

# Przeciwzuzyciowa, dwustopniowa obróbka powierzchniowa narzędzi stosowanych w przemyśle drzewnym

## STRESZCZENIE

Zastosowano technologię duplex, tj. sekwencyjne połączenie azotowania gazowego i procesu nanoszenia jednowarstwowej powłoki CrN techniką PVD, na noże do maszynowej obróbki drewna wykonane ze stali SW7M. Stosując duże spektrum metod badawczych: mikroskopię skaningową i optyczną do badania mikrostruktury układu powłoka – warstwa azotowana, metodę kalotest do pomiaru grubości powłoki, metodę Vickersa do pomiaru twardości, test Daimlera-Benz a oraz metodę scratch do badania adhezji wykazano, że wytworzenie modelowej budowy warstwy azotowanej, charakteryzującej się brakiem zewnętrznej strefy (węglo)azotków żelaza oraz brakiem wydzielen węglików żelaza na granicach ziaren gwarantuje istotny wzrost adhezji powłoki do podłoża.

**Słowa kluczowe:** warstwa azotowana, powłoki CrN, zużycie

## WPROWADZENIE

Właściwości warstw otrzymywanych po procesach duplex zależą w głównej mierze od synergicznego efektu wynikającego z połączenia dwóch pojedynczych procesów, a uzyskane tą drogą właściwości są nieosiągalne w przypadku pojedynczego procesu. Uzyskanie istotnego efektu synergicznego wymaga spełnienia jednoznacznie zdefiniowanych wymogów jakie ma spełniać warstwa azotowania będąca podłożem pod powłokę PVD. Nieodpowiednie połączenie i/lub niewłaściwa kontrola procesów może prowadzić do pogorszenia, a nie polepszenia efektu końcowego. Istotna jest właściwa identyfikacja reakcji, tak żeby efekty wynikające z pierwszego procesu nie zostały zredukowane przez drugi proces.

W artykule przedstawiono wyniki badań noży ze stali szybko tnącej (SW7M) po obróbce duplex, tj. po zmodyfikowaniu ich warstwy wierzchniej w wyniku zastosowania azotowania gazowego i następnie nałożeniu na ich powierzchnię jednowarstwowej powłoki z azotku chromu metodą PVD.

W celu uzyskania oczekiwanych rezultatów takiego sekwencyjnego połączenia wymienionych obróbek powierzchniowych, tj. wzrostu adhezji powłoki do podłoża, warstwa azotowana musi charakteryzować się ściśle zdefiniowanymi właściwościami. Przede wszystkim, musi być pozbawiona zewnętrznej strefy (węglo)azotków żelaza, ale jednocześnie ze strefą dyfuzyjną charakteryzującą się odpowiednio dużą twardością powierzchniową oraz możliwie największymi grubościami efektywnymi. Dodatkowo w celu uniknięcia kruchości warstwy należy dążyć do uniknięcia tworzenia się węglików na granicach byłego austenitu [1,2].

Te rygorystyczne wymagania połączone z bezwzględnym warunkiem otrzymywania w powtarzalny sposób założonej budowy warstwy stymulują badania w kierunku poszukiwań efektywnych metod projektowania algorytmu zmian parametrów procesu oraz poszerzenia spektrum metod kontroli procesu. Autorzy artykułu już od wielu lat pracują nad wieloma aspektami dotyczącymi procesu azotowania gazowego. W szczególności, zespół zagadnień dotyczący modelowania i projektowania procesów dyfuzyjnych przedstawiono

## Anti-wear duplex treatment of tools used in wood industrial

### ABSTRACT

Duplex technology was applied, i.e the sequential combination of gas nitriding and the process of deposition a monolayer coating CrN by PVD technique, to knife (made with SW7M steel) used in industrial wood machining. Using a large spectrum of research methods: optical and scanning electron microscopy to examine the microstructure of system - nitrided layer – coating, the ball cratering method (calotest) to the film thickness measurement, a method Vickers to measure the hardness, Daimler-Benz test and the scratch method to adhesion examination, showed that the formation of the nitrided layer model characterized by the absence of an external zone of iron (carbo)nitrides and the lack of iron carbides on the grain boundaries in diffusion zone provides a significant increase in adhesion of the coating to the substrate.

**Key words:** nitriding layer, CrN coating, wear

m.in. w pracach [3,4], natomiast metody kontroli procesu azotowania gazowego, głównie w oparciu o unikatowy czujnik magnetyczny tzw. czujnik rezultatu, w pracach [5,6].

W artykule zamieszczono wyniki wpływu modelowej struktury warstwy azotowanej otrzymanej w rezultacie zastosowania wspomnianych narzędzi na mikrostrukturę układu powłoka – warstwa oraz na adhezję powłoki do podłoża.

## CZEŚĆ DOŚWIADCZALNA

### 1. Proces azotowania

Proces azotowania przeprowadzono na stanowisku opisanym w pracach [4,6]. Oprócz standardowych układów regulacji składem atmosfery azotującej oraz temperaturą, stanowisko zostało wyposażone w automatyczny dysocjometr wodny służący do wyznaczania stopnia dysocjacji amoniaku i określania potencjału azotowy oraz czujnik rezultatu procesu (czujnik magnetyczny) [5].

Niezależnie od doboru zmian potencjału azotowego, a następnie kontroli parametrów procesu zapewniających uzyskiwanie jego wartości w trakcie trwania procesu, monitorowano i kontrolowano właściwy przebieg procesu za pomocą czujnika magnetycznego. Realizowano to poprzez porównywanie przebiegu bieżącego rejestrowanego przez czujnik z przebiegiem wzorcowym odwzorowującym tworzenie się warstwy azotowanej na stali SW7M zbudowanej wyłącznie ze strefy dyfuzyjnej.

### 2. Technologia nakładania powłok CrN

Powłokę CrN nanoszono metodą katodowego odparowania łukowego na azotowane i nieazotowane podłoża (noże) ze stali SW7M. Podłoża po kąpielii alkalicznej przy wykorzystaniu ultradźwięków montowano na obrotowym stoliku, w komorze roboczej w odległości 18 cm od źródeł. Podłoża podgrzewano radiacyjnie do temp. 300 °C. Proces nanoszenia powłoki poprzedzało trawienie jonami metalu przy napięciu -600 V w czasie 10 minut i ciśnieniu argonu w komorze 0,5 Pa. Jego celem było usunięcie słabo związanych cząstek z trawionej powierzchni. Aby poprawić przyczepność powłok do podłoża jako podwarstwę stosowano cienką warstwę chromu o grubości około 0,1 μm. W silnopiędowym katodowym wyładowaniu łukowym otrzymywana jest plazma o dużym stopniu jonizacji. Anodę stanowią ścianki komory próżniowej. Ukierunkowanie i zwiększenie energii kinetycznej jonów następuje poprzez polaryzację ujemnym napięciem

prof. dr hab. **Jerzy Ratajski** (jerzy.ratajski@tu.koszalin.pl),  
mgr **Roman Olik** (roman.olik@tu.koszalin.pl),  
dr inż. **B. Warcholiński** (bogdan.warcholinski@tu.koszalin.pl),  
mgr inż. **Adam Gilewicz** (adam.gilewicz@tu.koszalin.pl),  
mgr inż. **Jan Kwiatkowski** (jan.kwiatkowski@tu.koszalin.pl)  
mgr **Łukasz Szparaga** (lukasz.szparaga@tu.koszalin.pl), Instytut Mechatroniki,  
Nanotechnologii i Techniki Próżniowej, Politechnika Koszalińska  
doc. dr hab. inż. **Jerzy Michalski** (michalski@imp.edu.pl), Instytut Mechaniki  
Precyzyjnej, Warszawa

(- 70 V) podłoża, na które nanoszona jest powłoka. Parametry procesu nanoszenia powłoki CrN zawarto w pracy [7].

### 3. Metody badawcze

Morfologię powierzchni próbek rejestrowano na elektronowym mikroskopie skaningowym JEOL (JSM 5500 LV, U — 15000 V) oraz mikroskopie optycznym NIKON Eclipse MK200. Twardość powierzchniową po procesie azotowania mierzono przy użyciu twardościomierza Vickersa FV-700 a rozkład mikrotwardości na zglądach poprzecznych przy użyciu mikroskopu Neophot 2 i przystawki Hannemana. Twardość powłok CrN została wyznaczona przy użyciu nanoindentera Fischerscope® HM2000 ustalając głębokość wnikiwania węgelnika na około 0,2 μm.

Adhezję powłok do podłoża wyznaczano przy użyciu urządzenia Revetest z węgelnikiem diamentowym Rockwella typu C. Węgelnik przemieszczano z szybkością 10 mm/min zmieniając liniowo siłę nacisku od 0 do 200 N z szybkością 100 N/min. Siłę krytyczną  $L_{c1}$  określano jako siłę, przy stosowaniu której pojawiają się pierwsze pęknięcia powłoki, natomiast siłę krytyczną  $L_{c2}$  jako siłę, przy której następuje całkowite oderwanie powłoki od podłoża. Parametry te określano jako średnią z co najmniej trzech zarysowań. Do sprawdzenia adhezji warstw wykorzystano także test Daimlera-Benza [8]. Polega on na ocenie zniszczenia powłoki wywołanego przez stożek Rockwella wciskany z siłą (ok. 1470 N = 150 kG) w układ podłoża – warstwa. Miarą adhezji jest opór przeciwko propagacji zainicjowanego pęknięcia wzdłuż strefy międzyfazowej.

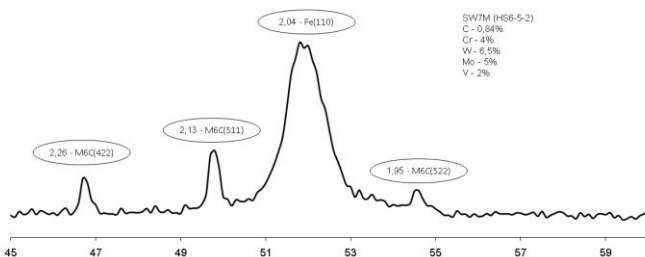
Pomiary współczynnika tarcia wykonano w układzie kula-płaszczyzna przy obciążeniu 20 N i prędkości około 0,2 m/s w warunkach tarcia suchego na drodze 1000 m. Przeciwpórkę stanowiły kulki alundowe o twardości około 15 GPa, średnicy 10 mm i  $R_a < 0,03 \mu m$ . Pomiary przeprowadzono w atmosferze o wilgotności około 40 % w temperaturze otoczenia. Profil wytarcia kuli mierzono za pomocą profilografu Hommel Werke T 8000. Współczynnik zużycia wyznaczono jako objętość usuniętego podczas testu tarcia materiału w stosunku do iloczynu drogi tarcia i działającej siły [9].

## REZULTATY

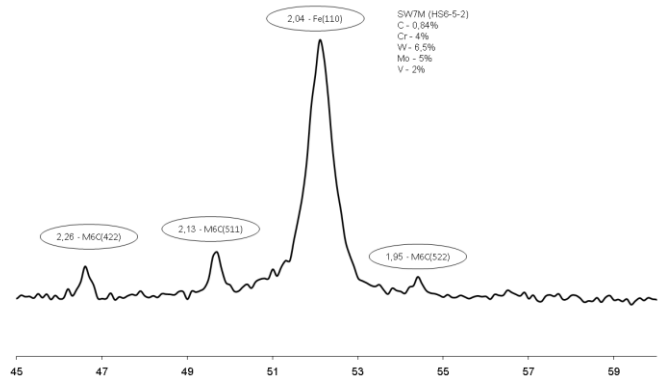
### 1. Azotowanie podłoża ze stali SW7M

Przeprowadzono serię procesów azotowania stali SW7M wg opracowanych algorytmów zmian parametrów. Warstwy azotowane, uzyskane w tych procesach spełniały założone właściwości. Najistotniejszym z nich jest niewystępowanie strefy (węglo)azotków żelaza na powierzchni tzw. białe warstwy. Potwierdzone to zostało badaniami rentgenowskimi, które zaprezentowano na rys. 1. W porównaniu do dyfraktogramu uzyskanego dla stali przed azotowaniem (rys. 2) obserwuje się poszerzenie linii (110) żelaza oraz przesunięcie w kierunku mniejszych kątów spowodowane naprężeniami i ekspansją sieciową w strefie dyfuzyjnej. Mikrostruktura stali po azotowaniu (mikroskopia optyczna, zgląd poprzeczny) przedstawiona na rys. 3 nie ujawnia wydzielenia węglików w obszarach granic ziaren byłego austenitu.

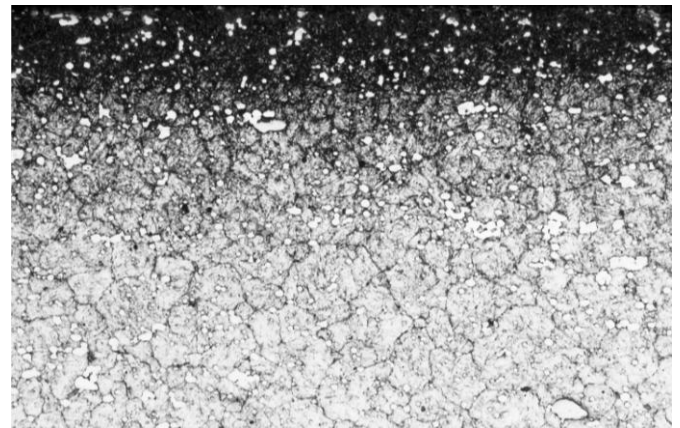
SW7M - nóż - azotowany - pr.812



Rys. 1. Dyfraktogram azotowanej stali SW7M  
Fig. 1. X-ray pattern of nitrided HS6-5-2 steel

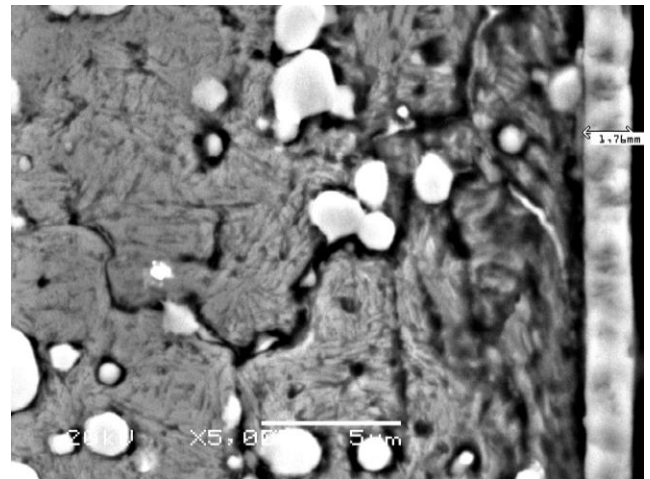


Rys. 2. Dyfraktogram stali SW7M  
Fig. 2. X-ray pattern of HS6-5-2 steel

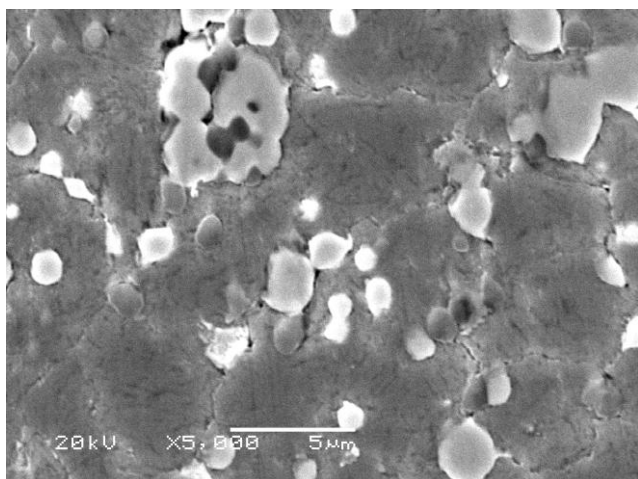


Rys. 3. Mikrostruktura stali SW7M, mikroskop optyczny, zgląd poprzeczny trawiony nitalem.  
Fig. 3. Microstructure of HS6-5-2 steel, optical microscope.

Dobitnie potwierdza to mikrostruktura otrzymana przy wykorzystaniu skaningowej mikroskopii elektronowej – rys. 4). Dla porównania zestawiono tą fotografię z mikrostrukturą części rdzeniowej, do której nie dociera azot (rys. 5). Drugim bardzo ważnym parametrem jest uzyskanie wysokiej twardości powierzchniowej sięgającej 1200 HV<sub>0,5</sub> oraz założonej grubości strefy dyfuzyjnej 50 μm.



Rys. 4. Mikrostruktura azotowanej stali SW7M, mikroskop elektronowy, zgląd poprzeczny trawiony nitalem + powłoka CrN  
Fig. 4. Microstructure of nitrided HS6-5-2 steel, SE microscope.



Rys. 5. Mikrostruktura stali SW7M, mikroskop elektronowy, zgląd poprzeczny trawiony nitem.

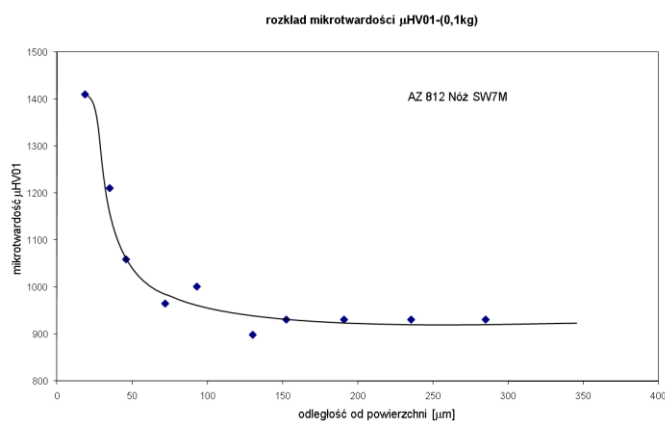
Fig. 5. Microstructure of HS6-5-2 steel, SE microscope.

Wyniki pomiarów twardości zestawiono w tabeli 1 a rozkład twardości na przekroju poprzecznym ilustruje rys. 6).

Tabela A. Twardość powierzchniowa azotowanej stali SW7M.

Table 1. Surface hardness of nitrided HS6-5-2 steel.

Twardość powierzchniowa	Twardość
HV0,5	1206
HV1	1050
HV5	990
HV30	947



Rys. 6. Rozkład mikrotwardości azotowanej stali SW7M

Fig. 6. Microhardness profile of nitrided HS6-5-2 steel

## 2. Układ podłoże - powłoka CrN

Powłoki CrN naniesione na podłoża ze stali SW7M zarówno nieazotowanej jak i azotowanej charakteryzują się jednakową grubością w całym obszarze jej występowania, szczelnym przyleganiem do materiału podłoża, a także zwartą budową bez widocznych rozwarstwień. Nie występują obszary słabego przylegania powłoki do podłoża. Podstawowe właściwości powłok zestawiono w tabeli A. Są one porównywalne do danych prezentowanych przez innych autorów [10].

Tabela 2. Właściwości powłoki CrN na podłożach ze stali SW7M.

Table 2. The properties of CrN coatings on HS6-5-2 steel.

Grubość powłoki [µm]	1,8 ± 0,2
Twardość powłoki H [GPa]	23,6 ± 0,8
Moduł Younga powłoki E [GPa]	285 ± 8
Wskaźnik H/E	0,082 ± 0,005
Współczynnik tarcia	0,51 ± 0,02

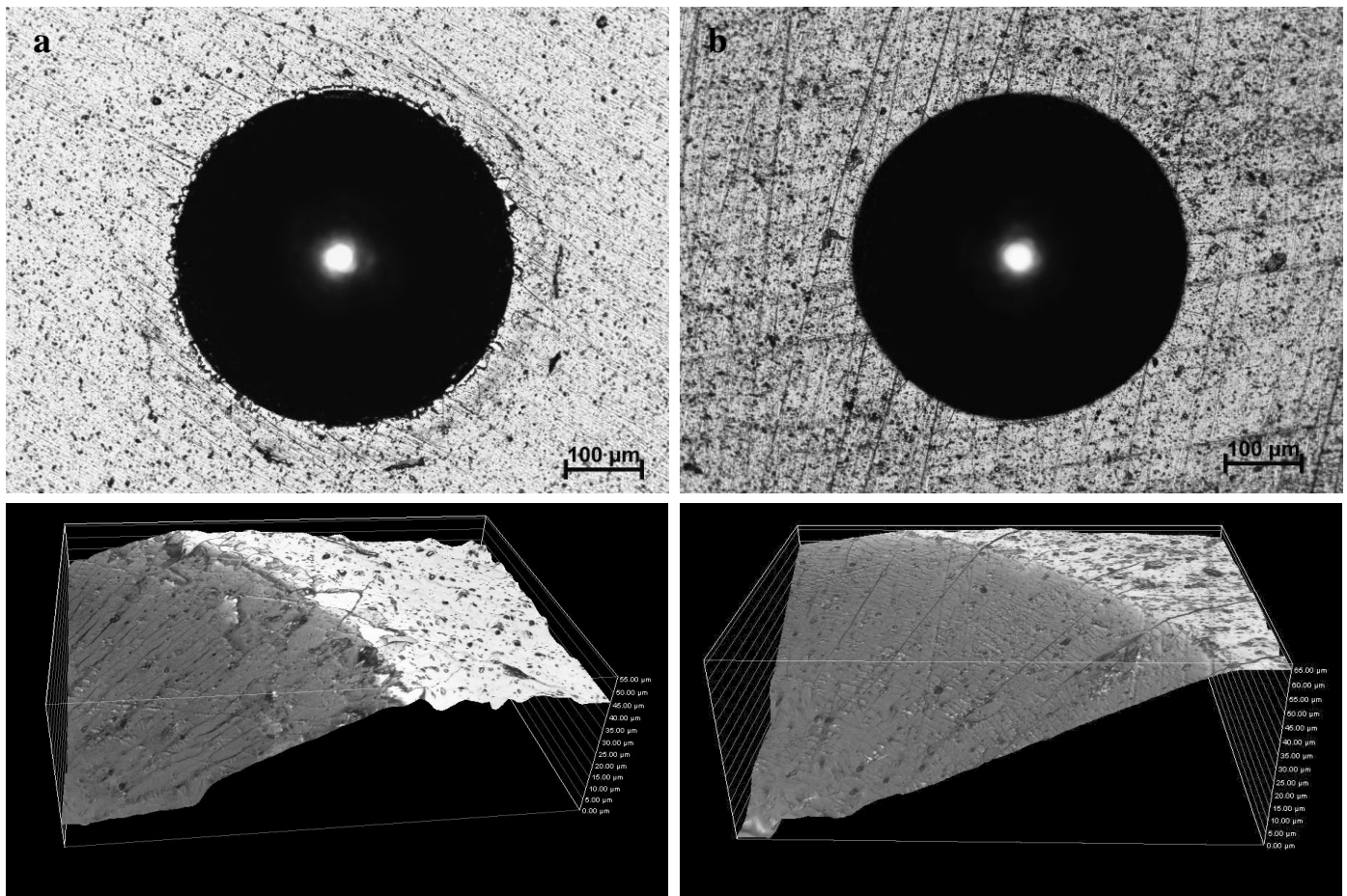
Jednym z ważniejszych parametrów decydujących o właściwościach tribologicznych powłok jest ich przyczepność do podłoża. Spośród wielu metod określania adhezji jedną z prostszych i powszechnie stosowanych jest metoda rysy. Metoda ta charakteryzuje się stosunkowo krótkim czasem pomiaru, dużą powtarzalnością łatwo interpretowalnych wyników oraz symuluje obciążenia (naprężenia) występujące w czasie eksploatacji wyrobu z powłoką. Przyłożenie liniowo rosnącej siły normalnej do badanego układu powłoka-podłoże powoduje generację naprężeń w układzie. Mogą mieć zarówno charakter rozciągający jak i ściskający. Naprężenia te oddziałują wspólnie z naprężeniami występującymi w powłoce i powstałymi np. na skutek różnicy współczynników rozszerzalności termicznej materiału podłoża i powłoki. Po przekroczeniu wartości krytycznej naprężeń powłoka jest usuwana – stan ten odpowiada sile krytycznej. Uszkodzenie takie ma charakter adhezyjny. Jeżeli dochodzi do utraty spójności materiału. Uszkodzenie układu warstwa-podłoże występuje w obszarze powłoki lub w miejscu oddalonym od powierzchni przylegania, stan taki nazywa się dekohezją. Wystąpienie uszkodzenia kohezijnego świadczy o dobrej przyczepności powłok do podłoża. Ślizganiu się obciążonego diamentowego węgelnika po powłoce towarzyszy odeszczynienie plastyczne podłoża i wciskanie weń powłoki. Pojawia się także siła tnąca działająca na granicy wgniecenia powłoki.

W teście Daimlera-Benz a miarą adhezji jest opór przeciwko propagacji zainicjowanego pęknięcia wzdłuż strefy międzyfazowej. Opór ten odpowiada siłom wiązania w tym obszarze. Jeżeli pęknięcie i jego propagacja nie następuje w obszarze międzyfazowym, lecz w podłożu lub powłoce, to znaczy, że przyczepność badanych powierzchni jest przynajmniej tak duża, jak odporność słabszego składnika układu podłoże –powłoka. Na obrazie mikroskopowym odcisku (rysunek 7) widać różną „odpowieź” powłoki na obciążenie. Na zdjęciu powłoki CrN na nieazotowanym podłożu (rys. 7a) widoczne są liczne pęknięcia zarówno na granicy powłoka-odcisk jak i wewnątrz odcisku skutkujące jej dużą delaminacją. Wyraźna strefa wykruszenia powłoki występuje na niemal całym obwodzie odcisku. Zupełnie inaczej zachowuje się powłoka CrN na azotowanym podłożu – rysunek 7b. widoczne są jedynie niewielkie pęknięcia promieniowe oraz całkowity brak odprysków powłoki. Charakteryzuje się ona bardzo dobrą przyczepnością do podłoża.

Test rysy obrazuje wartościowo, w odróżnieniu od metody Daimlera-Benz a, siłę przylegania powłoki do podłoża. Bezpośrednie porównanie siły przylegania tej samej powłoki do różnych podłoży ma duże znaczenie praktyczne. Zwiększenie twardości podłoża poprzez jego obróbkę cieplno-chemiczną korzystnie wpływa na wzrost siły krytycznej w stosunku do podłoża niepodanego takiej obróbce – rysunek 8. Badany wariant nieazotowane podłoże SW7M - powłoka CrN charakteryzuje się siłą krytyczną około 80 N, natomiast układ azotowane podłoże SW7M – powłoka CrN siłą około 120 N.

Poniżej przedstawiono (rysunek 9) obrazy zarysowania zarówno dla samych podłoży jak i układów podłoże-powłoka dla czterech obciążeń około 40 N, 60 N, 80 N i 120 N. W rysie azotowanego podłoża przy obciążeniu około 40 N następuje wciśnięcie powłoki w podłoże na głębokość około 15 µm. Przy obciążeniu około 60 N (przy głębokości rysy około 30 µm) zaobserwować można początkowe pęknięcia strefy azotowanej. Związane są one z tarcowym rozciąganiem strefy azotowanej. Pęknięcia te kończą się przy obciążeniu wynoszącym 140 N. Podłoże z nieazotowanej stali nie wykazuje żadnych efektów niszczenia powierzchni oprócz wystąpienia rysy. Podłoże nieazotowane z powłoką CrN wykazuje siłę krytyczną  $L_{c1}$  (pierwsze pęknięcia) przy obciążeniu 41 N. Przy 60 N widoczne są (rysunek 9) pęknięcia konforemne prowadzące do odwarstwienia i/lub wykruszania powłoki. Przy obciążeniu 80 N zapoczątkowane jest odrywanie powłoki od podłoża, tak że przy 120 N widoczne jest samo podłoże.

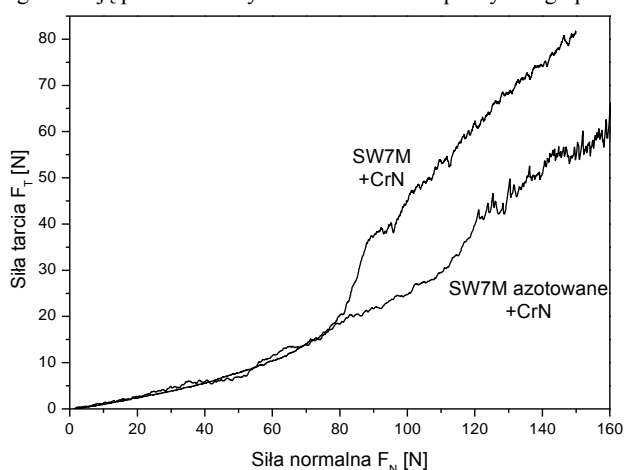
Powłoka CrN na podłożu azotowanym wykazuje wyraźne pęknięcia wywołane rozciąganiem, zarówno dla 60 N jak i 80 N. Pierwsze pęknięcia powłoki występują przy obciążeniu 56 N. Dopiero przy obciążeniu 120 N widoczne jest odsłonięcie podłoża będące miarą siły krytycznej  $L_{c2}$ . Interesujące jest, że pęknięcia strefy dyfuzyjnej obserwowane na podłożu z azotowanej stali SW7M do 140 N nie występują w przypadku układu podłoże – powłoka CrN.



Rys. 7. Obraz odcisku Rockwella i wycinek odcisku (zdjęcia poniżej) dla powłoki CrN na podłożu ze stali SW7M nieazotowanej (a) oraz azotowanej (b).

Fig. 7. The Rockwell indent on CrN coating on un-nitrided HS6-5-2 steel (a) and on nitrided HS6-5-2 steel (b). Below the sector of the Rockwell indent in three-dimensional projection.

Obserwowany wzrost siły krytycznej jest związany ze wzrostem twardości podłoża. Efekt ten obserwowany był także przez [11, 12]. Zaznaczyć należy, że proces azotowania gazowego podłoża ogranicza fragmentację powłoki w wyniku odkształcenia plastycznego podłoża.

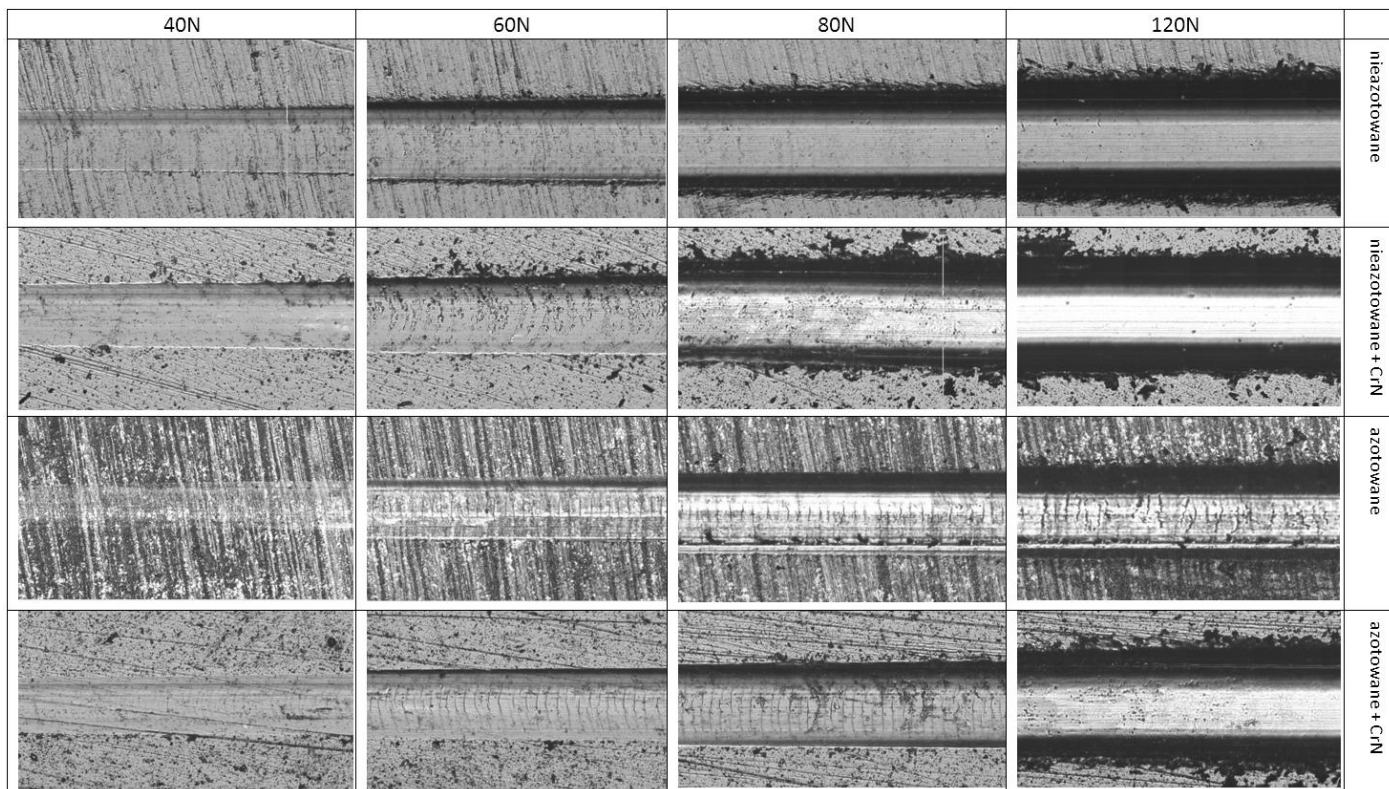


Rys. 8. Zależność siły stycznej od siły normalnej w teście rysy dla dwóch układów, podłoża SW7M + powłoka CrN oraz podłoża azotowane SW7M + powłoka CrN.

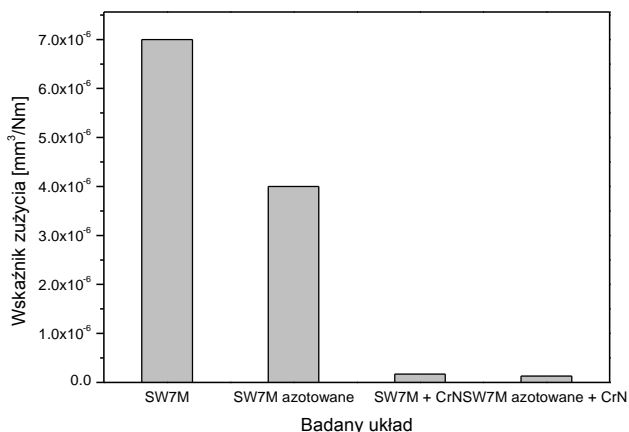
Fig. 8. Diagram of the dependence of the friction force  $F_T$  on the normal force  $F_N$  for the un-nitrided HS6-5-2 steel – CrN coating system and nitrided HS6-5-2 steel – CrN coating system.

Nie następowało także całkowite oderwanie powłoki od podłoża. Zwiększenie przyczepności powłoki powoduje ograniczenie pękania konforemnego, rozwarstwień i wykruszeń. Ma to szczególne znaczenie przy eksploatacji modyfikowanych detali zwiększając ich trwałość. Diamentowy wglębnik Rockwella powoduje plastyczną deformację podłoża. Może to świadczyć o znacznym spiętrzeniu materiału wzdłuż rysy jeszcze przed osiągnięciem krytycznej wartości obciążenia potrzebnej do oderwania powłoki od podłoża [13]. Mimo że warstwa ulega deformacji wraz z podłożem, to nie zachodzi jej delaminacja. Wskazuje to na doskonałą adhezję powłok i odporność na obciążenia dynamiczne. Mikrowykruszenia materiału powłoki na granicy rylec-powłoka występują dopiero po przekroczeniu obciążenia  $Lc_2$  i związane jest z dużą kruchością powłoki wynikającą z dużej jej twardości. Efekt spiętrzenia materiału podłoża wzdłuż rysy i w obszarze przed wglębkiem dotyczy tylko stali [13].

Wykonane pomiary wskaźnika zużycia dla układu powłoka-podłoża, ale także podłoża bez powłoki wskazują, że wzrost twardości podłoża wpływa na obniżenie wskaźnika zużycia – rysunek 10. Wyznaczony wskaźnik zużycia dla powłoki CrN na podłożu SW7M azotowanym i nieazotowanym nie wykazuje istotnej różnicy. Niskie wskaźniki zużycia powłoki CrN wynikają z faktu, że podczas testu powłoka nie została uszkodzona mimo przeprowadzenia ośmiu testów na drodze o długości 2400 m (blisko 64000 obrotów w czasie 12000 s) – rys. 11.



Rys. 9. Ślad zarysowania na powłoce CrN na podłożu nieazotowanym i azotowanym oraz na podłożach bez powłoki.  
Fig. 9. Scratch failure pictures of the CrN coating on unnitrided and nitrided substrates and on the uncoated substrates.



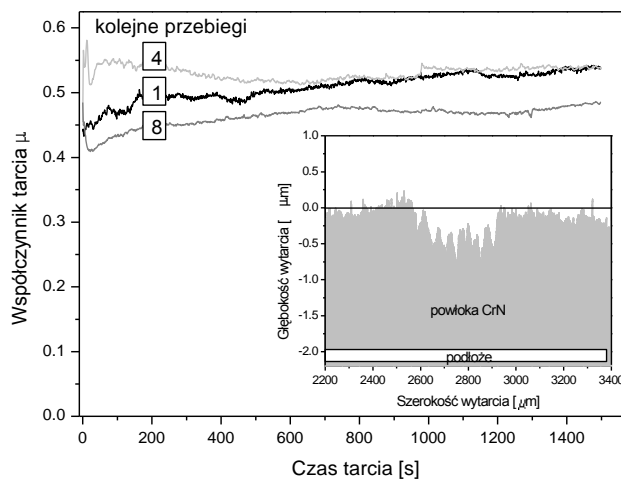
Rys. 10. Wskaźnik zużycia badanych układów podłoże-powłoka.  
Fig. 10. The wear rate for tested substrate-coating systems

## WNIOSKI

Twardość powłoki wpływająca na jej odporność na zużycie ściernie, odporność na kruche pęknięcie, struktura czy współczynnik tarcia nie będą miały większego znaczenia przy małej przyczepności powłoki do podłoża. Mała jej wartość powoduje niemal natychmiastowe zerwanie powłoki przy kontakcie narzędzia z obrabianym elementem. To właśnie adhezja charakteryzuje zdolność układu podłoże-powłoka do przenoszenia obciążeń.

Za przyczepność odpowiadają zarówno siły wiązań chemicznych, procesy zachodzące na granicy podłoże-powłoka, takie jak np. dyfuzja wzajemna atomów jak i powierzchnia rozwinięcia podłoża.

Przedstawione w pracy wyniki badań ilustrują korzystny wpływ zastosowania procesu azotowania gazowego na adhezję jednowarstwowej powłoki CrN. Warunkiem koniecznym otrzymania polepszenia właściwości adhezyjnych powłok i w konsekwencji ich



Rys. 11. Zmiany współczynnika tarcia powłoki CrN na azotowanym podłożu SW7M w wybranych testach. Wewnątrz profil zużycia powłoki CrN po 2400 m drogi tarcia.

Fig. 11. The variation of friction coefficient of CrN coating on nitrided HS6-5-2 substrate in selected tracks. Inside is the wear profile of CrN coating after 2400 m of wear length.

trwałości jest odpowiednia budowa fazowa i mikrostruktura warstwy azotowanej. W szczególności warstwa azotowana musi być pozbawiona zewnętrznej strefy (węglo)azotków żelaza, a w strefie dyfuzyjnej nie może być wydzielonych węglków żelaza na granicach ziaren.

Badania finansowane ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007-2013. Działanie 1.3.

## LITERATURA

- [1] Dobrzański L. A., Madejski J., Malina W., Sitek W.: The prototype of an expert system for the selection of high-speed steels for cutting tools; *Journal of Materials Processing Technology* 56 (1996), 873-881.
- [2] Kumar, S.; Singh, R.: A short note on an intelligent system for selection of materials for progressive die components. *Journal of Materials Processing Technology* 182, (2007), 456-461.
- [3] Lipiński, D.; Ratajski, J.: Modeling of Microhardness Profile in Nitriding Processes Using Artificial Neural Network. *Lecture Notes in Computer Science* 4682, (2007), 245-249
- [4] Ratajski J., Tacikowski J., Olik R., Suszko T., Łupicka O.: Intelligent control system for gaseous nitriding process, *Metallurgia Italiana* 6, (2006), 1b.
- [5] Ratajski J.: Monitoring nitride layer growth using magnetic sensor, *Surface Engineering* Vol. 17 No. 3, (2001), p.193.
- [6] Ratajski J., Olik R., Suszko T. Michalski J.: Design, Control and in Situ Visualization of Gas Nitriding Processes. *Sensors*, 10, (2010), 218-240
- [7] Warcholiński B., Gilewicz A.: Właściwości mechaniczne powłok  $Cr_xN$ , *Inżynieria Powierzchni* 3 (2009) 27 – 33
- [8] Verein Deutscher Ingenieure, Richtlinie 3198, 1992, Dusseldorf, Germany
- [9] Archard J.F.: Contact and rubbing of flat surfaces, *J. Appl. Phys.*, 24(8), 1953, 981-988.
- [10] Wu Z.L., Lin J., Moore J.J., Lei M.K.: Microstructure, mechanical and tribological properties of Cr-C-N coatings deposited by pulsed closed field unbalanced magnetron sputtering, *Surf. Coat. Technol.* 204 (2009) 931 – 935.
- [11] Ichimura H., Rodrigo A.: The correlation of scratch adhesion with composite hardness for TiN coatings, *Surf. Coat. Technol.* 126 ((2000) 152-158.
- [12] Stallard J., Poulat S., Teer D.G.: The study of the adhesion of a TiN coating on steel and titanium alloy substrates using multi-mode scratch tester, *Tribology International*, 39 (2006) 159-166.
- [13] Kupczyk M.J.: Wytwarzanie i eksploatacja narzędzi skrawających z powłokami przeciwzużyciowymi, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009.