



Zastosowanie aktywnej termografii podczerwonej z wymuszeniem mikrofalowym do wykrywania min lądowych typu PMN, PMN-2 oraz PMF-1*

Barbara SZYMANIK

*Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Wydział Elektryczny,
Katedra Elektrotechniki Teoretycznej i Informatyki,
ul. Władysława Sikorskiego 37,70-313 Szczecin*

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki zastosowania aktywnej termografii podczerwonej z wymuszeniem mikrofalowym do wykrywania zakopanych w piasku ćwiczebnych min przeciwpiechotnych: PMN, PMN-2 oraz PMF-1. Wspomniane miny mają obudowy wykonane z tworzyw sztucznych oraz odznaczają się niską zawartością metalu, przez co są trudno wykrywalne standardowymi wykrywaczami metalu. Prezentowana nowa metoda wykrywania min lądowych wykorzystuje źródło mikrofal o dużej mocy do podgrzania gruntu wraz z zakopaną w nim miną. Wytworzona różnica temperatur jest obserwowana na powierzchni gruntu za pomocą czulej kamery termowizyjnej.

Słowa kluczowe: aktywna termografia podczerwona, grzanie mikrofalowe, wykrywanie min lądowych

1. WSTĘP

Miny lądowe, które wciąż występują na wielu terytoriach na całym świecie, stanowią poważne zagrożenie nie tylko dla żołnierzy, ale również dla ludności cywilnej. Podczas konfliktów zbrojnych i po ich zakończeniu można je znaleźć niemal wszędzie tam, gdzie ludzie starają się toczyć normalne życie.

* Artykuł był prezentowany na VIII Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Pułtusk, 6-8 października 2010 r.

Dlatego prace nad rozwijaniem nowoczesnych metod rozminowania mają niewątpliwie wielkie znaczenie dla bezpieczeństwa ludności. Na chwilę obecną wciąż najbardziej popularnym urządzeniem służącym do wykrywania min lądowych jest wykrywacz metalu. Jego skuteczność, gdy mamy do czynienia z minami metalowymi, jest bezsprzeczna. Nie zmienia to jednak faktu, że w przypadku popularnych min z obudowami plastikowymi o niewielkiej zawartości metalu, wykrywacz metali nie zdaje egzaminu [1].

W niniejszej pracy przedstawiona zostanie nowa metoda wykrywania min lądowych, oparta na aktywnej termografii podczerwonej z wymuszeniem mikrofalowym [2, 3]. Wiązka mikrofal o dużej mocy (około 1000 W), generowana przez magnetron działający na częstotliwości 2,45 GHz, jest kierowana bezpośrednio na badany obszar, powodując jego objętościowe podgrzanie. Przy takich częstotliwościach ciepło w materiale dielektrycznym, jakim jest piasek oraz plastikowa obudowa miny, jest generowane w wyniku oddziaływania dipoli ze zmiennym polem elektrycznym. W przypadku metali podgrzewanie odbywa się w wyniku ruchu ładunków w obecności zmiennego pola elektrycznego. W trakcie podgrzewania lub w trakcie stygnięcia podgrzewanego gruntu wraz z zakopaną w nim miną, używa się kamery termowizyjnej w celu obserwacji rozkładu temperatury na jego powierzchni. Powierzchniowe aberracje temperaturowe wskazują na obecność miny zakopanej pod powierzchnią gruntu.

Skuteczność opisanej metody zbadano, używając trzech typów ćwiczebnych min przeciwpiechotnych: PMN, PMN-2, PMF-1. Z każdej z tych min został usunięty materiał wybuchowy.

2. PODGRZEWANIE MIKROFALOWE

Grzanie mikrofalowe zostało opisane w wielu publikacjach [4, 5]. Ten rodzaj podgrzewania, w przeciwieństwie do innych stosowanych w aktywnej termografii podczerwonej, ma charakter objętościowy. Oznacza to, że podgrzewając układ, powoduje się wzrost temperatury w pewnej jego objętości, a nie tylko na powierzchni. Ta cecha grzania mikrofalowego jest jego największą zaletą, gdyż znacznie skraca czas podgrzewania oraz uniezależnia proces od przewodzenia ciepła.

Efektywność grzania mikrofalowego jest ściśle uzależniona od rodzaju podgrzewanego materiału. I tak, w dielektrykach podgrzewanie to oparte jest na dwóch zjawiskach: po pierwsze, zachodzi tutaj grzanie oporowe. Po drugie, część dielektryków charakteryzuje się polarną budową molekularną – cecha ta powoduje, że cząsteczki dipolowe w materiale drgają, starając się ułożyć wzdłuż linii zmiennego pola elektrycznego. Ten mechanizm podgrzewania w dużym stopniu jest zależny od częstotliwości pola wymuszającego drgania.

Jednym z ważniejszych parametrów materiałów rozważanych przy analizie podgrzewania mikrofalami jest współczynnik strat dielektrycznych ϵ'' .

W praktyce do określania stratności dielektryków (a tym samym ich podatności na nagrzewanie mikrofalami) używa się następującej wielkości, nazywanej tangensem kąta stratności:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (1)$$

gdzie ε' jest przenikalnością dielektryczną. Tabela 1 przedstawia wartości współczynnik strat dielektrycznych i przenikalności dielektrycznej dla niektórych dielektryków [4].

Tabela 1. Wartości zespolonej elektrycznej przenikalności dla wybranych materiałów dielektrycznych

Table 1. The values of complex electric permittivity for chosen dielectric materials

Materiał	Częstotliwość	ε'	ε''
Piasek (wilgotność 0%)	2,45 GHz	2,55	0,007
Piasek (wilgotność 17%)	2,45 GHz	17	0,3
Bakelit	2,45 GHz	3,7	0,23
PCV	2,45 GHz	2,85	0,016
Polietylen	2,45 GHz	2,25	0,0007

Jak widać, istotnym czynnikiem wpływającym na wartości parametrów ε' i ε'' jest wilgotność gruntu. Wymienione w tabeli materiały plastikowe są często stosowane jako obudowy min przeciwpiechotnych [1].

W metalach natomiast grzanie mikrofalowe odbywa się w wyniku ruchu ładunków na skutek ich oddziaływania ze zmiennym polem elektrycznym. Ważnym parametrem opisującym oddziaływanie metalu ze zmiennym polem elektromagnetycznym jest głębokość wnikania fali. Wielkość ta wyraża się równaniem [6]:

$$d = \sqrt{\frac{1}{\sigma \cdot \pi \cdot f \cdot \mu}} \quad (2)$$

gdzie σ – jest wartością przewodności, f – częstotliwością pola, μ – przenikalnością magnetyczną metalu. Dla większości metali (nie dotyczy to metali proszkowych), przy częstotliwości 2,45 GHz, głębokość wnikania fali elektromagnetycznej jest niewielka (rzędu mikrometrów), stąd też mechanizm grzania nie jest zbyt efektywny. Jednakże z doświadczeń wynika, że podgrzewanie min z niewielką zawartością metalu daje zadowalające rezultaty.

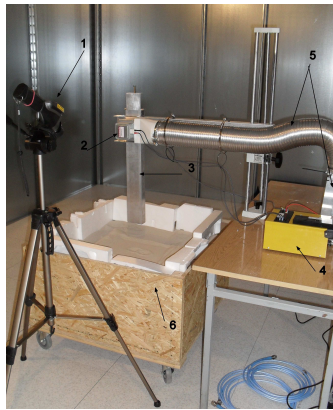
3. OPIS UKŁADU POMIAROWEGO ORAZ BADANYCH OBIEKTÓW

Laboratoryjny układ badawczy umieszczony w komorze bezdechowej składa się zasadniczo z urządzenia grzewczego, którego elementem bazowym jest generator mikrofal – magnetron oraz z czulej kamery termowizyjnej FLIR ThermaCam E300.

W pojemniku z piachem zakopywane były miny ćwiczebne produkcji rosyjskiej PMN, PMN-2 oraz PMF-1. Każda z tych min odznacza się niewielką zawartością metalu, a ich obudowy zbudowane są: w przypadku min PMN i PMN-2 z twardego plastiku (bakelit) i gumy, w przypadku miny PMF-1 z miękkiego plastiku.

3.1. Opis układu pomiarowego

Układ grzewczo-detekcyjny został przedstawiony na rysunku 1. Magnetron Panasonic 2M244, o mocy 1 kW, działający na częstotliwości 2,45 GHz, przyłączony jest bezpośrednio do aluminiowego falowodu prostokątnego.



Rys. 1. Układ pomiarowy: 1) kamera termowizyjna FLIR ThermaCam E300, 2) magnetron, 3) falowód prostokątny, 4) zasilacz, 5) elementy układu chłodzącego, 6) pojemnik z piaskiem

Fig. 1. The experimental setup: 1) Thermovision camera FLIR ThermaCam E300, 2) magnetron, 3) rectangular waveguide, 4) power supply, 5) magnetron's cooling system, 6) sand in the container

Za zasilanie magnetronu jest odpowiedzialny, sterowany wprost z komputera, zasilacz MAGDRIVE 1000. Apertura falowodu mikrofalowego skierowana jest bezpośrednio na powierzchnię piasku, umieszczonego w pudle drewnianym o wymiarach 40x40x40 cm.

Układ ze względów bezpieczeństwa umieszczony jest w komorze bezdechowej. Po podgrzaniu, powierzchnia piasku jest obserwowana przy użyciu kamery termowizyjnej umieszczonej na statywie. W wyniku oddziaływania mikrofal z piaskiem wytwarzana jest plamka grzejna o średnicy około 12 cm, widoczna na powierzchni piasku. Średnica ta jest zależna od wysokości, na jakiej znajduje się falowód względem piasku. Po przeprowadzeniu wielu testów wybrano wysokość 15 cm.

3.2. Opis badanych min ćwiczebnych

Jak wspomniano wcześniej, ze względu na minimalną zawartość metalu, użyte miny zaliczane są do trudno wykrywalnych standardowymi metodami. Badano miny ćwiczebne, pozbawione materiałów niebezpiecznych.

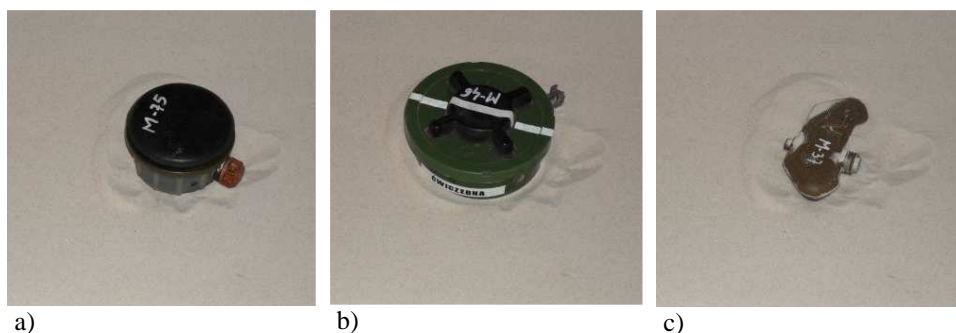
- Mina PMN jest widoczna na fotografii 2a. Jej korpus został wykonany z bakelitu oraz cienkiej gumy pokrywającej minę od strony wierzchniej. Jest ona wyposażona w zapalnik naciskowy.
- Mina PMN-2 jest widoczna na fotografii 2b. Jej korpus został wykonany z bakelitu oraz grubej gumy tworzącej na wierzchniej stronie miny kształt krzyża. Jest ona wyposażona w zapalnik naciskowy.
- Mina PMF-1 jest widoczna na fotografii 2c. Jej korpus został wykonany z polietylenu o niskiej gęstości. Ze względu na swój kształt czasem nazywana jest miną motylkową. Jej nadeptanie powoduje detonację płynnego materiału wybuchowego, umieszczonego w jednym ze skrzydeł miny.

W tabeli 2 zebrano podstawowe parametry opisanych wyżej min. Rysunki 3a, 3b oraz 3c przedstawiają wyniki prześwietlenia rentgenowskiego badanych obiektów. Takie prześwietlenie umożliwia lokalizację wszystkich elementów metalowych znajdujących się w obudowach badanych min ćwiczebnych.

Tabela 2. Podstawowe parametry badanych min

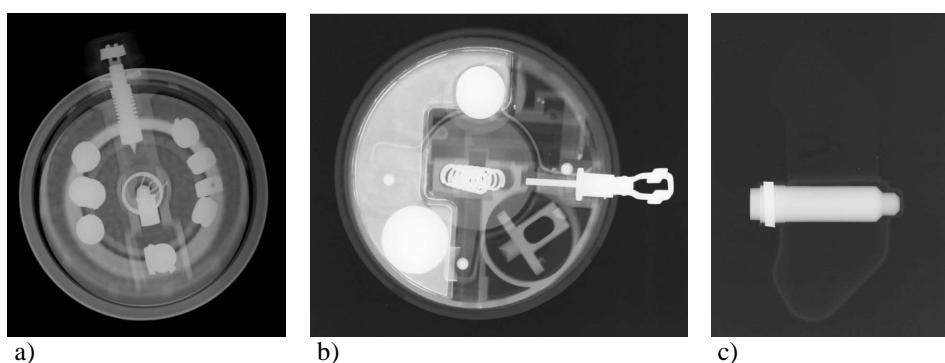
Table 2. The basic parameters of examined landmines

Mina	PMN	PMN-2	PMF-1
Szerokość / średnica	112 mm	122 mm	61 mm
Wysokość	57 mm	55 mm	20 mm
Masa	454 g	420 g	75 g
Masa materiału wybuchowego	234 g	108 g	37 g
Typ materiału wybuchowego	TNT	TNT, RDX	VV VS-6D



Rys. 2. Badane miny ćwiczebne: a) mina PMN, b) mina PMN-2, c) mina PMF-1

Fig. 2. Examined landmines: a) PMN mine, b) PMN-2 mine, c) PMF-1 mine

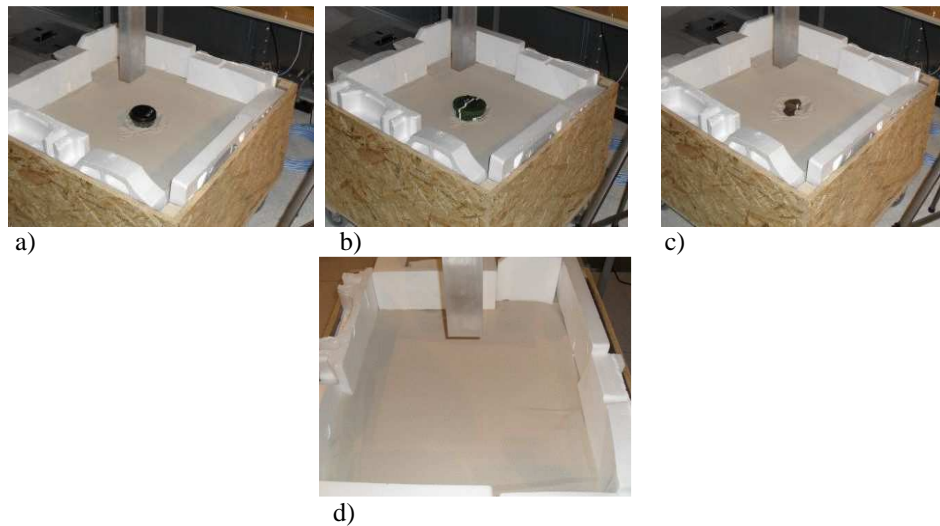


Rys. 3. Zdjęcia rentgenowskie badanych min ćwiczebnych (elementy jaśniejsze są wykonane z metalu):
a) mina PMN, b) mina PMN-2, c) mina PMF-1

Fig. 3. The radiograms of examined training landmines (brighter elements are made of metal):
a) PMN mine, b) PMN-2 mine, c) PMF-1 mine

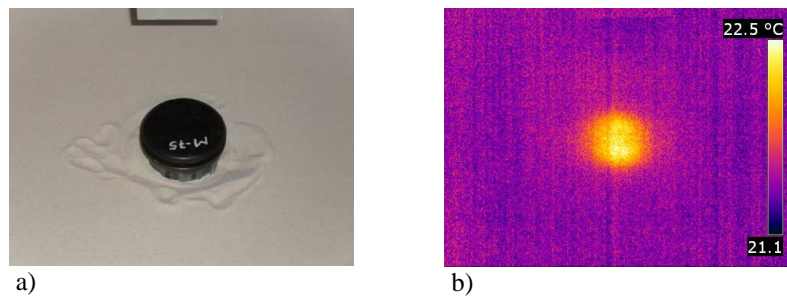
4. METODYKA I WYNIKI POMIARÓW

Badane miny ćwiczebne zakopywane były w suchym piasku na głębokości 2 cm (dla min PMN, PMN-2, PMF-1) oraz na głębokości 5 cm (dla min PMN oraz PMN-2). Orientacyjne pozycje min przed zakopaniem zostały pokazane na rysunkach 4a, 4b oraz 4c. Po zakopaniu miny, powierzchnia piasku została wygładzona (rys. 4d). W pierwszym etapie pomiarów, miny ćwiczebne zostały zakopane na głębokość 2 cm. Mikrofalowe podgrzewanie piasku wraz z zakopaną w nim miną trwało po 3 minuty dla min PMN oraz PMN-2, natomiast 5 i 20 minut dla miny PMF-1. Wyniki zostały przedstawione na rysunkach 5-7.



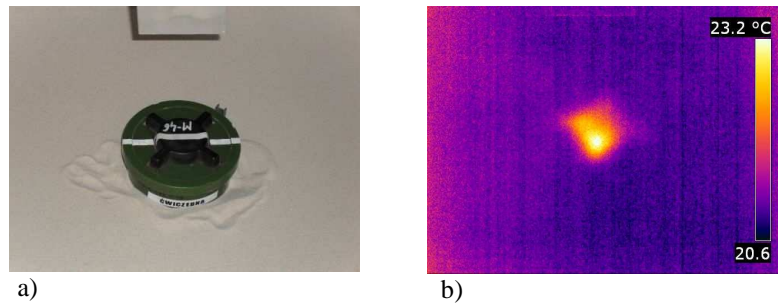
Rys. 4. Orientacyjne pozycje badanych min przed zakopaniem w piasku:
a) PMN, b) PMN-2, c) PMF-1, d) wygląd powierzchni piasku po zakopaniu obiektu

Fig. 4. The position of examined landmines before the burial:
a) PMN, b) PMN-2, c) PMF-1, d) the sand surface after the object's burial



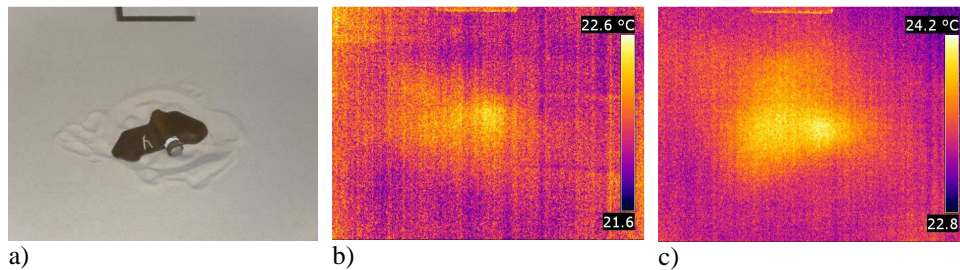
Rys. 5. Wynik 3-minutowego nagrzewania zakopanej na głębokość 2 cm miny PMN:
a) dokładna pozycja miny przed zakopaniem, b) termowizyjny obraz rozkładu temperatury na powierzchni piasku po 3-minutowym nagrzewaniu. Ciepła plamka na środku termogramu wskazuje minę PMN

Fig. 5. The result of 3-minutes of microwave heating of PMN landmine, buried at the 2 cm depth: a) exact position of the landmine before the burial, b) the thermogram obtained after 3 minutes of microwave heating. The central hot spot indicates the landmine position



Rys. 6. Wynik 3-minutowego nagrzewania zakopanej na głębokość 2 cm miny PMN-2: a) dokładna pozycja miny przed zakopaniem, b) termowizyjny obraz rozkładu temperatury na powierzchni piasku po 3-minutowym nagrzewaniu. Ciepła plamka na środku termogramu wskazuje minę PMN-2

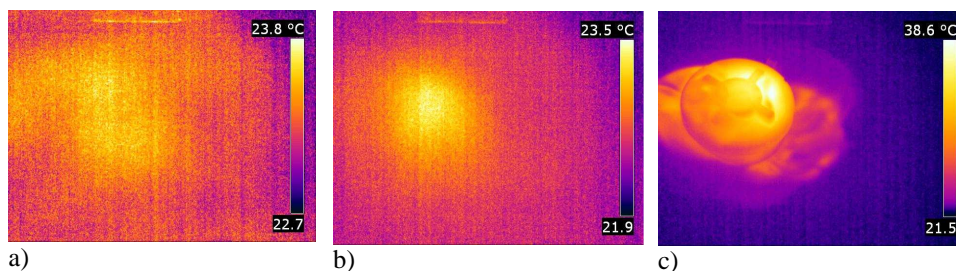
Fig. 6. The result of 3-minutes of microwave heating of PMN-2 landmine, buried at the 2 cm depth: a) exact position of the landmine before the burial, b) the thermogram obtained after 3 minutes of microwave heating. The central hot spot indicates the landmine position



Rys. 7. Wyniki 5- i 20-minutowego nagrzewania zakopanej na głębokość 2 cm miny PMF-1: a) dokładna pozycja miny przed zakopaniem, b) termowizyjny obraz rozkładu temperatury na powierzchni piasku po 5-minutowym nagrzewaniu, c) termowizyjny obraz rozkładu temperatury na powierzchni piasku po 20-minutowym nagrzewaniu. Ciepła plamka na środku termogramu, wskazująca minę PMF-1 jest wyraźniej ostrzejsza

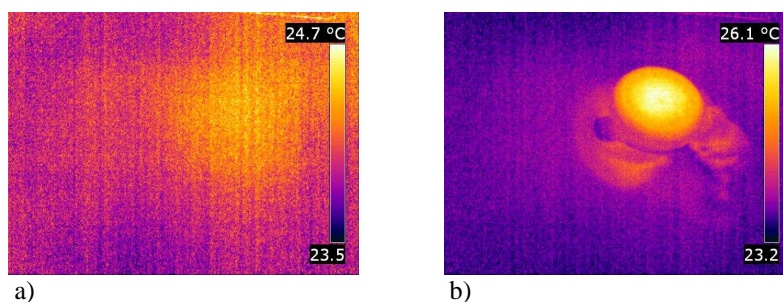
Fig. 7. The results of 5 and 20-minutes of microwave heating of PMF-1 landmine, buried at the 2 cm depth: a) the exact position of the landmine before the burial, b) the thermogram obtained after 5 minutes of microwave heating, c) the thermogram obtained after 20 minutes of microwave heating. The central hot spot is clearly more visible

Kolejnym etapem było zakopanie min PMN oraz PMN-2 na większą głębokość. Myny typu PMN-2 zakopane na głębokości 5 cm nie są wykrywalne wykrywaczami metali [1]. Z powodu większej głębokości zwiększono czas nagrzewania. W przypadku miny PMN-2 wystarczające okazało się 8 minut nagrzewania, a najlepszy efekt osiągnięty został po 10-minutowym naturalnym ochłodzeniu układu (rys. 8).



Rys. 8. Wyniki 8-minutowego nagrzewania miny PMN-2 zakopanej 5 cm poniżej powierzchni piasku: a) zdjęcie termowizyjne powierzchni piasku zrobione tuż po zakończeniu nagrzewania. Ciepłsza plama wskazuje położenie miny PMN-2, b) zdjęcie termowizyjne zrobione 10 minut po zakończeniu nagrzewania. Ciepła plama wskazująca położenie PMN-2 jest dużo ostrzejsza, c) termowizyjne zdjęcie miny PMN-2 po nagrzaniu, wykopanej z piasku. Obraz ukazuje stopień nagrzania miny oraz jej rzeczywiste położenie

Fig. 8. The results of 8-minutes of microwave heating of PMN-2 landmine, buried at the 5 cm depth: a) the thermogram acquired just after the microwave heating. The hot spot indicates the landmine position, b) the thermogram acquired 10 minutes after the microwave heating. Obtained hot spot is more visible c) the thermogram of the landmine dug out from the sand. The figure shows obtained level of heat and the exact position of the mine



Rys. 9. Wynik 15-minutowego nagrzewania miny PMN zakopanej 5 cm pod powierzchnią piasku: a) zdjęcie termowizyjne powierzchni piasku zrobione tuż po zakończeniu nagrzewania mikrofalowego. Widoczna w prawym górnym rogu ciepłsza plama wskazuje położenie zakopanej miny PMN, b) termowizyjne zdjęcie miny PMN po nagrzaniu, wykopanej z piachu. Obraz ukazuje stopień nagrzania miny oraz jej rzeczywiste położenie

Fig. 9. The results of 15-minutes of microwave heating of PMN landmine, buried at the 5 cm depth: a) the thermogram acquired just after the microwave heating. The hot spot indicates the landmine position, b) the thermogram of the landmine dug out from the sand. The figure shows obtained level of heat and the exact position of the mine

Dla miny PMN zastosowano dłuższy czas nagrzewania – 15 minut. Najlepsze wyniki otrzymano tuż po zakończeniu procesu nagrzewania (rys. 9).

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

1. Aktywna termografia podczerwona z wymuszeniem mikrofalowym pozwala na wykrycie płytko położonych min lądowych z minimalną zawartością metalu. Podgrzewanie mikrofalowe w tym wypadku ma dużą przewagę nad innymi źródłami energii, które mogą być stosowane do aktywnej termografii. Grzanie objętościowe gwarantuje wzrost temperatury obiektu położonego nawet dość głęboko pod powierzchnią gruntu. Przyspiesza to znacznie sam proces grzania.
2. Zastosowanie różnych modeli ćwiczebnych min przeciwpiechotnych pozwoliło na stwierdzenie dużej zależności efektywności podgrzewania od materiału, z którego obiekt jest zbudowany. Mina PMN zbudowana z bakelitu i pokryta cienką gumą, nagrzewa się dość wolno i szybko traci ciepło. Gdy warstwa piasku pokrywająca obiekt nie jest zbyt duża (2 cm), nie ma problemu z jego lokalizacją. Jeżeli jednak mina leży 5 cm pod powierzchnią piasku, plamka cieplna wskazująca obiekt jest znacznie bardziej rozmazana, co utrudnia jego odnalezienie. W przypadku miny PMN-2, zbudowanej z bakelitu i pokrytej gumą o dużej gęstości, obserwujemy szybkie podgrzewanie (3 min dla 2 cm głębokości oraz 8 min dla 5 cm) i dużą pojemność cieplną, co pozwala na dokładną lokalizację obiektu niezależnie od głębokości, na której leży. Mina PMF-1 zbudowana z polietylenu o małej gęstości, mająca zapalnik aluminiowy, podgrzewa się w znacznie mniejszym stopniu niż poprzednio wymienione obiekty. Dopiero po 20 min jej położenie było łatwe do zlokalizowania.
3. Wiadomo, że opisywana metoda, w związku z potrzebą precyzyjnych pomiarów temperaturowych, silnie zależy od warunków atmosferycznych [3]. Dlatego dalsze prace będą obejmowały nie tylko zastosowanie zaawansowanych technik termowizyjnych (takich jak termowizja impulsowa i modulacyjna), ale również próbę automatyzacji procesu detekcji i inteligentną kalibrację urządzenia.

Autorka dziękuje Panu Piotrowi Bikowi za udostępnienie badanych min ćwiczebnych.

LITERATURA

- [1] Ciszewski T., Grzegorzewski P., Zadania inżynierskie wykonywane przez saperów Pierwszego Kontyngentu Wojskowego w Afganistanie, *Zeszyty Naukowe WSOWL*, nr 1(143)/2007.
- [2] Szymanik B., Lesiecki P., Termografia podczerwona z wymuszeniem mikrofalowym w zastosowaniu do wykrywania niemetalicznych min lądowych, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, s. 67-79, 2009.
- [3] Mende H., Dej B., Khanna S., Apps R., Boyle M. and Addison F., *Microwave Enhanced IR Detection of Landmines Using 915 MHz and 2450 MHz*, TECHNICAL MEMORANDUM DRDC Ottawa TM 2004-266, December 2004.
- [4] Meredith R.J., *Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating*, Short Run Press, 1998.
- [5] Metaxas A.C., Meredith R.J., *Industrial microwave heating*, Peter Peregrinus Ltd., 1983.
- [6] Manoj G., Wong Wan Leong E.: *Metals and Microwaves*, John Wiley and Sons, 2007.

PMN, PMN-2 and PMF-1 Landmines Detection Using Active Infrared Thermography with Microwave Excitation

Barbara SZYMANIK

Abstract. In this paper, active infrared thermography is used to detect antipersonnel landmines: PMN, PMN-2 and PMF-1. Mentioned landmines have very low metal content and their casings are made of plastic, therefore are considered as hard to detect using metal detectors. Presented new method of landmines detection, uses high power microwave source to heat the ground with buried landmine. Obtained temperature difference can be observed on the ground surface with sensitive thermovision camera.

Keywords: active infrared thermography, microwave heating, landmines detection

