



## Wpływ regulowanego azotowania gazowego na trwałość eksploatacyjną przewodu lufy broni strzeleckiej\*

Zbigniew ŁATAŚ, Jerzy MICHALSKI, Jan TACIKOWSKI,  
Marek BETIUK, Piotr WACH, Jan SENATORSKI,  
Kryspin BURDYŃSKI

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

**Streszczenie.** Lufy broni strzeleckiej w większości są produkowane z niskostopowych stali konstrukcyjnych, podobnych do stali 30HN2MFA [3, 5]. Celem badawczym było poszukiwanie nowych technologii typu multiplex m.in. ciepłno-chemicznych, połączonych z głębokim wymrażaniem, które mogą zagwarantować trwałość finalną lufy przy mniejszej uciążliwości technologii dla środowiska naturalnego. Jedną z takich metod jest ulepszanie cieplne lufy, połączone w zamkniętym cyklu technologicznym z głębokim wymrażaniem, a następnie poddanie jej regulowanemu azotowaniu gazowemu [1]. Omówiono wyniki badań procesów regulowanego azotowania gazowego konstrukcyjnej stali stopowej gatunku 38HMJ, używanej na części maszyn, narażone w eksploatacji na korozję, zużycie przez tarcie i zmęczenie oraz udary cieplne, przewidzianej do zastąpienia obecnie stosowanej stali lufowej 30HN2MFA. Procesy azotowania prowadzono w zakresie temperatury: 520-560°C i w czasie 4-6 h, w atmosferze  $\text{NH}_3\text{-N}_2$  bądź  $\text{NH}_3\text{-NH}_{3\text{zdys}}$ . Z regulowaniem ich składu i potencjału azotowego w okresie nagrzewania i w temperaturze procesu. Podano przykłady i omówiono wpływ rozwiązań procesu umożliwiający wytwarzanie warstw azotowanych na stali 38HMJ z warstwą azotków żelaza przy powierzchni, przeznaczone do narażeń korozyjnych i tribologicznych oraz z ograniczoną warstwą azotków żelaza przy powierzchni, przeznaczone do narażeń zmęczeniowych.

**Słowa kluczowe:** inżynieria materiałowa, azotowanie regulowane, potencjał azotowy, azotek żelaza, atmosfera azotująca, warstwa dyfuzyjna, lufa strzelecka

\* Artykuł został opracowany na podstawie referatu prezentowanego podczas IX Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Pułtusk, 25-28 września 2012 r.

## 1. WSTĘP

W wyniku ciśnienia gazów prochowych, wysokiej temperatury spalania i ruchu pocisku wcinającego się w bruzdy przewodu lufowego powstaje, w obszarach granicznych z powierzchnią wewnętrzną lufy, złożony stan naprężeń mechanicznych generujący mechanizmy zużycia broni. Jak wykazano w pracy [1], bezwzględna wartość powstających w czasie strzału naprężeń i odkształceń obwodowych jest większa niż odkształceń promieniowych. Istotną rolę w procesie zużycia powierzchni lufy odgrywa sprężystość materiału powierzchni gwintowanej. Na styku powierzchni z przemieszczającym się pociskiem występują tak duże siły promieniowe, że wartość powstających naprężeń może chwilowo przekraczać wytrzymałość doraźną materiału prowadząc do inicjacji pęknięć.

W pracy omówiono zagadnienia wytwarzania warstw azotowanych na konstrukcyjnej stali stopowej 38HMJ (N135M wg ASTM) z przypowierzchniowymi warstwami azotków żelaza o różnym składzie fazowym i różnej grubości, przeznaczonymi na dokładne części maszyn narażonych na działanie czynników korozyjnych, tribologicznych i zmęczeniowych. Zamierzeniem podjętych badań było opracowanie technologii azotowania przewodów luf broni strzeleckiej kalibru 5,56 mm, umożliwiających wytwarzanie dwóch rodzajów warstw azotowanych, w celu porównania ich właściwości eksploatacyjnych:

- ze zwartą warstwą azotków żelaza o strukturze  $\epsilon + \gamma'_{\text{wydz}}$  z ograniczoną do minimum strefą porowatą przy powierzchni o grubości  $\leq 17 \mu\text{m}$  (wariant A),
- z ograniczoną warstwą azotków żelaza oraz warstwą roztworową porównywalną z wariantem A, o grubości od 0 do  $5 \mu\text{m}$  (wariant B).

W pierwszym wariantcie (A) warstwy azotowane mogą być zastosowane na części maszyn eksploatowane w warunkach korozyjnych i tribologicznych. Powinny mieć dużą twardość i odpowiednią grubość przypowierzchniowej warstwy azotków żelaza. Warstwy azotowane z warstwą azotków żelaza powinny odznaczać się również ograniczoną grubością tej ostatniej ze względu na małe tolerancje wymiarowe dokładnych części, dla których są przeznaczone. Przyjęto przedział grubości warstwy azotków 13-15  $\mu\text{m}$  jako odniesienie do porównania grubości warstw azotkowych, jakie są uzyskiwane w procesach chromowania i metodą Tenifer. Warstwy powinny także spełniać wymagania odnośnie do odporności na korozję.

W drugim wariantcie (B) warstwy azotowane mogą być zastosowane do wytwarzania części maszyn eksploatowanych w warunkach zmęczeniowych i udarnościowych. Warstwy te powinny mieć ograniczoną warstwą azotków od 0 do  $5 \mu\text{m}$ , wysoką twardość i odpowiednią grubość dyfuzyjną warstwy azotowanej.

## 2. MATERIAŁ DO BADAŃ I METODYKA BADAŃ

### 2.1. Materiał do badań

Do badań przewidziano konstrukcyjną stal stopową gatunku 38HMJ, szeroko stosowaną w przemyśle do azotowania, jako zamiennik na lufy ze stali 30HN2MFA. Badania przeprowadzono na próbkach i lufach. Skład chemiczny stali na próbki i lufy podano w tabeli 1. Stal była ulepszana cieplnie przed azotowaniem. Parametry ulepszenia cieplnego wraz z wymrażaniem stali w zamkniętym procesie technologicznym, przed procesem azotowania, podano w tabeli 2.

Tabela 1. Skład chemiczny stali stosowanych w badaniach (% wag.)

Table 1. Chemical composition of investigated steel (% weight)

38 HMJ wg PN / N135M wg ASTM							
C	Mn	Si	P max	S max	Cr	Mo	Al
0,41	0,4	0,21	0,025	0,035	1,45	0,22	1,01

Tabela 2. Parametry próżniowego ulepszenia cieplnego i wymrażania stali 38HMJ

Table 2. Parameters of heat treatment and cryogenic treatment of 38HMJ steel

Hartowanie (H)	Wymrażanie (W)	Odpuszczanie (O)	Twardość
890-900°C/0,4 h	-180°C/30 min.	620°C/2 h 660°C/3 h	30-31HRC

### 2.2. Urządzenie i procesy azotowania

Azotowanie próbek, odkuwek produkcyjnych luf i luf prowadzono w przemysłowym piecu wglębnym typu Nx609, produkcji firmy Nitrex Metal Inc., o wymiarach retorty  $\phi$  600 × 900 mm z komputerowym systemem sterowania procesem. Piec ten jest wyposażony w dysocjator amoniaku oraz układ szybkiego chłodzenia wsadu po procesie, a także w neutralizator atmosfery odlotowej. Komputerowy system sterowania umożliwia precyzyjną kontrolę i regulację składu, natężenia przepływu i potencjału azotowego atmosfery oraz temperatury i czasu procesu. Umożliwia również monitorowanie i pełną rejestrację parametrów procesu w każdym z jego etapów, bardzo użyteczną w analizowaniu i projektowaniu procesów.

Procesy azotowania prowadzono w zakresie temperatury 520-560°C i czasu 4-6 h w atmosferach azotu i amoniaku bądź ze zdysocjowanym amoniakiem. Parametry procesów regulowanego azotowania gazowego podano w tabeli 3.

Parametry procesów były zróżnicowane, zależnie od rodzaju wytwarzanych warstw.

Do wytwarzania warstw azotowanych ze zwartą warstwą azotków żelaza (bez porów) stosowano temperaturę azotowania (560°C), czasy do 6 h i atmosferę ze zdysocjowanym amoniakiem o potencjale azotowym 3,20 [2].

Z kolei do wytwarzania warstw azotowanych z ograniczoną warstwą azotków żelaza, temperatury azotowania były niższe (520°C), a czas do 4 h, zaś atmosfera wlotowa składała się z mieszaniny amoniaku z azotem, co zapewniło zmniejszenie rozporządzalności azotu [2].

Tabela 3. Parametry regulowanego azotowania gazowego dla wariantu A i B oraz właściwości warstw azotowanych

Table 3. Parameters of controlled gas nitriding for A and B variants and properties of nitrided layer

<i>Nr Procesu</i>	<b>847 – A</b>	<b>900 – B</b>
Temperatura (°C)	560	520
Czas procesu (h)	6	4
Skład atm. – 1 stopień	80NH <sub>3</sub> -20NH <sub>3</sub> diss	30NH <sub>3</sub> -70N <sub>2</sub>
Skład atm. – 2 stopień	nie było	15NH <sub>3</sub> -85N <sub>2</sub>
Twardość rdzenia (HV)	300	300
Twardość powierzchniowa HV 0,5	1120	1150
gr + 50 μm (grubość warstwy rozтворowej)	250	220
Grubość azotków (μm)	12-17	2-5

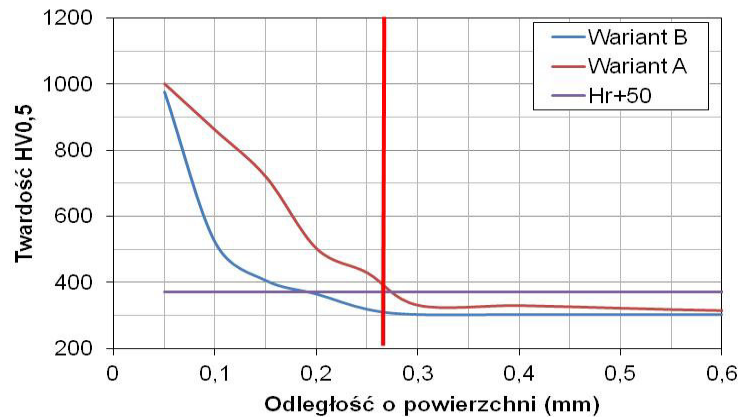
Przy realizowaniu procesów kontrola i regulacja atmosfery obejmowały cały proces, łącznie z nagrzewaniem. Przebiegi zmian wartości potencjału w okresie nagrzewania i podczas procesu dobierano tak, aby były one zbliżone do granicznych wartości potencjału, między obszarem faz  $\alpha$ - $\gamma'$  i  $\gamma'$ - $\epsilon$  układu Lehrera [4].

Wybrane przykłady stanowiły procesy oznaczone odpowiednio: A – proces Nx847, B – proces Nx900. Procesy te umożliwiały wytworzenie na stali 38HMJ dwóch rodzajów warstw azotowanych o najkorzystniejszych właściwościach strukturalnych, grubościach i twardościach. W przypadku procesu Nx900 (wariant B), z ograniczoną warstwą azotków żelaza, warstwa azotowana charakteryzuje się małym zużyciem przez tarcie i dużą zmęczeniową wytrzymałością stykową oraz odpornością na udary mechaniczne i cieplne. Z kolei warstwy azotowane ze zwartą warstwą azotków żelaza – proces Nx847 (wariant A) wykazują dobrą odporność na zużycie przez tarcie i korozję i przeznaczone są na części maszyn narażonych na zużycie przez tarcie i pracujące w agresywnym ośrodku korozyjnym.

W każdym z procesów istotną rolę odgrywała atmosfera azotująca, której potencjał kształtowano odpowiednio do wymaganej struktury warstwy.

Najbardziej złożonym przebiegiem zmian wartości potencjału charakteryzował się proces B, umożliwiający uzyskanie na stali 38HMJ warstw azotowanych z ograniczoną grubością przypowierzchniowej warstwy azotków żelaza.

Jak widać z zestawionych w tabeli 3 wyników pomiarów grubości warstwy azotków na stali 38HMJ, grubości warstwy azotków żelaza są niewielkie – w granicach 2-5  $\mu\text{m}$ . Porównanie twardości (tabela 3) i rozkładów twardości warstw azotowanych (rys. 1), otrzymanych w wyniku omawianych procesów wskazuje, że twardości powierzchni (ponad 1100 HV 0,5 – stal 38HMJ) oraz grubości warstw azotowanych są porównywalne dla obu wariantów procesów A i B.



Rys. 1. Porównanie rozkładów twardości w warstwach azotowanych: ze zwartą warstwą azotków – proces 847 (A), z ograniczoną warstwą azotków – proces 900 (B)

Fig. 1. Comparison of hardness distribution in the nitrided layers: the compact nitride layer – process 847 (A), with a limited layer of nitrides – process 900 (B)

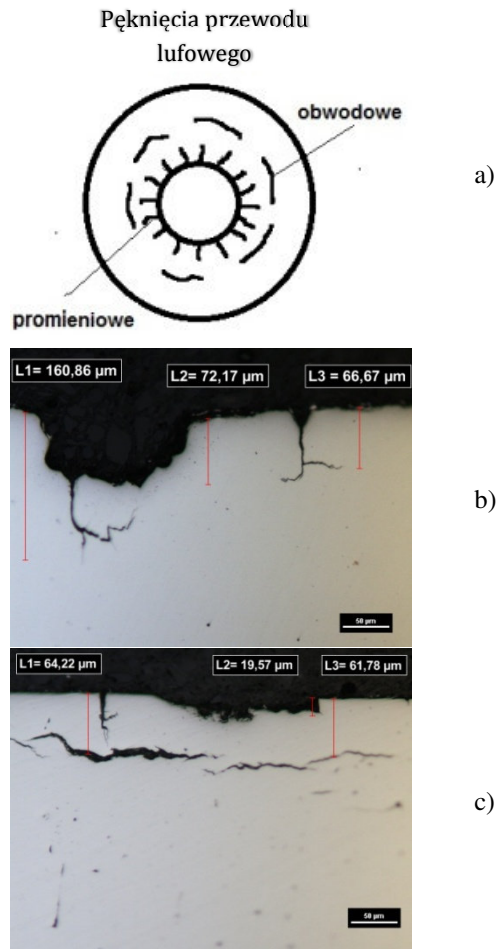
### 2.3. Zakres badań

Badania stali po azotowaniu obejmowały:

- rozkłady twardości w warstwie azotowanej,
- mikrostrukturę warstw azotowanych,
- grubość warstwy azotków ( $g_{WL}$ ),
- grubości efektywne warstwy azotowanej mierzone od powierzchni do twardości, nie mniejszej niż twardość rdzenia + 50 HV bądź do twardości nie mniejszej niż 600 HV ( $g_{c+50}$ ,  $g_{600}$ ),
- odporność na zużycie przez tarcie,
- badanie udarności,
- badanie kruchości metodą Baltest-M.

### 3. WYNIKI I ANALIZA BADAŃ STRUKTURALNYCH, TRIBOLOGICZNYCH I UDARNOŚCI

Przykład uszkodzeń przewodu lufowego po serii 10 000 strzałów wykonanego z ulepszonej, wymrożonej i azotowanej (wariant A) stali 38HMJ pokazano na rysunku 2. Powierzchnia przewodu w obszarze komory nabojeowej pokryta jest siatką pęknięć.



Rys. 2. Pęknięcia w przewodzie azotowanej lufy ze stali 38HMJ (wariant azotowania A) po 10 000 strzałów: a – schemat występujących pęknięć, b – pęknięcia promieniowe, c – pęknięcia obwodowe

Fig. 2. Cracks in nitrided barrel from 38HMJ steel (option nitriding A) after 10 000 shots: a – scheme occurring cracks, b – radial cracks, c – circumferential cracks

Wytworzona na stali 38HMJ warstwa azotowana składa się z przypowierzchniowej nie trawiącej się warstwy azotków żelaza oraz głębiej usytuowanej warstwy azotowania wewnętrznego, stanowiącej roztwór azotu w ferrycie stopowym z drobnodispersyjnymi wydzieleniami azotków stopowych składników azotkotwórczych stali, głównie chromu.

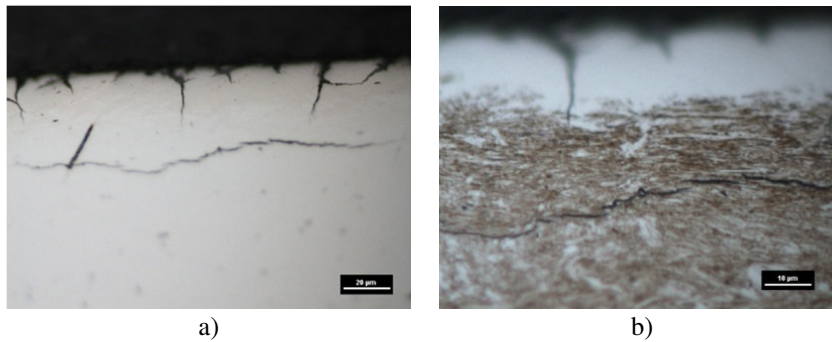
Przypowierzchniowa warstwa azotków żelaza, zwłaszcza przy większym stężeniu azotu, jest krucha i mało odporna na udary mechaniczne oraz cieplne. Udary mechaniczne, wywołane ciśnieniem gazów prochowych, jak również oddziaływaniem przemieszczającego się w polach bruzd pocisku, generują pęknięcia propagujące w głąb warstwy. Zmiany objętościowe azotków żelaza wywołane szybko zmiennymi udarami cieplnymi, jakie powstają w trakcie eksploatacji lufy, są również jedną z przyczyn jej powierzchniowego pęknięcia. Charakter występujących pęknięć w warstwie przypowierzchniowej badanej lufy pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Pęknięcia promieniowe (a) i obwodowe (b) w obszarze warstwy azotków żelaza

Fig. 3. Radial (a) and peripheral (b) cracks in the iron nitride layer

Widoczne na rysunku 3, tworzące się niepożądane pęknięcia mają przebieg promieniowy względem osi lufy. Pęknięcia promieniowe inicjowane w warstwie azotków żelaza ulegają wygaszeniu w obszarze głębiej położonej roztworowej warstwy azotowanej (rys. 3a). Gęsta siatka pęknięć promieniowych łączących się wzajemnie w wyniku tworzenia się pęknięć obwodowych (rys. 3b) doprowadza ostatecznie do wykruszania się bloków materiału z powierzchni lufy. Głębokość tak powstających wykruszeń nie przekracza grubości warstwy azotków żelaza. Innym rodzajem pęknięć obwodowych są również pęknięcia obserwowane w głębszych partiach azotowanego materiału (rys. 4). Pęknięcia te powstają w obszarze roztworowej warstwy azotowanej pod warstwą azotków żelaza.



Rys. 4. Struktura azotowanej stali 38HMJ (wariant A), pęknięcia promieniowe w obszarze azotków żelaza i obwodowe w obszarze roztworowej warstwy azotowanej: a – struktura nie trawiona, b – struktura trawiona Nitalem 3%

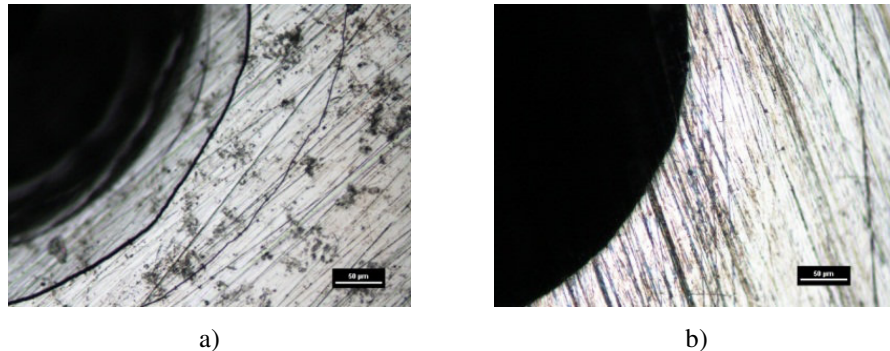
Fig. 4. The structure of the nitrided steel 38HMJ (option A), radial cracks in the area of iron nitrides and peripheral cracks in area of the nitrided layer: a – not etched, b – 3% Nital etched

Jak wykazano w badaniach [1], zmienne pole temperatury występujące w przewodzie lufy powoduje zmiany składu fazowego w przypowierzchniowej warstwie przewodu. Roztworowa warstwa azotowania wewnętrznego podlega przemianom fazowym i strukturalnym spowodowanym udarami cieplnymi. Udry ciepłe wywołują cykliczny proces przemiany austenitycznej i martenzytycznej w azotowanym materiale i rdzeniu. Szybkość procesu przemian jest różna i zależna od stężenia azotu. Azot w stali przesuwają krzywe izotermicznej przemiany austenitu w prawo oraz obniża temperaturę początku przemiany martenzytycznej. Efekt ten sprzyja wzrostowi zawartości austenitu szczytkowego w warstwie azotowanej, przy czym warstwa ta ma zwiększoną hartowność w porównaniu z rdzeniem. Przemiana martenzytyczna przy zwiększonej zawartości austenitu szczytkowego zachodzi z mniejszymi zmianami objętościowymi, a pozostający austenit szczytkowy zwiększa plastyczność zahartowanej warstwy.

Powierzchniowe stężenie azotu w warstwie azotowania wewnętrznego jest zależne od grubości przypowierzchniowej warstwy azotków żelaza. Zbyt gruba warstwa azotków utrudnia rozbudowywanie się warstwy azotowania wewnętrznego odpornej na udary cieplne. Odporność warstw azotowanych na powierzchniowe udary cieplne jest więc ściśle związana z grubością warstwy azotków żelaza i efektywną grubością warstwy azotowanej. Stąd w procesach azotowania luf należy dążyć do ograniczenia grubości warstwy azotków żelaza do ok. 2 µm lub całkowitej jej eliminacji. To drugie rozwiązanie, jak wykazały przeprowadzone badania w zrealizowanej pracy [1], umożliwiło praktycznie wyeliminowanie objawów kruchości występującej w warstwach azotowanych.



Na rysunkach 5 i 6 pokazano warstwy azotowane poddane badaniom kruchości nową, opracowaną w IMP metodą Baltest-M, wykorzystującą pomiar twardości HRC i zgląd sferyczny.



Rys. 5. Struktura powierzchni azotowanej stali 38HMJ w obrębie krawędzi śladu odcisku twardości HRC Rockwela: a – warstwa azotowana z warstwą azotków żelaza (wariant A), b – warstwa azotowana z ograniczoną warstwą azotków żelaza (wariant B)

Fig. 5. The surface structure of nitrided steel 38HMJ around the edge of the indentation HRC: a – nitrided layer with a layer of iron nitrides (option A), b – limited nitride iron layer (option B)



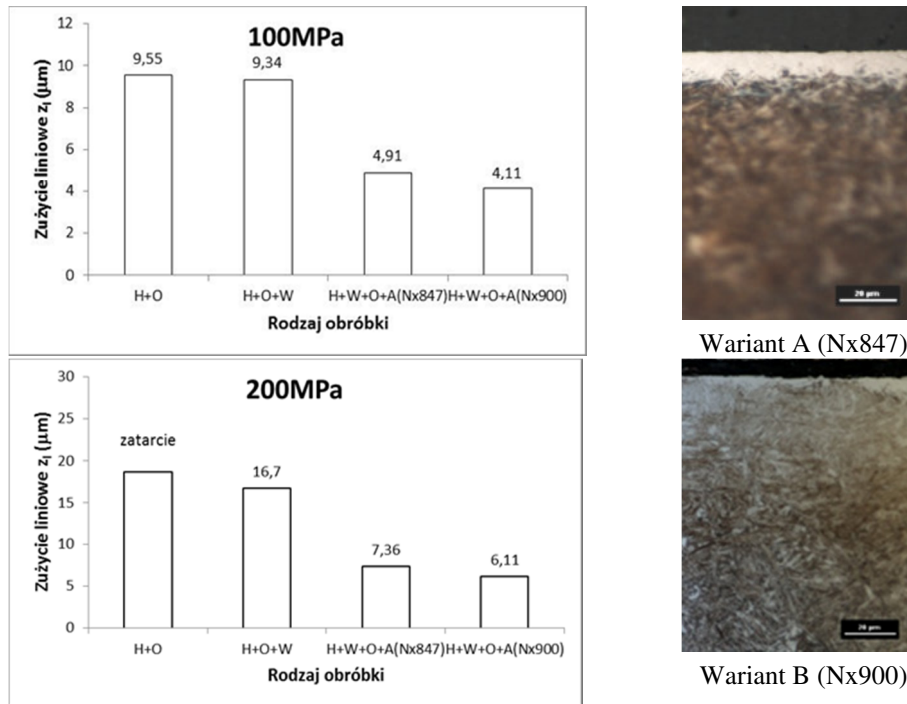
Rys. 6. Struktura powierzchni azotowanej stali 38HMJ w obrębie zglądu sferycznego na krawędzi śladu odcisku twardości Rockwela HRC (metoda Baltest-M): a – warstwa azotowana z warstwą azotków żelaza z widocznymi pęknięciami obwodowymi i promieniowymi (wariant A), b – warstwa azotowana z ograniczoną warstwą azotków żelaza (wariant B)

Fig. 6 The surface structure of nitrided steel 38HMJ within a spherical micro-section on the edge of the indentation HRC (method Baltest-M):

a – nitrided layer with a layer of iron nitrides with visible cracks in the circumferential and radial (option A), b – nitrided layer with limited of iron nitrides layer (option B)

Na powierzchni zgładu sferycznego wykonanego w obrębie śladu odcisku twardości HRC przy obciążeniu 150 kG, w przypadku występowania kruchości badanego materiału, uwidacznia się siatka pęknięć warstwy i podłoża (rys. 5a). W przypadku warstwy o dobrej plastyczności nie obserwuje się takich pęknięć (rys. 5b).

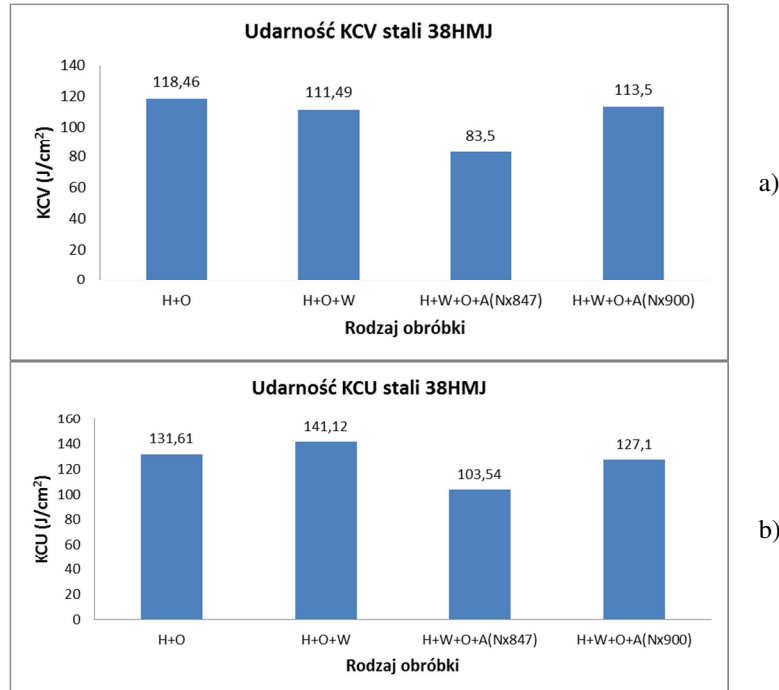
Przeprowadzone badania zużycia przez tarcie azotowanej stali 38HMJ wg wariantu B (rys. 7) wykazały, że kolejność operacji technologicznych: próżniowego hartowania (H), wymrażania (W), odpuszczania (O) i azotowania (A), wykazuje najmniejsze zużycie.



Rys. 7. Zużycie liniowe próbek ze stali 38HMJ po czterech wariantach technologicznych: H + O – ulepszeniu cieplnym; H + O + W – ulepszeniu cieplnym i wymrażaniu; H + W + O + A (Nx847) – ulepszeniu cieplnym, wymrażaniu i azotowaniu (proces Nx847 – wariant A); H + W + O + A + (Nx900) – ulepszeniu cieplnym, wymrażaniu i azotowaniu (proces Nx900 – wariant B). Metoda stożek – 3 wałki czas próby tarcia 100 min, naciski jednostkowe: 100 MPa, 200 MPa

Fig. 7. Linear wear samples of 38HMJ steel after four different technological options: H + O – quenching and tempering, H + O + W – quenching and tempering and cryogenic treatment, H + W + O + A (Nx847) – quenching and tempering, cryogenic treatment and nitriding (Nx847 process-option A), H + W + O + A + (Nx900) – quenching, cryogenic treatment, tempering and nitriding (Nx900 process – option B). The friction in 3-rollers-cone system, test time 100 min, unit pressure: 100 MPa, 200 MPa

Również wyniki badań udarności (rys. 8) potwierdzają, że azotowanie z ograniczoną przypowierzchniową warstwą azotków żelaza pozwala na osiągnięcie udarności porównywalnej jak dla stali tylko po ulepszeniu cieplnym, czyli nie pogarsza właściwości plastycznych, co ma miejsce w przypadku warstwy azotowanej wg wariantu A.



Rys. 8. Wyniki badań udarności próbek ze stali 38HMJ z karbem w kształcie litery V (a) i U (b) po czterech wariantach technologicznych: H + O – ulepszeniu cieplnym; H + O + W – ulepszeniu cieplnym i wymrażaniu; H + W + O + A (Nx847) – ulepszeniu cieplnym, wymrażaniu i azotowaniu (proces Nx847 – wariant A); H + W + O + A + (Nx900) – ulepszeniu cieplnym, wymrażaniu i azotowaniu (proces Nx900 – wariant B)

Fig. 8. Results of notched impact strength of 38HMJ steel V-shaped (a), U-shaped (b) after four technological options: H + O – quenching and tempering, H + O + W – quenching and tempering and cryogenic treatment ; H + W + O + A (Nx847) – quenching, cryogenic treatment and tempering and nitriding (Nx847 process – option A), H + W + O + A + (Nx900) – quenching, cryogenic treatment and tempering and nitriding (Nx900 process – option B)

#### 4. PODSUMOWANIE

Po przeprowadzonych badaniach można stwierdzić, że w przypadku azotowania luf ze stali 38HMJ, należy wytwarzać warstwy azotowane o ograniczonej przypowierzchniowej warstwie azotków żelaza z warstwą roztworową do 300  $\mu\text{m}$ . Warstwy takie charakteryzują się grubością przypowierzchniowej warstwy azotków od 0 do 5  $\mu\text{m}$  oraz wykazują dobrą odporność na zużycie przez tarcie (rys. 7) i gwarantują utrzymanie udarności na poziomie stali ulepszonej cieplnie (rys. 8). W celu zmniejszenia zmian wymiarowych, które mają bezpośredni wpływ podczas eksploatacji na celność broni, przed procesem azotowania należy przeprowadzić proces wymrażania w czasie obróbki cieplnej.

Cenne narzędzie w ocenie kruchości i propagacji pęknięć w warstwach azotowanych i innych, wytwarzanych na lufach broni strzeleckiej, stanowi opracowana w IMP metoda Baltest-M, łącząca metodę pomiaru twardości przy dużych obciążeniach (ok. 150 kG) z metodyką przygotowania szlifu sferycznego za pomocą kulotestera.

*Artykuł zawiera wyniki pracy finansowanej ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczo-rozwojowy nr 0025/R/T00/2009.*

#### LITERATURA

- [1] Sprawozdanie końcowe z projektu badawczo-rozwojowego nr 0025/R/T00/2009, *Badanie materiałowo-technologiczne nad zastosowaniem nowych materiałów i ekologicznych obróbek typu multiplex w wytwarzaniu luf broni strzeleckiej*, WAT, Warszawa, 2011.
- [2] Michalski J., Tacikowski J., Wach P., Ratajski J., Mońka G., Nakoneczny A., Azotowanie gazowe stali stopowych z i bez przypowierzchniowej warstwy azotków żelaza, *Inżynieria Materiałowa*, 4(176), s. 1100-1103, lipiec-sierpień 2010.
- [3] Łataś Z., Żółciak T., Dębski A., Michalski J., Bogdański B., Metody obróbki cieplno-chemicznej przewodów luf broni strzeleckiej, *Inżynieria Materiałowa*, 4(176), s. 1077-1080, lipiec-sierpień 2010.
- [4] Michalski J., Burdyński K., Wach P., Tacikowski J., Łataś Z., Projektowanie procesów azotowania gazowego z uwzględnieniem rozporządzalności azotu atmosfery azotującej, *Inżynieria Powierzchni*, nr 1, s. 3-10, 2011.
- [5] Łataś Z., Żółciak T., Michalski J., Wach P., Dębski A., Azotowanie luf do broni małokalibrowej, *Problemy Techniki Uzbrojenia*, Biuletyn Naukowy Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia, nr 2, rok XL, zeszyt 118, s. 159-167, 2011.

## Effect of Controlled Gas Nitriding on the Durability of the Barrels of Small Arms

Zbigniew ŁATAŚ, Jerzy MICHALSKI, Jan TACIKOWSKI,  
Marek BETIUK, Piotr WACH, Jan SENATORSKI,  
Kryspin BURDYŃSKI

**Abstract.** The project research – development, implemented in a consortium: Institute of Precision Mechanics (Warsaw, Poland), Military University of Technology (Warsaw, Poland) and Small Arms Factory (Radom, Poland), studies were undertaken of the possibility and desirability of replacing the electrolytic chromium plating technology used in the production of small arms barrels of 5.56 mm. So far, the barrel of small arms calibre 5.56 mm, and the like are mostly produced from low-alloy structural steels, similar to that used for the purpose of domestic steel 30HN2MFA. The aim was to search for new technologies such as multiplex thermo-chemical properties, combined with the deep freeze, which can ensure the sustainability of the final gun with less onerous technologies for the environment. One such method is the quenching barrel, connected in a closed technological cycle of the deep freeze and then subjected to nitriding gas industries regulated. The results of investigations of processes controlled gas nitriding grade alloy steel construction 38HMJ, used for machine parts, exposed in operation to corrosion, friction wear and fatigue and thermal shock, provided to replace the currently used barrel steel 30HN2MFA. Nitriding process was carried out in the temperature range 520-560°C and at times 4-6 h, in an atmosphere of N<sub>2</sub> or NH<sub>3</sub>-NH<sub>3</sub><sub>zdys</sub> with the settlement of their composition and potential for nitrogen during the heating process and temperature. Provides examples and discusses the impact of process solutions for the production of nitrided layers on 38HMJ iron nitride layer at the surface, designed for corrosive and tribological exposure and limited iron nitride layer at the surface, intended for exposures of fatigues. For both types of nitrided layers determined resistance to frictional wear and impact resistance. Phenomena, brittleness and cracks bombardment nitrided layers after 10 000 rounds.

**Keywords:** material engineering, controlled gas nitriding, nitriding potential, iron nitride, nitriding atmosphere, diffusion layer, barrel shooting

