

Laboratoryjne i poligonowe badania hydrostrumieniowego wypłukiwania TNT z pocisków artyleryjskich

Laboratory and firing ground examinations of TNT hydro-jetting washing out from artillery shells

Józef A. Borkowski¹⁾, Przemysław J. Borkowski¹⁾, Michał Bielecki¹⁾, Andrzej Maranda²⁾, Jacek Borkowski³⁾, Dariusz Danielewicz³⁾, Radosław Warchoń³⁾

- 1) Instytut Niekonwencjonalnych Technologii Hydrostrumieniowych, Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, Polska
- 2) Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, Polska
- 3) Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, ul. Prym. St. Wyszyńskiego 7, 05-220 Zielonka, Polska

Streszczenie: W artykule omówiono zagadnienia usuwania materiałów wybuchowych z pocisków artyleryjskich, koncentrując się zwłaszcza na ich wypłukiwaniu hydrostrumieniowym. Zaprezentowano w nim wielogniazdowe stanowisko badawcze o napędzie hydraulicznym i wysokociśnieniowy osprzęt roboczy oraz metodykę badań stosowaną w warunkach poligonowych, które umożliwiają wypłukiwanie materiałów wybuchowych (MW) z takich pocisków przy zastosowaniu wysokociśnieniowej strugi wodnej. Badania procesu hydrostrumieniowego wypłukiwania trotylu przeprowadzono dla pocisków odlankowo-burzących o kalibrach 85 mm, 100 mm, 122 mm i 125 mm.

W wyniku badań stwierdzono zmienność mechanizmu wypłukiwania TNT, uwarunkowaną hydro- i termodynamicznymi warunkami tego procesu, zależnymi głównie od ciśnienia strugi wodnej. Porównanie wyników tych eksperymentów z wynikami wcześniejszych badań nad wypłukiwaniem materiału zastępczego, imitującego właściwości mechaniczne MW, pozwoliło na określenie odpowiedniego współczynnika korygującego potencjalną efektywność takiego procesu, co umożliwia przeprowadzanie bezpiecznych badań symulacyjnych w warunkach laboratoryjnych. Z kolei przeprowadzenie badań morfologii i struktury geometrycznej wypłukiwanego TNT, stabilności termicznej i prędkości detonacji umożliwiło zaproponowanie kierunków wykorzystania wypłukanego MW, szczególnie jako składnika górniczych MW.

Abstract: The paper presents discussion on high explosives removal from artillery ammunition especially its hydro-jetting washing out technology. Multi socket research stand hydraulically driven as well high-pressure equipment and experimentally verified methodology of developed technology that enables HE washing out with high-pressure water jet are presented too. Firing ground experiments were realized for TNT washing out from ammunition range 85 mm, 100 mm, 122 mm and 125 mm.

As a result of above research one can state variability in TNT washing out process characteristic what is conditioned by hydro- and thermo dynamical conditions of that process but mostly dependent on water jet pressure. Comparing these results to previous experiments realized for HE imitator material (characterized with analogous mechanical properties to the real HE) let to elaborate suitable factor that corrects potential process efficiency. All that enabling safe tests realization in the laboratory conditions. In turns, examining TNT morphology, it's geometrical structure as well as it's thermal stability and detonation velocity let to offer directions of such HE reuse, especially as a compound of mine explosives.

Słowa kluczowe: materiały wybuchowe, amunicja artyleryjska, wysokociśnieniowa struga wodna

Keywords: explosives, artillery ammunition, high-pressure water jet

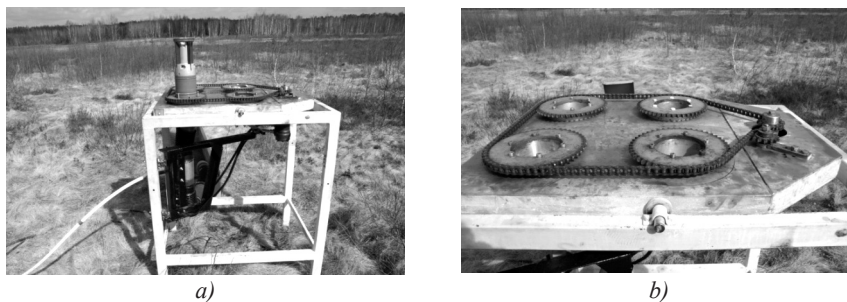
1. Wprowadzenie

Racjonalne zagospodarowanie zapasów różnych środków bojowych w Polsce stanowi poważny problem

wymagający np. utylizacji zbędnej amunicji artyleryjskiej, a zwłaszcza neutralizacji materiałów wybuchowych (MW) [4,9,11-13]. Najczęściej stosowane sposoby usuwania MW z amunicji artyleryjskiej, polegają na wypalaniu, usuwaniu mechanicznym oraz ich wytapianiu gorącą wodą lub przegrzaną parą wodną [29]. Najnowsze sposoby usuwania MW z amunicji artyleryjskiej i raketowej, polegają na ich wymywaniu i wyplukiwaniu wysokociśnieniową strugą wodną [3-13,16-18]. Rzadziej stosuje się do tego celu strugę wodno-lodową [14], wodno-ścierną [23] lub kriogeniczną [19,24]. Są to metody efektywne, które nie wymagają zachowania szczególnych warunków bezpieczeństwa [1,2], dlatego od blisko dwudziestu lat [17] są one stosowane w USA [25,27,28]. Zbliżone rozwiązania zastosowano także w kilku krajach europejskich, jak: Rosja [14], Niemcy, Holandia, Szwecja i Czechy [15]. Także dotychczasowe wyniki badań własnych [3-13], prowadzonych przy zastosowaniu zastępczego MW, stały się podstawą dla adekwatnego sposobu wyplukiwania MW wysokociśnieniową strugą wodną. Zasadnicze przy tym znaczenie ma kwestia recyklingu takich MW, która w znacznym stopniu jest rozwiązywana przez ich zastosowanie w przemyśle górniczym [20-22]. Obecny artykuł zawiera wyniki badań nad wyplukiwaniem trotylu (TNT) ze skorup pocisków artyleryjskich, przy użyciu wysokociśnieniowej strugi wodnej. W badaniach tych wykorzystywano technologię opracowaną w Instytucie Niekonwencjonalnych Technologii Hydrostrumieniowych Politechniki Koszalińskiej, której eksperymentalną weryfikację przeprowadzono w warunkach poligonowych Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia.

2. Stanowisko i metodyka badań

Dla zapewnienia wysokiej efektywności wyplukiwania MW opracowano wielogniazdowe urządzenie (rys. 1) o budowie modułowej. Obecnie takie rozwiązanie konstrukcyjne pozwala usuwać MW z czterech pocisków jednocześnie lecz docelowo można je łatwo powiększyć do 64 gniazd. Jego poszczególne gniazda obracane są przekładnią łańcuchową napędzaną silnikiem hydraulicznym wyposażonym w obiegową przekładnię redukcijną.



Rys. 1. Szczegóły urządzenia do wyplukiwania MW: a) widok ogólny z widocznym pociskiem kalibru 125 mm, wstawionym do gniazda roboczego; b) stół roboczy modułu czterogniazdowego

Do badań poligonowych urządzenie to przystosowano do obsługi tylko pojedynczego gniazda, wyposażając je w głowice robocze z dwiema wichrowatymi lub pojedynczą dyszą wodną. Centralnym kierunkiem ustawienia każdej dyszy wodnej jest oś pocisku. Względem niego dysza wykonuje quasi-promieniowe ruchy nie przekraczając przy tym obrysu otworu zapalnikowego. Takie wahania zapewnia jej odpowiedni mechanizm korbowy napędzany przez inne z sąsiadujących gniazd roboczych tego urządzenia. Rodzaj i charakterystykę dysz wodnych zastosowanych do wyplukiwania TNT z czyszczonych pocisków artyleryjskich dobierano według wyników najnowszych badań [5,6,26].

Hydrostrumieniowe erodowanie MW odbywa się we wnętrzu smukłej skorupy pocisku, do której przez otwór po wykręconym zapalniku wpływa wysokociśnieniowa struga wodna. Wyplukany urobek wypływa w sposób ciągły przez ten sam otwór, co narzuca konieczność skutecznego jego rozdrobnienia na dość drobne kawałki. Ogólny widok stanowiska badawczego do wyplukiwania MW z pocisków artyleryjskich przy użyciu wysokociśnieniowej strugi wodnej na poligonie WITU, przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Widok ogólny uniwersalnego stanowiska badawczego: a) usytuowanie poszczególnych podzespołów; b) proces wyplukiwania TNT z pocisku kalibru 125 mm

Do zasilania tego stanowiska w wysokociśnieniową strugę wodną wykorzystuje się odpowiednio oprzyrządowany hydromonitor (rys. 3) zbudowany na bazie pompy Hammelmann'a typu HDP 164 ($p_{\text{maks}} = 300 \text{ MPa}$, $Q_{\text{maks}} = 0,5 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$, $P = 175 \text{ KM}$). W przypadku zastosowania modułów o większej ilości gniazd roboczych można zastosować hydromonitor o większej wydajności wody, np. typu HDP 483 ($p_{\text{maks}} = 150 \text{ MPa}$, $Q_{\text{maks}} = 2,6 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$, $P = 750 \text{ KM}$).



Rys. 3. Wysokociśnieniowy hydromonitor HDP 164 Hammelemann ($p_{\text{maks}} = 300 \text{ MPa}$, $Q_{\text{maks}} = 0,5 \text{ dm}^3 \text{ s}^{-1}$)

Ogólne warunki procesu erodowania MW z pocisków amunicji artyleryjskiej, w przeprowadzonych badaniach poligonowych, przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Warunki wyplukiwania MW z artyleryjskich pocisków odłamkowo-burzących o różnych kalibrach i badane wielkości charakterystyczne

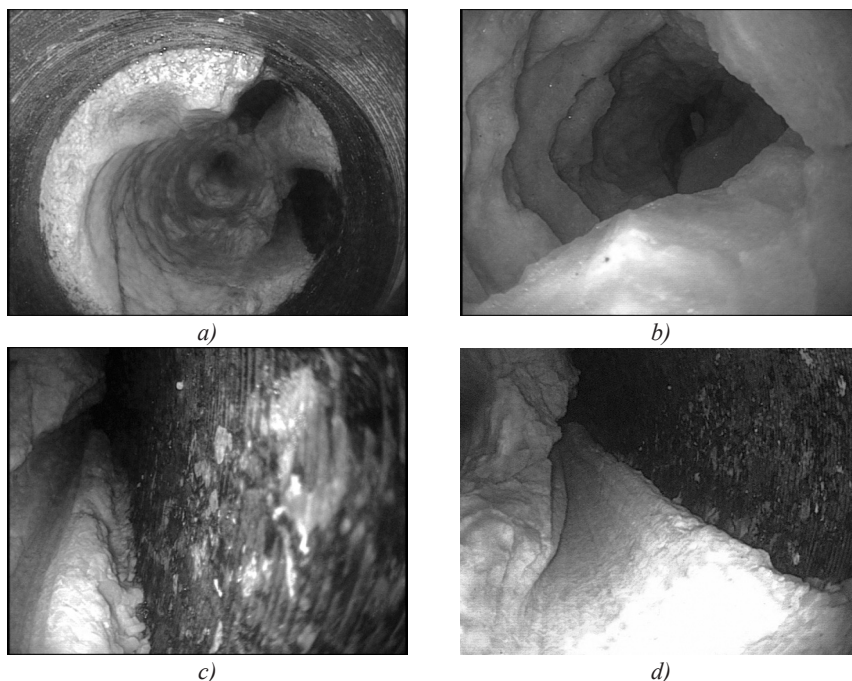
Wielkości wejściowe	Wielkości badane
- ciśnienie wody $p = (150 \div 270) \text{ MPa}$	- czas wyplukiwania MW, M_g
- średnica dyszy $d = (0,7 \div 1,0) \text{ mm}$	- skuteczność wyplukiwania MW, Q_t
- długość robocza strugi $L_o = (50 \div 525) \text{ mm}$	- efektywność procesu, E_w
- prędkość obrotowa pocisków $n = (5 \div 20) \text{ min}^{-1}$	- granulacja wyplukanego MW, G_f
- kaliber pocisków $k = (85, 100, 122, 125) \text{ mm}$	- jakość powierzchni granulatu MW, Q_s

3. Mechanizm wyplukiwania trotylu

W celu poznania mechanizmu hydrodynamicznego wyplukiwania TNT z pocisków, przeprowadzono endoskopową analizę ich wnętrza, wykonywaną w różnych fazach procesu erodowania MW. Tego rodzaju badania pozwalają na udokumentowanie poszczególnych faz odpajania i usuwania TNT ze skorup. Zarys ilustracji tego rodzaju procesów, występujących dla kilku wybranych warunków badań, przedstawiają zestawy zdjęć zamieszczone na poniższych rysunkach.

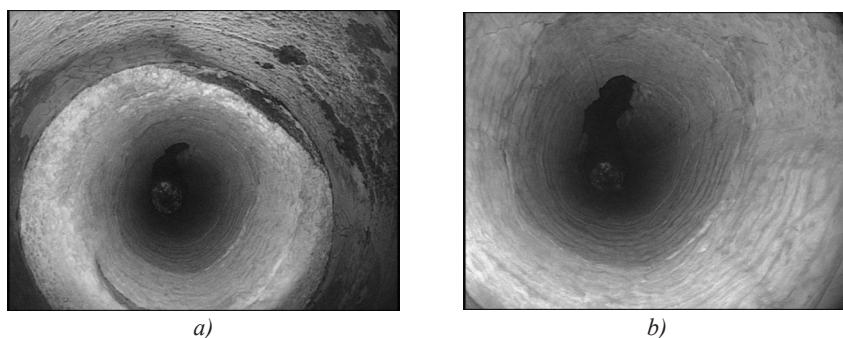
Charakterystyczne sposoby hydrostrumieniowego erodowania TNT strugą wodną o stosunkowo niewysokich

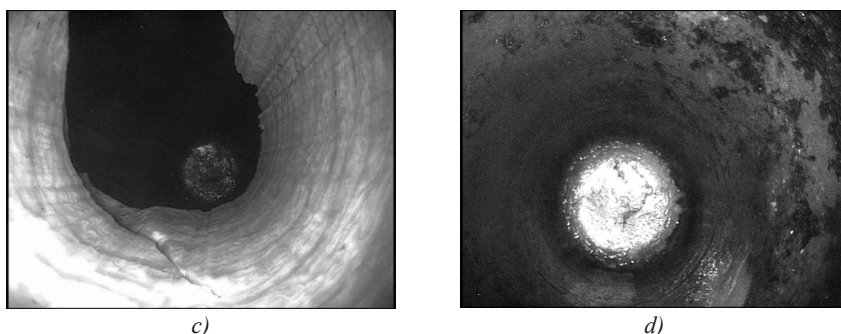
ciśnieniach, ilustrują przykładowe zdjęcia przedstawione na rys. 4. Na podstawie analizy takich obrazów stwierdzono, że dynamiczny napór strugi wodnej o stosunkowo niskim ciśnieniu (150 MPa) powoduje zwykle dekohezyjne wykruszanie większych cząstek TNT (rys. 4b). W analizowanym tu przykładzie zastosowano podwójną strugę wodną, wytwarzaną w głowicy z dwiema dyszami. Jej zadaniem jest ułatwienie odspajania trotylu od ścianek skorupy (rys. 4c i 4d) zapewniające zwykle wzrost efektywności procesu wyplukiwania MW z pocisków o większych kalibrach.



Rys. 4. Przykłady erodowania TNT wysokociśnieniową strugą wodną ($p = 150$ MPa) wytwarzaną w głowicy dwudyszowej ($2 \times \Phi 0,7$ mm) z pocisku odłamkowo-burzącego kalibru 125 mm: a) ogólny widok strefy erozji; b) dekohezyjne erodowanie grubszych cząstek TNT wzdłuż drażonych kanałów; c) ślady wzdłużnego wyplukiwania strugą wodną; d) odspajanie TNT od ścianki skorupy pocisku

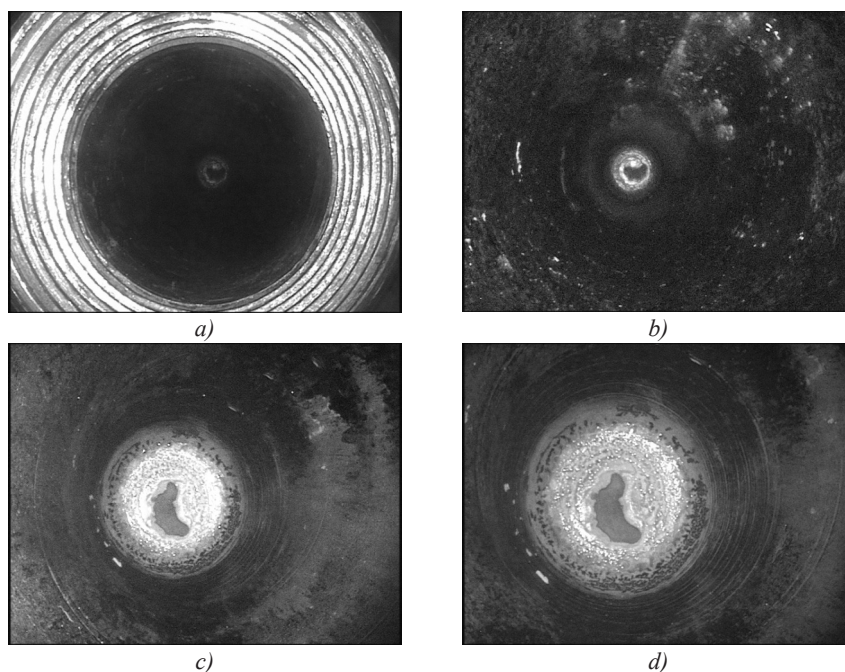
Do wyplukiwania TNT ze skorupy pocisku artyleryjskiego mniejszego kalibru można z powodzeniem używać wysokociśnieniowej strugi wodnej, wytwarzanej w pojedynczej dyszy wodnej. Charakter przebiegu procesu erodowania trotylu taką strugą ilustrują endoskopowe obrazy, zamieszczone na przykładowym rys. 5.





Rys. 5. Przykładowe fazy hydrostrumieniowego procesu wyplukiwania TNT z pocisku odłamkowo-burzącego kalibru 85 mm ($p = 200$ MPa, dysza wodna $\Phi 1,0$ mm): a) ślady wyplukiwania przy otworze zapalnikowym; b) ślady wyplukiwania w głębi skorupy; c) charakter wyplukiwania przydennych warstw trotylu z widocznymi ich spękaniem; d) widok wyplukanej przydennej części skorupy pocisku

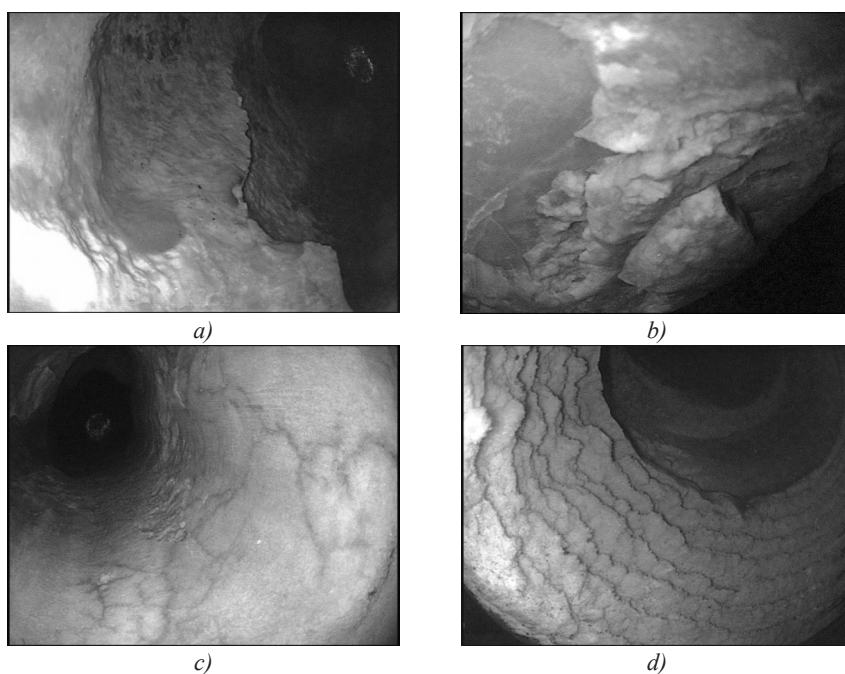
Z rezultatów przeprowadzonych badań wynika, że po wyerodowaniu w TNT centralnego otworu, wysokociśnieniowa struga wodna rozplywa się promieniście na dnie skorupy. W takich warunkach następuje hydrodynamiczne wyplukiwanie najpierw przydennych warstw trotylu, a następnie coraz to szerszych, powodując w nich wykruszenia o stosunkowo znacznych wymiarach. Obserwuje się przy tym, że krawędzie tych wykruszeń są zwykle wyraźne i ostre. Wspomaga to proces hydrodynamicznego rozmywania coraz to odleglejszych warstw trotylu, prowadzący do oczyszczenia całej skorupy pocisku. Skuteczność wyplukiwania TNT taką metodą ze skorupy pocisku artyleryjskiego (kalibru 85 mm), przy użyciu pojedynczej strugi wodnej o ciśnieniu 200 MPa, ilustrują endoskopowe zdjęcia zamieszczone na przykładowym rys. 6.



Rys. 6. Widok wnętrza skorupy pocisku odłamkowo-burzącego kalibru 85 mm po hydrostrumieniowym wyplukaniu TNT ($p = 200$ MPa, dysza wodna $\Phi 1,0$ mm): a) gwint w otworze zapalnikowym; b, c) środkowe części skorupy; d) przydenna część skorupy pocisku

Dla odmiany, podczas wyplukiwania trotylu strugą wodną o stosunkowo wysokim ciśnieniu (powyżej 250 MPa), występują specyficzne zjawiska, powodujące zmiany opisanego powyżej mechanizmu usuwania TNT. Typowe przykłady tego rodzaju zjawisk przedstawiono na rys. 7.

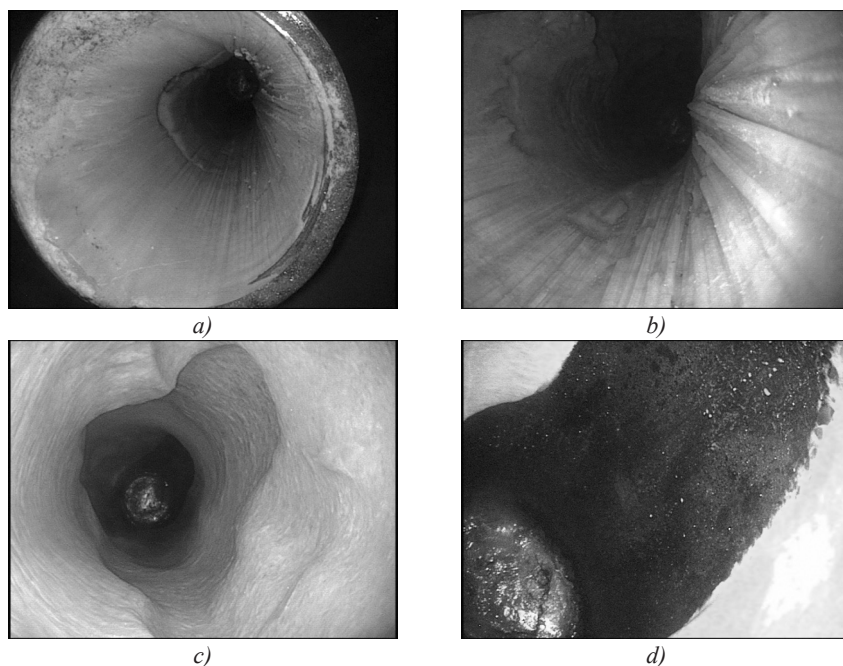
Oddziaływanie wysokociśnieniowej strugi wodnej sprawia, że w wierzchnich warstwach TNT powstaje stosunkowo gęsta siatka pęknięć (rys. 7a i 7b) prowadzących do usuwania drobnoziarnistych cząstek, co zapewnia kształtowanie obłych powierzchni odznaczających się na ogół znaczną gładkością (rys. 7c). Najczęściej również w MW następuje stosunkowo szybkie wyerodowanie centralnego otworu aż do dna pocisku. Wówczas to energia hydrodynamicznego oddziaływania wysokociśnieniowej strugi wodnej wywołuje strefowe podgrzewanie skorupy pocisku, powodując nadtapianie przylegających warstw TNT. Cząstki wykruszone z tych warstw, pod wpływem dynamicznych przemieszczeń wewnątrz skorupy pocisku w sposób trwały przywierają do zimniejszych powierzchni, zwłaszcza w miejscach o rozwiniętej strukturze geometrycznej (rys. 7d).



Rys. 7. Typowe przykłady erozji TNT w pocisku odłamkowo-burzącym kalibru 100 mm, pod wpływem oddziaływania wysokociśnieniowej ($p = 265$ MPa) strugi wodnej wytwarzanej w dyszy o średnicy $d = 0,9$ mm: a) ślady wyplukania i pęknięcia trotylu; b) spękania i złuszczenia warstwy wierzchniej; c) obłe wyplukania i gładkie powierzchnie trotylu; d) nalepy nadtopionego TNT przywarłe do gwintu w otworze zapalnika

Analogiczny charakter zjawisk występuje również podczas erodowania i usuwania TNT ze skorupy kalibru 122 mm, co ilustrują przykładowe zdjęcia zamieszczone na rys. 8.

Zastosowanie strugi wodnej o ciśnieniu powyżej 250 MPa, powoduje zwykle występowanie prostoliniowych śladów wyplukiwania, co m.in. intensyfikuje erodowanie trotylu. Z kolei nagrzewanie dna skorupy energią wysokociśnieniowej strugi wodnej powoduje strefowe nadtapianie przyległych warstw TNT. Wszystko to sprawia, że podczas dynamicznych przemieszczeń przywierają one do wszelkich nierówności i wypełniają zagłębienia itd. Uwidacznia się to w postaci znacznego wygładzania wyplukiwanych powierzchni ale, co gorsze, przyczynia się do przywierania trotylu do miejsc o rozwiniętej strukturze, jak np. gwint do zapalnika itp.



Rys. 8. Przykładowe fazy hydrostrumieniowego procesu usuwania TNT z pocisku odłamkowo-burzącego kalibru 122 mm ($p = 260$ MPa, dysza wodna $\Phi = 0,9$ mm): a) ślady wypłukiwania przy otworze skorupy; b) wyraźniejsze ślady wypłukiwania w głębi skorupy; c) stosunkowo regularne erodowanie otworu centralnego; d) wypłukiwanie przydennych warstw trotylu, uwidaczniające podkład w postaci lakieru bitumicznego

4. Efektywność procesu wypłukiwania MW

Zwiększenie ciśnienia strugi wodnej a także jej wydatku powodują zwykle zintensyfikowanie erozji MW. Te podstawowe zależności zostały potwierdzone także w trakcie przeprowadzonych badań poligonowych. Jednak w przypadku tych początkowych eksperymentów należało zachować szczególnie wysoki poziom bezpieczeństwa. Z tego względu powstała konieczność uproszczenia kinematyki mechanicznego korbowego zastosowanego do poruszania dyszy wodnej. Spowodowało to konieczność wyeliminowania kątowych ruchów dyszy w płaszczyźnie pionowej, a przez to świadome pominięcie korzystnego sposobu natryskiwania strugą wodną.

Pomimo tego istotnego mankamentu w niektórych warunkach uzyskano zadowalające wyniki już w pierwszych próbach eksperymentalnych. Odnosi się to zwłaszcza do pocisków mniejszego kalibru, z których prawie nieruchoma, bo wyłącznie tylko równoległa, struga wodna wypłukiwała trotyl ze skorupy w stopniu zadowalającym. Wprawdzie wydajność tych operacji jest obniżona w porównaniu z wypłukiwaniem imitacji materiału zastępczego [5,7,8] ale na podstawie tych badań została potwierdzona idea w pełni bezpiecznego przebiegu takiej właśnie metody usuwania MW. Przeprowadzenie zaledwie tych początkowych eksperymentów wykazało możliwość bezpiecznego i skutecznego wypłukiwania TNT praktycznie ze wszystkich typowych pocisków artyleryjskich. Spośród jedynie w pełni udanych prób można tu wskazać, że wydajność wypłukiwania trotylu kształtuje się na poziomie $(2,69 \div 3,53) \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$.

W celu dokonania oceny efektywności takiego sposobu wypłukiwania MW posłużono się współczynnikiem sprawności tego rodzaju operacji, który można określić według następującej formuły

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{t_1}{t_2} \quad (1)$$

w której: Q_1 i Q_2 to wydajność wyplukiwania odpowiednio: zastępczego MW i prawdziwego TNT, natomiast t_1 i t_2 to odpowiednie czasy trwania tych właśnie operacji.

Wartości określonego w taki sposób współczynnika sprawności tego rodzaju operacji kształtują się w zakresie $0,42 \div 0,48$. Świadczy to ewidentnie, że w zakresie udoskonalenia efektywności hydrostrumieniowego wyplukiwania TNT z pocisków artyleryjskich jest jeszcze wiele do osiągnięcia. Zatem stosownie przeprowadzona optymalizacja wyplukiwania TNT z pocisków artyleryjskich przy użyciu wysokociśnieniowej strugi wodnej stwarza szansę na co najmniej zdublowanie obecnie uzyskiwanej efektywności.

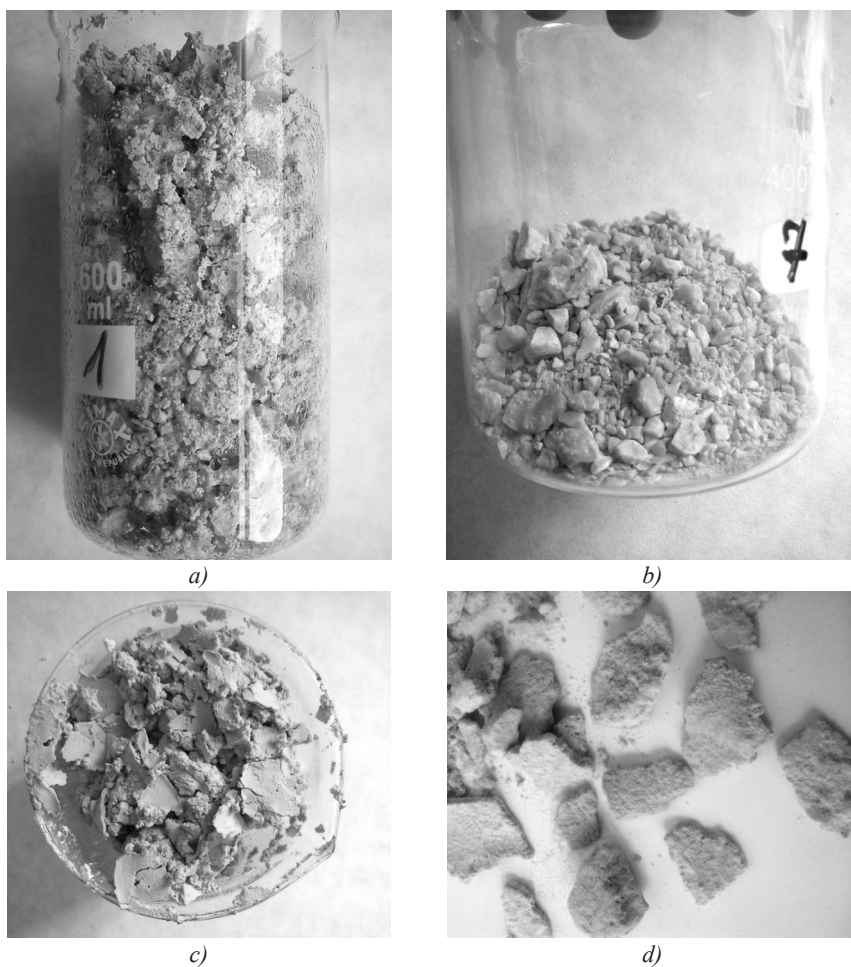
Jest to istotny warunek efektywnego erodowania trotylu znajdującego się wewnątrz smukłej skorupy pocisku, do której przez otwór po wykręconym zapalniku wtryskuje się wysokociśnieniową strugę wodną. Takie rozwiązanie dość poważnie utrudnia wypływ ze skorupy większych kawałków wyplukiwanego MW, które muszą wpierrw ulec rozdrobnieniu. Wszystko to powoduje obniżenie efektywności procesu wyplukiwania TNT ze skorup pocisków artyleryjskich.

Jednak nawet na podstawie tych początkowych efektów można stwierdzić, że rozpatrywana tu metoda hydrostrumieniowego wyplukiwania MW jest konkurencyjna względem innych metod, stosowanych dotychczas. Ponadto całkiem realna jest możliwość około dwukrotnego zwiększenia jej efektywności jedynie na drodze optymalizacji parametrów i warunków funkcjonowania tej oryginalnej metody. Zważywszy zatem na powyższe można uznać iż metoda wyplukiwania TNT z pocisków artyleryjskich przy użyciu wysokociśnieniowej strugi wodnej, opracowana w Instytucie Niekonwencjonalnych Technologii Hydrostrumieniowych Politechniki Koszalińskiej, jest bardzo interesująca i perspektywiczna pod względem ekonomicznym.

5. Ukształtowanie cząstek wyplukanego TNT

Przeprowadzone badania hydrostrumieniowego usuwania MW z odłamkowo-burzących pocisków artyleryjskich, wykazały występowanie zróżnicowanej postaci i struktury wyplukiwanego TNT (rys. 9). W zależności od hydrodynamicznych parametrów wysokociśnieniowej strugi wodnej, wyplukiwany materiał występował głównie w trzech następujących postaciach: drobnocząsteczkowego proszku tworzącego porowatą „pianę” utrzymującą się na wodzie poprocesowej, „grysiu” w postaci cząstek o wielkości ($8 \div 15$) mm (maks. do 25 mm), a także jako nadtopiona masa TNT.

Wyplukiwanie TNT w postaci bardzo rozdrobnionego proszku występuje głównie podczas stosowania strugi wodnej o najniższych ciśnieniach (np. rzędu 150 MPa) i niewielkim wydatku wody odpowiadającym użyciu dysz o mniejszych średnicach (np. 0,7 mm). Ziarnistość cząstek TNT powstających w takich warunkach zawiera się w zakresie ($0,2 \div 1,0$) mm, co sprawia, że tworzą one porowatą zawiesinę przypominającą pianę, która utrzymuje się na powierzchni wody poprocesowej (rys. 10a). Aby je odzyskać należy odcedzać wodę (rys. 10b) dzięki czemu otrzymuje się wilgotną papkę (rys. 10c), która po wyschnięciu tworzy zlepienia odznaczające się stosunkowo znaczną porowatością (rys. 10d).



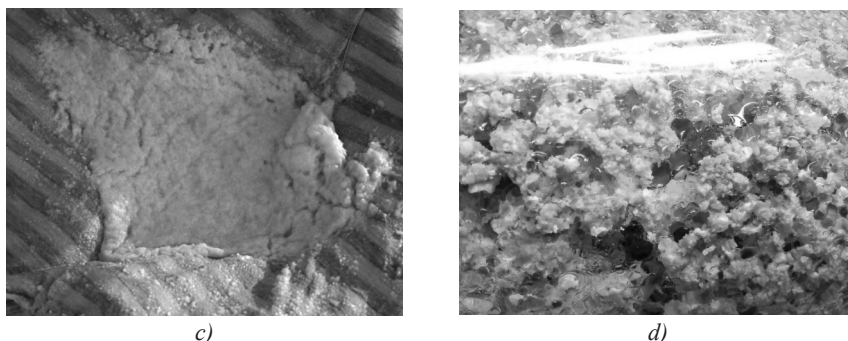
Rys. 9. Zróżnicowanie struktury cząstek TNT wypłukiwanych wysokociśnieniową strugą wodną: a) mieszanina granulek z pozlepianych najdrobniejszych cząstek (wyschniętej „piany”) i okruchów „gryssiku”; b) ziarna suchego „gryssiku”; c) zlepienia najdrobniejszych cząstek, powstałe z wyschniętej „piany”; d) cząstki powstałe z nadtopionego trotylu



a)



b)



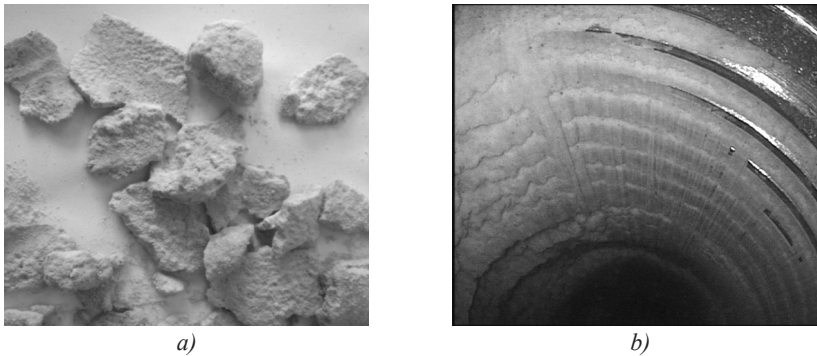
Rys. 10. Odzyskiwanie najdrobniejszych cząstek TNT wyflukiwanych wysokociśnieniową strugą wodną: a) zawiesina cząstek utrzymująca się jako piana na powierzchni wody poprocesowej; b) odczadanie wody; c) wilgotna papka odczadzonych cząstek; d) wyschnięte zlepienia takich cząstek o znacznej porowatości

Najczęściej jednak cząstki TNT wyflukiwane z pocisków wysokociśnieniową strugą wodną mają postać „grysiu” (rys. 11) o przeważającej wielkości # (5 ±15) mm, a niekiedy dochodzącej nawet do # 25 mm. Zbliżona forma takich cząstek występuje praktycznie w każdych, spośród stosowanych tu, warunkach hydrodynamicznych.



Rys. 11. Typowy granulaty wyflukiwanych cząstek TNT ma postać „grysiu”

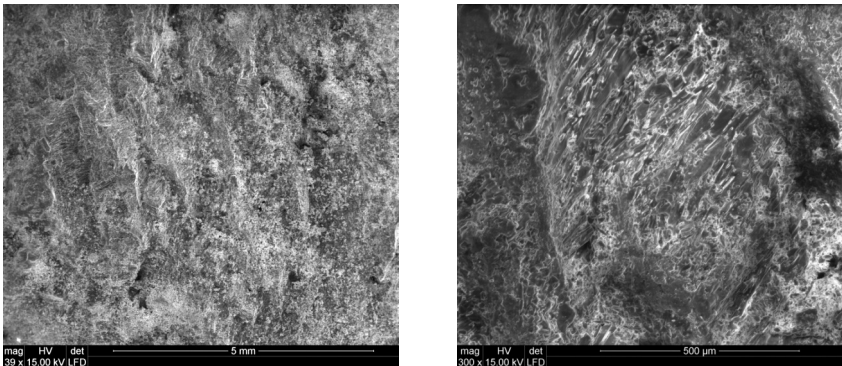
Zgodnie z wcześniejszymi analizami częściowe nadtapianie TNT występuje podczas oddziaływania strugi wodnej o najwyższych ciśnieniach (powyżej 250 MPa). Jest to spowodowane względnie szybkim wyerodowaniem trotylu aż do dna pocisku, a wówczas energia hydrodynamicznego oddziaływania wysokociśnieniowej strugi wodnej wywołuje strefowe podgrzewanie skorupy pocisku. Z kolei podgrzana skorupa powoduje nadtapianie przylegających warstw TNT (rys. 12a), które podlegając dynamicznym przemieszczeniom potrafią w trwały sposób przywierać do różnych powierzchni, zastygając zwłaszcza na zimniejszych miejscach skorupy pocisku, odznaczających się rozwiniętą strukturą geometryczną (rys. 12b).



Rys. 12. Zebrane cząstki nadtopionego TNT: a) uformowane w warunkach wyplukiwania strugą wodną o ciśnieniu 260 MPa oraz jego nalepy; b) zalegające w bruzdach gwintu w otworze zapalnika skorupy pocisku o kalibrze 100 mm

Zaprezentowane powyżej zagadnienia w dużym stopniu umożliwiły zrozumienie mechanizmu decydującego o skuteczności hydrodynamicznego wyplukiwania TNT z typowych pocisków artyleryjskich, a także opracowanie jego wstępnego opisu.

W tym celu nieodzowne jest przeprowadzenie m.in. badań morfologii powierzchni cząstek wyplukiwanego trotylu, która jest bardzo zróżnicowana. Najczęściej taki TNT występuje w postaci granulatu, nazywanego „grysiem”, o wielkości cząstek # (5÷15) mm (maks. do # 25 mm). Ich powierzchnia jest zwykle dość regularna i jedynie sporadycznie występują na niej ślady oddziaływania strugi wodnej. Charakter takich śladów ilustrują przykładowe obrazy SEM, przedstawione na rys. 13.



Rys. 13. Przykładowe obrazy SEM morfologii powierzchni cząstek TNT typu „grysiak”, wyplukanych wysokociśnieniową strugą wodną

Jednak pod względem postrzegalności optycznej, stereometria śladów oddziaływania wysokociśnieniowej strugi wodnej na powierzchni wyplukiwanych cząstek TNT, zostaje uwypuklona wyraziściej dopiero na obrazach struktury SGP. Ukazują się one wówczas w postaci bardziej rozwiniętych zarysowań (rys. 14). Co ważniejsze jednak, to analiza takich struktur SGP, umożliwia skwantyfikowanie ich morfologii według przydatnych w użyciu, następujących wskaźników liczbowych.

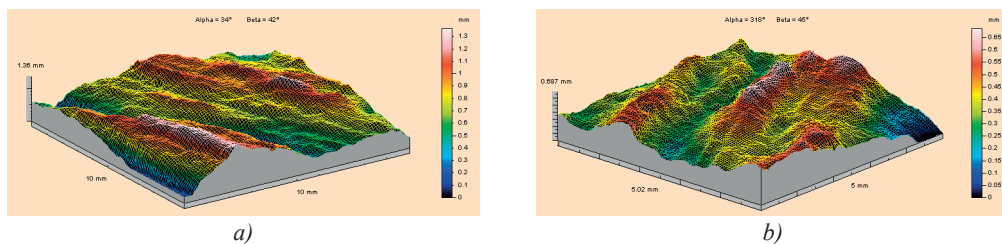
Maksymalny wskaźnik morfologii opisuje się następującym wzorem:

$$W_{maks} = \frac{h_{maks}}{\sqrt{ab}} \quad (2)$$

Z kolei średni wskaźnik morfologii określa się według, trudniejszej do fizycznego zrealizowania, zależności

$$W_m = \frac{\sum h_i}{\sqrt{ab}} \quad (3)$$

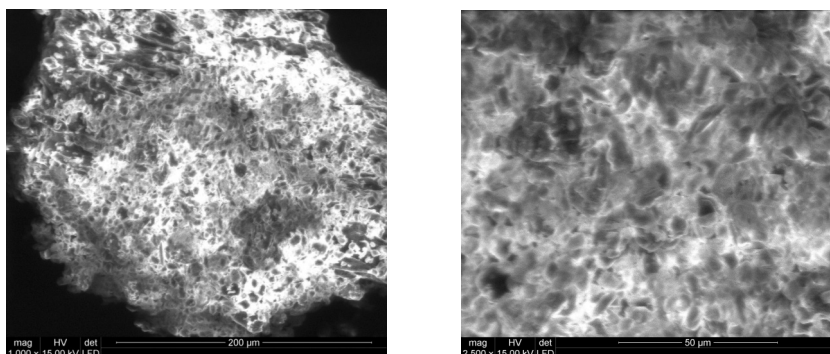
W powyższych wzorach czynniki: h_{maks} i h_i oznaczają odpowiednio maksymalną i jednostkowe wysokości nierówności analizowanej powierzchni o wymiarach: $a \times b$.



Rys. 14. Przykładowe TalyScany powierzchni SGP cząstek TNT typu „grysik”, wyflukanych wysokociśnieniową strugą wodną

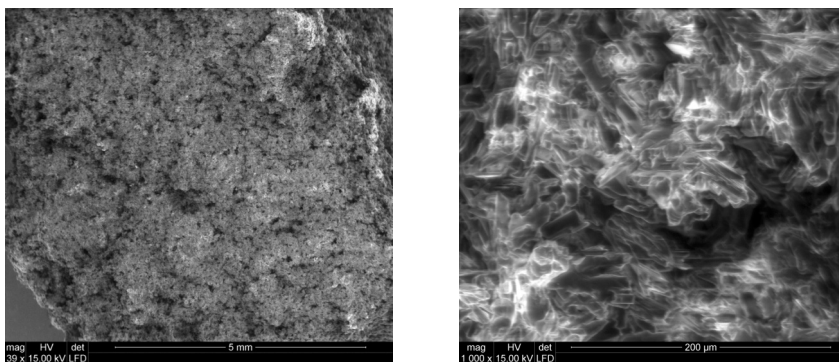
Pomimo, zdawałoby się, optycznego zróżnicowania obydwu przykładów powierzchni, zaprezentowanych na rys. 14, morfologia ich struktur SGP jest jednakowa. Świadczą o tym niemal identyczne wartości wskaźnika W_{maks} , który dla powierzchni SGP przedstawionej rys. 14a jest równy 0,136 natomiast dla SGP z rys. 14b wynosi 0,137.

Znaczna część trotylu jest wyflukiwana w postaci najbardziej drobnocząsteczkowego proszku, który zlepia się tworząc porowatą „pianę”, utrzymującą się na powierzchni wody poprocesowej. Po wyschnięciu taka „piana” zachowuje swą porowatą strukturę, co odzwierciedla się również na jej powierzchni, przedstawionej przykładowo na rys. 15.



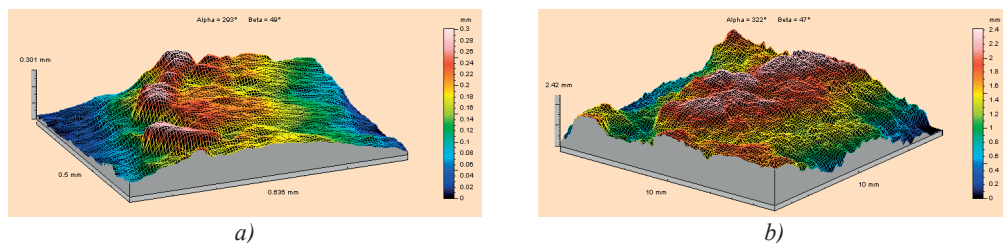
Rys. 15. Przykładowe obrazy SEM powierzchni najbardziej drobnocząsteczkowych cząstek TNT wyflukanych wysokociśnieniową strugą wodną, które tworzą porowatą „pianę” pływającą po wodzie poprocesowej

Stosunkowo nieregularną strukturą powierzchni odznaczają się również cząstki TNT, które uległy nadtopieniu podczas wyflukiwania wysokociśnieniową strugą wodną. Jako przykład ilustrujący taki właśnie stan powierzchni, mogą tu posłużyć obrazy skaningowe zamieszczone na rys. 16. Nieregularność struktury powierzchni obserwuje się tu zarówno w makroskali (rys. 16a), jak i w skali mikro (rys. 16b), na którym widać wyraźny rozrost nowopowstałych struktur.



Rys. 16. Przykładowe obrazy SEM powierzchni cząstki TNT nadtopionej podczas wyplukiwania strugą wodną o ciśnieniu 260 MPa

Ilościowe informacje odnośnie morfologii różnych postaci cząstek TNT wyplukiwanego wysokociśnieniową strugą wodną, można uzyskać z obrazów ich TalyMap, przedstawionych przykładowo na rys. 17.



Rys. 17. Przykładowe TalyScany morfologii powierzchni SGP cząstek TNT wyplukanych wysokociśnieniową strugą wodną: a) najbardziej drobnoziarnistych, które tworzą porowatą „pianę”; b) nadtopionych podczas wyplukiwania

Obrazy takie odzwierciedlają charakter powierzchni cząstek trotylu wyplukiwanego z pocisków, ukazując zarazem ilościowe zróżnicowanie wskaźników powstałej topografii SGP. Wartości maksymalnego wskaźnika W_{maks} morfologii powierzchni SGP (rys. 17a), powstałej z najbardziej drobnoziarnistych cząstek TNT wyplukanych wysokociśnieniową strugą wodną, wynosi aż 0,534. Taka szczególnie wysoko rozwinięta morfologia powierzchni wynika z wysokiej porowatości tej wysuszonej „piany” utworzonej jako konglomerat najbardziej drobnoziarnistych cząstek TNT.

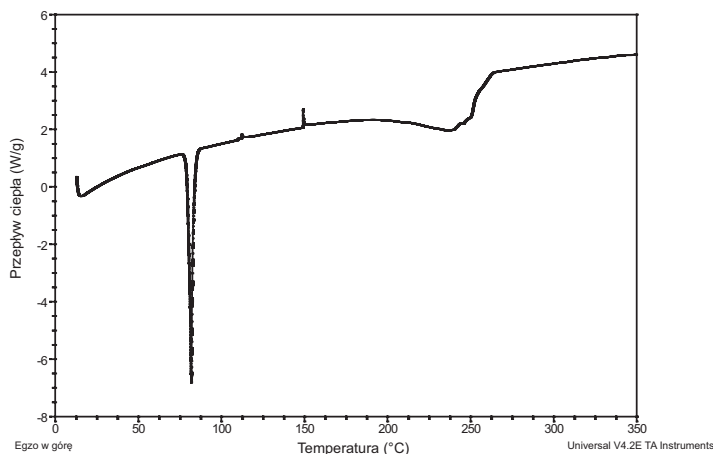
W porównaniu z powyższym, wartość liczbową maksymalnego wskaźnika W_{maks} morfologii dla takiego nadtopionego TNT (rys. 17b), nie jest szczególnie wysoka. Dzieje się tak pomimo Wprawdzie w tym przypadku wskaźnik W_{maks} jest równy aż 0,242, co jest wynikiem głównie stosunkowo dużej nieregularności struktury powierzchni, przedstawionej wcześniej na obrazach SEM (rys. 16), ale i tak wynosi on zaledwie 45% wartości charakteryzującej TNT w postaci wysuszonej „piany”.

6. Właściwości wyplukanego TNT

Trotyl uzyskany podczas hydrostrumieniowego wyplukiwania należy poddać procesowi utylizacji. Sposób wykonania tej operacji zależy od właściwości odzyskanego wysokoenergetycznego MW. Dlatego wykonano między innymi badania odporności termicznej i prędkości detonacji.

W celu wyznaczenia przemian zachodzących w badanych próbkach materiałów wybuchowych zastosowano metodę mikrokalorimetrii skaningowej (DSC). Badania polegały na pomiarze i rejestracji zmian cieplnych wszystkich przemian chemicznych i fazowych, zachodzących w badanej próbce podczas jej ogrzewania od temperatury pokojowej do temperatury rozkładu próbki. Wyniki analizy różnicowej DSC dla jednej z próbek

wyflukanego MW przedstawiono na rys. 18 oraz w tabeli 2.



Rys. 18. Krzywa DSC jednej z próbek wyflukanego TNT

Tab. 2. Wartości temperatur charakterystycznych oraz ciepła przemian próbki TNT uzyskane za pomocą DSC

Parametr	Przemiana I	Przemiana II
Temperatura maksimum pików [°C]	81,75	239,81
Temperatura onset pików [°C]	79,74	188,50
Efekt cieplny przemiany [J g ⁻¹]	133,4	419,6

Bardzo zbliżone wyniki uzyskano dla wszystkich przetestowanych próbek MW. Uzyskane rezultaty eksperymentów świadczą o tym, że w mikroskali TNT charakteryzuje się odpornością termiczną typową dla czystego TNT.

Przeprowadzono również pomiar prędkości detonacji. Ładunki TNT o gęstości nasypowej umieszczano w otoczce PCV o średnicy 30 mm i 45 mm. Bazy pomiarowe (czujniki) znajdowały się w odległości 30 mm. Do inicjowania ładunków każdorazowo stosowano pobudzacze heksogenowy z zapalnikiem typu ERG. Pomiarów dokonano w dwóch wariantach tj. przy gęstości nasypowej TNT (tabela 3) oraz w układzie gdzie trotyl zalany był wodą (tabela 4).

Tab. 3. Prędkość detonacji dla suchego TNT

Nr próbki	Gęstość [g cm ⁻³]	Średnica ładunku [mm]	Prędkość detonacji [m s ⁻¹]
1	0,83	30	3190
2	0,87	45	3700
3	0,78	30	2940
4	0,75	45	2900
5	0,59	30	3270

Tab. 4. Prędkość detonacji dla TNT zalanego wodą (ok. 30 % wody) dla ładunku o średnicy 45 mm

Nr próbki	Gęstość [g cm ⁻³]	Prędkość detonacji [m s ⁻¹]
1	1,05	4030
2	1,10	4890
3	1,00	4010
4	0,91	3130

Uzyskane wyniki pomiarów detonacji korespondują z rezultatami otrzymanymi przez innych autorów. Pokazują między innymi zdolność do detonacji wyplukanego trotylu w przypadku zalania wodą.

7. Możliwości ponownego wykorzystania wyplukanego trotylu

Istotnym zagadnieniem związanym z wyplukiwaniem TNT jest opracowanie takiego sposobu jego wykorzystania lub utylizacji, by nie powodowało to zanieczyszczenia środowiska. Jedną z metod „czystego” zastosowania trotylu pozyskanego podczas deelaracji amunicji jest jego wykorzystanie jako składnika górniczych materiałów wybuchowych lub samodzielnego środka strzałowego.

Do sypek górniczych materiałów wybuchowych trotyl jest dodawany w postaci rozdrobnionej. Dlatego można byłoby stosować w nich drobne frakcje wyplukanego trotylu o rozdrobnieniu około 0,3 mm. Oczywiście wysokoenergetyczny dodatek powinien być wcześniej wysuszony. Natomiast w przypadku materiałów wybuchowych zawieszinowych mogą być stosowane wyższe frakcje trotylu. Trotyl nie musi być suchy, jedynie należy wyznaczyć zawartość wody, która powinna być uwzględniona w potencjalnym składzie zawieszinowego materiału wybuchowego.

Jedną z możliwych form wykorzystania trotylu jest dodatek do emulsyjnych materiałów wybuchowych. W niektórych rozwiązaniach jest on wykorzystywany jako składnik organicznej fazy ciągłej. Potencjalnie może być również dodawany jako wysokoenergetyczny składnik palny. Jednak takie rozwiązanie jest bardzo rzadko stosowane ze względu na zbyt ujemny bilans tlenowy trotylu. Chociaż materiały wybuchowe emulsyjne zawierające duże ilości trotylu mogą być stosowane w górnictwie odkrywkowym, gdzie nie uwzględnia się bilans tlenowy stosowanego środka strzałowego, który wpływa na zawartość związków toksycznych w produktach wybuchu.

Oprócz zastosowania trotylu w górniczych mieszaninach wybuchowych można go używać jako samodzielnego środka strzałowego. W takim przypadku jest on ładowany do dolnego, najczęściej zawodnionego odcinka otworu strzałowego. Natomiast górną część otworu strzałowego, ponad lustrem wody, można ładować niewodoodporną mieszaniną trotylu i saletry amonowej (saletrotem). Zmieniając zawartość komponentów w saletrocie można w szerokim zakresie regulować parametry detonacyjne wybuchowej mieszaniny.

Jedną z możliwości zastosowania trotylu jako górniczego środka strzałowego jest wytwarzanie z niego pobudzaczy. Pobudzacze są stosowane jako ładunki pośrednie do inicjowania górniczych materiałów wybuchowych, które nie mają zdolności do detonacji od różnego typu zapalników lub lontu detonującego. Od pewnego czasu przyjęto w pracach strzałowych założenie, że pobudzacz, oprócz tego że musi być wykonany z wysokoenergetycznego materiału wybuchowego, powinien mieć dużą masę. Dlatego popularne stały się pobudzacze produkowane z trotylu, ponieważ elementem bardzo istotnym jest cena zastosowanego MW.

8. Podsumowanie

Na podstawie analizy wyników badań przeprowadzonych w warunkach poligonowych i laboratoryjnych można sformułować następujące wnioski dotyczące zastosowania wysokociśnieniowej strugi wodnej do odpajania i wyplukiwania trotylu z pocisków artyleryjskich:

- 8.1. Stosowanie strugi wodnej wtryskiwanej równolegle do osi symetrii skorupy pocisku, bez wywoływania zmian jej kąta natrysku, zapewnia zadowalające efekty jedynie przy usuwaniu TNT z pocisków mniejszego kalibru (np. 85 mm).
- 8.2. W celu zwiększenia skuteczności procesu wyplukiwania trotylu z pocisków większego kalibru należy stosować zmienne kąty natrysku strugi, a także używać głowicy roboczej z dwiema dyszami odpowiednio usytuowanymi względem siebie.
- 8.3. Zwiększenie ciśnienia strugi wodnej jest najskuteczniejszym sposobem wzrostu efektywności procesu wyplukiwania TNT z pocisku a dodatkowo zapewnia lepszą jakość erodowanych powierzchni i skuteczność czyszczenia wnętrza skorup.
- 8.4. Należy tak prowadzić proces wyplukiwania TNT z pocisku aby nie tracić energii kinetycznej strugi na zbędne rozgrzewanie skorupy, powodujące niekorzystne nadtapianie przylegających do niej warstw trotylu.
- 8.5. Porównanie efektywności hydrostrumieniowego usuwania zastępczego MW z pocisków, ze skutecznością

- wyłukiwania prawdziwego TNT wskazuje, że istnieje potrzeba przeprowadzenia wielokryterialnej optymalizacji takiego sposobu czyszczenia skorup pocisków artyleryjskich.
- 8.6. W zależności od warunków wyłukiwania TNT z pocisków występują trzy różne postacie jego cząstek: porowata „piana” powstająca ze zlepionych najdrobniejszych jego cząstek, „grysik”, stanowiący największą grupę cząstek TNT o wielkości $\#5 \div 15$ mm i wielkogabarytowe nalepy TNT nadtopionego przez rozgrzaną skorupę.
 - 8.8. Przeanalizowano warunki efektywnego wyłukiwania TNT z typowych pocisków artyleryjskich oraz opracowano zarys mechanizmu decydującego o skuteczności funkcjonowania tego procesu.
 - 8.9. Zastosowanie wielogniazdowego urządzenia technologicznego do hydrostrumieniowego wyłukiwania MW, umożliwi zwielokrotnienie wydajności procesu, proporcjonalnie do liczby równocześnie wykorzystywanych gniazd roboczych.
 - 8.10. Ziarna trotylu wyłukiwanego taką metodą hydrostrumieniową są przydatne na kilka sposobów do wykorzystania, głównie w warunkach przemysłu wydobywczego.
 - 8.11. Na podstawie analizy porównawczej różnych metod stosowanych do usuwania MW ze skorup pocisków artyleryjskich stwierdzono, że opracowana własna metoda hydrostrumieniowa jest szybsza, wydajniejsza i znacznie ekonomiczniejsza od pozostałych.

W podsumowaniu całości dokonań w tym zakresie, można stwierdzić, że wyniki dotychczasowych badań nad wyłukiwaniem TNT ze skorup pocisków artyleryjskich, przeprowadzanych przy użyciu wysokociśnieniowej strugi wodnej, dobranej według technologii opracowanej w Instytucie Niekonwencjonalnych Technologii Hydrostrumieniowych Politechniki Koszalińskiej, są bardzo obiecujące.

Podziękowanie

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2011 jako projekt badawczy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego Nr O N507 003934. Wykonano ją z wykorzystaniem aparatury zakupionej w latach 2006-2007 w ramach europejskiego grantu nr WKP_1/1.4.3/2/2005/3/122/296.

Literatura

- [1] Alba H.H., Haber D.J., Thode W.J., *Safe water abrasive cutting of ammunition*. 7th American Waterjet Conference. Seattle, 1993, pp 759-776.
- [2] Antoshin E.T., Goidin O.P., Tyshkievich M.Yu., *Safety during abrasive water-jet cutting of high explosive components*. International Symposium on Unconventional HydroJetting Technologies. Koszalin, 2007, pp. 175-182.
- [3] Borkowski J.A., Borkowski P.J., Woźniak D., *Podstawy hydrostrumieniowego wyłukiwania materiałów wybuchowych ze skorup pocisków artyleryjskich*. Wysokociśnieniowe technologie hydrostrumieniowe. (ISSN 0239-7129). Wydawnictwo Uczelniane PK. Koszalin, 2008, s. 373-384.
- [4] Borkowski J.A., Borkowski P.J., Woźniak D., *Development of high explosives washing out technology from artillery ammunition*. Journal of Machine Engineering: Water Jetting Technology – Development. Vol. 7 (2007), No. 4, pp. 62-69.
- [5] Borkowski J.A., Borkowski P.J., *Innowacyjne zastosowania technologii hydrostrumieniowych*. Referat główny na Konferencji: „Komplementarne systemy rozwoju regionalnego: Edukacja, Wiedza, Innowacje”, połączonej z posiedzeniem Komitetu Budowy Maszyn PAN. Kołobrzeg, 27-28.10.2010.
- [6] Borkowski P.J., *Podstawy wysokociśnieniowych technologii hydrostrumieniowych* (Rozdz. 6.3.: *Podstawy wyłukiwania materiałów wybuchowych z pocisków artyleryjskich*). ISSN 0239-7129, ISBN 978-83-7365-207-1, Wydawnictwo Uczelniane PK. Koszalin, 2010, s. 260-274.
- [7] Borkowski P.J., Borkowski J.A., Bielecki M., *High explosives washing out from artillery ammunition using hydrojetting technology*, Unconventional and Hydrojetting Technologies. (ISSN 0239-7129). Koszalin, 2009, s. 519-528.
- [8] Borkowski P.J., Borkowski J.A., Bielecki M., *Hydrostrumieniowe wyłukiwanie materiałów wybuchowych z amunicji artyleryjskiej*. Niekonwencjonalne Technologie Hydrostrumieniowe. (ISSN

1426-708X). Wyd. Inżynieria Maszyn, Vol. 13, No. 1-2, Wrocław, 2008, s. 28-36.

- [9] Borkowski P.J., Borkowski J.A., Bielecki M., *Wysokowydajna metoda wyplukiwania materiałów wybuchowych z amunicji artyleryjskiej*. Wysokociśnieniowe technologie hydrostrumieniowe. (ISSN 0239-7129) Wydawnictwo Uczelniane PK. Koszalin, 2008, s. 385-396.
- [10] Borkowski P.J., Borkowski J.A., Woźniak D., *Współczesne metody utylizacji amunicji i materiałów wybuchowych*. Zeszyty Naukowe WM Politechniki Kosz., Koszalin, 2004, nr 33, s. 21-34.
- [11] Borkowski P.J., Borkowski J.A., Woźniak D., *Explosives washing-out technology from artillery ammunition*. International Symposium on Unconventional HydroJetting Technologies. Koszalin, 2007, pp. 183-192.
- [12] Borkowski P.J., Borkowski J.A., Woźniak D., Maranda A., *Examination of high-pressure water jet usability for high explosives (HE) washing out from artillery ammunition*. Central European Journal of Energetic Materials. Vol. 5 (2008), No. 2, pp. 21-35.
- [13] Borkowski P.J., Borkowski J.A., Woźniak D., Szymanowski J., Maranda A., Kostrow R., Milewski E., *The basis of high explosives washing out technology from heavy-artillery ammunition*. 2007 WJTA American Waterjet Conference. Houston, 2007. Paper No. 1-E.
- [14] Chukov A.N., Mikhaylov A.V., Sladkov V.Y., Brenner V.A., Pushkarev A.E., Golovin K.A., *Water and ice technology for removing explosives from unused ammunition*. 15th International Conference on Jetting Technology. Ronneby, 2000, pp. 77-88.
- [15] Foldyna J, Hauner M., Sedlarik A., *Utilization of water jets in SS-23 missiles dismantling*. 14th International Conference on Jetting Technology, 1998, pp. 485-489.
- [16] Fossey R.D., Summers D.A., Blaine J.G., Tyler L.J., *The new generation waterjet explosives cutting system*. 12th International Conference on Jet Cutting Technology. Applications and Opportunities. Rouen, 1994, Paper No. 54.
- [17] Fossey R.D. Blaine J.G., Tyler L.J., Sabin M., Summers D.A., Sims K., *Practical problems in the demilitarization of munitions*. 9th American Waterjet Conf., Dearborn, Michigan, 1997, pp. 673-682.
- [18] Galecki G., Summers D.A., Newkirk J., Fossey R., Johnson M., *Abrasive waterjet cutting through 40 mm munitions casing*. 17th International Conference on Jetting Technology. Mainz, 2004, pp. 395-402.
- [19] Hashish M., Miller P., *Cutting and washout of chemical weapons with high-pressure ammonia jets*. 15th International Conference on Jetting Technology, Ronneby, 2000, pp. 81-92.
- [20] Maranda A., *Przemysłowe materiały wybuchowe*, Wyd. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2010.
- [21] Maranda A., Miszczak M., Nowaczewski J., *Application on the explosives withdrawn from military stocks in the coal mining industry*. 24th International Annual Conference of ICT. Energetic Materials - Intensitivity and Enviromental Awareness. Karlsruhe, 1993, pp. 72-1 – 72-13.
- [22] Maranda A., Nowaczewski J., Statuch J., *Badania nad zastosowaniem prochów bezdymnych oraz trotylu i heksogenu w górnictwie*, Prace Naukowe Głównego Instytutu Górnictwa, Seria Konferencje nr 28. Konferencja Naukowo-Techniczna. Bezpieczeństwo Robót Strzałowych w Górnictwie. Ustroń, 1999.
- [23] Miller D., *Abrasive water jets for demilitarization of explosive materials*. 8th American Waterjet Conference. Houston, 1995, pp. 445-457.
- [24] Miller P.L., Hashish M., *Demilitarization of chemical weapons using high pressure ammonia fluid jets*. 10th American Waterjet Conference. Houston, 1999, pp. 609-616.
- [25] Reynolds S., Miller P.L., *Gradient Technology's high-pressure waterjet demilitarization system*. 17th International Conference on Jetting Technology. Mainz, 2004, pp. 385-394.
- [26] Shimuzu S., Shinoda Y. Peng G., *Flow characteristics of water jet issuing from a fan jet nozzle*. 19th International Conference on Water Jetting. BHR Group. Nottingham, 2008, pp. 55-65.
- [27] Summers D.A., Tyler L.J., Blaine J.G., Fossey R.D., Short J., Craig L., *Consideration in the design of waterjet device for reclamation of missile casings*. 4th U.S. Water Jet Conference. Berkeley, 1987, pp. 51-56.
- [28] Summers D.A., Worsey P. N., *The use of high pressure water jets to wash out explosives*. 6th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact. Cambridge, 1983, pp. 5-8.
- [29] Szymanowski J., Milewski E., Borkowski J., Błachnio B., *Opracowanie założeń do technologii utylizacji środków bojowych wycofywanych z wojsk*. Sprawozdanie WITU Zielonka, 2001, s.1–30.