

Kinga CHRONOWSKA¹, Marcin KOT², Łukasz MAJOR³

ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI NOWYCH GRUP POWŁOK STOSOWANYCH NA WYSOKO OBCIĄŻONE ELEMENTY MASZYN

Streszczenie. W artykule przedstawiono przegląd nowych grup powłok tribologicznych o złożonej mikrostrukturze, nakładanych metodami PVD (Physical Vapour Deposition) oraz CVD (Chemical Vapour Deposition). Zaprezentowano wyniki badań strukturalnych (TEM), mechanicznych i tribologicznych powłok nanokompozytowych nc-Cr₂C/a-C:H i wielowarstwowych 16x(Ti/TiN). Właściwości tych nowoczesnych powłok porównano z właściwościami dwóch pojedynczych powłok a-C:H i TiN. Wszystkie powłoki nakładano metodą rozpylania magnetronowego na stali austenitycznej AISI 304. Porównano wartości twardości i modułu sprężystości oraz adhezję do podłoża badaną przy użyciu testu zarysowania. Wyniki badań wykazały możliwość poprawy odporności na zużycie powłok nanokompozytowych i wielowarstwowych w porównaniu z typowymi powłokami stosowanymi obecnie w przemyśle maszynowym.

Słowa kluczowe: twarde powłoki, twardość, adhezja, zużycie

ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF NEW GROUPS OF COATINGS APPLIED IN HIGHLY LOADED MACHINE COMPONENTS

Summary. The paper presents an overview of new groups of tribological coatings with complex microstructure deposited by PVD (Physical Vapour Deposition) and CVD (Chemical Vapor Deposition) techniques. The results of microstructure studies (TEM), mechanical and tribological properties of nanocomposite coatings nc-Cr₂C/a-C:H and multilayers 16x(Ti/TiN) were shown. The properties of these modern coatings are compared with the properties of two single coatings a-C:H and TiN. All coatings were deposited by magnetron sputtering on AISI 304 steel substrates. The hardness, elastic modulus and adhesion to the substrate studied by scratch testing were compared. The results showed the possibility of improving the wear resistance of the nanocomposite and multilayer coatings in comparison with conventional single coatings currently used in the machine industry.

Keywords: hard coatings, hardness, adhesion, wear

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, 30-065 Kraków, al. Mickiewicza 30, e-mail: chronows@agh.edu.pl.

² Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, 30-065 Kraków, al. Mickiewicza 30, kotmarc@imir.agh.edu.pl.

³ Instytut Metalurgii I Inżynierii Materiałowej PAN, Kraków.

1. WPROWADZENIE

Jakość oraz niezawodność maszyn zależą głównie od trwałości składowych elementów części, narażonych często na bardzo duże obciążenia oraz zużycie ścierne. Obejmuje to również części wyrobów będących w bezpośrednim kontakcie z materiałami o zróżnicowanych właściwościach. Rosnące z każdym rokiem zapotrzebowanie na elementy maszyn o ciągle większej nośności powierzchni stawia coraz wyższe wymagania. Wyczerpanie możliwości podnoszenia obciążeń dla materiałów jednorodnych w dalszym ciągu powoduje zbyt duże zużycie powierzchni elementów pracujących w trudnych warunkach, co można zauważyć na przykładzie braku smarowania w węzłach tarciovych. Niejednokrotnie czynnik ekonomiczny ma nieodłączny wpływ na stosowane materiały. Dlatego najczęściej spotyka się elementy maszyn i urządzeń wykonanych ze stali węglowej lub też ze stali niskowęglowej ulepszonej przez różnego rodzaju obróbkę powierzchniową. Na ogół takiemu ulepszeniu poddawane są powierzchnie robocze maszyn i urządzeń narażone na największe zużycia. Mając to na uwadze, w obecnych czasach na wiele elementów konstrukcyjnych nakłada się różnego rodzaju powłoki lub wytwarza się warstwy wierzchnie. Możliwe jest również stosowanie technologii duplex, czyli najpierw wytwarzanie warstwy przez obróbkę zazwyczaj cieplną lub cieplno-chemiczną, a następnie nanoszenie powłoki.

Przez odpowiedni dobór i sposób wykonania warstw oraz powłok uzyskuje się zwiększoną niezawodność pracy części maszyn i urządzeń oraz zmniejszenie ich awaryjności. Wytwarzane warstwy wierzchnie oraz nanoszone powłoki dają możliwości wykonania elementów maszyn z materiałów o obniżonych właściwościach użytkowych, niejednokrotnie tańszych, i nadawania im lepszych właściwości eksploatacyjnych. Często prowadzi to do obniżenia ich masy kosztem wzrostu wydatków energii na jej wytworzenie przy tych samych właściwościach wytrzymałościowych. Z powodu zmniejszania masy wysoko obciążonych elementów maszyn oraz na skutek poprawy właściwości tribologicznych powierzchni trących uzyskuje się obniżenie strat energii wywołanych oporami tarcia. Prowadzi to do zmniejszenia intensywności zużycia elementów maszyn, co zmniejsza częstotliwość przeprowadzania ich wymian czy remontów. Decydującym parametrem jest wtedy odporność na zużycie układów powłoka-podłoże. Dodatkowo wiele z powłok charakteryzuje się małym współczynnikiem tarcia przy współpracy z metalami, a to daje znaczne ograniczenie strat energii, co np. w pojazdach mechanicznych prowadzi do ograniczenia zużycia paliwa. Można zatem stwierdzić, że ograniczenie strat energii podczas pracy wysoko obciążonych elementów maszyn i narzędzi wykonanych z materiałów, na które nałożone są odpowiednie powłoki, wpływa również na zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Można także zaobserwować spadek generowanych odpadów, ścieków, płynów oraz gazów przemysłowych.

2. NOWE TECHNIKI NANOSZENIA POWŁOK

W ostatnich latach można zaobserwować znaczne postępy w zakresie wytwarzania jeszcze nowszych powłok, głównie dzięki stałemu doskonaleniu technik ich nanoszenia. Spośród wielu technik pozwalających na podniesienie trwałości powierzchni materiałów stosowanych na elementy maszyn pracujących w trudnych warunkach, istotną rolę w praktyce przemysłowej odgrywają dwie metody nanoszenia powłok: metoda fizycznego osadzania powłok z fazy gazowej PVD (Physical Vapour Deposition) oraz metoda chemicznego osadzania powłok z fazy gazowej CVD (Chemical Vapour Deposition).

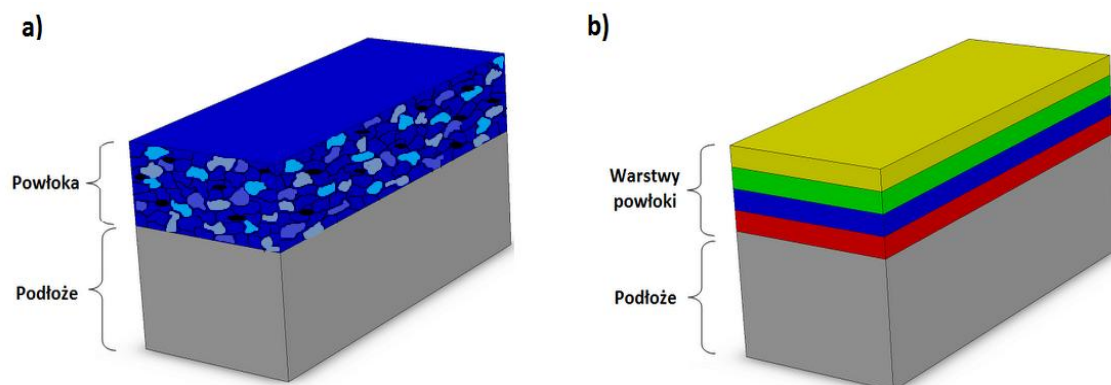
W metodzie PVD nanoszona powłoka powstaje ze strumienia zjonizowanej plazmy skierowanej na podłoże. Nanoszenie powłok wykonywane jest na zimnym lub podgrzewanym podłożu do temperatury 200-500°C [1, 2]. Nie martwiąc się o spadek twardości podłoża, taki zabieg wykonywany w odpowiednich warunkach umożliwia pokrywanie powierzchni zahartowanych i odpuszczonych. Możliwe jest także nanoszenie powłok na podłoża polimerowe. Specyficzne właściwości powłok stosowanych na pokrycia elementów maszyn są niejednokrotnie wynikiem gwałtownego rozwoju procesów PVD. Dlatego zmiany parametrów procesu, takich jak: temperatura, energia jonów bombardujących podłoże, ciśnienie gazu, odległość pomiędzy podłożem a źródłem materiału, który osadzano, mają duży wpływ na strukturę powłoki. Wielkość zmian powodujących różnicowanie powstających powłok zależy między innymi od gęstości strumienia energii. Gdy powłokę potraktujemy małą ilością energii jonów, wówczas może to spowodować niewielki wzrost temperatury oraz desorpcję zanieczyszczeń. Natomiast, gdy na podłoże skierujemy dużo większą ilość energii, to oprócz wcześniejszych zjawisk mogą nastąpić implantacja jonów oraz rozpylanie atomów z powierzchni pokrywanej. To, jaki rodzaj energii jonów zostanie użyty, wpływa głównie na wzrost powłoki, budowę powierzchni, ale przede wszystkim na przyczepność z podłożem. Ta ostatnia, czyli adhezja powłoki z podłożem, jest najważniejszą właściwością powłok wytwarzanych metodą PVD. Powłoki PVD znajdują zastosowanie nie tylko w budowie maszyn, ale również w optyce i mikroelektronice, biomedycynie, przemyśle samochodowym oraz przemyśle budowlanym.

Druga, starsza metoda nanoszenia powłok, zapoczątkowana w latach czterdziestych XX wieku, to metoda CVD. Metoda ta polega na tworzeniu warstwy węglików i azotów na podłożu. Proces ten przebiega w szczelnym reaktorze w wyniku reakcji chemicznych zachodzących w wysokiej temperaturze 900-1100°C, potrzebnej do rozkładu gazów, ograniczając tym samym zakres wykorzystania takich powłok [1, 2]. Często zalecane jest, aby elementy wcześniej poddane procesowi chemicznemu osadzania powłok CVD objęte były dalszą obróbką cieplną, m.in. hartowaniem i odpuszczaniem, które głównie przyczyniają się do zmian wymiarów i kształtów elementów maszyn. Dzięki metodzie CVD możliwe jest powstawanie warstw o grubości do 15 µm [2], pozwalającej na stosowanie takich powłok w przypadku obróbki elementów maszyn pracujących w ciężkich warunkach, gdzie ważna jest odporność na zużycie spowodowane tarciem. Wytwarzane są zazwyczaj powłoki charakteryzujące się takimi właściwościami, jak: twardość, odporność na ścieranie i korozję. Metoda CVD, mająca swego rodzaju ograniczenia, dąży do zmiany rozwiązań tradycyjnych bardziej w kierunku zmniejszenia temperatury procesu do 500-600°C [2], głównie przez obniżenie ciśnienia, powodując szybsze tworzenie się warstwy dyfuzyjnej. Dlatego też metodą tą wytwarza się twarde powłoki węglików, azotków, węglikoazotków, a także tlenków metali na podłożach stalowych, ceramicznych lub wysoko topliwych metalach.

3. NOWE GRUPY POWŁOK TRIBOLOGICZNYCH

Nakładane na powierzchnie większe lub mniejsze grubości warstw i powłok odgrywają bardzo ważną rolę w światowym rynku zajmującym się wysoko obciążonymi elementami maszyn. Ciągły wzrost wymagań oraz potrzeb w ówczesnym świecie, skłaniający do ciągłego zwiększania obciążeń elementów maszyn pracujących w trudnych warunkach, spowodował, że powłoki monowarstwowe, takie jak m.in.: Al, Cr, Cu, TiN, TiC, nie mogą sprostać dzisiejszym oczekiwaniom. Bogactwo współczesnej technologii daje możliwość łączenia powłok prostych w bardziej złożone. Dlatego dzięki temu udogodnieniu na rynku oprócz powłok jednowarstwowych znalazły zastosowanie twarde powłoki przeciwzużyciowe

o ulepszonych właściwościach tribologicznych i mechanicznych. Należą do nich przede wszystkim powłoki wielowarstwowe i nanokompozytowe, których mikrostrukturę pokazano w uproszczeniu na rys. 1.



Rys. 1. Struktura powłoki: a) nanokompozytowej, b) wielowarstwowej
Fig. 1. Structure of: a) nanocomposite, b) multilayer coatings

Powłoki nanokompozytowe zbudowane są z wielu różnego typu materiałów. Stanowią specyficzny rodzaj powłok wielofazowych, gdzie jedna faza jest rozproszona w drugiej w sposób ciągły. Przykładem takiej nowoczesnej powłoki jest AlTiSiN. Dużym zainteresowaniem cieszą się obecnie powłoki nanokompozytowe typu nc-MX/a-Osn, gdzie nc-MX oznacza nanokrystaliczne cząstki najczęściej węglików bądź azotków metali przejściowych, natomiast a-Osn oznacza amorficzną osnowę (np. z amorficznego węgla bądź amorficznego azotku krzemu Si_3N_4). Charakteryzują się one dużą twardością, szerokim zakresem odkształceń sprężystych oraz niskim zużyciem [5, 7, 11].

Drugą grupę nowoczesnych powłok stanowią powłoki wielowarstwowe, zwane również multiwarstwami. Zbudowane są one z wielu kolejno nałożonych warstw. Najczęściej jest to jednak powłoka składająca się z dwóch materiałów, z których warstwy są nakładane na przemian. Ich liczba może dochodzić nawet do kilkuset nanometrów, a grubości kolejnych warstw mają grubości kilku do kilkuset nanometrów [4, 6]. Warstwy znajdujące się przy samym podłożu powinny charakteryzować się dużą przyczepnością do podłoża. Natomiast warstwy zewnętrzne powinny zapewniać wysokie właściwości tribologiczne oraz, co często jest kluczowym elementem podczas doboru, powinny odznaczać się odpornością przeciwkorozyjną. W środkowej, centralnej części powłoki powinny znajdować się warstwy odpowiedzialne za wytrzymałości oraz twardość powłoki. Cienkie, twarde warstwy, takie jak np. TiCN-MoS₂, Ti/TiN, W-C:H, WC/C, w ciągu ostatnich lat skupiły na sobie zainteresowanie głównie z powodu tendencji do ograniczania ilości środków smarnych lub całkowitego ich eliminowania. C. Donnat i A. Erdemir [3], analizując rozwój powłok niskotarciowych, wyszczególnili w nich cztery grupy:

- I. Jednoskładnikowe powłoki, takie jak DLC, MoS₂, W₂C – są powłokami, które nie wnoszą żadnej rewolucji w dziedzinie powłok niskotarciowych do pokrycia maszyn pracujących w trudnych warunkach. Tego rodzaju powłoki ulegają szybko zniszczeniu.
- II. Wieloskładnikowe powłoki przeciwzużyciowe – charakteryzują się szczególnymi właściwościami mechanicznymi oraz tribologicznymi. Taki rodzaj powłok znajduje swoje zastosowanie przy wysoko obciążonych narzędziach formujących.
- III. Powłoki nanostrukturalne oraz powłoki o strukturze super sieci, np. W-DLC, WC/C, TiAlN- MoS₂ – do tej pory są tematem licznych badań w przypadku zastosowań na elementach maszyn i urządzeniach wysoko obciążonych.

- IV. Czwarty typ powłok to powłoki stosowane na elementy maszyn pracujących w bardzo trudnych, wręcz ekstremalnych warunkach, tj. wysoka temperatura oraz zmienne obciążenie. Do takich powłok należy powłoka DLC- WS_2 .

4. MIKROSTRUKTURA ORAZ WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE I TRIBOLOGICZNE WYBRANYCH POWŁOK O ZŁOŻONEJ BUDOWIE

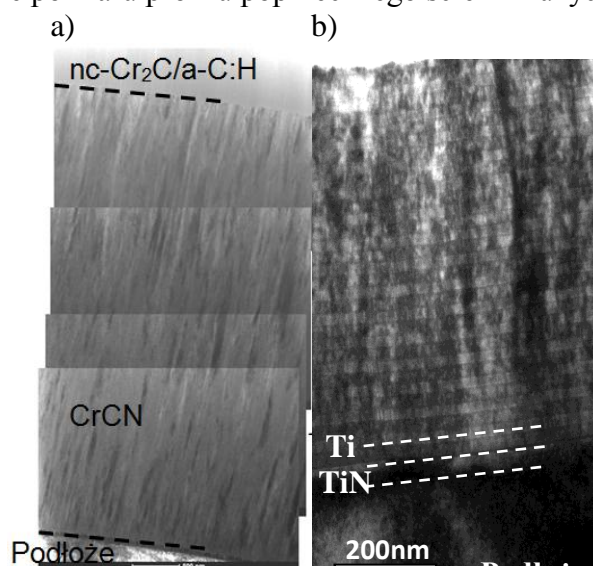
Badaniom poddano powłoki:

- nanokompozytową nc- $Cr_2C/a-C:H$ – grubość powłoki 900 nm,
- wielowarstwową 16x(Ti/TiN) – grubość całkowita 1000 nm = 16x(31nm TiN+ 31nm Ti),
- powłoki pojedyncze a-C:H i TiN – grubość 1 μm .

Powłoki nałożono metodą rozpylania magnetronowego na stali austenitycznej AISI 304. W przypadku powłoki nanokompozytowej na stalowym podłożu najpierw наносono powłokę CrCN o grubości 4 μm i dopiero na niej powłokę nc- $Cr_2C/a-C:H$.

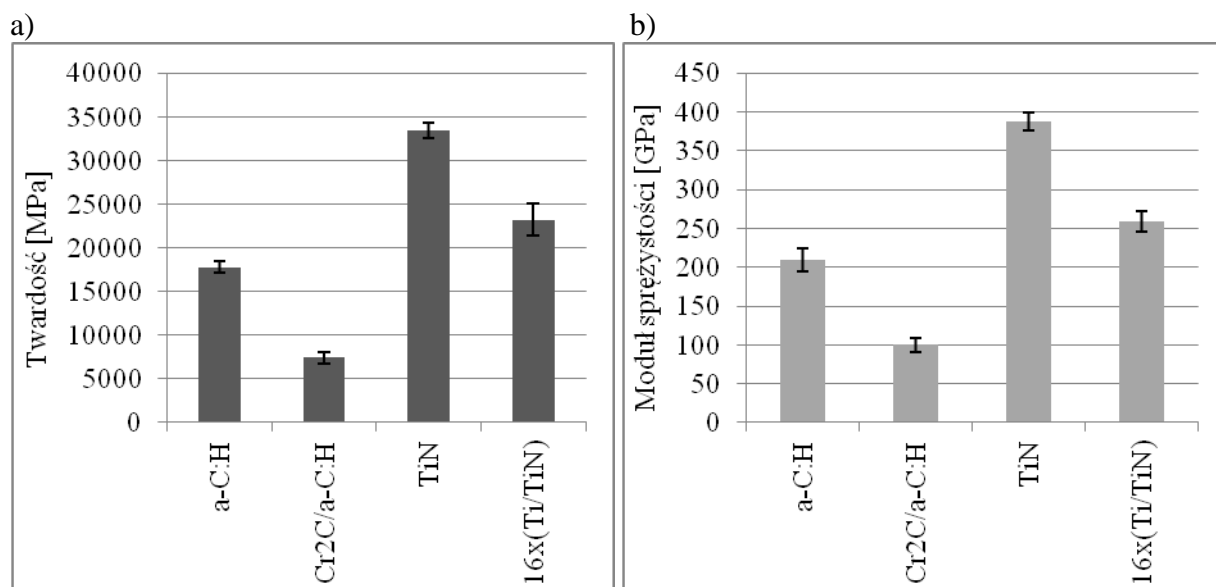
Badania mikronanostruktury systemów powłoka-podłoże przeprowadzono przy użyciu techniki mikroskopii transmisyjnej (TEM) i mikroskopów Philips CM20 200 kV oraz JEOL EX4000 (400 kV). Cienkie folie z przekrojów poprzecznych próbek przygotowano za pomocą techniki FIB (Focused Ion Beam). Dla badanych systemów mierzono nanotwardość i moduł sprężystości metodą instrumentalną [15], na urządzeniu Micro-Combi-Tester firmy CSM Instrument. Stosowano wgłębnik o geometrii Berkovicha i obciążenie 5 mN.

Powłoka może spełniać stawiane przed nią wymagania, jeżeli jest silnie związana z podłożem. Wytrzymałość połączenia powłoka-podłoże analizowano, wykonując testy zarysowania. Stosowano wgłębnik o geometrii Rockwella C, o promieniu zaokrąglenia 200 mm i obciążenie od 0,01 do 30 N. Wartość obciążenia krytycznego L_c określono na podstawie sygnału emisji akustycznej oraz analizy mikroskopowej torów zarysowań. Określono także odporność na zużycie powłok, przeprowadzając testy tribologiczne na styku kula-tarcza w warunkach tarcia technicznie suchego. Stosowano kule z Al_2O_3 o średnicy 6 mm, nacisk $F_N=1$ N, promień tarcia 5 mm, prędkość liniową 0,03 m/s i liczbę cykli 20000. Wskaźnik zużycia obliczano z zależności $W_v= V/(F_N \cdot s)$, gdzie: V to objętość usuniętego materiału wyznaczana na podstawie pomiaru profilu poprzecznego ścieżki zużycia, a s to droga tarcia.



Rys. 2. Obrazy TEM mikrostruktury powłok: a) Cr/CrN+nc- $Cr_2C/a-C:H$, b) 16x(Ti/TiN)
Fig. 2. TEM microstructure images of: a) Cr/CrN+nc- $Cr_2C/a-C:H$, b) 16x(Ti/TiN) coatings

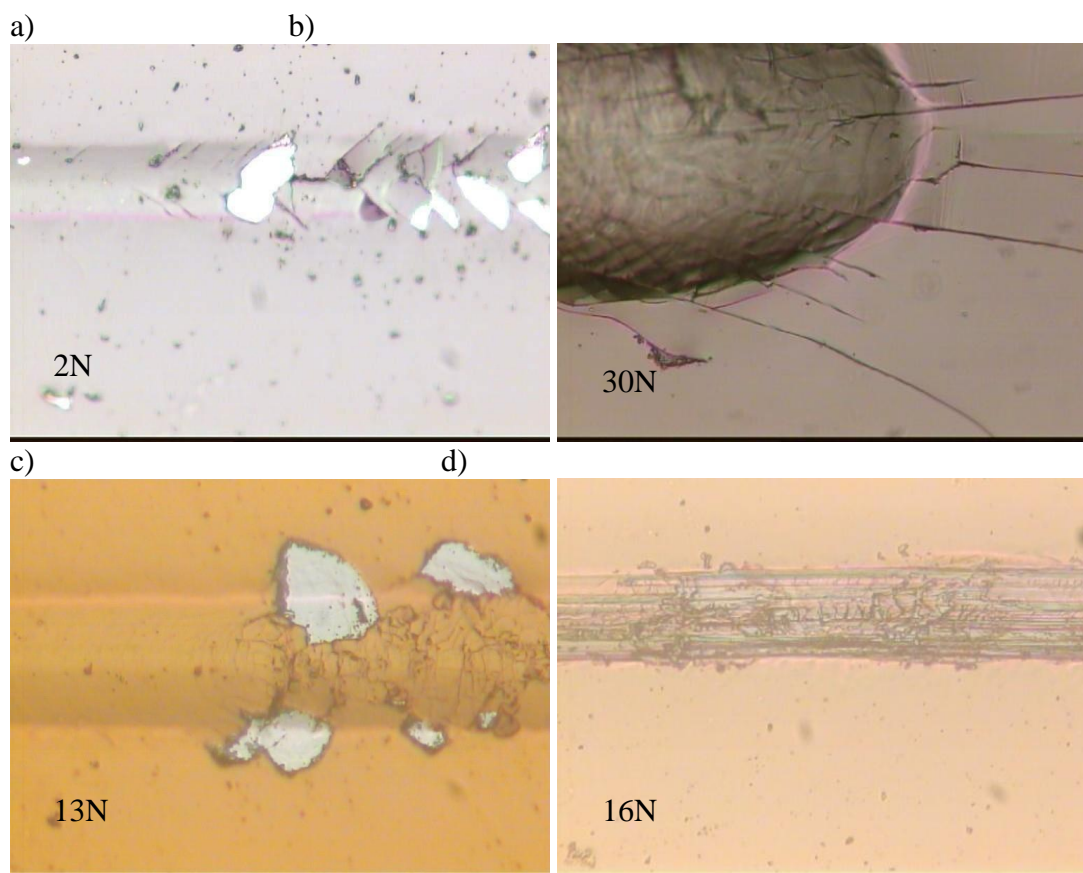
Mikrostrukturę powłok przedstawiono na rys. 2. W przypadku powłoki nanokompozytowej (rys. 2a) analiza wysokorozdzielcza TEM potwierdziła istnienie nanocząstek Cr_2C o wielkości 5-8 nm w amorficznej osnowie uwodornionego węgla a-C:H. Całkowicie amorficzną strukturę ma pojedyncza powłoka a-C:H. Obraz mikrostruktury powłoki wielowarstwowej z wyraźnie rozdzielonymi kolejnymi warstwami Ti i TiN przedstawia rys. 2b. Kolejne warstwy mają typową dla takich powłok strukturę kolumnową, podobnie jak pojedyncza powłoka TiN. Wyniki pomiarów indentacyjnych zestawiono na rys. 3. Wprowadzenie nanocząstek Cr_2C do osnowy węglowej a-C:H spowodowało znaczący wzrost twardości powłoki z 7 do 17 GPa. Towarzyszy temu także znaczące usztywnienie powłoki, tj. wzrost modułu sprężystości ze 100 do 210 GPa. Natomiast dla powłoki wielowarstwowej wprowadzenie międzywarstw metalu Ti pomiędzy warstwy ceramiki TiN spowodowało zmniejszenie twardości z 33 do 23 GPa oraz modułu sprężystości z 390 do 260 GPa. W przypadku obydwu powłok o złożonej budowie należy zaznaczyć, że wartości modułu sprężystości są bliższe modułowi sprężystości podłoża $E=190$ GPa niż pojedyncze powłoki. Efektem tego są mniejsze naprężenia na granicy połączenia powłoka-podłoże, które rosną proporcjonalnie wraz rosnącym niedopasowaniem właściwości mechanicznych powłoki i podłoża. Może to skutkować większą wytrzymałością tego połączenia.



Rys. 3. Wyniki testów indentacyjnych: a) twardość, b) moduł sprężystości badanych powłok
Fig. 3. Result of indentation tests: a) hardness, b) elasticity modulus of tested coatings

Chcąc określić adhezję powłok do podłoża, poddano je testowi zarysowania. Obrazy rys na powierzchni powłok po teście zestawiono na rys. 4. Dla powłoki pojedynczej węglowej pierwsze pęknięcia i towarzyszące im usuwanie powłoki z podłoża obserwowano już przy obciążeniu 2 N (rys. 4a). Powłoki takie są zazwyczaj bardzo kruche i mają słabą adhezję do podłoża, co jest największym problemem przy aplikacji takich powłok w zastosowaniach mechanicznych, pomimo ich wspaniałych właściwości tribologicznych. Wprowadzenie nanocząstek Cr_2C do osnowy węglowej powoduje znaczące umocnienie powłoki i wzrost obciążenia krytycznego do ponad 30 N. Powłoka, nawet przy bardzo dużych naciskach kontaktowych, wciąż jest dobrze zaczepiona na podłożu (rys. 4b). Wzrost odporności na zarysowanie w stosunku do pojedynczej powłoki TiN obserwowano w przypadku powłoki wielowarstwowej. Pomimo podobnych wartości obciążenia krytycznego 13 N i 16 N,

wyraźnie widoczna jest znacząco bardziej katastrofalna forma niszczenia w przypadku powłoki pojedynczej TiN (rys. 4c) niż powłoki wielowarstwowej (rys. 4d).

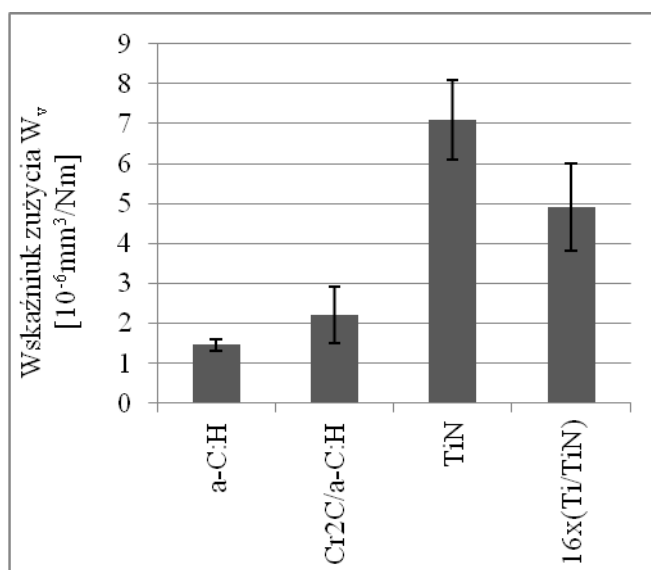


Rys. 4. Obrazy torów zarysowania powłok: a) a-C:H, b) Cr/CrN+nc-Cr₂C/a-C:H, c) TiN, d) 16x(Ti/TiN)
Fig. 4. Images of the scratch tracks of: a) a-C:H, b) Cr/CrN+nc-Cr₂C/a-C:H, c) TiN, d) 16x(Ti/TiN)
coatings

Wyniki testów tribologicznych (rys. 5) wykazały nieznacznie większą odporność na zużycie powłoki pojedynczej węglowej w stosunku do powłoki nanokompozytowej. Badania prowadzono jednak przy niezbyt wysokich naciskach jednostkowych (ok. 0,4 GPa). Lepsze właściwości mechaniczne i tribologiczne ujawniają się przy większych naciskach, co potwierdzają wyniki testów zarysowania. Poprawa tych właściwości wynika, w przypadku powłok nanokompozytowych, z wprowadzenia wielu nanocząstek ceramicznych do osnowy węglowej. Efektem tego są odchylenie i blokowanie nanopęknięć na cząstkach ceramicznych. Mała odległość między nimi powoduje, że pęknięcia nie mogą rozrastać się do mikropęknięć i propagować przez całą grubość powłoki i dalej w płaszczyźnie połączenia powłoki oraz podłoża, prowadząc do delaminacji powłoki. Podobny efekt uzyskuje się w przypadku powłok wielowarstwowych, gdzie pęknięcia są blokowane na kolejnych granicach warstw Ti i TiN bądź zamykane przez uplastycznienie na froncie mikropęknięcia, kiedy osiąga ono warstwę metalu Ti. Taki mechanizm deformacji prowadzi do ograniczenia wykruszania mikroobszarów powłoki ceramicznej i poprawy odporności na zużycie powłoki wielowarstwowej Ti/TiN w porównaniu do powłoki TiN.

5. PODSUMOWANIE

Zwiększanie trwałości wysoko obciążonych elementów maszyn jest głównym punktem rozważań prowadzonych przez wiele ośrodków badawczych na całym świecie. Problem taki można rozwiązać przez takie kierowanie budową warstwy wierzchniej maszyn i urządzeń, aby miała ona jak najlepsze właściwości zarówno mechaniczne, jak i tribologiczne. W artykule przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań właściwości powłoki nanokompozytowej nc-Cr₂C/a-C:H o grubości powłoki 900 nm, powłoki wielowarstwowej 16x(Ti/TiN) o grubości całkowitej 1000 nm = 16x(31 nm TiN+ 31 nm Ti), a także właściwości dwóch pojedynczych powłok a-C:H oraz TiN o grubościach 1 μm, nałożonych metodą rozpylania magnetronego na stali austenitycznej AISI 304.



Rys. 5. Wskaźnik zużycia badanych powłok
Fig. 5. Wear index of tested coatings

Wyniki badań przy teście zarysowania wskazują, że powłoki pojedyncze są bardzo kruche, mają słabą adhezję do podłoża, ponieważ już przy obciążeniu 2 N widoczne były pierwsze pęknięcia oraz usuwanie powłoki z podłoża. Fakt ten stanowi duży problem i praktycznie wyklucza zastosowanie takich powłok w wysoko obciążonych elementach maszyn, pomimo ich dobrych właściwości tribologicznych. Zwiększoną odporność na zarysowanie w porównaniu do pojedynczych warstw można zauważyć w przypadku powłok wielowarstwowych, gdzie pęknięcia są blokowane na kolejnych granicach warstw. Na podstawie wyników badań można wnioskować, że powłoki wielowarstwowe Ti/TiN mają większą odporność na zużycie niż powłoki pojedyncze. Poprawę właściwości mechanicznych i tribologicznych przy zwiększonym nacisku widać również w powłokach nanokompozytowych z wprowadzonymi nanocząsteczkami ceramicznymi w osnowie węglowej, kompensujących nanopęknięcia na cząsteczkach.

Autorzy pragną podziękować dr. hab. J.M. Lacknerowi z Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, Leoben, Laser Center, Austria, za nałożenie powłok.

Bibliografia

1. Burakowski T., Wierzchnoń T.: Inżynieria powierzchni metali. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1995, s. 47-61, 191-219, 449-550.
2. Dobrzański L.A, Dobrzańska-Danikiewicz A.D.: Obróbka powierzchni materiałów inżynierski. Open Access Library, 2011, s. 89-136.
3. Donnat C., Erdemir A.: Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant coating. Surface and Coatings Technology, Vol. 180-181, 2004, p. 76-84.
4. EN 1071-3. Advanced technical ceramics – Methods of test for ceramic coatings – Part 3: Determination of adhesion and other mechanical failure modes by a scratch test.
5. ISO 14577-1. Metallic materials – instrumented indentation test for hardness and material parameters – Part 1: Test method.
6. ISO 20808:2004. Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Determination of friction and wear characteristics of monolithic ceramics by ball-on-disc method.
7. Kot M.: Contact mechanics of coating-substrate systems: single and multilayer coatings. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 12, Issue 4, 2012, p. 464-470
8. Kot M., Lacki P.: Contact mechanics of coating-substrate systems: I – Methods of analysis and FEM modeling of nanoindentation tests. Journal of the Balkan Tribological Association, Vol. 18 (2012), p. 598-614.
9. Kot M., Moskalewicz T., Wendler B., Rakowski R., Czyrska-Filemonowicz A.: Micromechanical and tribological properties of nc-TiC/a-C nanocomposite coatings. Solid State Phenomena, Vol. 177 (2011), p. 36-46.
10. Kot M., Moskalewicz T., Wendler B., Rakowski W., Czyrska-Filemonowicz A.: Solid State Phenomena. Vol. 177 (2011), p. 36-46.
11. Lackner J.M., Major Ł., Kot M.: Microscale interpretation of tribological phenomena in Ti-TiN soft-hard multilayer coatings on soft austenite steel substrates. Biulletin of Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, Vol. 59/3 (2011), p. 343-355.
12. Leyland A., Matthews A.: On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimized tribological behavior. Wear, Vol. 246 (2000), p. 1-11.
13. Michalczewski R.: Właściwości tribologiczne smarowanych wysokoobciążonych elementów maszyn pokrytych cienkimi powłokami niskotarciowymi. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2012.
14. PN-EN 1071-6:2008. Techniczna ceramika zaawansowana – Metody badania powłok ceramicznych. Część 6: Oznaczanie odporności na ścieranie powłok metodą mikrościerania.
15. Vepřek S., Vepřek-Heijman M.: Industrial application of superhard nanocomposite coatings. Surface and Coatings Technology, Vol. 202 (2008), p. 5063-5073.