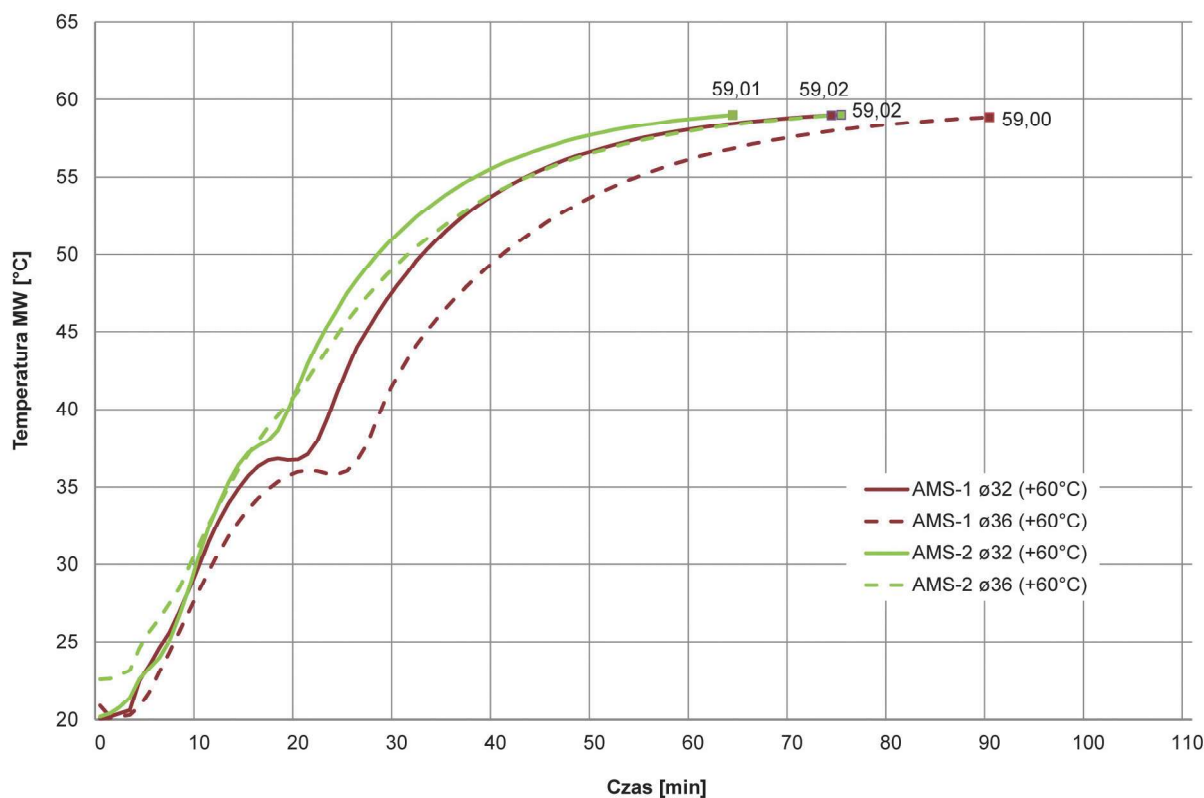
- **DYN-2** – MW nitroestrowy, skalny, o gęstości ok. 1,4 g/cm<sup>3</sup>, średnicy naboju  $\varnothing$ 32 mm i zawartości m.in.: saletry amonowej (<60%), mieszanki nitrogliceryny/nitroglikolu (<30%),
- **MWE-1** – MW emulsyjny, metanowy-specjalny, uczulany mikrosferami, o gęstości ok. 1,2 g/cm<sup>3</sup>, średnicy naboju  $\varnothing$ 32 mm i zawartości m.in.: saletry amonowej (>40%) i chlorku sodu (<10%),
- **MWE-2** – MW emulsyjny, skalny, uczulany gazowo, o gęstości ok. 1,1 g/cm<sup>3</sup>, średnicy naboju  $\varnothing$ 32 mm i zawartości m.in.: saletry amonowej (>40%) i chlorku sodu (<10%).

Badane MW umieszczano w szafie klimatycznej typu WEISS WK11-600 w zadanej temperaturze (–20°C i 60°C). Temperaturę w szafie klimatycznej kontrolował wbudowany programator.

Badanie miało na celu określenie czasu, po jakim temperatura wnętrza naboju MW zrówna się z temperaturą otoczenia. Dla ustalenia tego czasu we wnętrzu naboju badanego MW umieszczano sondę (osiowo) i obserwowano wskazania miernika temperatury.

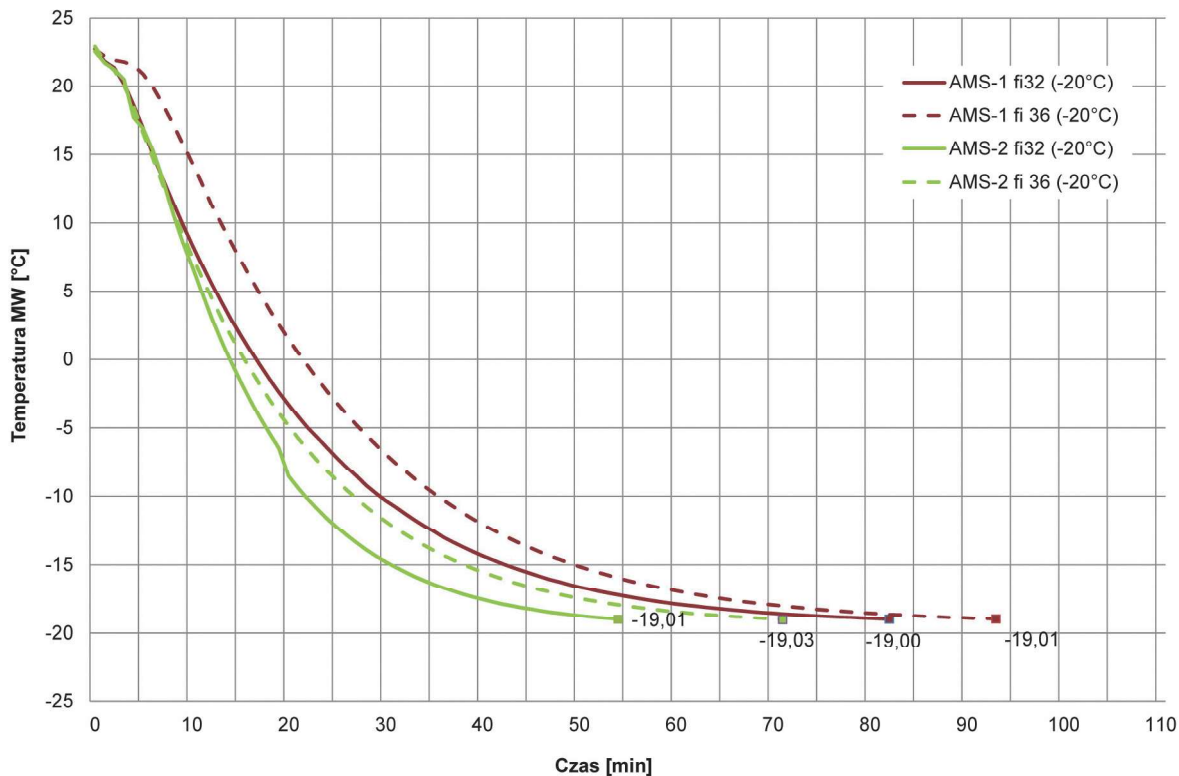
## 3. Wyniki pomiarów

Ze względu na asymptotyczny przebieg krzywych wychładzania/ogrzewania się naboju MW uznano za celowe określenie z wykresów (rys. 2-7) czasu, po upływie którego temperatura naboju MW różniła się od temperatury powietrza otaczającego nabój o 1°C. Taka temperatura była najbardziej uchwytta i nadająca się do porównań.



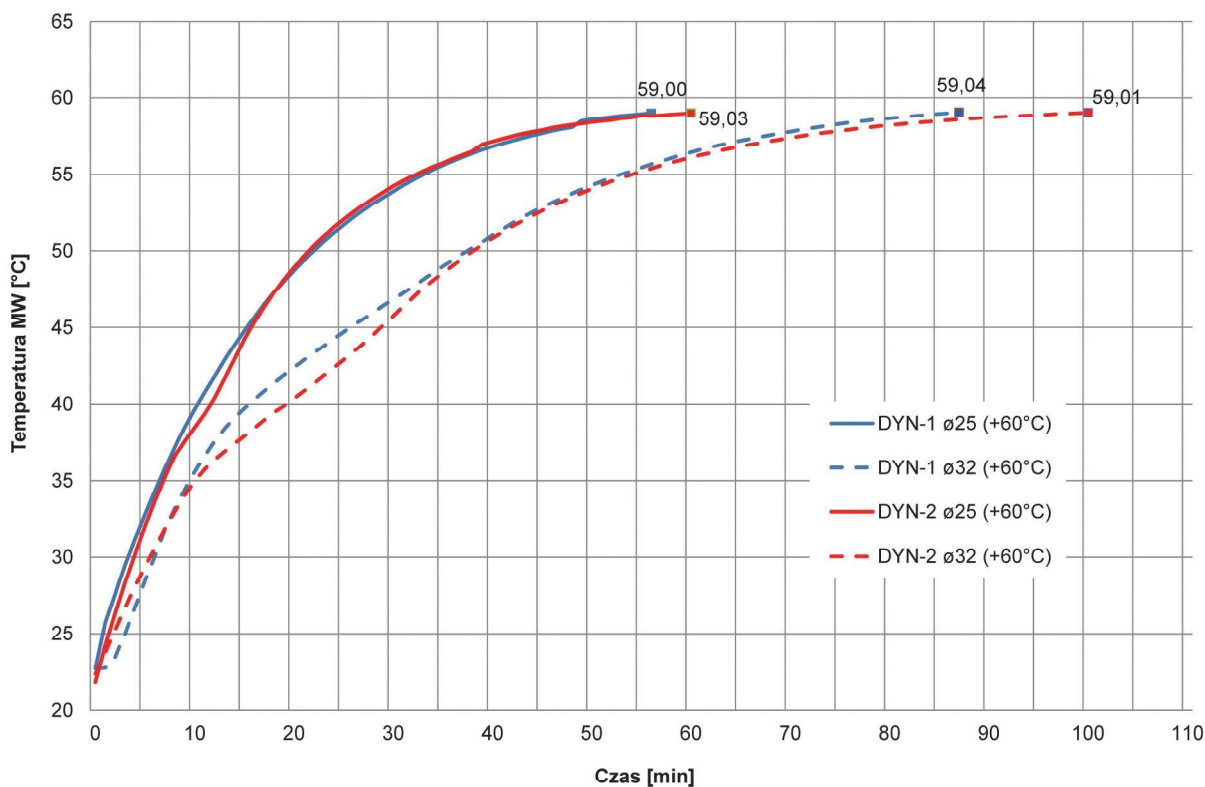
Rys. 2. Zmiany temperatury MW amonowo-saetrzanych podczas składowania w temperaturze ekstremalnej dodatniej (60°C) (opracowanie własne)

Fig. 2. Temperature changes of ammonium nitrate explosives during the storage in extreme temperature (60°C) (own data)



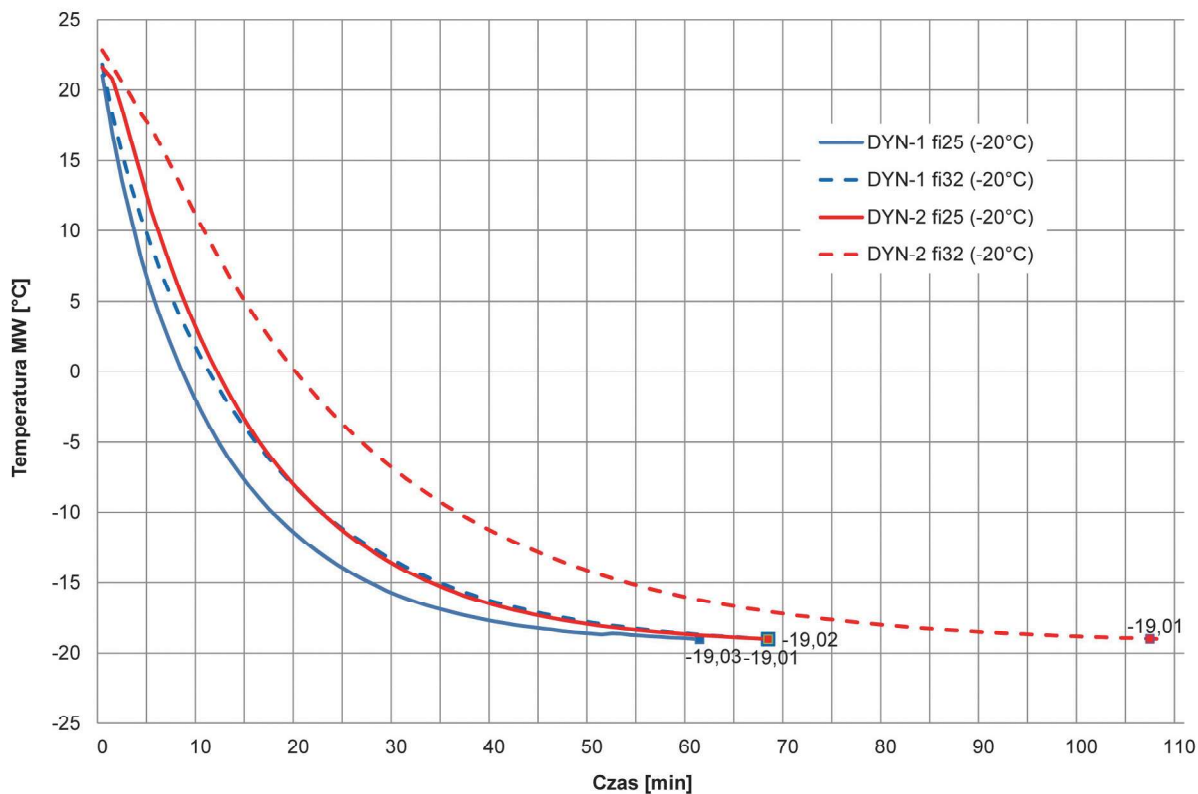
Rys. 3. Zmiany temperatury MW amonowo-saletrzanych podczas składowania w temperaturze ekstremalnej ujemnej (-20°C) (opracowanie własne)

Fig. 3. Temperature changes of ammonium nitrate explosives during the storage in extreme temperature (-20°C) (own data)



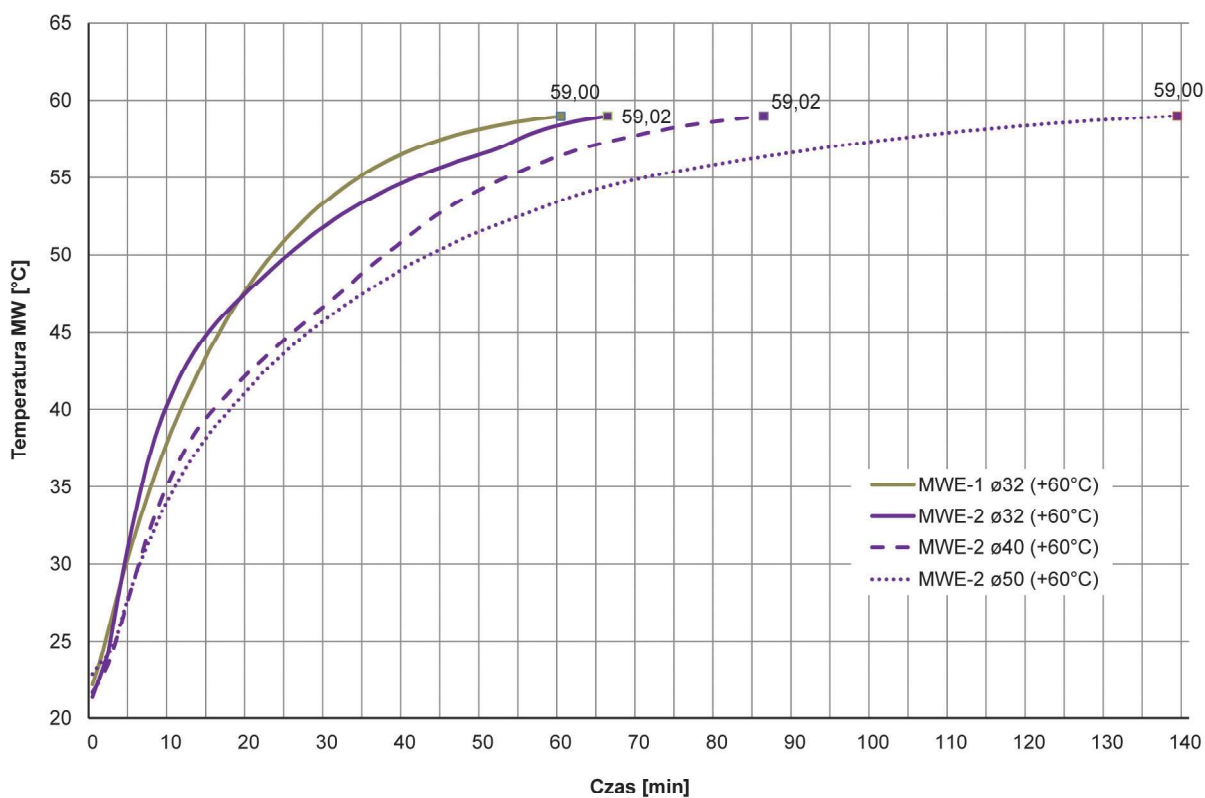
Rys. 4. Zmiany temperatury MW nitroestrowych podczas składowania w temperaturze ekstremalnej dodatniej (60°C) (opracowanie własne)

Fig. 4. Temperature changes of nitroester explosives during the storage in extreme temperature (60°C) (own data)



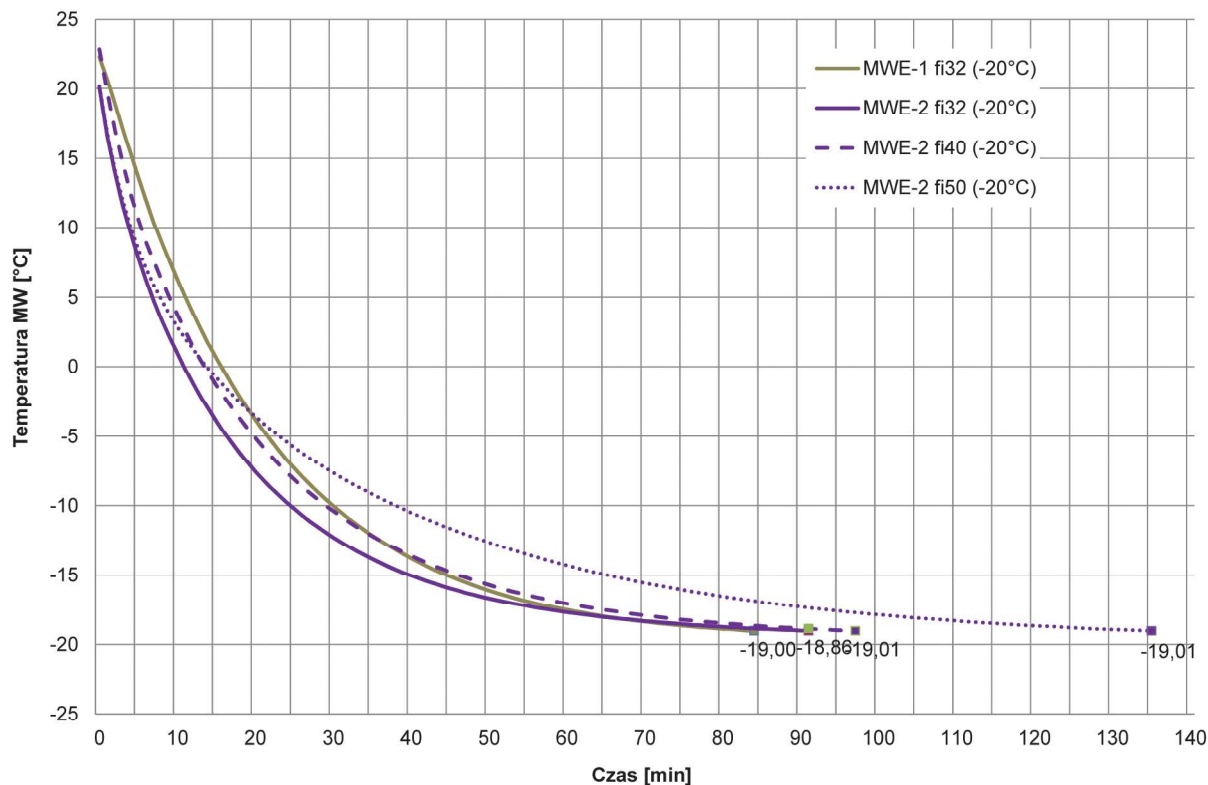
Rys. 5. Zmiany temperatury MW nitroestrowych podczas składowania w temperaturze ekstremalnej ujemnej ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) (opracowanie własne)

Fig. 5. Temperature changes of nitroester explosives during the storage in extreme temperature ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) (own data)



Rys. 6. Zmiany temperatury MW emulsyjnych podczas składowania w temperaturze ekstremalnej dodatniej ( $60^{\circ}\text{C}$ ) (opracowanie własne)

Fig. 6. Temperature changes of emulsion explosives during the storage in extreme temperature ( $60^{\circ}\text{C}$ ) (own data)



Rys. 7. Zmiany temperatury MW emulsyjnych podczas składowania w temperaturze ekstremalnej ujemnej ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) (opracowanie własne)

Fig. 7. Temperature changes of emulsion explosives during the storage in extreme temperature ( $-20^{\circ}\text{C}$ ) (own data)

Tabela 1. Wyniki oznaczania czasu uzyskania przez MW temperatury otoczenia

Table 1. Results of determining the time when the MW obtains ambient temperature

MW	Średnica [mm]	Wynik oznaczania czasu, po którym wewnątrz naboju uzyskało temperaturę różniącą się o $1^{\circ}\text{C}$ od temperatury w komorze [min]	
		$-20^{\circ}\text{C}$	$60^{\circ}\text{C}$
AMS-1	32	82	75
	36	94	94
AMS-2	32	54	64
	36	71	75
DYN-1	25	61	56
	32	68	87
DYN-2	25	68	60
	32	108	100
MWE-1	32	84	60
MWE-2	32	91	66
	40	97	86
	50	135	139

Źródło: opracowanie własne. Source: own data

#### 4. Porównanie wyników i wnioski

Jak wynika z przeprowadzonych obserwacji oznaczania temperatur we wnętrzu ładunków MW poddawanych oddziaływaniu ekstremalnej temperatury (zarówno  $-20^{\circ}\text{C}$ , jak i  $60^{\circ}\text{C}$ ), naboje o średnicy 32 mm wszystkich badanych MW potrzebują do 90 minut, aby z temperatury pokojowej (ok.  $21^{\circ}\text{C}$ ) osiągnąć zadaną temperaturę otoczenia ( $-20^{\circ}\text{C}$  lub  $60^{\circ}\text{C}$ ). Ponadto, należy wnioskować, że naboje MW o większej średnicy nagrzewają się/zamarzają dłużej od naboju tego samego MW o mniejszej średnicy.

Podczas ogrzewania materiałów wybuchowych amonowo-saletrzanych zauważono, w początkowym okresie, wzrost temperatury wnętrza naboju, a następnie zahamowanie tego wzrostu (w temp. ok.  $37^{\circ}\text{C}$ ), co potwierdziło wcześniejsze wyniki badań Charewicza i Plewika (1964). Przyjmując za nimi, w miejscu przegięcia odbywało się przechodzenie saletry amonowej z odmiany krystalograficznej rombowej beta w rombowa gamma.

Oznaczanie temperatur we wnętrzu ładunków MW poddawanych oddziaływaniu ekstremalnych temperatur wykazało również, że MW zawierające w swoim składzie chlorek sodu szybciej reagują na zmiany temperatury otoczenia w porów-

naniu do MW tego samego typu, ale niezawierających tego składnika – dotyczy to zarówno MW amonowo-saletrzanych, jak i emulsyjnych. Dostrzegalna jest również zależność związana z obecnością mieszanki nitrogliceryny/nitroglikolu w MW – jej obecność powoduje wydłużenie czasu zamarzania/nagrzewania naboju.

### Literatura

- CHAREWICZ J., PLEWIK W. 1963 - O możliwości wykonywania roboty strzałowej w caliznie o podwyższonej temperaturze, Prace Głównego Instytutu Górnictwa, Wydawnictwo Śląsk, Katowice.
- KOHLER J., MEYER R. 1993 - Explosives – fourth, revised and extended edition, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim.
- MARANDAA. 2004 - Metody badań wrażliwości materiałów wybuchowych na bodźce zewnętrzne w aspekcie przepisów ADR oraz norm polskich i europejskich, „Górnictwo i Geoinżynieria” z. 3/1.
- PAWŁOWSKI W. 2002 - Badania nad technologią otrzymywania termostabilnego materiału wybuchowego 2,6-bis(pikryloamino)-3,5-dinitopirydyny (PYX), Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Chemiczny, Warszawa.
- SULIMA-SAMUJŁO J. 1968 - Roboty strzelnicze w górnictwie odkrywkowym, Wydawnictwo Śląsk, Katowice.
- WEISZER E. 2003 - Blasting works in hot operations, Proc. Int. Conference Blasting Techniques 2003, ISBN 80-968748-1-0, Stará Lesná, 22-23.05.2003.

Artykuł wpłynął do redakcji – maj 2019

Artykuł akceptowano do druku – 15 lipiec 2019