



## Nowa metoda oceny warstw i powłok przewodów luf strzeleckich

Zbigniew ŁATAŚ\*, Marek BETIUK, Jan TACIKOWSKI,  
Jerzy MICHALSKI, Piotr WACH

*Institut Mechaniki Precyzyjnej, ul. Duchnicka 3, 01-796 Warszawa  
autor korespondencyjny, e-mail: zbigniew.latas@imp.edu.pl*

*Artykuł wpłynął do redakcji 27.07.2014. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 26.02.2015*

DOI: 10.5604/20815891.1166988

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodę oceny jakości warstw w odniesieniu do metod wytwarzania systemów aerologicznych na powierzchniach zewnętrznych i wewnętrznych rur grubościennych mających zastosowanie między innymi w produkcji luf broni strzeleckiej. Na przykładzie badań nad technologiami cieplno-chemicznymi, opracowanymi w IMP, zaprezentowano wyniki oceny jakości warstw azotowanych na wewnętrznych powierzchniach przewodu luf kalibru 5,56 mm oraz powłok wytwarzanych metodą PVD dla rur o średnicy powyżej 30 mm. Przedstawiono możliwości szybkiej i precyzyjnej oceny jakości i struktury warstw oraz powłok na szlifie sferycznym wykonywanym przy użyciu Kulotestera i skośnym wykonywanym w okolicy śladów odcisków pomiarów twardości wg nowej metody badawczej Baltest-M, która stanowi uzupełnienie stosowanych badań w inżynierii powierzchni, szczególnie dla oceny plastyczności warstw. Przykłady stosowania nowej metody odniesiono do klasycznych metalograficznych technik oceny jakości warstw i powłok otrzymywanych metodami regulowanego azotowania gazowego oraz chromowania elektrolitycznego.

**Słowa kluczowe:** inżynieria powierzchni, metoda oceny, lufa strzelecka

## 1. WSTĘP

Jednym z elementów broni najbardziej narażonych na zużycie eksploatacyjne jest lufa strzelecka, szczególnie jej powierzchnia wewnętrzna. 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, generujących 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.

Prawidłowe rozwiązywanie problemów badawczych związanych z inżynierią powierzchni wymaga kompleksowego spojrzenia na obszar warstw powierzchniowych i ich podłoża. Obszar warstw wierzchnich i podłoża tworzy system areologiczny. Właściwości materiałowe systemów areologicznych często utożsamiane są z właściwościami warstw powierzchniowych. Skuteczne rozwiązywanie problemów trwałości eksploatacyjnej utworzonych systemów areologicznych wymaga stosowania technik badawczych umożliwiających ich opis ilościowy i ocenę jakościową [2].

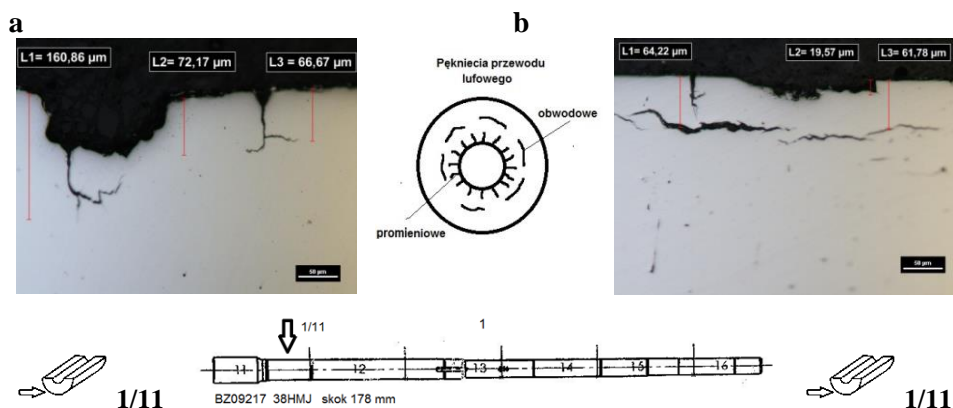
W ramach własnych prac badawczych oraz realizacji projektów badawczo-rozwojowych, finansowanych ze środków na naukę, w IMP badano jakość warstw i powłok wytworzonych w zastosowaniu technologii: regulowanego azotowania gazowego, węgloazotowania i azotowania fluidalnego, azotowania jarzeniowego oraz technologii magnetronowej na wewnętrznych powierzchniach rur grubościennych o małych średnicach (od 5,0 do 30,0 mm).

Wyniki oceny jakości warstw i powłok odniesiono do stosowanych w przemyśle obronnym w produkcji luf broni strzeleckiej, technologii chromowania elektrolitycznego i kąpielowego węgloazotowania metodą Tenifer. Specyfiką tych zastosowań jest wytworzenie systemów areologicznych, wewnątrz grubościennych przewodów rurowych o średnicach 5÷15 mm [1].

Badania makroskopowe właściwości eksploatacyjnych przewodu luf po testach strzelania przy użyciu boroskopu umożliwiają ocenę jakości warstwy lub powłoki wewnętrznej lufy, w końcowym etapie jej eksploatacji.

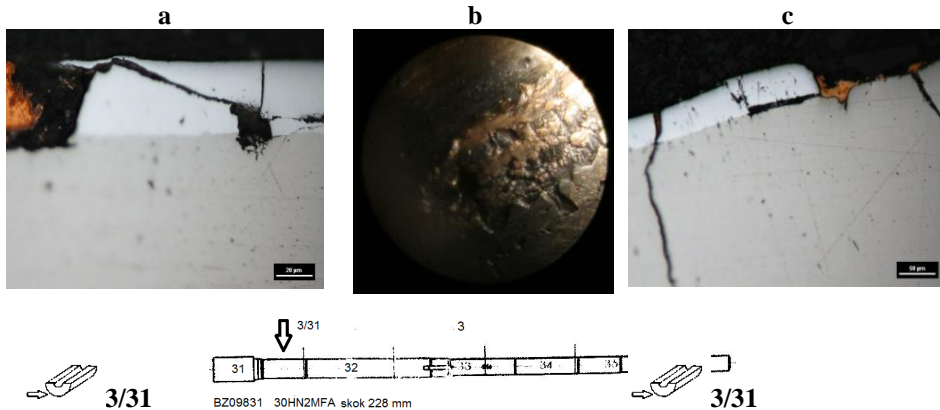
Badania klasycznymi metodami metalograficznymi, mikrostruktury warstwy, grubości warstwy, grubości efektywnej, nie umożliwiają szybkiej oceny wstępnej jakości nakładanej warstwy, powłoki i zastosowanej procedury technologicznej.

Szczególnie grubości przypowierzchniowej nakładanej warstwy, powłoki oraz jej wpływu na określenie twardości systemu powłoka-podłoże oraz na podstawie analizy obrazu ujawnionych struktur: pęknięć i wykruszeń materiału warstwy, powłoki i propagacji pęknięć, określenia jakości zachowania się materiału warstwy i powłoki. Przykłady oceny jakości warstw po procesie azotowania i chromowania elektrolitycznego, klasycznymi metodami metalograficznymi oraz badań właściwości eksploatacyjnych przewodu lufy przedstawiono na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1. Struktura azotowanej lufy 5,56 mm o grubości przypowierzchniowej warstwy azotków żelaza powyżej 15 mikrometrów, na zglądzie przekroju prostopadłym do powierzchni w strefie komory naboջowej, po ostrzale 10 000; a – pęknięcia promieniowe o głębokości 60-160  $\mu\text{m}$  z wykruszeniami, b – pęknięcia promieniowe o głębokości  $< 20 \mu\text{m}$  i obwodowe na głębokości 60-70  $\mu\text{m}$  w strefie przypowierzchniowej (zgląd metalograficzny nie trawiony) [1]

Fig. 1. The structure of the nitrided barrel of 5.56 mm and a thickness of the subsurface layer of iron nitrides greater than 15 micrometers, the cross section perpendicular to the surface area of cartridge chamber; after firing 10 000; a – radial cracks with a depth of 60-160 microns with chippings, b – radial cracks with a depth  $< 20$  microns and circumferential at a depth of 60-70 microns in surface zone (metallographic section is not eating) [1]



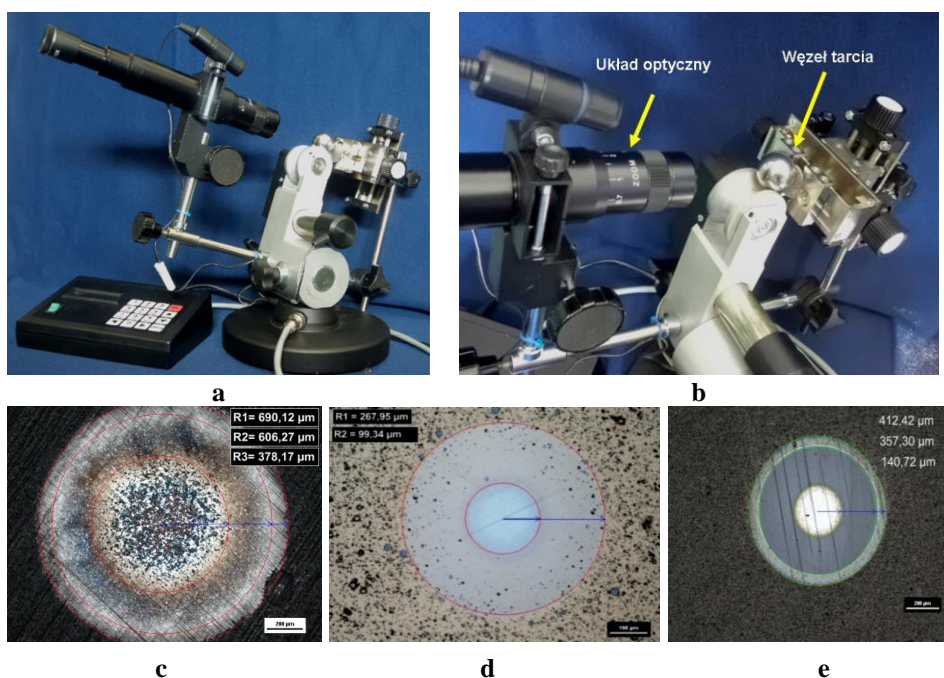
Rys. 2. Struktura lufy 5,56 mm na przekroju równoległym do osi przewodu w strefie komory nabojeowej (stal 30HN2MFA + powłoka Cr) po ostrzale 7000;  
 a – pęknięcia, ubytki powłoki chromu częściowo wypełniane miedzią przenoszoną z przemieszczających się pocisków, b – widok z boroskopu, c – pęknięcia promieniowe w powłoce chromu i propagujące w głąb materiału podłoża, oderwane bloki powłoki chromowej, pęknięcia wypełniane miedzią (zgląd metalograficzny nie trawiony)[1]

Fig. 2. The structure of the barrel of 5.56 mm on a cross section parallel to the pipe axis in the zone of the cartridge chamber (30HN2MFA steel + Cr coating) after firing at 7000;  
 a – cracks, holes coatings of chromium partially filled with copper transmitted from moving missiles, b – the view from the borescope c – cracks radial coating of chromium and propagating into the substrate, detached blocks chrome plating, cracks filled with copper (metallographic section metallographic not eating) [1]

Celem publikacji jest przedstawienie możliwości szybkiej oceny jakości i struktury warstw oraz powłok na szlifie sferycznym (sferycznym-skośnym) i skośnym, wykonywanym w okolicy śladów odcisków pomiarów twardości. W pracach Instytutu Mechaniki Precyzyjnej (IMP) analizowano kilka systemów areologicznych typu stal + warstwa azotków żelaza a stal + powłoki (PVD). Zaproponowana przez IMP nowa metoda badawcza Baltest-M może być uzupełnieniem badań związanych z oceną jakości stosowanych warstw i powłok w inżynierii powierzchni. Natomiast wykorzystanie szlif sferycznego lub skośnego umożliwia rozszerzenie zakresu badań i obserwacji metalograficznej.

## 2. NOWE METODY OCENY JAKOŚCI WARSTW I POWŁOK POWIERZCHNI OTWORU LUFY

Na etapie badań, doboru rodzaju warstwy, powłoki, można ocenić jakość struktury warstwy, powłoki, stosując opracowaną w IMP technikę badawczą, przy użyciu Kulotestera [6]. Ocenę budowy struktury warstwy prowadzi się na powierzchni zglądu sferycznego. Zgląd sferyczny wykonywany jest na płaskiej lub walcowej powierzchni próbek. Precyzyjne wykonanie zglądu sferycznego w ściśle ustalonym miejscu umożliwiają zmodyfikowane stanowisko badawcze Kulotestera (rys. 3) z układem optycznym zespolonym z uchwytem próbek usytuowanym na stoliku x-y z odczytem położenia z dokładnością 0,01 mm.



Rys. 3. Stanowisko badawcze Kulotester: a – widok ogólny, b – precyzyjny węzeł tarcia zespolony z systemem optycznym, c – struktura warstwy azotowanej, d – struktura powłoki TiN, e – struktura powłoki WC/C-TiAlN [6]

Fig. 3. The Kulotester test: a – general view, b – node precise friction combined with an optical system, c – nitrided layer structure, d – structure TiN coat, e – structure WC / C-TiAlN coat [6]

Istotą metody jest to, że zgląd metalograficzny sferyczny posiada cechy zglądu skośnego. Na powierzchni zglądu sferycznego osiągnięty jest efekt poszerzenia obszaru analizowanej warstwy lub powłoki.

Ujawnienie struktury warstwy lub powłoki na zglądzie sferycznym jest bardziej precyzyjne i nie wymaga operacji przecinania próbek, ich inkludowania i polerowania stosowanego w tradycyjnej metalografii.

Zastosowanie odczynników trawiących na zgląd sferyczny kontrastuje optycznie składniki strukturalne warstwy. Istotnym ograniczeniem tej metody jest maksymalna głębokość zglądu sferycznego, która nie przekracza 25 $\mu$ m.

Na podstawie analizy struktur ujawnionych na powierzchni zglądu sferycznego i w skojarzeniu z innymi technikami badawczymi można uzyskać podstawowe informacje dotyczące własności i jakości systemu aerologicznego (podłoże + warstwa, powłoka).

W sposób precyzyjny można:

- mierzyć grubość powłok i poszczególnych warstw je tworzących (pomiar grubości warstw i powłok w zakresach od 0,1 do 25  $\mu$ m),
- oceniać i opisywać strukturę powłok i warstw zgodnie z metodyką ustaloną w tradycyjnych badaniach metalograficznych, ujawniając nowe szczegóły,
- prowadzić badania mikrotwardości oraz analizę budowy i składu chemicznego na rozwiniętym przekroju powłoki z zastosowaniem mikroskopii skaningowej,
- dokonać ilościowej oceny grubości mieszanej strefy dyfuzyjnej z warstwą azotków żelaza,
- dokonać oceny jakościowej adhezji powłoki do podłoża,
- dokonać oceny porównawczej odporności na kruche pękanie (metoda Baltest-M).

## 2.1. Metoda Baltest-M

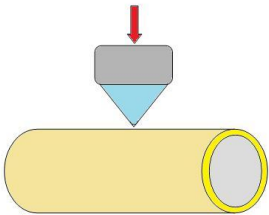
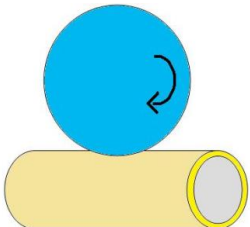
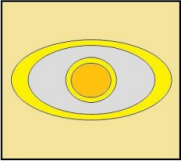
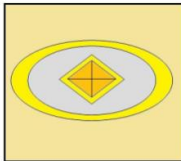
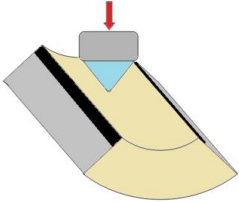
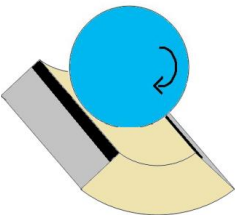
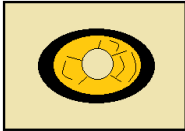
Metoda badawcza Baltest-M to połączenie standardowych dostępnych technik badawczych:

- precyzyjnego zglądu sferycznego przy użyciu Kulotestera w obszarze odcisku pomiaru twardości,
- pomiaru twardości (np. HV, HRC),
- przy zastosowaniu mikroskopii optycznej lub elektronowej, analiza i ocena ilościowa ujawnionych struktur materiału powłoki i podłoża (nie trawionej lub trawionej odczynnikami metalograficznymi) [5, 6].

Schemat przygotowania próbki, wycinka próbki z lufy dla oceny jakości powłok i warstw na powierzchniach walcowych przedstawiono w tablicy 1.

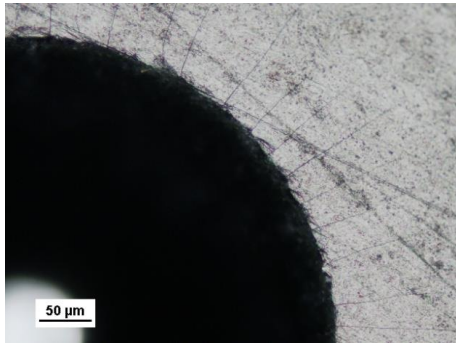
Tablica 1. Schemat kolejności operacji dla powierzchni walcowych w metodzie Baltest-M

Table 1. Diagram of the sequences operation for the Baltest-M method

Odształcenie plastyczne powłoki i podłoża głowicą twardościomierza Rocwella (HRC), Vickersa (HV)	Wykonanie precyzyjnego zglądu sferycznego	Analiza mikroskopowa ujawnionych struktur na powierzchni zglądu
a – dla powierzchni zewnętrznych		
		 <p style="text-align: right;">HRC</p>
		 <p style="text-align: right;">HV10</p>
b – dla powierzchni wewnętrznych		
		 <p style="text-align: right;">HRC</p>

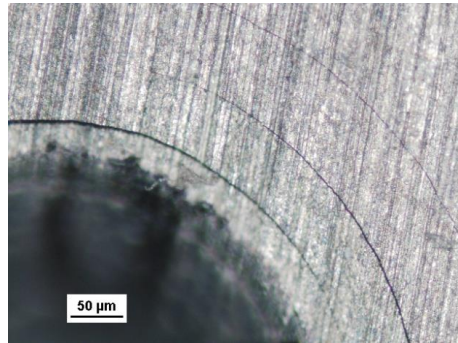
Zgląd sferyczny w obrębie śladów pęknięć pozwala obserwować charakter ich propagacji wewnątrz struktury powłoki oraz podłoża. Analizując obraz przebiegu pęknięcia na powierzchni zglądu sferycznego, można określić charakter jej przebiegu w objętości systemu areologicznego, tj. w samym podłożu, na granicy z warstwą lub powłoką w samym materiale warstwy i powłoki. Pęknięcie może obejmować jedynie materiał warstwy, powłoki podłoża lub rozprzestrzeniać się w całej objętości systemu. Jego przebieg może być liniowy, krzywoliniowy lub mieszany, pojedynczy lub propagujący na szereg drobniejszych pęknięć. Rzeczywistą strukturę warstwy wokół śladu odcisku Rockwella ujawnioną na powierzchni zglądu sferycznego lufy kalibru 5,56 mm przedstawiono na rysunku (rys. 4a, b).





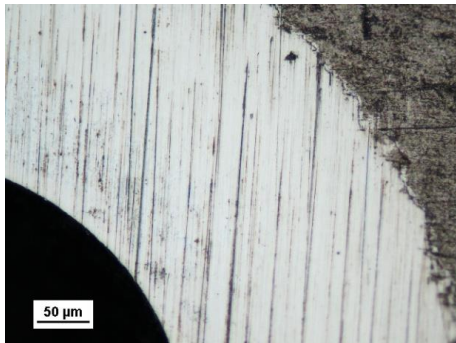
**a** – warstwa azotków żelaza z widocznymi powierzchniowymi pęknięciami promieniowymi

**a** – iron nitride layer of the visible surface cracks radial



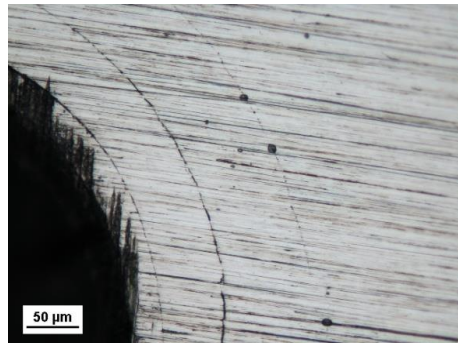
**b** – warstwa azotków żelaza z widocznymi powierzchniowymi pęknięciami obwodowymi

**b** – iron nitride layer with visible surface circular cracks in the peripheral surface



**c** – zgląd sferyczny bez widocznych oznak pęknięć promieniowych i obwodowych (bez oznak kruchości warstwy na głębokości 10 µm)

**c** – metallographic spherical section with no visible signs of cracks radial and circumferential (without signs of fragility layer at a depth of 10 microns)



**d** – zgląd sferyczny z widocznymi pęknięciami obwodowymi na głębokości 15 µm

**d** – metallographic section with visible circular cracks at a depth of 15 µm

Rys. 4. Przykłady powierzchni warstwy azotowanej i zglądu sferycznego próbki z lufy kalibru 5,56 mm, na krawędzi odcisku twardości Rockwella (HRC), metoda Baltest-M

Fig. 4. Examples of nitrided layer surface and spherical section of sample from the barrel of 5.56 mm, on the edge of the trace Rockwell hardness (HRC), the Baltest-M method



Na rysunku 4 pokazano warstwy azotowane przewodu lufy kalibru 5,56 mm, poddane badaniom kruchości nową opracowaną w IMP metodą Baltest-M, wykorzystującą pomiar twardości HRC i zgląd sferyczny. Na powierzchni zglądu 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. 4b, d). W przypadku warstwy i podłoża o dobrej plastyczności w obszarze zglądu sferycznego na krawędzi odcisku Rockwella nie obserwuje się takich pęknięć (rys. 4c).

Wykonanie precyzyjnego zglądu sferycznego w obrębie odcisku za pomocą Kulotestera dla pomiaru twardości penetratorem Vickersa i Rockwella, jest możliwe dla średnicy przewodu lufy od 5,0 mm do 30 mm. Poniżej średnicy 30 mm w tym dla oceny jakości warstwy np. dla luf kalibru 5,56 mm, bardziej precyzyjna jest metoda w oparciu o zgląd metalograficzny skośny.

## 2.2. Metoda zglądu skośnego


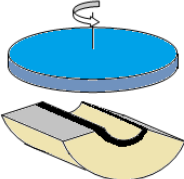
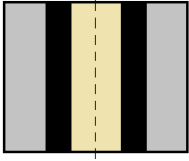
Podobną metodą, bez użycia Kulotestera, jest metoda zglądu skośnego (tab. 2). Metoda umożliwia:

- mierzenie grubości powłok i warstw,
- ocenienie i opisanie struktury powłok i warstw zgodnie z metodyką ustaloną w tradycyjnych badaniach metalograficznych,
- prowadzenie badań mikrotwardości oraz analizę budowy i składu chemicznego na rozwiniętym przekroju powłoki, warstwy.

Zgląd metalograficzny skośny z próbki, wycinka lufy uzyskuje się przez jej pocięcie prostopadłe lub równoległe do osi przewodu próbki, lufy (tab. 2).

Tablica 2. Schemat kolejności operacji dla metody opartej na zglądzie skośnym

Table 2. Diagram of sequence of operations to implementation of oblique metallographic section

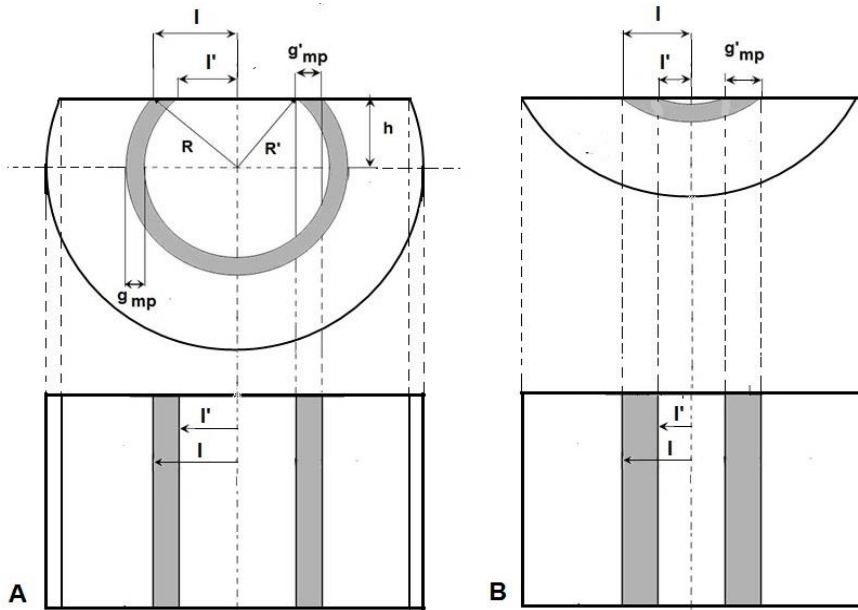
		
<p><b>a</b> – widok równoległego wycinka próbki z lufy</p> <p><b>a</b> – view a sample slice parallel with the barrel</p>	<p><b>b</b> – wykonanie zglądu skośnego</p> <p><b>b</b> – implementation of oblique metallographic section</p>	<p><b>c</b> – widok powiększonego obszaru płaszczyzny zglądu skośnego</p> <p><b>c</b> – view the magnified area of plane of oblique metallographic section</p>

Zgład umożliwia identyfikację pęknięć promieniowych i obwodowych w badanym fragmencie. Identyfikacja grubości powłok (np. chromowanych) i warstw (np. azotowanych, węglazotowanych), w przypadku zgładów metalograficznych równoległych do jej osi, identyfikacja i interpretacja ilościowa zależna jest od wzajemnej odległości powierzchni zgładu od osi lufy. Zgłady prostopadłe do osi lufy, pokrywające się z osią otworu, odwzorowują mikrostrukturę warstw i powłok w skali 1:1. Przesunięcie płaszczyzny zgładu metalograficznego poniżej osi lufy zwiększa geometryczny obszar obserwowanych struktur powierzchniowych (rys. 5). Efekt ten jest wynikiem powstawania zgładu metalograficznego skośnego. Największe powiększenia w tak utworzonym zgładzie skośnym powstają w przypadku powierzchni maksymalnie oddalonych od osi i przyległych do powierzchni wewnętrznej otworu lufy. W przypadku zgładów skośnych rzeczywista grubość identyfikowanych warstw i powłok jest mniejsza od ujawnianych. Różnica ta zależy od odległości  $h$  mierzonej w stosunku do osi otworu lufowego. Maksymalne fizyczne powiększenie  $I_m$  (max) identyfikowanych mikrostruktur warstwowych, powłokowych opisuje zależność (1).

$$I_m(\text{max}) \approx \frac{\sqrt{g_{mp}^2 - 2R \times g_{mp}}}{g_{mp}} \quad (1)$$

gdzie:  $g_{mp}$  – grubość warstwy azotków, powłoki galwanicznej lub PVD,  
 $R$  – średnica nie modyfikowanego otworu.

Schemat przygotowania próbki, wycinka równoległego do osi przewodu lufy i geometrii zgładu skośnego, pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat przygotowania próbki i geometrii dla ujawnienia mikrostruktury warstwy, powłoki na powierzchni wewnętrznej przewodu lufowego, zgląd metalograficzny skośny; A – powyżej osi przewodu lufy, B – w obszarze dna przewodu lufy (powiększenie obszaru badawczego)

Fig. 5. Scheme of sample preparation and geometry to reveal the microstructure of the layer, coating on the inner surface of the barrel, oblique metallographic section; A – above the axis of the barrel, B – in the area of the bottom of the barrel (larger research area)

Na podstawie zależności geometrycznych (2-5) odnoszących się do charakterystycznych ujawnionych granic mikrostruktur warstw, powłok (rys. 6) z uwzględnieniem średnicy wewnętrznej ( $R$ ) nie modyfikowanej lufy, można obliczyć rzeczywistą grubość badanej warstwy lub powłoki –  $g_{mp}$  (6-7)

$$g_{mp} = R - R' \quad (2)$$

$$R' = \sqrt{h^2 + l'^2} \quad (3)$$

$$h = \sqrt{R^2 - l^2} \quad (4)$$

$$l' = l - g'_{mp} \quad (5)$$

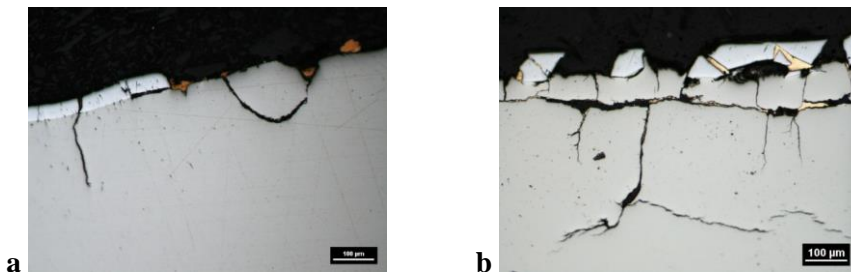
$$g_{mp} = R - \sqrt{R^2 + g'_{mp} (g'_{mp} - 2l)} \quad (6)$$

$$\text{lub} \quad g_{mp} = R - \sqrt{R^2 + I'^2 - I^2} \quad (7)$$

gdzie:

- $R$  – promień otworu lufy przed modyfikowaniem (np. azotowaniem, chromowaniem galwanicznym, PVD),
- $R'$  – promień otworu lufy po modyfikacji (np. chromowaniu galwanicznym, azotowaniu, PVD),
- $I$  – odległość granicy strefy przejścia materiału warstwy, powłoki w podłoże, mierzona w stosunku do osi symetrii zglądu (oś symetrii zglądu równoległa do osi otworu (rys. 5),
- $I'$  – odległość krawędzi modyfikowanej powierzchni od osi symetrii zglądu (rys. 5),
- $h$  – odległość powierzchni zglądu od osi otworu lufy,
- $g'_{mp}$  – grubość warstwy azotków żelaza, powłoki chromowanej, PVD ujawniona na zglądzie metalograficznym skośnym,
- $g_{mp}$  – rzeczywista grubość azotków, warstwy azotowanej powłoki galwanicznej, PVD.

Powiększenie obszaru płaszczyzny zglądu metalograficznego poniżej osi lufy (rys. 5B) zwiększa geometryczny obszar obserwowanych struktur powierzchniowych, umożliwia bardziej precyzyjną ich identyfikację. Na rysunku 6 pokazano struktury powierzchni chromowanych elektrolitycznie, uzyskane metodami zglądu prostopadłego do osi przewodu lufy (rys. 6a) oraz zglądu skośnego (rys. 6b).

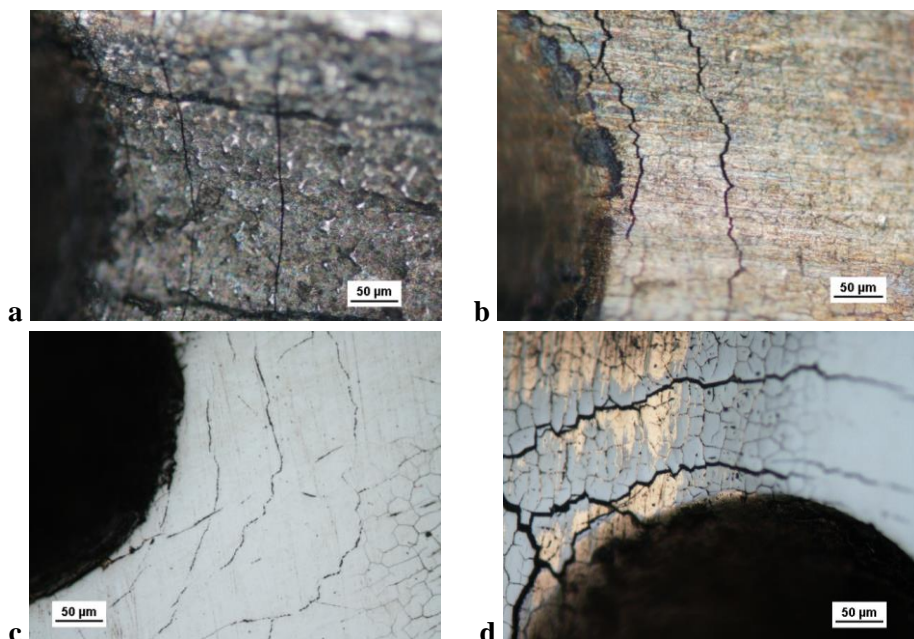


Rys. 6. Struktury powierzchni stali 30NH2MFA chromowanej elektrolitycznie lufy 5,56 mm; a – zgląd metalograficzny prostopadły do osi przewodu lufy z widocznymi pęknięciami promieniowymi w powłoce chromu, oderwane bloki powłoki chromowej; b – zgląd metalograficzny skośny z widocznymi pęknięciami promieniowymi propagujące w głąb materiału podłoża, przechodzące w pęknięcia obwodowe, oderwane bloki powłoki chromowej (zgląd metalograficzny nie trawiony)

Fig. 6. The structure of surface of 30NH2MFA steel after electrolytic chromized of barrel 5.56 mm; a – metallographic cross section perpendicular to the axis of the barrel with visible cracks in the chromium coat, chromium coating detached blocks; b – oblique metallographic section with visible radial cracks propagating into the substrate material passing into cracks peripheral detached blocks chromium coating (metallographic section is not etching)

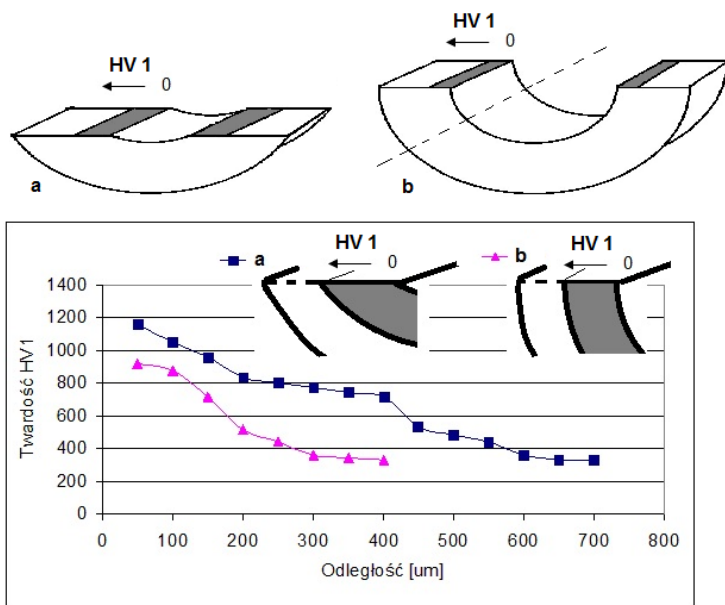
Zgład sferyczny-skośny umożliwia obserwację propagacji pęknięć na polach i w bruzdach przewodu lufy.

Na rysunku 7 pokazano destrukcję pól i bruzd przewodu lufowego z widocznymi pęknięciami obwodowymi w warstwie azotków żelaza (rys. 7a, b). Ponadto powiększony obszar badawczy z uwagi na poszerzenie mierzonej strefy warstwy (rys. 7c, d), umożliwia pomiar twardości i obserwację charakteru przebiegu profilu twardości w przypadku badań na powierzchni zgładzie skośnym. Przykładowe porównanie tradycyjnego rozkładu twardości w warstwie azotowanej z rozkładem na jej zgładzie skośnym przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 7. Struktury powierzchni pól i bruzd przewodu lufy 5,56 mm ze stali 38HMJ azotowanej, wykonane na zgładzie metalograficznym skośnym; a – struktura powierzchni w obszarze bruzdy, b – struktura powierzchni w obszarze pola, c – mikrostruktura powierzchni w obszarze bruzdy na zgładzie skośnym, d – mikrostruktura powierzchni w obszarze pola na zgładzie skośnym

Fig. 7. The surface structure of fields and furrows of the barrel 5.56 mm with nitrided 38HMJ steel, made on metallographic oblique section; a – the surface structure of wrinkles, b – the surface structure of the field, c – microstructure surface in the furrows on metallographic oblique section, d – microstructure surface in the field on cross section



Rys. 8. Przebieg zmiany twardości w warstwie azotowanej stali 38HMJ; a – rozkład na zglądzie skośnym, b – rozkład na zglądzie prostopadłym do osi przewodu lufy

Fig. 8. Hardness distribution in nitrided layer of 38HMJ steel: a – hardness distribution on oblique metallographic section, b – hardness distribution on cross section perpendicular to the axis of the barrel

### 3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione przykłady systemów areologicznych analizowanych na zglądach sferycznych i skośnych, w tym metodą Baltest-M, pokazują zakres nowych informacji, jakie możemy uzyskać na temat zachowania się materiału powłok i warstw, w obszarze punktowej deformacji, realizowanej wgłębnikami dostępnych klasycznych twardościomierzy.

W dotychczasowych metodach analizy jakości warstw i powłok określających ich odporność na pęknięcie, wykruszanie, złuszczenie, źródłem informacji była jedynie ich powierzchnia. Zaprezentowana technika badawcza pozwala na uzyskanie precyzyjnych danych o zachowaniu się odkształcanych struktur w warstwie lub powłoce (pojedynczej, wielo- i multiwarstwowej), zwłaszcza w ich przekroju równoległym i prostopadłym do osi przewodu walcowego.

Na zgładzie sferycznym-skośnym możliwa jest analiza zjawisk destrukcji struktur w bliskich obszarach granicy warstwa, powłoka-podłoże oraz granic międzyfazowych warstw tworzących powłokę jedno- lub multiwarstwową.

Analizując obrazy przebiegu pęknięć w obszarze naroży śladu węgelnika Vickersa, Rockwella, można określić głębokość pola powierzchni pęknięcia. W przypadku badania materiałów kruchych, do których zaliczamy np. węgliki i azotki Ti, Zr, Cr, Si, można określić charakter wygenerowanych pęknięć w obrębie warstwy i powłoki. Na tej podstawie możemy ocenić ich odporności na kruche pęknięcie, określone krytyczną wartością współczynnika koncentracji naprężeń  $K_{Ic}$  [ 4].

Metodyka badawcza Baltest-M, oparta na zgładzie sferycznym-skośnym umożliwia szybką weryfikację jakości makrostruktury jej odporności na odkształcenia sprężysto-plastyczne i na tej podstawie prowadzenie badań nad optymalizacją technologii obróbki cieplno-chemicznej oraz nakładania warstw metodami galwanicznymi, których celem jest zastosowanie warstw i powłok o nowych lepszych właściwościach funkcjonalnych i eksploatacyjnych.

- Ujawniona struktura materiału powłoki na zgładzie sferycznym-skośnym umożliwia precyzyjną analizę zjawisk pęknięcia, wykruszania i delaminacji materiałów w systemie areologicznym na jego powierzchni i przekroju prostopadłym, równoległym do osi przewodu lufy.
- Zastosowanie metody Baltest-M umożliwia rozszerzenie informacji na temat zachowania się materiału warstw, powłok i podłoża w sytuacji silnego odkształcenia sprężysto-plastycznego generowanego przy pomiarach twardości HB, HRC, HV, w tym w przewodach luf strzeleckich.
- Metoda ta wymaga dalszych badań, zwłaszcza w zakresie systematyki jej opisu jakościowego i ilościowego.
- Zastosowanie metody Baltest-M na zgładzie sferycznym i skośnym znajduje zastosowanie w weryfikacji jakości warstw i powłok w korelacji z parametrami technologicznymi procesów galwanicznych i klasycznych procesów cieplno-chemicznych oraz aktywowanych plazmą.

## LITERATURA

- [1] Dębski A., Łataś Z. i inni, *Badania materiałowo-technologiczne nad zastosowaniem nowych materiałów i ekologicznych obróbek typu multiplex w wytwarzaniu luf broni strzeleckiej*, Sprawozdanie z pracy PBR 0025 RT009, Instytut Mechaniki precyzyjnej, Warszawa, 2011.
- [2] Burakowski T., *Rozważania o synergizmie w inżynierii powierzchni*, Wydawnictwo Politechniki Radomskiej, Radom, 2004.



- [3] Dobrzański L., Significance of materials science for the future development of societies, *Journal of Materials Processing Technology*, 175, pp. 133-148, 2006.
- [4] *Coating CVD, PVD of cold forging tools*, Verein Deutscher Ingenieure Normen, VDI 3198, VDI-Verlag, Dusseldorf, 1991.
- [5] Betiuk M., Baltest-M nowa metoda badawcza do oceny jakości struktury powierzchni powłok PVD, CVD, *Inżynieria Materiałowa*, 1, s. 1-4, 2009.
- [6] Betiuk M., Burdyński K., Michalski J., Wach P., Ujawnienie struktury cienkich warstw i powłok w badaniach metalograficznych za pomocą Kulotestera, *Inżynieria Powierzchni*, 3, s. 70-74, 2007.
- [7] Łataś Z., Michalski J., Tacikowski J., Betiuk M., Wach P., Senatorski J., Burdyński K., Wpływ regulowanego azotowania gazowego na trwałość eksploatacyjną przewodu luf broni strzeleckiej, *Problemy mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa*, vol. 4, nr 4(14), s. 53-66, 2013.

## **New Method for Evaluating Quality of Layers and Coatings of Inner Surfaces of Barrel Arms**

Zbigniew ŁATAŚ, Marek BETIUK, Jan TACIKOWSKI,  
Jerzy MICHALSKI, Piotr WACH

**Abstract.** The paper presents a method for evaluating the quality of the layers in relation to the methods of manufacturing aerological systems on internal and external surfaces of a pipe applicable to production of barrels of small arms. For example, research on technologies of thermo-chemical, developed in the Institute of Precision Mechanics (Warsaw, Poland), presented the results of the assessment of the quality of nitrided layers on the inner surfaces of the barrel caliber 5.56 mm, PVD coatings for pipes with a diameter greater than 30 mm. The possibilities of rapid and precise evaluation of the quality and the structure of layers and coatings on spherical cut using “Kulotester”, and on diagonal cut performed around the traces of indents of hardness measurements with the new test method Baltest-M, which is complementary to research in surface engineering, especially for the evaluation of layers ductility. Examples of application of a new method were referred to classical metallographic techniques for assessing the quality of layers and coatings obtained by the methods of controlled gas nitriding, carbonitriding, and chromium plating bath.

**Keywords:** surface engineering , the method of evaluation , barrel arms