



Nowe materiały i technologie obróbki cieplno-chemicznej luf broni strzeleckiej*

Tadeusz ŻÓŁCIAK¹, Zbigniew ŁATAŚ¹, Andrzej DĘBSKI²

¹ Instytut Mechaniki Precyzyjnej, ul. Duchnicka 3, 01-796 Warszawa,

² Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, Instytut Techniki Uzbrojenia
ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

Streszczenie. W artykule omówiono wyniki badań obróbki powierzchniowej wewnętrznej powierzchni luf broni strzeleckiej kalibru 5,56 mm. Omówiono kolejno metodę chromowania elektrolitycznego, węgloazotowania kąpielowego TENIFER, technologie typu multiplex, tj. azotowanie / węgloazotowanie fluidalno-gazowe i wymrażanie oraz próżniowe ulepszenie cieplne z wymrażaniem. W Instytucie Mechaniki Precyzyjnej prowadzone są badania nad zastosowaniem technologii obróbek cieplno-chemicznych, których celem jest wyeliminowanie szkodliwej dla środowiska metody chromowania.

Słowa kluczowe: inżynieria materiałowa, lufa broni strzeleckiej, azotowanie, węgloazotowanie

1. WPROWADZENIE

Badania dotyczące możliwości i celowości zastąpienia dotychczas stosowanej stali 30HN2MFA i obróbki powierzchniowej stosowanej w produkcji luf broni strzeleckiej kalibru 5,56 mm prowadzone są w Instytucie Mechaniki Precyzyjnej (IMP) od kilku lat.

Dotychczas lufy broni strzeleckiej kalibru 5,56 mm i podobne są w większości produkowane z niskostopowych stali konstrukcyjnych, podobnych do używanej do tego celu krajowej stali 30HN2MFA.

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

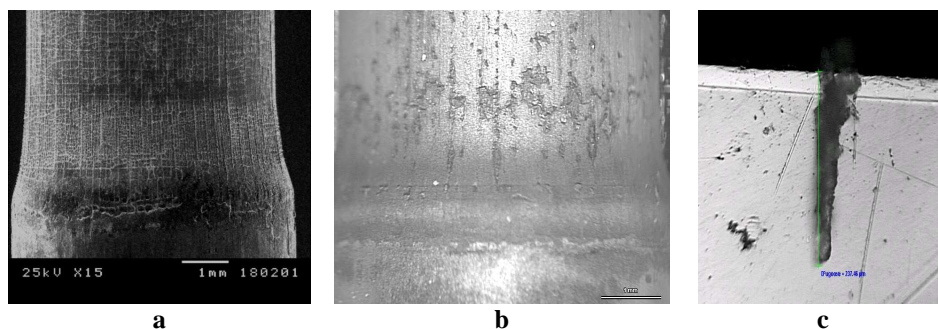
Po wstępnej obróbce mechanicznej elementy na lufy z takich stali są ulepszone cieplnie do twardości przeważnie w zakresie 25÷35 HRC, po czym są poddawane obróbce plastycznej mechanicznej wykańczającej. Rozpowszechnione elektrolityczne chromowanie przewodów tak wykonanych luf ma na celu ich zabezpieczenie przed korozją podczas długotrwałego, często wieloletniego składowania, a także w pewnym stopniu chroni wewnątrz lufy przed niszczeniem od gazów prochowych. Chemiczne czernienie lub także następne lakierowanie zewnętrznej powierzchni luf o przewodach chromowanych elektrolitycznie służy jako środek ich zabezpieczenia przeciwkorozyjnego i przeciwodblaskowego.

Poszukiwania nowych technologii m.in. cieplnych, cieplno-chemicznych połączonych z głębokim wymrażaniem może zagwarantować wzrost trwałości finalnego wyrobu przy mniejszej uciążliwości technologii dla środowiska naturalnego [6].

2. METODA CHROMOWANIA ELEKTROLITYCZNEGO

Badaniom poddano lufy broni strzeleckiej kalibru 5,56 mm wykonane ze stali konstrukcyjnej 30HN2MFA chromowanej elektrolitycznie [4]. W badaniach stosowano przyspieszoną metodę oceny trwałości lufy, polegającą na wystrzeleniu w krótkim czasie 1000 szt. amunicji. Pomiędzy wystrzeliwaniem kolejnych partii amunicji lufę ochładzano w powietrzu i obserwowano stopień zużycia przewodu za pomocą boroskopu. Po badaniach lufy przecięto wzdłuż przewodu i poddano badaniom metalograficznym. Lufy chromowane elektrolitycznie uległy zniszczeniu głównie przez cykliczne zmiany objętości podłoża stalowego, powodujące pękanie i wykruszanie leżącej na nim warstwy chromu. Taki charakter zużycia występuje praktycznie od samego początku eksploatacji i powoduje stałe obniżanie prędkości wylotowej pocisków.

Głównymi przyczynami zużycia luf chromowanych elektrolitycznie są zmęczenie cieplne intensyfikowane przemianami strukturalnymi stali podczas cyklicznego nagrzewania i oziębiania lufy, zwłaszcza przy równoczesnym działaniu ciśnienia w fazie nagrzewania (podczas spalania wybuchowego) oraz dyfuzja węgla i innych produktów spalania prochu strzelniczego, które sprzyjają nadtapianiu podłoża. Przemiana strukturalna w stali konstrukcyjnej występuje już od temperatury ok. 730°C, to jest poniżej temperatur, do jakich nagrzewa się wierzchnia warstwa przewodu lufy, a ponadto im wyższa temperatura tej warstwy, tym większe są skutki jej niszczenia od korozji gazowej. Widok przewodu lufy chromowanej elektrolitycznie po próbach strzelania pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Widok przewodu lufy w obszarze komory nabojeowej ze stali 30HN2MFA chromowanej elektrolitycznie wraz z pomiarem głębokości pęknięć (266,04 μm) [3, 4]

Fig. 1. Sight of barrel bore in the area of cartridge chamber made from 30HN2MFA steel, chromium electroplated, with depth measurements of cracks (266,04 μm) [3, 4]

3. METODA WĘGLOAZOTOWANIA KĄPIELOWEGO TENIFER

Ograniczona skuteczność elektrolitycznego chromowania jako sposobu ochrony przewodu lufy od niszczenia wskutek oddziaływania gazów prochowych oraz szkodliwość tego procesu dla środowiska naturalnego spowodowały zainteresowanie przemysłu procesem kąpielowego węgloazotowania metodą TENIFER [2]. Technologia ta jest stosowana w przemyśle metalowym od lat 70. ubiegłego wieku, pomimo tego, że odpady cyjankowe powstające przy jej wykorzystaniu są nie mniej uciążliwe dla środowiska od odpadów po procesie chromowania elektrolitycznego.

Proces węgloazotowania kąpielowego, dzięki jego połączeniu z procesem pasywacji powierzchni wsadu oraz obróbką mechaniczną polerowania międzyoperacyjnego, umożliwia podwyższenie odporności na zużycie, korozję, erozję oraz wytrzymałości zmęczeniowej. Ponadto zabiegi te nadają wyrobom estetyczny wizualnie wygląd (metalicznie błyszcząca, czarna lub ciemnoszara powierzchnia).

Proces TENIFER, nazywany Quench-Polish-Quench (QPQ), składa się z kilku etapów (tab. 1). Przed rozpoczęciem obróbki wsad jest dokładnie oczyszczany, gdyż kąpiele solne są bardzo wrażliwe na zanieczyszczenia. W celu zmniejszenia odkształceń, lufy nagrzewane są w powietrzu do temperatury 350°C. Węgloazotowanie wykonywane jest w kąpeli solnej (TF1) w temperaturze 570°C.

Po węgloazotowaniu wsad przenoszony jest do chłodzącej kąpeli pasywacyjnej (AB1) – w tym etapie przebiega czernienie wstępne, a następnie chłodzony jest w wodzie. Kolejnym zabiegiem jest polerowanie mechaniczne w strumieniu kulek szklanych o granulacji 0,04÷0,07 mm.

Końcowym zabiegiem jest czernienie końcowe w kąpeli pasywacyjnej (AB1).

TABELA 1. Zasadnicze etapy metody węgloazotowania kąpielowego TENIFER

TABLE 1. Essential stages of bath cyaniding „TENIFER” method

Etap	Proces/Parametry procesu
Q	Węgloazotowanie TENIFER / kąpiel TF1, 570°C/60' + 15'
	Czernienie wstępne / kąpiel AB1 380°C/20'
	Chłodzenie / woda, temp. max. 40°C
P	Polerowanie mechaniczne / strumień kulek szklanych o granulacji 0,04÷0,07 mm, ciśnienie max. 4 bar
Q	Czernienie końcowe / kąpiel AB1

Procesowi TENIFER poddaje się całe, wykonane ze stali konstrukcyjnych, uprzednio ulepszone cieplnie lufy broni strzeleckiej krótkiej, zwłaszcza pistolety. Wytworzona w ten sposób powierzchniowa warstwa węgloazotowana nadaje lufie dużą odporność na korozję, estetyczne ciemne przeciwodblaskowe zabarwienie i jest bardzo odporna na ścieranie, zaś przewód lufy dodatkowo uodpornia na niszczenie od gazów prochowych.

Warstwy węgloazotków w technologii TENIFER powstają w wyniku utleniania soli cyjanowo-cyjanianowych podczas ich przepływu przez przewód lufy i dyfuzji węgla i azotu.

Nie znaleziono informacji o produkcyjnym stosowaniu kąpielowego węgloazotowania metodą TENIFER lub inną tego typu do luf broni strzeleckiej innej niż krótkiej. Tłumaczy się to technicznymi przeszkodami dostosowania tej technologii do długich otworów o małej średnicy, w których przepływ roztopionej węgloazotującej soli może być utrudniony. Jakkolwiek technologia TENIFER potwierdziła zasadność jej zastosowania produkcyjnego na lufach do pistoletu kalibru 9 mm oraz w próbach do dłuższych luf kalibru 5,56 mm, to brak jest danych o równomierności i grubości uzyskanych warstw na całej długości lufy.

4. METODY MULTIPLEX

Technologie typu multiplex [6], łączące obróbki cieplne i cieplno-chemiczne: próżniowe ulepszanie cieplne, azotowanie / węgloazotowanie dyfuzyjne z głębokim wymrażaniem (-180°C), umożliwiają umacnianie przewodów lufy kalibru 5,56 mm, a w konsekwencji zwiększają trwałość eksploatacyjną w stosunku do stosowanych dotychczas obróbek.

Jako skutki wymrażania wymienia się najczęściej poprawę celności broni, następnie zmniejszenie zużycia, to jest przedłużenie trwałości lufy, a także

łatwiejsze usuwanie osadu tworzącego się w lufie oraz zwiększenie prędkości wylotowej pocisku.

Poprawę celności broni w wyniku długookresowego wymrażania przypisuje się zmniejszeniu naprężeń wewnętrznych zalegających w lufie po operacjach obróbki plastycznej, szczególnie po przetłaczaniu na trzpieniu, a także po hartowaniu, wierceniu i bruzdowaniu. Wynikiem tak obniżonego poziomu naprężeń wewnętrznych mają być mniejsze ich zmiany i odpowiednio mniejsze wywołane przez nie odkształcenia lufy od jej nagrzewania się po kolejnych strzałach i w rezultacie mniejszy rozrzut kolejnych wystrzelianych pocisków [1].

4.1. Azotowanie / węgloazotowanie fluidalno-gazowe i wymrażanie

W celu umożliwienia prawidłowego przepływu gazowej atmosfery azotującej lub węgloazotującej przez cienki i długi przewód obrabianej lufy wykonany ze stali 38HMJ, opracowano metodę fluidalno-gazową, która zgłoszona została do opatentowania i wykorzystano ją w niniejszej pracy. Zbudowano stanowisko umożliwiające przeprowadzenie procesów azotowania i węgloazotowania. W tym celu zaadaptowany został piec fluidalny IMP typu FP-700 wyposażony w retortę o wysokości 900 mm i średnicy 100 mm wraz z dystrybutorem atmosfery. Jako materiał złoża wykorzystano elektrokorund. Wymrażanie do -180°C przeprowadzono po ulepszeniu cieplnym w specjalnej wymrażarce, jako osobny proces technologiczny [3].

Przykładowe parametry procesów fluidalnych przedstawiono w tabeli 2. Widok przewodów luf po próbach trwałości pokazano na rysunkach 2 i 3.

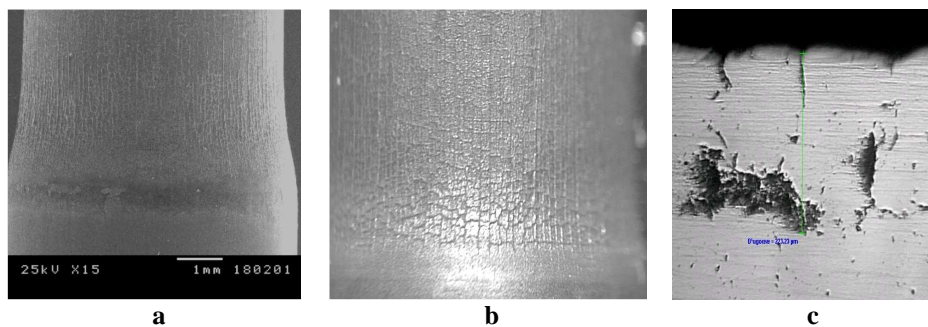
Węgloazotowana lufa ze stali 38HMJ charakteryzuje się stosunkowo niewielkimi uszkodzeniami w postaci drobnej siatki pęknięć od zmęczenia cieplnego. Zaobserwowano charakterystyczny dla warstw dyfuzyjnych przebieg pęknięć o kierunku wzdłużnym pod powierzchnią i dochodzące do nich prostopadle pęknięcia od zmęczenia cieplnego (rys. 2).

W przypadku azotowania stwierdzono siatkę pęknięć w komorze naboju, ale bez śladów wykruszeń warstwy utwardzonej. W strefie komory naboju i stożka przejściowego wystąpiła regularna siatka pęknięć w wyniku zmęczenia cieplnego. Zużycie w strefie przewodu gazowego jest minimalne. Wskazuje to, że warstwa azotowana chroni dobrze strefy narażone na erozję od gorących gazów.

TABELA 2. Zasadnicze parametry procesu azotowania i węgloazotowania fluidalnego

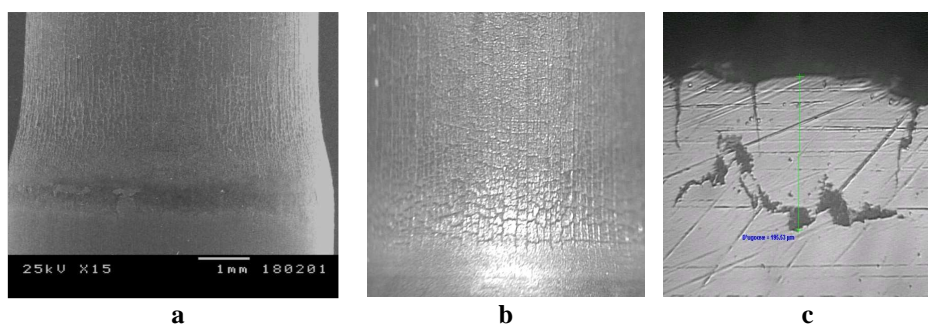
TABLE 2. Essential parameters for nitriding and fluidal cyaniding processes

Rodzaj procesu	Atmosfera	T[$^{\circ}\text{C}$]	t [h]
Węgloazotowanie	50% NH_3 + 50% endogaz	570	2
Azotowanie	NH_3	570	4



Rys. 2. Widok przewodu lufy w obszarze komory naboju ze stali 38HMJ – węglonitrowanej wraz z pomiarem głębokości pęknięć (195,53 μm) [3, 4]

Fig. 2. Sight of barrel bore in the area of cartridge chamber made from 38HMJ steel – cyanided, with depth measurements of cracks (195,53 μm) [3, 4]



Rys. 3. Widok przewodu lufy w obszarze komory naboju ze stali 38HMJ – azotowanej wraz z pomiarem głębokości pęknięć (223,23 μm) [3, 4]

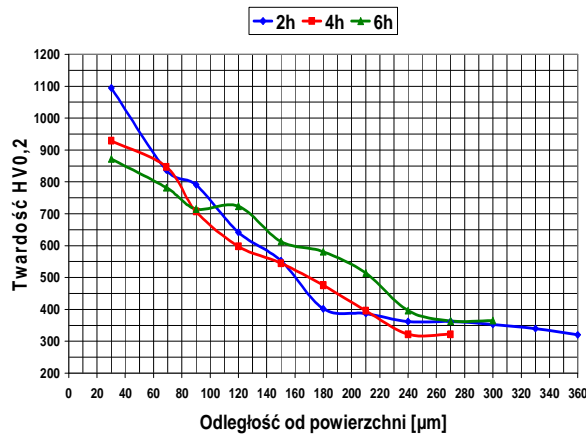
Fig. 3. Sight of barrel bore in the area of cartridge chamber made from 38HMJ steel – nitrided, with depth measurements of cracks (223,23 μm) [3, 4]

Na rysunkach 4 i 5 pokazano rozkłady twardości warstw azotowanych (rys. 4) oraz węglonitrowanych (rys. 5) uzyskanych na stali 38HMJ.

Na podstawie badań metalograficznych określono grubości warstw związków w badanych próbkach. Uzyskane grubości warstw azotków żelaza o strukturze $\epsilon + \gamma'$ wynosiły średnio 20 i 16 μm odpowiednio dla procesu azotowania i węglonitrowania (rys. 6).

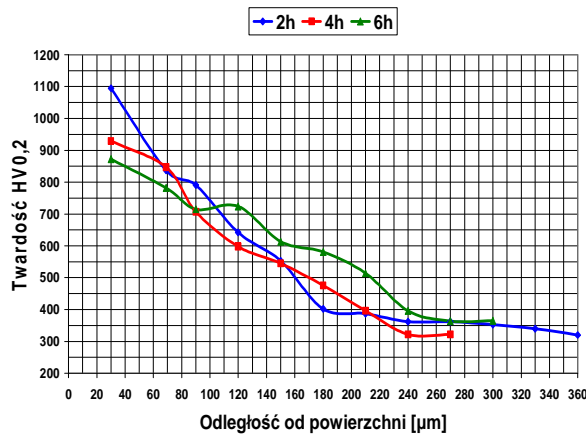
Warstwy węglonitrowane wykazują mniejszą głębokość utwardzenia w porównaniu z warstwami azotowanymi, przy czym w strefie komory naboju lufy azotowanej uszkodzenia są znacznie mniejsze niż w lufie węglonitrowanej.

Badania odporności na korozję przy natrysku obojętną mgłą solną wykazały wysoką odporność azotowanych lub węglonitrowanych stali 38HMJ i 30HN2MFA i niższą odporność w przypadku stali WCL [3].



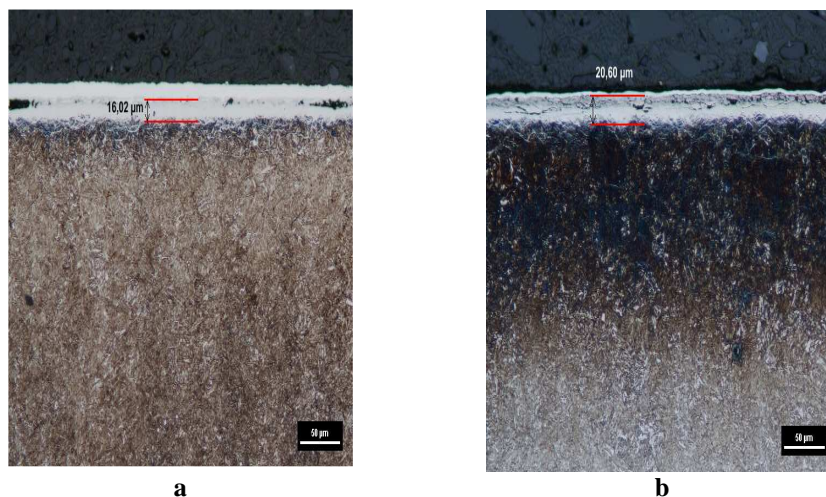
Rys. 4. Rozkłady twardości stali 38HMJ po azotowaniu w temperaturze 570°C w atmosferze NH₃

Fig. 4. Hardness distribution for steel 38HMJ after nitriding in temperature of 570°C, in NH₃ atmosphere



Rys. 5. Rozkłady twardości stali 38HMJ po węglazotowaniu w temperaturze 570°C w atmosferze NH₃/ endogaz

Fig. 5. Hardness distribution for steel 38HMJ after cyaniding in temperature of 570°C, in atmosphere composed of NH₃ and EndogasTM



Rys. 6. Mikrostruktury stali 38HMJ węglonitrowanej w temperaturze 570°C w atmosferze N₂/ endogaz w czasie 4 h (a) oraz azotowanej w temperaturze 570°C w atmosferze NH₃ (b)

Fig. 6. Microstructures of 38HMJ steel, cyanided in temperature of 570°C in N₂/ Endogas™ atmosphere in time of 4h (a) and nitrided in temperature of 570°C in NH₃ atmosphere (b)

4.2. Próżniowe ulepszenie cieplne z wymrażaniem

Obróbkę cieplną lufy wykonanej ze stali WCL przeprowadzono w piecu próżniowym, w zamkniętym cyklu technologicznym (połączonym procesie), obejmującym hartowanie w gazie, wymrażanie i odpuszczanie (tab. 3).

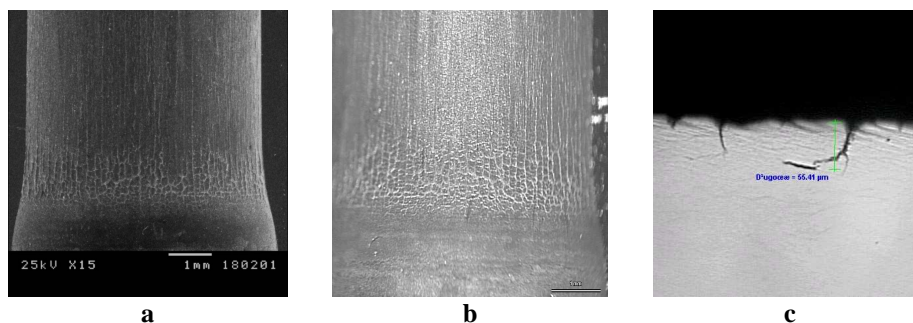
TABELA 3. Zasadnicze parametry obróbki cieplnej

TABLE 3. Essential heat treatment parameters

p [hPa]	T [°C]	p _{N₂} [bar]	T [°C]	t [h]
5×10^{-2}	1100	10	-180	6

Widok przewodu lufy ze stali WCL obrobionej cieplnie na twardość ok. 400 HV30 i poddanej strzelaniu pokazano na rys. 7. Jak wynika z przedstawionych obrazów, lufa ze stali WCL ulepszona cieplnie na twardość stosowaną przy obróbce narzędzi do pracy na gorąco wykazała najmniejsze zużycie we wszystkich strefach i dużą odporność na rozwój pęknięć w głąb materiału.

Na podstawie uzyskanych wstępnych wyników badań, zaproponowano nowe rozwiązanie problemu obróbki luf przez zastosowanie stali WCL (1.2343) ulepszonej cieplnie (i wymrożonej) na twardość ok. 400 HV30 [2, 3], w przypadku której uzyskano najmniejsze zużycie przewodu po 1000 strzałów.



Rys. 7. Widok przewodu lufy w obszarze komory naboju ze stali WCL – ulepszonej cieplnie wraz z pomiarem głębokości pęknięć (55,41 μm) [3, 4]

Fig. 7. Sight of barrel bore in the area of cartridge chamber made from WCL steel – heat treated, with depth measurements of cracks (55,41 μm) [3, 4]

5. PODSUMOWANIE

W oparciu o badania wstępne i wykonane prace badawcze przez IMP i WAT wykazano możliwości i celowość zastosowania stali 38HMJ i WCL oraz obróbek powierzchniowych w wykonaniu luf broni strzeleckiej kalibru 5,56 mm jako alternatywy dotychczasowego stosowania w produkcji tych luf ze stali konstrukcyjnej typu 30HN2MFA i elektrolitycznego chromowania.

Najlepsze wyniki badań zużycia po strzelaniu uzyskano na lufach ze stali WCL ulepszonej cieplnie na twardość 400 HV. Wydaje się więc celowe zastosowanie takiej obróbki już na wyrobach gotowych i zabezpieczenie ich konwencjonalnie przed korozją. Zastosowanie stali WCL przy rezygnacji z obróbki cieplno-chemicznej wymaga zahartowania luf po obróbce mechanicznej (przy uwzględnieniu tolerancji na skurcz) w piecu próżniowym z temperatury 1010°C z chłodzeniem w azocie pod ciśnieniem a następnie wymrożeniu ich w temp. ok. -180°C i odpuszczeniu w próżni na twardość 400 HV. W obecnym stanie techniki budowy pieców próżniowych, istnieje możliwość przeprowadzenia procesu technologicznego w jednej komorze pieca, w zamkniętym cyklu, na lufach wykonanych na gotowo. Po ulepszeniu cieplnym lufy należy poddać czernieniu.

Przy zastosowaniu stali 38HMJ jako alternatywnej dla stali 30HN2MFA, wskazane jest węglazotowanie lub azotowanie z następnym wymrażaniem w temperaturze -180°C . Procesy te zapewniają również dobrą odporność luf na korozję atmosferyczną.

Końcowe wyniki badań z realizacji projektu rozwojowego [6], zgodne z WTO u producenta broni, pozwolą na opracowanie wytycznych do przemysłowego zastosowania technologii obróbki cieplnej i powierzchniowej luf kalibru 5,56 mm z wybranych gatunków stali.

Odnosi się to wyników, które mogą być użytkowo najbardziej konkurencyjne w stosunku do dotychczasowej metody z powodów ekologicznych, techniczno-technologicznych i ekonomicznych.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011.

LITERATURA

- [1] Rogalski Z., Łataś Z. i in., Wymrażanie i azotowanie z wymrażaniem elementów broni strzeleckiej. *Sprawozdanie z projektu badawczego nr OT00C 034*, 2005-2008, Warszawa, 2008.
- [2] Łataś Z., Ciski A., Jęczmyk A., Węglazotowanie z wymrażaniem luf karabinka szturmowego wz. 96 „Beryl”, *Materiały XVI Konferencji Naukowo-Technicznej „Problemy Rozwoju, Produkcji i Eksploatacji Techniki Uzbrojenia”*, Rynia 2007.
- [3] Żółciak T., Łataś Z. i in., Próby zastosowania niekonwencjonalnych stali i technologii obróbki powierzchni dla podwyższenia trwałości luf broni strzeleckiej kalibru 5,56 mm. *Sprawozdanie z projektu badawczego nr OT00B 021*, 2005-2008, Warszawa, 2008.
- [4] Dębski A. i in., Materiałowo-technologiczne badania optymalizacyjne pod kątem zwiększenia trwałości luf broni strzeleckiej. *Sprawozdanie z projektu badawczego nr OT00B 008 06*, 2007-2009, Warszawa 2009.
- [5] Żółciak T., Łataś Z., Dębski A., Ciski A., Kowalski S., Zastosowanie niekonwencjonalnych stali i technologii obróbki powierzchni dla podwyższenia trwałości luf broni strzeleckiej kalibru 5,56 mm, *Biuletyn WAT* nr 2 (2009), Warszawa, 2009.
- [6] Dębski A., Łataś Z., Żółciak T. i in., Badania materiałowo-technologiczne nad zastosowaniem nowych materiałów i ekologicznych obróbek typu multiplex w wytwarzaniu luf broni strzeleckiej. *Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego rozwojowego nr 0025 RT009*. 2009-2011.

New Materials and Thermo-Chemical Treatment Technologies of Small Arms Barrels

Tadeusz ŻÓŁCIAK, Zbigniew ŁATAŚ, Andrzej DEBSKI

Abstract. This paper discusses the research results of surface treatment of internal surface of barrel cal. 5,56 mm. The following technologies are described: chromium electroplating, bath cyaniding TENIFER, multiplex technologies, such as nitriding / cyaniding, both fluidal and gaseous and deep freezing, and also vacuum heat treatment with deep freezing. Institute of Precision Mechanics performs research in the field of applying improved and varied thermo-chemical treatments to eliminate the need for harmful to environment chromizing technology.

Keywords: material engineering, small arms barrel, nitriding, cyaniding