

OCENA EFEKTYWNOŚCI AZOTOWANIA TYTANU TECHNICZNEGO W RÓŻNYCH OBSZARACH WYŁADOWANIA JARZENIOWEGO

Tadeusz FRĄCZEK, Krystian MAŹNIAK, Marzena OGÓREK

Streszczenie: W pracy dokonano analizy wpływu różnych wariantów umiejscowienia próbek w komorze roboczej pieca do azotowania, na właściwości warstwy wierzchniej powstałej podczas azotowania jednofazowego tytanu technicznego Ti99,2. Badano warstwy azotowane wytworzone w różnych obszarach wyładowania jarzeniowego po azotowaniu tego materiału w temperaturze $T = 833 \text{ K}$ ($560 \text{ }^\circ\text{C}$) i w czasie $t = 61,2 \text{ ks}$ (17 h). W celu oceny efektywności poszczególnych wariantów azotowania skupiono się głównie na analizie profilowej otrzymanych warstw powierzchniowych. Określono rozkład profilu pierwiastków Ti, N, O w warstwie wierzchniej metodą GDOES. Dodatkowo przeprowadzono badania metalograficzne otrzymanych struktur, tribologiczne oraz twardości uzyskanych warstw wierzchnich. Zastosowanie ekranu aktywnego w procesie azotowania zwiększyło głębokość dyfuzyjnie naazotowanej warstwy na wytypowanym do badań tytanie technicznym.

Słowa kluczowe: efektywność, azotowanie jonowe, ekran aktywny

1. Wstęp

Tytan i jego stopy są coraz częściej stosowane w wielu gałęziach przemysłu, jak również w medycynie, ponieważ tytan jest zaliczany do grupy biogodnych materiałów metalicznych. Szerokie zastosowanie tych materiałów wynika z ich unikalnych właściwości fizycznych i chemicznych [1]. Połączenie niskiej gęstości, dobrej odporności korozyjnej, z dobrą plastycznością i właściwościami mechanicznymi decyduje o zastosowaniu stopów tytanu w takich gałęziach przemysłu jak: lotnictwo, motoryzacja, energetyka, przemysł okrętowy, architektura a także sprzęt sportowy. Pomimo wielu cennych zalet, podstawowym mankamentem ograniczającym szersze zastosowanie tytanu i jego stopów są ich niskie właściwości tribologiczne. Powoduje to przyśpieszone zużycie na skutek tworzenia się złącz adhezyjnych oraz mechanicznej niestabilności pasywnej warstwy tlenków, szczególnie w obecności ciał trzecich. Analizując inne zastosowania tytanu i jego stopów, ujawnia się również niekorzystny wpływ reaktywnej natury tytanu i jego podatności do utleniania. Utworzona w temperaturze otoczenia warstwa tlenków jest cienka i posiada niską wytrzymałość, co sprzyja jej łatwemu usuwaniu w warunkach tarcia. Negatywny wpływ na zużycie powierzchni elementów wykonanych ze stopów tytanu wywiera niska odporność na ścinanie, wynikająca z heksagonalnej struktury krystalicznej $\text{Ti}\alpha$ [2]. Konfiguracja elektronowa powodująca wysoką reaktywność tytanu, struktura krystalograficzna oraz nieefektywność stosowanych konwencjonalnie smarów ogranicza stosowanie tytanu i jego stopów do warunków nie wymagających odporności na zużycie tribologiczne [3]. Całkowite lub przynajmniej częściowe wyeliminowanie wyżej wymienionych mankamentów staje się możliwe poprzez stosowanie różnych rodzajów obróbek powierzchniowych, która poprzez modyfikację składu chemicznego i fazowego

warstwy wierzchniej pozwala na efektywną poprawę trwałości eksploatacyjnej elementów wykonanych z tej grupy materiałów.

Do popularnych metod obróbki powierzchniowej tytanu i jego stopów zalicza się: utlenianie, azotowanie i jego pochodne, borowanie, nawęglanie, metody PVD i CVD oraz techniki laserowe i implantacji jonów [4].

Azotowanie tytanu i jego stopów realizowane może być tradycyjną metodą gazową, drogą przetapiania laserowego w atmosferze azotu, implantacji jonów lub też z wykorzystaniem technik jarzeniowych. Procesy jarzeniowe pozwalają na konstytuowanie warstw wierzchnich o określonej strukturze, składzie fazowym i chemicznym, co umożliwia zdecydowaną poprawę właściwości tribologiczne tytanu i jego stopów [5].

Azotowanie jarzeniowe tytanu i jego stopów jest problemem szeroko badanym i ciągle rozwijanym zarówno w skali światowej jak i krajowej, a wyniki prac naukowych wydawnie przyczyniły się do poszerzenia zakresu stosowania tytanu i jego stopów w medycynie, przemyśle maszynowym i zbrojeniowym oraz lotnictwie i kosmonautyce.

Czynnikiem limitującym grubość warstw uzyskanych w procesie azotowania jest niski współczynnik dyfuzji azotu w tytanie [6]. Dlatego też procesy te prowadzi się najczęściej w zakresie temperatur 973 ÷ 1423 K. Wyraźną poprawę odporności na zużycie przez tarcie i odporności korozyjnej tytanu i jego stopów stwierdzono również w przypadku ich azotowania w temperaturach poniżej 873 K [4], pomimo cieńszych warstw naazotowanych uzyskiwanych w tych temperaturach.

Niniejsze opracowanie dotyczy badań warstw wierzchnich uzyskiwanych na wytypowanym do badań tytanie technicznym, poddanym procesowi azotowania w różnych obszarach wyładowania jarzeniowego w temperaturze niższej od 873 K.

2. Materiał do badań i metodyka badań

Azotowaniu jarzeniowemu poddano tytan czysty technicznie Ti99,2 (gatunku Grade 2 według ASTM) o składzie chemicznym zestawionym w tabeli 1.

Tab. 1. Skład chemiczny tytanu tytanu technicznego TiGrade 2

Pierwiastek	C	Fe	O	N	H	Ti
Ti99,2	0,01	0,08	0,12	0,01	0,001	reszta
według certyfikatu wystawionego przez Daido Steel Co Ltd.						

Proces azotowania jarzeniowego przeprowadzono w urządzeniu do obróbek jarzeniowych z chłodzoną anodą typu JON-600, stosując następujące parametry azotowania: temperatura $T = 833 \text{ K}$ ($560 \text{ }^\circ\text{C}$), czas $t = 61,2 \text{ ks}$ (17 h), ciśnienie atmosfery $p = 150 \text{ Pa}$, skład atmosfery 75% $\text{N}_2 + 25\% \text{H}_2$. Zastosowano cztery warianty rozmieszczenia próbek w komorze jarzeniowej:

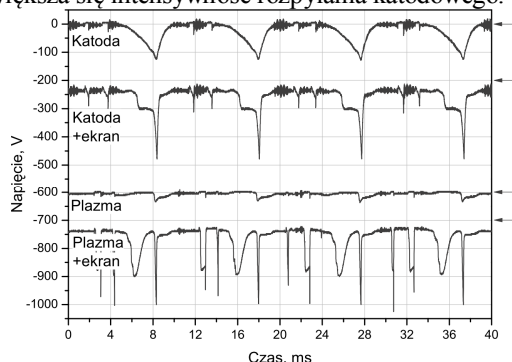
- bezpośrednio na katodzie (katoda - K),
- na powierzchni odizolowanej zarówno od anody jak i od katody, czyli w tzw. „potencjale plazmy” (plazma - P),
- na katodzie z ekranem aktywnym wykonanym z perforowanej blachy tytanowej (katoda + ekran – K+E),
- w potencjale plazmy również z ekranem aktywnym (plazma+ekran – P+E).

W pierwszym przypadku powierzchnia próbek bombardowana jest jonami o energiach wynikających z wartości spadku katodowego (około 100 eV) natomiast do podłoża odizolowanych od katody i anody docierające jony mają niewielką energię, ponieważ posiadają ujemną polaryzację względem plazmy rzędu 20 V tak, więc nie występuje w tym

przypadku efekt rozpylania [7]. Do odizolowania wsadu od katody i anody wykorzystano izolator z labiryntem ceramicznym [8]. Zastosowane w pozostałych wariantach azotowania ekrany aktywne miały na celu zintensyfikowanie zjawisk powierzchniowych w wyniku tworzenia się na ich powierzchni tzw. katod wnękowych.

Wyniki własnych badań azotowania jarzeniowego z ekranem aktywnym tytanu i jego stopów, pozwalają stwierdzić, że [4]:

- zastosowanie ekranu aktywnego zwiększa intensywność procesu azotowania, a także podwyższa jego temperaturę,
- ekran aktywny zmienia przede wszystkim charakterystyki napięciowe, zarówno ilościowe, jak i jakościowe (rys. 1). Powstają pod ekranem aktywnym dodatkowe impulsy napięcia. Wartości tych napięć są kilkukrotnie większe w porównaniu do napięć występujących podczas azotowania katodowego. Czas tych impulsów napięcia powoduje uzyskanie przez jony i inne aktywne składniki plazmy dużej prędkości. Odpowiada ona dużej energii kinetycznej rzędu nawet kilkuset elektronowoltów. Aktywne składniki plazmy są implantowane w materiał podłoża. Tworzą w warstwie wierzchniej nierównowagową strefę przesyconą azotem. Duże stężenie azotu ułatwia jego dyfuzję w głąb podłoża.
- podwyższenie temperatury podłoża tytanu, w procesie azotowania katodowego z zastosowaniem ekranu aktywnego powoduje, że warstwa azotowana tworzy się zarówno na powierzchni w środowisku plazmy, jak i na powierzchni przylegającej do katody. Świadczy to o obecności azotu cząsteczkowego, mimo niskotemperaturowego charakteru tego procesu azotowania,
- zjawiska bombardowania jonowego i rozpylania katodowego mają duży wpływ na kinetykę procesu azotowania, skład fazowy i morfologię składników fazowych mikrostruktury, tworzących się warstw wierzchnich – stąd w procesie azotowania na katodzie oraz z użyciem ekranu aktywnego, tworzą się w warstwie wierzchniej strefy azotków o dużym stężeniu azotu, w porównaniu do procesu azotowania w potencjale plazmy, prowadzącego do wytworzenia warstwy złożonej wyłącznie ze strefy dyfuzyjnej,
- proces azotowania w atmosferze mieszaniny azotu i wodoru przebiega z udziałem rodników NH , zdolnych do przyłączenia wodoru i wytworzenia aktywnych rodników NH_2 . Zmniejszenie stężenia azotu w mieszaninie zmniejsza ilość rodników NH . Dlatego przy małej zawartości azotu nie stwierdza się efektu azotowania na katodzie, natomiast zwiększa się intensywność rozpylania katodowego.

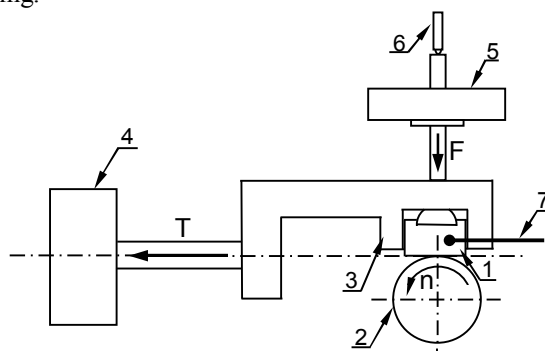


Rys.1. Analiza oscyloskopowa napięć zarejestrowanych z obszarów przykatodowych próbek

Test odporności na zużycie trybologiczne w warunkach tarcia suchego ze stykiem rozłożonym oraz badania współczynnika tarcia w układzie typu rolka–klocek przeprowadzono na testerze T-05 wyprodukowanym przez Instytut Technologii Eksploatacji w Radomiu, współpracującym z elektronicznym układem rejestracji danych Spider 8 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik oraz oprogramowaniem Catman Express v3.0R4. Parę trącą stanowiła jedna z azotowanych powierzchni prostopadłościennej próbki (klocka) o wymiarach 4x8x12 mm oraz rolka o średnicy 35 mm wykonana ze stali łożyskowej 100Cr6 o twardości około 61 HRC. Schemat urządzenia do badań ścieralności przedstawiono na rysunku 2. Podczas testu rejestrowane były następujące parametry: siła tarcia, przemieszczenie pary trącej oraz temperatura próbki. Badania współczynnika tarcia liczonego, jako:

$$\mu = \frac{T}{F_N}, \quad (1)$$

gdzie: μ – wsp. tarcia, T – siła tarcia, F_N – siła nacisku przeprowadzono przy obciążeniu 8,83 N w czasie 5 minut. Badanie odporności na zużycie ścierne przeprowadzono natomiast przy obciążeniu 13,73 N w czasie 30 min oraz prędkości liniowej ślizgu 1 m/s. Przyjęte parametry odpowiadają prędkości obrotowej wrzeciona 546 obr/min oraz drodze tarcia wynoszącej 1,6 km. Jako parametr odporności na zużycie ścierne wyznaczono ubytek masy próbek po teście ścieralności. Pomiaru masy próbek dokonano na wadze analitycznej WPA 40/160/C/1 wykonanej przez Zakłady Mechaniki Precyzyjnej Radwag z Radomia o dokładności 0,01 mg.



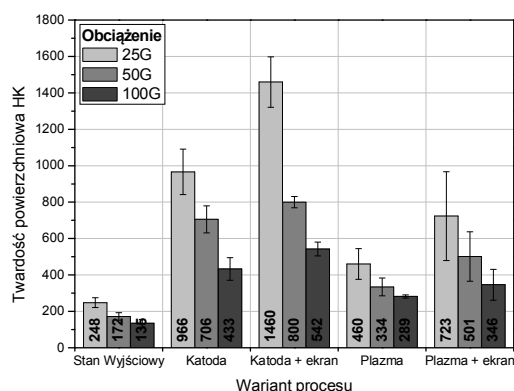
Rys. 2. Ideowy schemat testera T-05: 1) badany materiał, 2) rolka, 3) uchwyt próbki, 4) czujnik do pomiaru siły tarcie, 5) obciążenie, 6) czujnik przemieszczenia, 7) termoelement

Pomiaru rozkładu twardości w warstwie wierzchniej dokonano na mikrotwardościomierzu półautomatycznym FM-7 firmy FUTURE-TECH metodą Knoop.

Analiza rozkładów pierwiastków została przeprowadzona na optycznym spektrometrze emisyjnym z wyładowaniem jarzeniowym GDS GD PROFILER HR z wyładowczą lampą Grimma o średnicy katody 4 mm (rys. 1). RF GDOES (Glow Discharge Optical Emission Spectrometer) łączy wyładowanie jarzeniowe (GD) zasilane źródłem radiowym RF oraz optyczny spektrometr emisyjny (OE). Takie zestawienie pozwala na szybkie i dokładne wykonanie analizy objętościowej i analizy profilowej próbki.

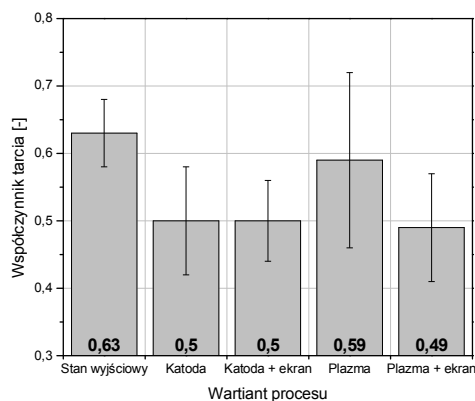
3. Wyniki badań

Uzyskane wyniki twardości powierzchniowej zilustrowano na rysunku 3. Najwyższą twardość powierzchniową uzyskano w przypadku azotowania katodowego próbek umieszczonych pod ekranem aktywnym, ten wariant azotowania spowodował około 7-krotny wzrost twardości, w porównaniu do stanu wyjściowego. Najmniejszy blisko 3-krotny wzrost twardości uzyskano dla wariantów azotowania w tzw. „potencjale plazmy”.



Rys. 3. Twardość powierzchniowa tytanu czystego technicznego Ti99,2 w stanie wyjściowym i po azotowaniu jarzeniowym

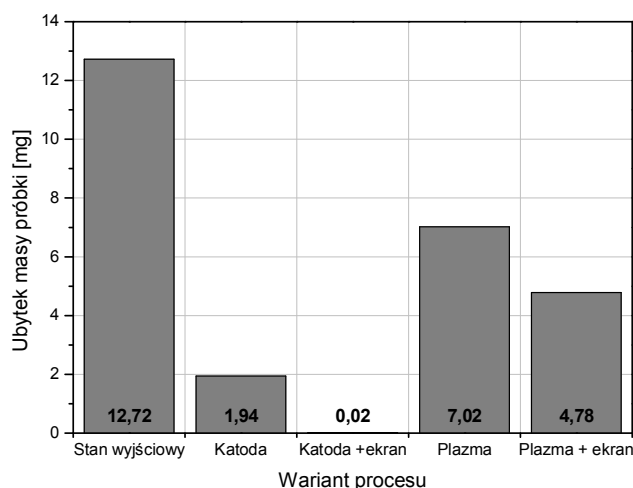
Uzyskane wartości współczynników tarcia oraz ubytków masy próbek po różnych wariantach azotowania jarzeniowego w porównaniu ze stanem wyjściowym zilustrowano graficznie na rysunkach 4 i 5. Natomiast na rysunkach 6 i 7 zobrazowano obraz zmian siły tarcia, przemieszczenia pary tarczej i temperatury w czasie badania tribologicznego.



Rys. 4. Współczynniki tarcia tytanu technicznego Ti99,2 po azotowaniu jarzeniowym

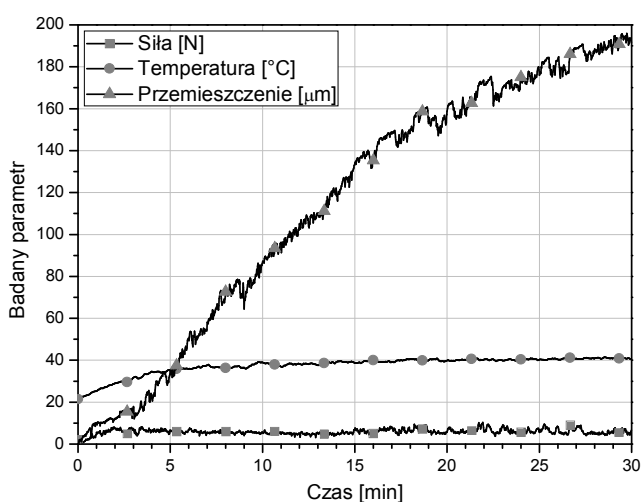
Analizując wyniki pomiarów ubytków masy próbek oraz wartości współczynników tarcia, po badaniach ścieralności można zauważyć, że każdy z zadanych parametrów procesu azotowania znacząco wpływa na poprawę odporności na zużycie trybologiczne, jak również powoduje obniżenie wartości współczynników tarcia (rys. 4÷5). Największy

wzrost odporności na zużycie obserwujemy podczas azotowania tytanu technicznego Ti99,2 na katodzie z zastosowaniem ekranu aktywnego. Najmniejszy wzrost odporności na zużycie stwierdzono dla wariantów azotowania w potencjale plazmy (rys.5).

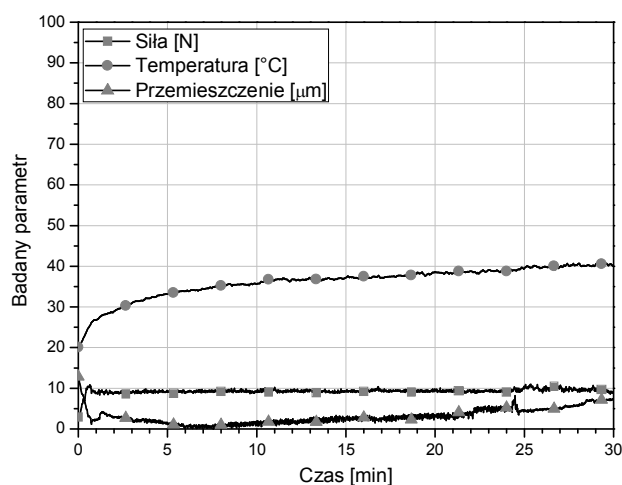


Rys. 5. Odporności na zużycie ściernych warstw wytworzonych na tytanie technicznym Ti99,6 po azotowaniu jarzeniowym

Porównując ze sobą przykładowe wykresy zmiany przemieszczenia pary trącej podczas testu odporności na zużycie azotowanej jarzeniowo próbki z tytanu technicznego Ti99,2 przy założonych parametrach testu, możemy zauważyć, że nastąpiło przemieszczenie pary trącej rzędu zaledwie kilku mikrometrów (rys. 7), przy czym część przemieszczenia powstała w skutek wycierania się powierzchni rolki ścierniczej. Natomiast podczas ściernia próbki nie poddanej procesowi azotowania wystąpiło gwałtowne zużycie materiału (rys. 6).

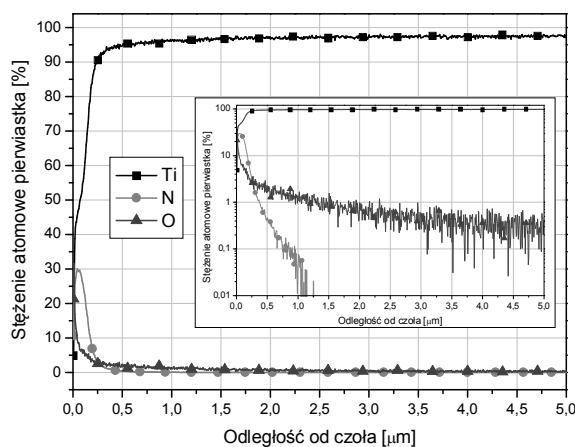


Rys. 6. Zmiana siły tarcia, przemieszczenia pary trącej i temperatury w czasie badania tribologicznego tytanu technicznego Ti 99,2 w stanie wyjściowym

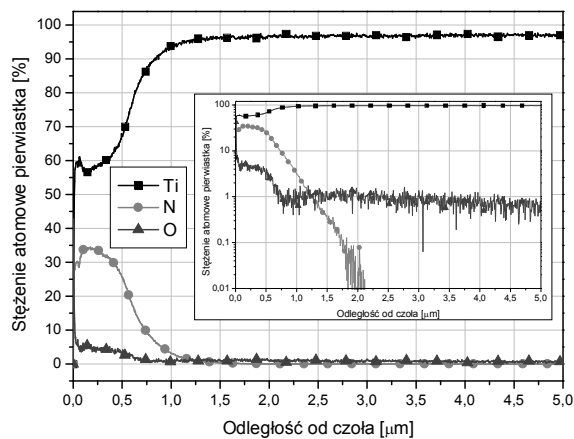


Rys. 7. Zmiana siły tarcia, przemieszczenia pary trącej i temperatury w czasie badania tribologicznego tytanu technicznego Ti99,2 po azotowaniu jarzeniowym

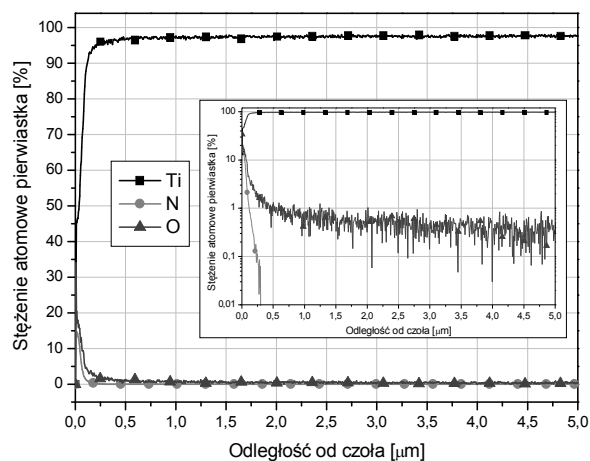
Analizując wyniki badań rozkładów profili pierwiastków w warstwach wierzchnich azotowanego tytanu technicznego Ti99,2 można zauważyć, że każdorazowe zastosowanie ekranu aktywnego spowodowało uzyskanie na powierzchni stref azotków o większej grubości w porównaniu z odpowiednimi wariantami azotowania bez ich stosowania (rys. 8 ÷ 11, tab. 2). Zastosowanie ekranu aktywnego podczas azotowania próbek umieszczonych na katodzie blisko 5-krotnie zwiększyło głębokość dyfuzji w głąb materiału (rys. 8÷9). Użycie ekranu aktywnego podczas azotowania tytanu technicznego Ti99,2 w potencjale plazmy spowodowało około 2-krotny wzrost głębokości dyfuzji azotu w głąb materiału. Nadmienić należy, że warstwa dyfuzji azotu po azotowaniu w potencjale plazmy osiąga najmniejszą grubość spośród wszystkich zastosowanych wariantów azotowania (rys. 10÷11).



Rys. 8. Profil rozkładu pierwiastków w warstwie wierzchniej po azotowaniu jarzeniowym na katodzie tytanu technicznego Ti 99,2



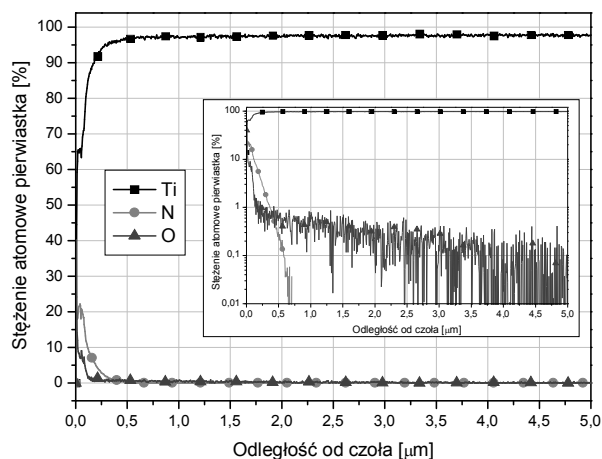
Rys. 9. Profil rozkładu pierwiastków w warstwie wierzchniej po azotowaniu jarzeniowym tytanu technicznego Ti99,2 na katodzie z udziałem ekranu aktywnego



Rys. 10. Profil rozkładu pierwiastków w warstwie wierzchniej tytanu technicznego Ti99,2 po azotowaniu jarzeniowym w potencjale plazmy

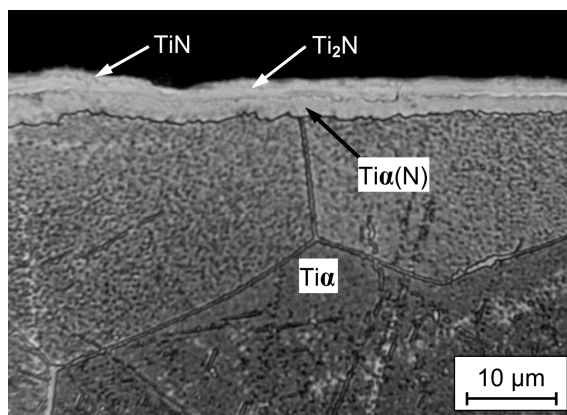
Tab. 2. Głębokość warstw wierzchnich po azotowaniu w różnych obszarach wyładowania jarzeniowego tytanu technicznego Ti99,2. T = 833 K (560 °C), czas t = 61,2 ks (17 h)

Obszar wyładowania	K	K+E	P	P+E
Głębokość warstwy wierzchniej, μm	2,84	9,68	0,46	2,13



Rys. 11. Profil rozkładu pierwiastków w warstwie wierzchniej po azotowaniu jarzeniowym tytanu technicznego Ti99,2 w potencjale plazmy z udziałem ekranu aktywnego

Warstwa azotowana na podłożu tytanu i jego stopów, w następujących obszarach plazmy wyładowania jarzeniowego: I – katoda, II – potencjał plazmy + ekran aktywny, III – katoda + ekran aktywny, ma budowę strefową (rys. 12). Wyróżnia się przypowierzchniową strefę azotków TiN , strefę azotków Ti_2N i najgłębiej położoną strefę ziaren roztworu stałego azotu w tytanie α – $Ti\alpha(N)$.

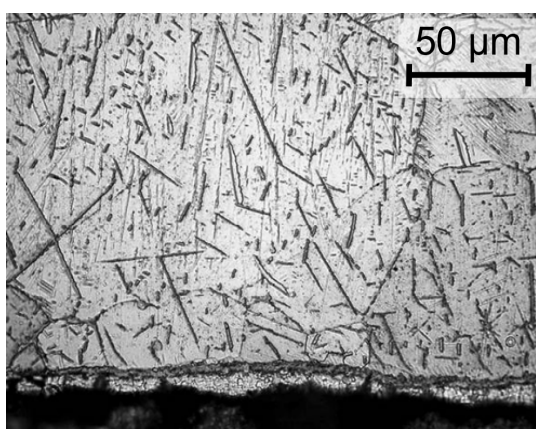


Rys. 12. Mikrostruktura warstwy wierzchniej tytanu technicznego Ti99,2 po azotowaniu jarzeniowym na katodzie [4]

Natomiast dla przypadku podłoża odizolowanego od katody i anody – azotowania w potencjale plazmy – nie stwierdzono obecności azotków. W mikrostrukturze warstwy azotowanej występują wtedy ziarna roztworu stałego azotu w tytanie $Ti\alpha(N)$. Przyczyną tego jest mała energia jonów dla podanych warunków procesu. Ponadto jony te charakteryzują się ujemną polaryzacją względem plazmy – ok. 20 V (rys. 1 - plazma). Stąd mały efekt zjawiska rozpylania [8]. Mała energia jonów, nie wystarcza także do wytrącania atomów metalu z podłoża, które reagowałyby z atomami azotu tworząc

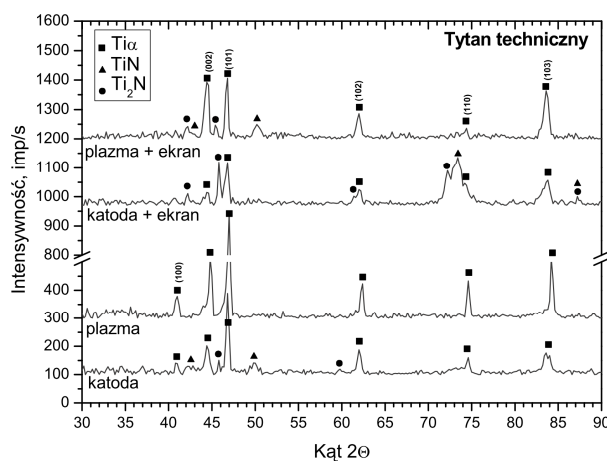
azotki. Dla takich warunków występuje tylko zjawisko adsorpcji jonów azotu, które dyfundując do sieci krystalicznej tytanu tworzą ziarna roztworu stałego azotu w tytanie $Ti\alpha(N)$.

Na uwagę zasługuje to, że proces azotowania na katodzie z zastosowaniem ekranu aktywnego, nawet dla tak niskiej stosowanej w eksperymencie temperatury, prowadzi do wytworzenia warstwy azotowanej na powierzchni osłoniętej od wyładowania jarzeniowego na powierzchni przylegającej do katody – spodzie azotowanego elementu (rys. 13). Dane literaturowe, wskazują możliwość wytworzenia warstwy azotowanej na takiej powierzchni, w znacznie wyższej temperaturze, niż stosowana podczas tego eksperymentu. Wówczas azotki tytanu powstają w wyniku reakcji tytanu podłoża z azotem cząsteczkowym [9].



Rys. 13. Struktura spodu próbki tytanu technicznego Ti99 po katodowym azotowaniu jarzeniowym z użyciem ekranu aktywnego

Powyższą budowę strefową potwierdziły przeprowadzone badania rentgenowskiej analizy fazowej (rys. 14).



Rys. 14. Dyfraktogramy powierzchni po różnych wariantach azotowania jarzeniowego tytanu technicznego Ti99,2

4. Podsumowanie

Dynamiczny rozwój współczesnej nauki i techniki stwarza konieczność stosowania materiałów o coraz większych właściwościach mechanicznych, szczególnie wytrzymałości zmęczeniowej, odporności na korozję oraz zużycie w warunkach tarcia w parach kinetycznych współpracujących elementów maszyn lub konstrukcji. Te podstawowe cechy zależą od właściwości ukonstruowanej warstwy wierzchniej tych elementów. We współczesnej praktyce inżynierskiej stosowane warstwy wierzchnie, o różnym składzie chemicznym i fazowym oraz morfologii składników fazowych mikrostruktury wytwarzane są w procesach obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej. Rosnące wymagania jakościowe odnośnie właściwości warstw wierzchnich materiałów metalicznych powodują wprowadzanie innowacyjnych i ekonomicznych technologii obróbek powierzchniowych. Do takich technologii można zaliczyć azotowanie jarzeniowe z zastosowaniem aktywnego ekranu. Zastosowanie tego nowego rozwiązania technologicznego pozwala: na uzyskanie zakładanych właściwości eksploatacyjnych materiałów, na obniżenie energochłonności procesu oraz na minimalizację kosztów.

Dzieje się tak dlatego, ponieważ uzyskanie większej energii jonów, w wyniku wprowadzenia ekranu aktywnego, jest decydującym czynnikiem intensyfikującym oddziaływanie plazmy wyładowania jarzeniowego w procesach azotowania tytanu technicznego Ti99,2.

Wprowadzenie ekranu aktywnego powoduje zmiany charakterystyki ilościowej i jakościowej napięcia (rys. 1). Zwiększa się wartość napięcia, a w efekcie także gęstości jonów oraz ich prędkości – uzyskują one energię kinetyczną o wartości ok. 300 eV. Jony o dużej energii implantowane są w materiał podłoża, tworząc w warstwie wierzchniej silnie nierównowagową strefę przesyconą azotem, co z kolei sprzyja dyfuzji azotu w głąb azotowanego tytanu.

Zastosowanie ekranu aktywnego prowadzi do podwyższenia temperatury plazmy, co skutkuje jednocześnie zmniejszeniem jej gęstości oraz zwiększeniem średniej drogi swobodnej elektronów i w efekcie – zwiększeniem energii jonów bombardujących azotowaną powierzchnię

Na podstawie przeprowadzonych badań trybologicznych, analizy profilowej rozkładu pierwiastków w warstwie wierzchniej oraz pomiarze twardości powierzchniowej technicznie czystego tytanu technicznego Ti99,2 w stanie wyjściowym oraz po azotowaniu jarzeniowym z różnymi wariantami umiejscowienia azotowanych próbek w komorze jarzeniowej, można stwierdzić, że:

- każdy z zastosowanych wariantów azotowania jarzeniowego wpływa na poprawę właściwości tribologicznych tytanu technicznego Ti99,2. Największy wzrost odporności na zużycie ścierne w warunkach tarcia suchego stwierdzono po azotowaniu na katodzie z zastosowaniem ekranu aktywnego (rys. 5), w tym przypadku ubytek masy próbki podczas testu tribologicznego był bardzo minimalny - 0,02 mg.
- najwyższą twardość powierzchniową uzyskano w przypadku azotowania katodowego próbek umieszczonych pod ekranem aktywnym (rys. 3), ten wariant azotowania jarzeniowego spowodował 7-krotny wzrost twardości w stosunku do stanu wyjściowego. Najmniejszy wzrost twardości uzyskano dla wariantów azotowania w tzw. „potencjale plazmy”.
- każdorazowe zastosowanie ekranu aktywnego spowodowało uzyskanie na powierzchni stref azotków o większej grubości w porównaniu z odpowiednimi

wariantami azotowania bez ich stosowania (rys. 8 ÷ 11, tab. 2). Zastosowanie ekranu aktywnego podczas azotowania próbek umieszczonych na katodzie blisko 5-krotnie zwiększyło głębokość dyfuzji w głąb materiału (rys. 8÷9). Użycie ekranu aktywnego podczas azotowania tytanu technicznego Ti99,2 w potencjale plazmy spowodowało około 2-krotny wzrost głębokości dyfuzji azotu w głąb materiału.

- proces azotowania na katodzie z zastosowaniem ekranu aktywnego, nawet dla tak niskiej stosowanej w eksperymencie temperatury, prowadzi do wytworzenia warstwy azotowanej na powierzchni osłoniętej od wyładowania jarzeniowego na powierzchni przylegającej do katody – spodzie azotowanego elementu (rys. 13).

Reasumując należy stwierdzić, że zastosowanie ekranu aktywnego w procesie azotowania jarzeniowego skutkuje zwiększeniem efektywności tego procesu. Dalsze badania tego procesu mierzyć powinny w kierunku określenia jego efektywności ekonomicznej. Opracowana technologia niekonwencjonalnego azotowania materiałów metalicznych z zastosowaniem ekranu aktywnego wywołuje zainteresowanie wielu specjalistów zajmujących się tą problematyką. Uzyskane wyniki badań będą pomocne w opracowaniu innowacyjnych technologii produkcji zaawansowanych materiałów metalicznych, poprzez praktyczne ich zastosowanie w przemyśle.

Literatura:

1. Bystrzycka J., Bojar Z., Przetakiewicz W., Varin R.A.; *Intermetale*, Wojskowy Przegląd Techniczny, Nr 6, 1993, 15÷24
2. Bell T., Morton P. H., Bloyce A., *Materials Science and Engineering*, Vol. A184, 1994, 73 ÷ 86
3. Dong H., Bell T., *Wear*, Vol. 238, 2000, 131-137.
4. Frączek T.: *Niekonwencjonalne niskotemperaturowe azotowanie jarzeniowe materiałów metalicznych*. Seria Monografie Nr 13, Wyd. WIPMiFS, Częstochowa 2011.
5. Wierzchoń T.: *Surface engineering of titanium alloys: new prospective aplikation*, *Materials Science Forum*. 2003. No 2563, p. 426-432
6. Bylica A., Sieniawski J.; *Tytan i jego stopy* PWN 1985.
7. Frączek T, Michalski J., *Rola potencjału plazmy w warunkach wyładowania jarzeniowego prądu stałego w procesie azotowania stali EJ96*, *Inżynieria Materiałowa*, (2002), (Nr 5), s. 299-301.
8. Michalski: D.C. *glow discharge in gas under lowered pressure in ion nitriding of Armco iron*, *Journal of Materials Science Letters*, 19, (2000), s. 1411-1414.
9. Roliński E.: *Azotowanie jonowe tytanu i jego stopów*, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, *Mechanika*, z. 118, 1988.

Dr hab. inż. Tadeusz Frączek, prof. PCz

Mgr inż. Krystian Maźniak

Mgr inż. Marzena Ogórek

Politechnika Częstochowska

Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów

Al. Armii Krajowej 19

42-200 Częstochowa

e-mail: marzenaogorek@wip.pcz.pl