natrysk cieplny, obróbka elektroerozyjna, powłoka, tribologia

Norbert RADEK [1]
Wojciech ŻÓRAWSKI [1]

MODYFIKACJA OBRÓBKĄ ELEKTROEROZYJNĄ POWŁOK NATRYSKANYCH NADDŹWIĘKOWO

W pracy podjęto próbę wytwarzania przeciwzużyciowych warstw powierzchniowych hybrydową metodą naddźwiękowo-elektroiskrową. Powłoki z WC12Co i WC17Co zostały naniesione systemem do natrysku naddźwiękowego TAFA-JP-5000. Modyfikacja powłok obróbką elektroerozyjną została wykonana za pomocą urządzenia ELFA-541. Ocenę własności powłok przeprowadzono na podstawie analizy mikrostruktury, badaniach tribologicznych oraz pomiarach mikrotwardości i chropowatości.

MODYFICATION OF HVOF SPRAYED COATINGS USING THE EDM PROCESS

Hypersonic sprayed WC-Co coatings are widely used in different wear situations because they combine such advantages as resistance to wear, high temperature and corrosive atmospheres. The influence of the spray parameters and material type on the coating properties has been analyzed thoroughly by numerous researchers. This study focuses on the performance properties of two HVOF-sprayed tungsten carbide coatings, each with a different content of cobalt, which were subjected to electrical discharge machining (EDM). The material deposited over the HVOF-sprayed coatings was tungsten carbide. The microstructure of the sprayed and electro-discharge-machined coatings was analyzed with a JOEL JSM-5400 scanning microscope. A ball-on-disc test was conducted to determine the coefficients of friction. The EDM process results in the formation of a homogeneous layer of tungsten carbide with a low cobalt content, which is well bonded with the HVOF-sprayed coating. The values of the coefficient of friction obtained for the two coatings with the EDM layer were similar.

1. WSTĘP

Określenie „natryskiwanie cieplne" obejmuje grupę procesów, które wykorzystują energię cieplną do stopienia materiału oraz energię kinetyczną do osadzenia go na podłożu. Stopione cząstki uderzają w specjalnie przygotowaną powierzchnię, odkształcają się i przylegają do niej ulegając jednocześnie szybkiemu schłodzeniu. Następnie cząstki padając jedna na drugą tworzą powłokę. Za twórcę natryskiwania cieplnego uważa się Szwajcara -

[1]Centrum Laserowych Technologii Metali, Politechnika Świętokrzyska, Al. 1000-lecia P. P. 7, 25-314 Kielce, POLSKA; Telefon: 041 34-24-518, Fax: 041 34-24-504, E-mail: norrad@tu.kielce.pl

dr U. Schoopa, który skonstruował pierwszy pistolet do metalizacji natryskowej a w 1913 roku opisał ten proces czasopiśmie Scientific American. Jest on uznawany za ojca tej technologii. Początkowo natryskiwanie cieplne nazywane metalizacją, było stosowane głównie do nakładania powłok antykorozyjnych i do regeneracji części maszyn. Ponieważ okazało się, że trwałość tych części jest znacznie wyższa niż trwałość nowych części został on wprowadzony bezpośrednio do produkcji nowych elementów. W 1939 roku niemiecki inżynier Reinecke zastosował do natryskiwania strumień plazmy jako źródła ciepła co umożliwiło zastosowanie materiałów o wysokiej temperaturze topnienia.

Wprowadzenie w połowie lat 50-tych natryskiwania detonacyjnego i na początku lat 80-tych natryskiwania z dużymi prędkościami (HVOF) pozwoliło znacznie rozszerzyć zastosowanie tej technologii w wielu gałęziach przemysłu. Główne zastosowania to powłoki; podwyższające odporności na zużycie, bariery termiczne, izolacyjne, przewodzące, antykorozyjne, katalityczne, bioaktywne i inne. Na obecnym etapie rozwoju natryskiwania cieplnego można wyróżnić natryskiwanie: płomieniowe, łukowe, plazmowe, detonacyjne, naddźwiękowe (HVOF) oraz laserowe. Proces w zależności od wymagań dotyczących własności powłoki może być prowadzony w warunkach otaczającej atmosfery, w atmosferze kontrolowanej, przy obniżonym ciśnieniu, w próżni oraz pod wodą. Z uwagi na zróżnicowane własności powłok otrzymywanych w każdym z tych procesów, uzupełniają się one wzajemnie i każdy z nich ma swój zakres zastosowań w praktyce.

Szczególnie interesujące jest natryskiwanie z dużymi prędkościami HVOF będące wynikiem poszukiwań nowych rozwiązań ukierunkowanych na zwiększenie energii kinetycznej natryskiwanych cząstek. Doprowadziły one do opracowania nowej generacji pistoletów w których wypływający strumień osiąga prędkości naddźwiękowe. W najnowszych rozwiązaniach sięga on 2900 m/s.

Bardzo wysoka prędkość strumienia umożliwia uzyskanie przez cząstki materiału powłokowego bardzo dużej energii kinetycznej przy jego umiarkowanym nagrzaniu. W momencie zderzenia ziarna proszku z podłożem a następnie z utworzoną powłoką generowane są lokalnie bardzo wysokie ciśnienia dynamiczne sięgające od kilku do kilkunastu GPa. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie powłok o bardzo dużej przyczepności do podłoża, dużej kohezji pomiędzy cząstkami tworzącymi powłokę oraz znikomej porowatości. Ponieważ czas przebywania cząstek w strumieniu gazów jest bardzo krótki ogranicza to w znacznym stopniu proces ich utlenienia i powstawania niekorzystnych zmian fazowych.

Natryskiwane naddźwiękowo powłoki są obecnie stosowane w różnych gałęziach przemysłu w celu podwyższenia właściwości eksploatacyjnych zarówno części nowych jak i do regeneracji elementów, które uległy zużyciu [1]. Charakteryzują się one wysoką odpornością na ścieranie oraz erozję i w wielu przypadkach są stosowane w celu eliminacji galwanicznych powłok chromowych. Ma to bezpośredni związek z nowymi, znacznie ostrzejszymi wymaganiami dotyczącymi procesów chromowania galwanicznego [2÷3]. Jednym z wielu stosowanych materiałów powłokowych jest węglik wolframu, którego ziarna osadzone w kobaltowej matrycy tworzą powłokę charakteryzującą się bardzo wysoką odpornością na zużycie. Do nakładania powłok można wykorzystać różne techniki natryskiwania cieplnego obejmujące natrysk plazmowy, detonacyjny czy tez naddźwiękowy. Jednak w procesie natrysku plazmowego wysoka temperatura plazmy powoduje odwęglenie WC i powstanie kruchej fazy W_2C oraz metalicznego wolframu co znacznie pogarsza właściwości powłoki [4]. Właściwości powłok otrzymywanych przy

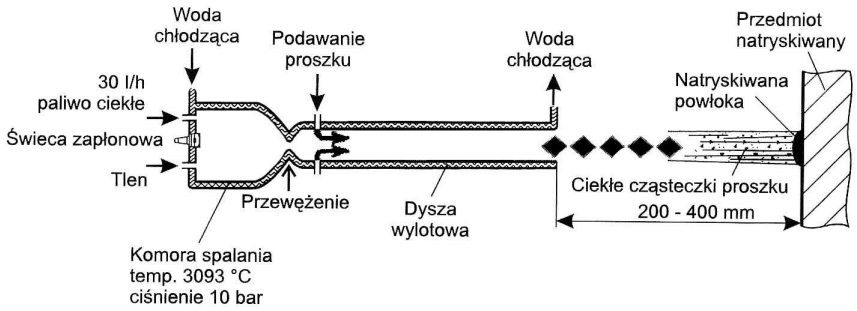
pomocy w/w metod zależą w dużym stopniu od parametrów natrysku. Natryskiwanie detonacyjne pozwala na otrzymywanie powłok o doskonałych właściwościach jednak proces ten jest trudno dostępny. Powłoki o porównywalnych właściwościach można otrzymać przy pomocy natrysku HVOF który stosuje się w wielu gałęziach przemysłu. Jest to rezultat relatywnie niskiej temperatury strumienia naddźwiękowego oraz bardzo wysokiej prędkości cząstek, co pozwala na znaczne ograniczenie zmian fazowych w materiale powłokowym.

W przeprowadzonych badaniach zastosowano obróbkę elektroerozyjną EDM (electrical discharge machining) do poprawy właściwości natryskiwanych naddźwiękowo powłok z węglika wolframu. Proces obróbki elektroerozyjnej pozwala na precyzyjną modyfikacje mikrostruktury oraz składu fazowego powierzchni przez nakładanie powłok z różnych pierwiastków i związków chemicznych o grubości od kilku do kilkunastu mikrometrów. Dodatkowa zaleta tego procesu jest bardzo wysoka adhezja nałożonych powłok do podłoża. Procesy obróbki elektroerozyjnej związane są z przepływem masy i energii którym towarzyszą reakcje chemiczne i elektrochemiczne. W czasie procesu nakładania powłok występują lokalnie bardzo wysokie temperatury sięgające $(5\text{-}40)10^3$ K oraz bardzo wysokie ciśnienia rzędu $(2\text{-}7)10^3$ GPa [5÷6].

2. METODYKA BADAŃ

W procesie natryskiwania naddźwiękowego (HVOLF) zastosowano proszki węglika wolframu WC12Co oraz WC17Co. Zakres wielkość ziaren obydwóch proszków wynosił 21÷51μm. Są to materiały przeznaczone specjalnie do natryskiwania cieplnego, otrzymywane w wyniku aglomeracji oraz spiekania drobnych ziaren proszku. Posiadają one bardzo duży udział ziaren o kształcie sferoidalnym, co znacznie zwiększa ich sypkość w porównaniu z proszkami o nieregularnym kształcie ziarna.

Do natryskiwania HVOLF zastosowano system TAFA–JP-5000. Do procesu natryskiwania jako paliwo została zastosowana nafta. Parametry natryskiwania zawarto w tabeli 1, natomiast proces natryskiwania naddźwiękowego przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Schemat procesu natryskiwania naddźwiękowego

Do badań metalograficznych stosowano próbki ze stali węglowej wyższej jakości C45 o wymiarach 50mm x 25mm x 5 mm z powłokami węglikowymi natryskanymi naddźwiękowo przed i po modyfikacji EDM. Natomiast do badań tribologicznych

stosowano pierścienie ze stali C45 o wymiarach ϕ46mm x ϕ25mm x 6 mm z powłokami WC12Co oraz WC17Co natryskanymi naddźwiękowo przed i po modyfikacji EDM.
Przed natryskiem, próbki ze stali C45 zostały poddane obróbce strumieniowo-ściernej elektrokorundem 12EB przy ciśnieniu 0,5 MPa. Średnia grubość natryskanych powłok wynosiła około 0,3 mm.

Tablica 1. Parametry natryskiwania HVOLF

Długość dyszy, mm	150
Ciśnienie tlenu, kPa	890
Wydatek nafty, l/h	22,7
Wydatek proszku, g/min	330
Gaz podajnika proszku	argon
Odległość natrysku, mm	380

Do modyfikacji elektroerozyjnej powłok WC12Co oraz WC17Co natryskanych naddźwiękowo użyto urządzenie produkcji bułgarskiej, model ELFA-541. Modyfikację elektroerozyjną powłok węglikowych natryskanych naddźwiękowo przeprowadzono przy użyciu elektrody WC8Co o średnicy ∅=1 mm (anoda). Opierając się na analizie charakterystyk prądowych oraz zaleceniach producenta urządzenia przyjęto następujące parametry obróbki elektroerozyjnej: natężenie prądu I= 16 A; prędkość przesuwu stołu V= 0,5 mm/s; prędkość głowicy wraz z elektrodą n= 4200 obr/min; liczba przejść powlekających L= 2; pojemność zespołu kondensatorów C= 0,47 μF; czas trwania impulsu T_i= 8 μs; czas trwania przerwy między impulsami T_p= 32 μs; częstotliwość f= 25 kHz.

Analiza mikrostruktury oraz składu chemicznego natryskanych powłok została przeprowadzona przy pomocy mikroskopu skaningowego JSM-5400 z mikrosondą ISIS 300 Oxford (EDS).

Pomiary mikrotwardości wykonano metodą Vickersa przy użyciu mikrotwardościomierza PMT-3, stosując obciążenie 100 G i 5 G. Wykonano 15 pomiarów (dla każdej powloki), a następnie obliczono wartość średnią z tych pomiarów. Mikrotwardość powłoki WC12Co wyniosła 1147 HV0,1, natomiast powłoki WC17Co 1640 HV0,1.

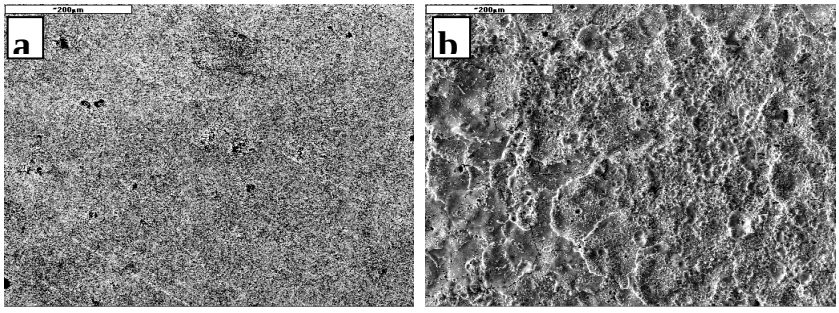
Do pomiaru chropowatości powierzchni wykorzystano przyrząd Talysurf 4 z programem SUFORM, który znajduje się w Laboratorium Komputerowych Pomiarów Wielkości Geometrycznych Katedry Technologii Mechanicznych i Metrologii PŚk. Wykonano 10 pomiarów (dla każdej powłoki), a następnie obliczono wartość średnią z tych pomiarów. Chropowatość powłoki WC-12Co wyniosła R_a = 0,37 μm oraz R_a = 0,44 μm dla powłoki WC-17Co.

Badania tribologiczne powłok zostały przeprowadzone na testerze tribologicznym T-01M typu kulka-pierścień. Przeciwpróbką była kulka o średnicy ϕ6,35 mm (¼'') wykonana ze stali 100Cr6. Badania na testerze przeprowadzono przy następujących parametrach tarcia: obciążenie Q = 4,9 N; prędkość liniowa V = 1m/s; czas próby t = 1 h.

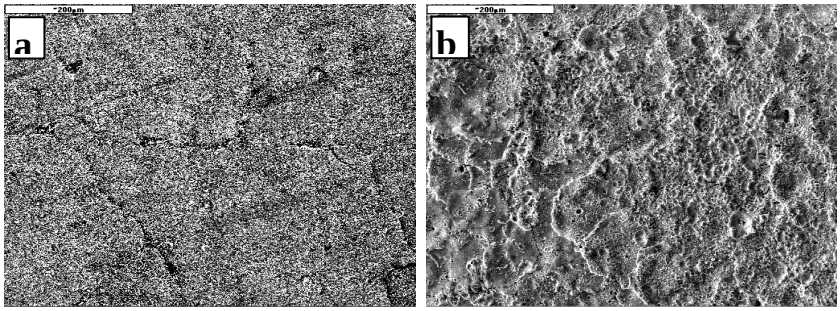
3. WYNIKI BADAŃ

Obydwie natryskane naddźwiękowo powłoki z WC12Co i WC17Co były przed nałożeniem powłok elektroiskrowych polerowane. Na pokazanych (rys. 2a i 3a)

polerowanych powierzchniach powłok widoczna jest ich znikoma porowatość oraz granice miedzy lamellami. Chropowatość powierzchni R_a wynosiła odpowiednio 0,13 μm i 0,063 μm a mikrotwardość odpowiednio 790,1 HV0,1 i 1826,5 HV0,1. Struktura tych powierzchni uległa zmianie po nałożeniu warstwy elektroiskrowej (rys. 2b i 3b). Obraz powierzchni warstwy EDM to rezultat nakładania się na siebie kraterów będących wynikiem erozji podłoża jak również grzbietów utworzonych z przemieszczających się na powierzchnię cząstek materiału powlekającego elektrody. Tak powstała powierzchnia charakteryzuje się brakiem kierunkowości oraz dużymi promieniami zaokrągleń wierzchołków mikronierówności. Chropowatość warstw R_a wynosiła odpowiednio 1,26 μm i 1,72 μm, a mikrotwardość odpowiednio 811±174 HV0,005 i 877±151 HV0,005.



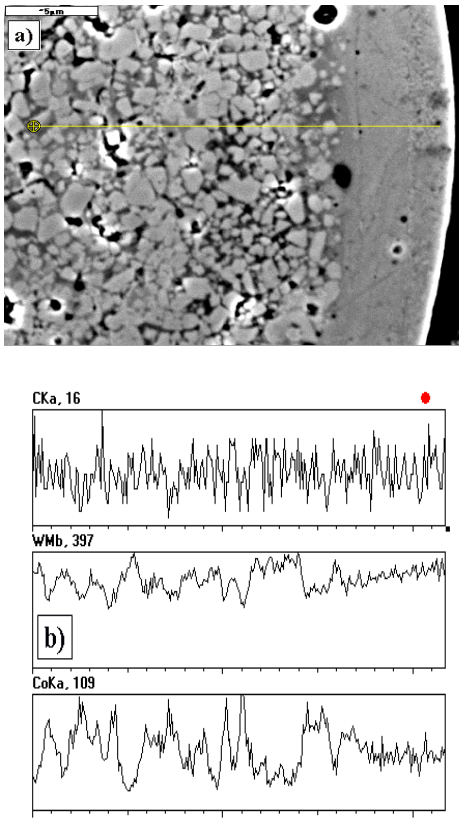
Rys. 2. Mikrostruktura powierzchni a) natryskanej powłoki WC12Co po polerowaniu, b) po nałożeniu warstwy elektroiskrowej



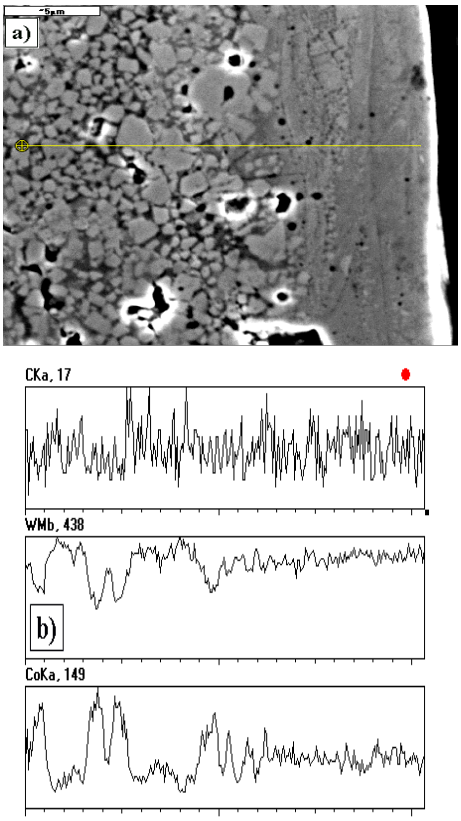
Rys. 3. Mikrostruktura powierzchni a) natryskanej powłoki WC17Co po polerowaniu, b) po nałożeniu warstwy elektroiskrowej

Na fotografii (rys. 4a i 5a) przedstawiono widok mikrostruktury natryskanych powłok WC12Co i WC17Co z nałożoną warstwą z zastosowaniem elektrody WC8Co. Grubość uzyskanych metodą EDM warstw wyniosła od 6÷7 μm. Widoczna jest wyraźna różnica w budowie pomiędzy natryskaną naddźwiękowo powłoką a naniesioną elektroiskrowo warstwą. Na obydwóch zgładach natryskanych powłok (rys. 4a i 5a) widoczne są drobne jasne nieodkształcone ziarna, które są osadzone w ciemnej matrycy. Przeprowadzona

analiza liniowa (rys. 4b i 5b) pokazała nierównomierny rozkład pierwiastków w powłoce natryskanej naddźwiękowo. Można wyróżnić strefy, w których występują znaczne zróżnicowanie ilości wolframu i kobaltu. Na jej podstawie można stwierdzić, że w natryskanych powłokach jasna faza posiadająca dużą zawartość wolframu to ziarna węglika wolframu, natomiast ciemna matryca to obszar bogaty w kobalt z niedużą zawartością wolframu. W obydwóch natryskanych powłokach widoczna jest niewielka porowatość. Nałożona elektroiskrowo na natryskane powłoki warstwa (rys. 4a i 5a) w obydwóch przypadkach ma jednorodną budowę z niewielką ilością okrągłych porów. Analizy liniowe warstw (rys. 4b i 5b) pokazują wyższą zawartość wolframu, niższa zawartość kobaltu oraz ich bardziej równomierny rozkład w nałożonej elektroiskrowo powłoce niż w przypadku natryskanych powłok. Jest to wynikiem niższej zawartości kobaltu (8%) w elektrodzie zastosowanej do nałożenia warstwy elektroiskrowej. Stopniowa zmiana zawartości W i Co przy przejściu z powłoki do warstwy świadczy o jej bardzo dobrym połączeniu z natryskana powłoką.

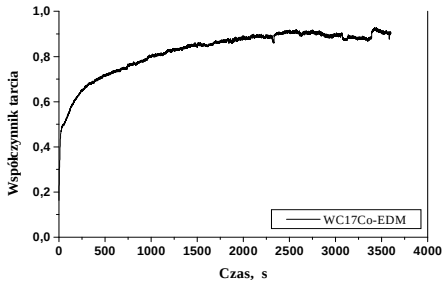


Rys. 4. Mikrostruktura i rozkład liniowy pierwiastków w powłoce WC12Co po EDM

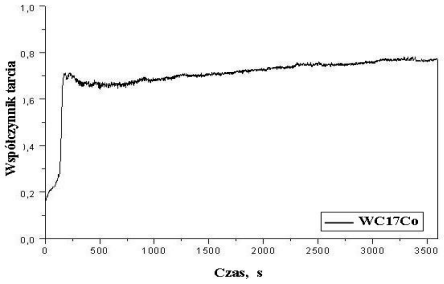


Rys. 5. Mikrostruktura i rozkład liniowy pierwiastków w powłoce WC17Co po EDM

Na wykresach (rys. 6 i 7) przedstawione są przebiegi współczynników tarcia dla natryskanej powłoki WC17Co oraz powłoki z warstwą EDM.



Rys. 6. Wykres zmian współczynnika tarcia w funkcji czasu powłoki WC17Co po EDM



Rys. 7. Wykres zmian współczynnika tarcia w funkcji czasu powłoki WC17Co po polerowaniu

Dla powłoki WC12Co po polerowaniu współczynnik tarcia po wyniósł 1,1 a powłoki z warstwą EDM 0,95. W przypadku powłoki WC17Co wynosi on 0,85 a powłoki z warstwą EDM 0,9. Zmiany współczynnika tarcia są wynikiem zmiany mikrogeometrii współpracującej powierzchni ze stalowa kulką. Niezależnie od składu natryskanej powłoki, nałożona na nią warstwa elektroiskrowa ma zbliżoną mikrotwardość i chropowatość co powoduje, że współczynniki tarcia w obydwóch przypadkach są zbliżone.

4. WNIOSKI

- w wyniku nałożenia warstwy EDM na natryskane powłoki powstała jednorodna warstwa węglika wolframu z niewielka zawartością kobaltu,
- nałożona warstwa EDM jest dobrze związana z natryskaną po powłoką, o czym świadczy stopniowa zmiana zawartości składników powłoki i warstwy,
- współczynnik tarcia w obydwóch przypadkach natryskanych powłok węglikowych z warstwą EDM jest zbliżony ponieważ jej skład, mikrostruktura, mikrotwardość i chropowatość są zbliżone.

5. LITERATURA

[1] Flitney B.: *Alternatives to chrome for hydraulic actuators*, Sealing Technology, 2007, 10, 8-12.

[2] Picas J.A., Forn A., Matthäus G.: *HVOF coatings as an alternative to hard chrome for pistons and valves*, Wear, 2006, 261 (5-6), 477-484.

[3] Sahraoui T., Fenineche N. E., Montavon G., Coddet C.: *Alternative to chromium: characteristics and wear wear behaviour of HVOF coatings for gas turbine shafts repair (heavy-duty)*, Journal of Materials Processing Technology, 2004, 152, 43-55.

[4] Liao H., Normand B., Coddet C.: *Influence of coating microstructure on the abrasive wear resistance of WC/Co cermet coatings*, Surface & Coating Technology, 2000, 124, 235-242.

[5] Liu J., Wang R., Qian Y.: *The formation of a single-pulse electrospark deposition spot*, Surface & Coatings Technology, 2005, 200, 2433-2437.
[6] Agarwal A., Dahotre N.: *Pulse electrode deposition of superhard boride coatings on ferrous alloy*, Surface & Coatings Technology, 1998, 106, 242-250.