



Numerical and Experimental Investigations of Mechanical Behavior of Hard TiAlN Nanostructured Coatings Applied by PVD on HSS Substrate

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Naderi H.¹ MSc,
Elmkhah H.^{*1} PhD,
Mazaheri Y.¹ PhD

How to cite this article

Naderi H, Elmkhah H, Mazaheri Y. Numerical and Experimental Investigations of Mechanical Behavior of Hard TiAlN Nanostructured Coatings Applied by PVD on HSS Substrate. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(12):3063-3069.

ABSTRACT

In this research, nanostructured TiAlN coatings were applied on HSS substrate using cathodic arc evaporation method (CAE) in the different duty cycle values. Then the effect of duty cycle on the coating surface properties including surface morphology and structure, coating thickness and mechanical behavior of nanostructured coatings were investigated. X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) were used to characterize the surface coatings. Also, micro indentation and adhesion test were utilized to evaluate the mechanical behavior. The results show that by changing the duty cycle, the macro-particles size and amount change which is effective on the roughness and morphology of the coatings. It is attributed to the electrical charge of macro-particles that are produced in the process which can be influenced by the structure. Also, the changes in grain size depend on the changes of duty cycle value. Furthermore, the mechanical properties of the coatings are affected by altering the duty cycle related to the deposition mechanism. The hardness value of TiAlN coatings increases from 3168 HV to 3817 HV when the duty cycle increases from 25% to 50%. But with an increase in duty cycle from 50% to 75%, hardness reduced to 3582 HV. Consequently, it can be possible to find an optimum duty cycle value to achieve the best mechanical properties. Also, the minimum friction coefficient (0.44) and the minimum wear rate were determined for the TiAlN coating with the duty cycle of 75%, which it can be attributed to better smoothness and higher density of the coating.

Keywords Duty Cycle; Mechanical Behavior; Wear Behavior; Nanostructured TiAlN Coating

CITATION LINKS

[1] Effects of duty cycle and pulsed frequency on the fabrication AlCrN thin films deposited by high power impulse magnetron ... [2] Correlation between the surface characteristics and the duty cycle for the PACVD-derived TiN ... [3] Combined electrochemical and electron spectroscopic investigations of the surface oxidation of TiAlN HPPMS hard ... [4] Influence of pulsed bias duty cycle variations on structural and mechanical properties arc evaporated (Al,Cl)2O3 ... [5] Influence of duty cycle on the microstructure and microhardness of pulse electrodeposition Ni-CeO2 nanocomposite ... [6] Fabrication of Sn-Ni/MWCNT composite coating for li-ion batteries by pulse electro deposition: effect of duty ... [7] Investigation and optimization of the trib-mechanical properties of CrAlCN coatings using design of ... [8] Effects of pulsed bias duty ratio on microstructure and surface properties of TiN ... [9] Deposition of thick TiAlN coatings on 2024 AL/SiCp substrate by arc ion plating. Surface & Coatings ... [10] Structure and wear resistance of TiN and TiAlN coatings on az 91 alloy deposited by multi-arc ion ... [11] Influence of pulse substrate bias on the structure and properties of TiAlN films deposited by cathodic vacuum ... [12] Mechanical and tribological properties of CrN/TiN superlattice coating deposited by a combination of arc-free deep oscillation ... [13] Multilayer (TiN, TiAlN) Ceramic coatings for nuclear fuel ... [14] Surface characteristics for the Ti-Al-N coatings deposited by high power impulse magnetron sputtering technique at the ... [15] Influence of Mo on the structure and the tribomechanical properties of arc evaporated ... [16] Structure and high temperature tribological behavior of TiAlN duplex treated coating ... [17] Effect of duty cycle on the deposition and characteristics of HIPIMS deposited TiN thin ... [18] The role of superimposing pulse bias voltage on DC bias on the macroparticle attachment and structure of TiAlN coatings produced ... [19] Effect of pulsed bias duty ratio on microstructure and mechanical properties of TiN/TiAlN multilayer ... [20] Influence of duty cycle on microstructure, tribological and corrosion behaviors of a-c/a-c; Ti multilayer ... [21] Hardness measurements of thin ... [22] Qualitative evaluation of mechanical properties of nanostructured TiAlN coatings deposited on ...

¹Department of Materials Engineering, Engineering Faculty, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

*Correspondence

Address: Bu-Ali Sina University, Ahmadi-Roshan Boulevard, Hamedan, Iran. Postal code: 6517838695
Phone: +98 (81) 38292630
Fax: +98 (81) 38292631
h.elmkhah@basu.ac.ir

Article History

Received: October 13, 2018

Accepted: May 26, 2019

ePublished: December 21, 2019

بررسی عددی و تجربی رفتار مکانیکی پوشش‌های سخت نانو ساختار TiAlN اعمال شده به روش PVD بر زیرلایه فولاد تندبر

حسین نادری MSc

گروه مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

حسن علم‌خواه* PhD

گروه مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

یوسف مظاهری PhD

گروه مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

چکیده

هدف از این تحقیق، ایجاد پوشش نانو ساختار TiAlN بر زیرلایه فولاد تندبر HSS با استفاده از روش تبخیر قوس‌کاتی و نیز بررسی تأثیر درصد چرخه‌کار بر خواص سطحی پوشش از جمله مورفولوژی و ساختار سطح، ضخامت پوشش و رفتار مکانیکی پوشش نانو ساختار است. برای مشخصه‌یابی پوشش‌ها از دستگاه‌های پرتوی اشعه ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی بهره‌گرفته شد. همچنین برای ارزیابی رفتار مکانیکی از آزمون میکروسختی استفاده شد. مطالعات نشان می‌دهد که با تغییر درصد چرخه‌کار در فرآیند لایه‌نشانی، مقدار و اندازه ماکروذراتی موجود در پوشش تغییر یافته که این امر در زبری سطح و مورفولوژی آن تأثیرگذار است. این عامل به باردارشدن ماکروذراتی تولیدشده در اتمسفر لایه نشانی مربوط می‌شود. همچنین به دلیل اینکه تغییرات اندازه دانه به تغییرات درصد چرخه‌کار وابسته است که این تغییرات نیز بر خواص مکانیکی پوشش اثرگذار خواهد بود که با مکانیزم لایه‌نشانی در درصد‌های مختلف چرخه‌کار مرتبط است. بنابر آزمون‌های سختی گرفته شده هنگامی که چرخه کار از ۲۵٪ به ۵۰٪ افزایش می‌یابد سختی از ۳۱۶۸ ویکرز به ۳۸۱۷ ویکرز افزایش پیدا می‌کند اما با افزایش چرخه‌کار از ۵۰٪ به ۷۵٪ سختی به ۳۵۸۲ ویکرز کاهش پیدا می‌کند. در نتیجه با تغییر چرخه‌کار می‌توان، درصد بهینه آن برای خواص مکانیکی مطلوب را تعیین نمود. همچنین حداقل ضریب اصطکاک (۰/۴۴) و حداقل نرخ سایش، برای پوشش TiAlN با درصد چرخه کار ۷۵٪ تعیین شد که این می‌تواند به صافی بهتر و تراکم بالاتر این پوشش نسبت داده شود.

کلیدواژه‌ها: درصد چرخه‌کار، رفتار مکانیکی، رفتار سایشی، پوشش نانو ساختار TiAlN

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۷/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۳/۰۵

* نویسنده مسئول: h.elmkhah@basu.ac.ir

۱- مقدمه

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه اثر درصد چرخه‌کار بر پوشش‌های نیتریدی و غیرنیتریدی که به روش‌های مختلف اعمال شده‌اند صورت گرفته است [1, 2]. پژوهش‌های مختلفی در زمینه خواص مکانیکی، سایشی و مقاومت به خوردگی پوشش‌های نانو ساختار نیتریدی انجام شده است [3, 4]. همچنین در پژوهش‌های مختلف، تأثیر درصد چرخه‌کار بر رفتار مکانیکی پوشش‌های نانو ساختار نیتریدی که به روش تبخیر قوس‌کاتی یا روش‌های مشابه آن اعمال شده مورد بررسی قرار گرفته است [5]. اما تحقیقات جامعی در رابطه با تأثیر درصد چرخه‌کار بر خواص مکانیکی پوشش نانو ساختار TiAlN اعمال شده به روش تبخیر قوس‌کاتی در دسترس نیست. لذا این پژوهش ضمن ارائه کمی و کیفی از اثر چرخه‌کار بر پوشش نانو ساختار TiAlN، به بررسی رفتار مکانیکی و سایشی آن خواهد پرداخت.

پوشش نانو ساختار TiN به دلیل دارا بودن خواص منحصربه‌فردی مانند سختی بالا، استحکام چسبندگی بسیار قوی، غیرسمی بودن، مقاومت به خستگی مطلوب و قابلیت پوشش‌دهی خوب روی انواع زیرلایه‌ها به سرعت جای خود را در مهندسی سطح پیدا کرد [6, 7]. از

این ماده در مصارف هوا فضا، تجهیزات پزشکی و دندان پزشکی، وسایل جراحی، قالب‌های اکستروژن، سنبه‌ها، خودرو سازی و ابزارهای برشی استفاده می‌شود. با اضافه کردن عنصر سوم مانند آلومینیم به پوشش نانو ساختار TiN نسل دوم پوشش‌های سه‌جزئی تولید شد که برخی از خواص این پوشش مانند ضریب اصطکاک نسبت به پوشش‌های TiN کمتر می‌شود و مقاومت به سایش آن بهبود می‌یابد که به دلیل ایجاد لایه‌ای از اکسید آلومینیم می‌باشد [8]. بر اساس یافته‌ها می‌توان گفت که پوشش‌های نانو ساختار TiAlN در کاربردهای سرعت بالا و دمای بالا، پایداری و عمر مؤثر طولانی‌تر نسبت به پوشش‌های نانو ساختار TiN دارند [9].

برای ایجاد پوشش‌های نانو ساختار سخت، روش‌های زیادی وجود دارد. در میان روش‌ها، روش PVD و CVD به عنوان دو روش متفاوت است که در دهه‌های اخیر در رقابت یکدیگر می‌باشند. با استفاده از این روش‌ها امکان ایجاد لایه نازک ۱ تا ۵ میکرونی سخت و فوق سخت اعم از پوشش‌های TiN و TiAlN و دیگر پوشش‌های نیتریدی و اکسیدی فراهم می‌باشد. از میان روش‌های CVD روش پلاسمایی آن یعنی PACVD [2] و میان روش‌های PVD روش قوس‌کاتی آن یعنی CA-PVD [4] به مرحله تجاری سازی رسیده است.

با اعمال پوشش نانو ساختار TiAlN به روش تبخیر قوس‌کاتی و کنترل متغیرهای مختلف آن، می‌توان خواص آن را بهبود داد [10, 11]. یکی از این متغیرها درصد چرخه‌کار می‌باشد که میزان درصد چرخه‌کار بر مورفولوژی و ریزساختار پوشش‌ها مؤثر است و می‌تواند بر خواص آن از جمله زبری سطح، چقرمگی، میزان سختی و ضریب اصطکاک و غیره تأثیرگذار باشد. به طور کلی با تغییر درصد چرخه‌کار دو اثر مهم ملاحظه می‌شود، یکی تغییر در اندازه دانه و دیگری تغییر در مقدار ماکروذرات در پوشش است. تغییر در اندازه دانه و تعداد ماکروذرات به ترتیب خواص مکانیکی و رفتار سایشی را تغییر می‌دهند [8]. در نتیجه می‌توان با به‌دست آوردن یک مقدار بهینه از درصد چرخه‌کار در روش تبخیر قوس‌کاتی به یک پوشش نانو ساختار مطلوب رسید. به بیان دیگر می‌توان با تغییر درصد چرخه‌کار به خواص مکانیکی مطلوب در پوشش نانو ساختار دست یافت.

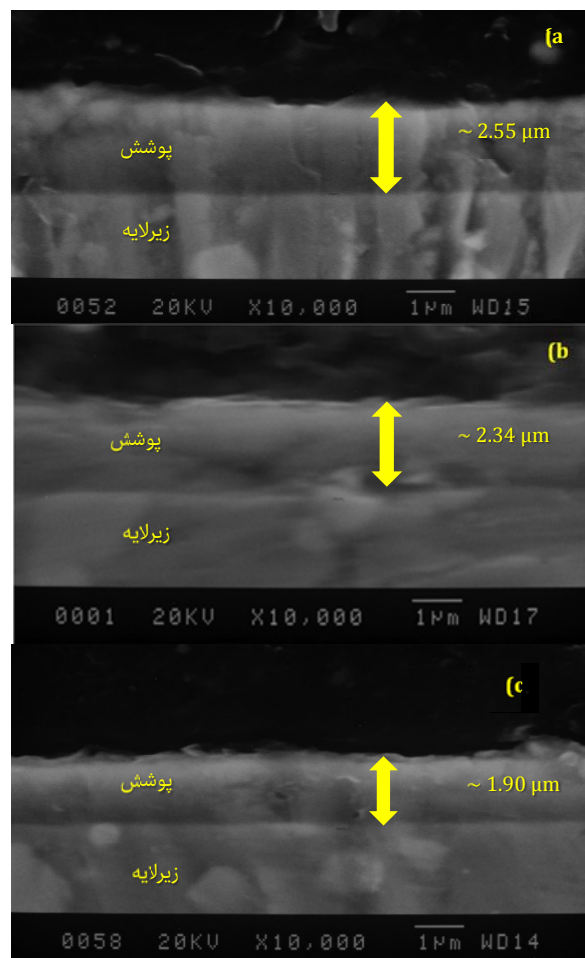
هدف از انجام این پروژه بررسی خواص مکانیکی پوشش TiAlN اعمال شده به روش تبخیر قوس‌کاتی با تغییر متغیر درصد چرخه‌کار می‌باشد.

۲- مواد و روش تحقیق

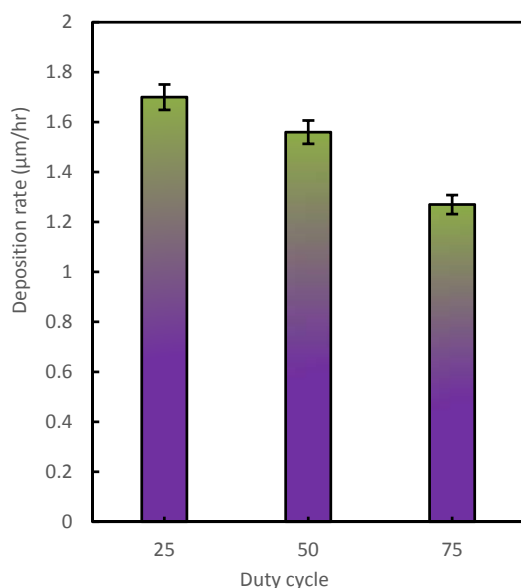
در این پژوهش از فولاد HSS به عنوان زیرلایه و از TiAlN به عنوان پوشش استفاده شد و پوشش به وسیله روش تبخیر قوس‌کاتی اعمال شد. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود در ابتدا میلگردی با قطر ۲ سانتی‌متر و طول ۲۰ سانتی‌متر از فولاد HSS (خشکه هوایی) تهیه شد و با استفاده از دستگاه برش، آن را به قطعه‌هایی با ضخامت ۱ سانتی‌متر تقسیم شد. بر هر زیرلایه عملیات سنباده‌زنی تر تا سنباده ۲۰۰۰، برای آماده‌سازی سطح انجام گرفت تا برای پوشش‌دهی آماده شوند. بعد از آماده‌سازی سطح زیرلایه، روی نمونه‌ها به کمک دستگاه تبخیر قوس‌کاتی که یکی از روش‌ها در فرآیندهای پوشش‌دهی PVD می‌باشد، پوشش TiAlN در سه چرخه‌کار ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ اعمال شد. در این دستگاه از تارگت‌های Al و Ti هر یک با درجه خلوص ۹۹/۹۹٪ استفاده شد. همچنین گاز نیتروژن به عنوان گاز واکنش به کار برده شد. خلوص گاز ۹۹/۹۹٪ و جریان آن در طول فرآیند ثابت بود. با توجه به قابلیت‌ها و شرایط بهینه دستگاه، فشار کاری محفظه ۱۰^{-۳} تور و ولتاژ بایاس ۱۰۰ ولت در نظر گرفته شد. فاصله تارگت و

بررسی عددی و تجربی رفتار مکانیکی پوشش‌های سخت نانو ساختار TiAlN اعمال شده ... ۳۰۶۵

شکل ۳، تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع نمونه دارای پوشش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود پوشش TiAlN از تعدادی نانولایه‌های TiAlN تشکیل شده است که ضخامت هر لایه حدود ۵۰ نانومتر اندازه‌گیری شده است.

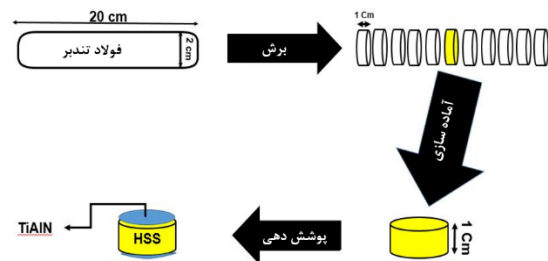


شکل ۳) تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از سطح مقطع نمونه‌ها به ترتیب در درصد چرخه‌های: (a) ۲۵، (b) ۵۰ و (c) ۷۵



نمودار ۱) وابستگی نرخ رسوب‌گذاری پوشش TiAlN به درصد چرخه‌کار

زیرلایه ۱۵ سانتی‌متر و دمای زیرلایه ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد نیز ثابت بود. همچنین مدت زمان رسوب‌دهی ۹۰ دقیقه تعیین شد.



شکل ۱) شماتیک آماده‌سازی و پوشش‌دهی نمونه‌ها

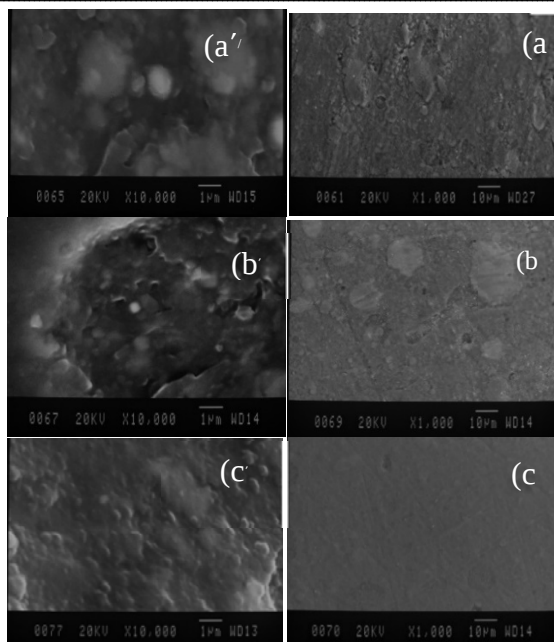
برای مشخصه‌یابی همانند مشاهده ریزساختار، مورفولوژی، ضخامت پوشش و جهت‌گیری کریستال‌ها از تصاویر FESEM و الگوی XRD و مورفولوژی استفاده شد. تصاویر SEM از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل JSM-840A هم از لایه‌ها برای تعیین ضخامت پوشش و هم از سطح پوشش برای به‌دست‌آوردن مورفولوژی گرفته شد که برای مشاهده ضخامت پوشش نمونه‌ها مانت شدند و روی سطح آن عملیات سنباده‌زنی تا سنباده ۲۰۰۰ انجام گرفت و تصاویر به دست آمد. در نهایت با استفاده از برنامه Digimizer ضخامت پوشش‌ها اندازه‌گیری شد. همچنین برای تعیین نانولایه‌های پوشش از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی مدل MIRA3 TESCAN استفاده شد. با استفاده از دستگاه XRD مدل APD2000 با لامپ از جنس مس و با طول موج ۱/۵۴ آنگستروم با زاویه تابش ۲۰ تا ۸۰ درجه در محدوده ۲θ با اندازه گام ۰/۰۲ درجه بر ثانیه الگوهای XRD به دست آمد.

برای بررسی خواص مکانیکی از آزمون میکروسختی برای هر نمونه استفاده شد که در آن فرورونده با نیروی ۱۰۰ گرم به مدت ۳۰ ثانیه بر سطح نمونه‌ها وارد شد و بر اساس اثری که روی سطح گذاشت، سختی هر نمونه به دست آمد و نتایج به‌دست‌آمده با یکدیگر مقایسه شد. همچنین برای بررسی چسبندگی پوشش در نمونه‌ها، فرورونده راکول‌سی به مدت ۳۰ ثانیه با نیروی ۱۴۷۳ نیوتون بر سطح نمونه اعمال شد و با مشاهده تصویری که با میکروسکوپ نوری در بزرگمایی ۴۰۰ گرفته شد و با توجه به استاندارد ASTM B 571-97، میزان کیفی چسبندگی بررسی گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی ریزساختار پوشش‌ها

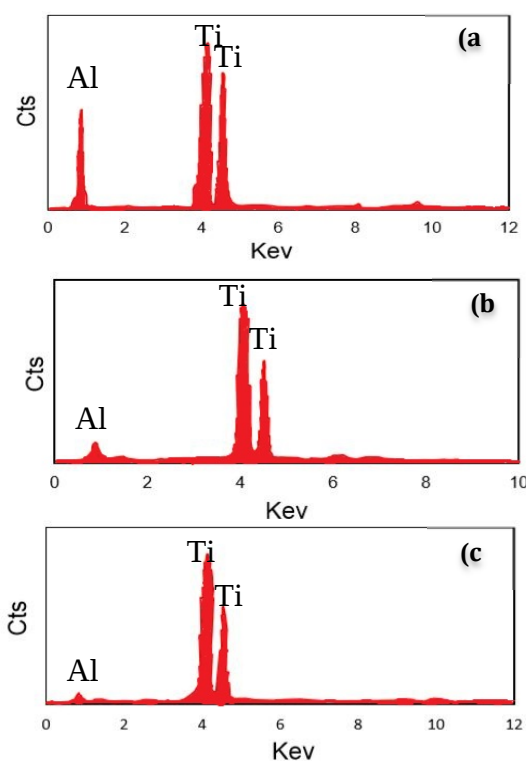
شکل ۲ تغییرات ضخامت پوشش TiAlN در چرخه‌کارهای مختلف را نشان می‌دهد که با افزایش درصد چرخه‌کار از ۲۵ به ۷۵٪، ضخامت پوشش از ۲/۵۵ میکرومتر به ۱/۹۰ میکرومتر کاهش یافته است. همین‌طور نمودار ۱ رابطه نرخ رسوب‌گذاری نسبت به درصد چرخه‌کار را نشان می‌دهد. نرخ رسوب‌گذاری ۱/۷، ۱/۵۶ و ۱/۲۷ میکرومتر بر ساعت به ترتیب در درصد چرخه‌کارهای ۲۵ به ۵۰ و ۷۵ مشاهده شد. در زمان لایه‌نشانی در چرخه‌کارهای مختلف ضخامت‌های مختلف ایجاد شد. افزایش درصد چرخه‌کار باعث کندوپاش ثانویه (Re Sputtering) پوشش از زیرلایه می‌شود که این امر باعث کاهش ضخامت و نرخ رسوب‌گذاری می‌شود^[12]، همچنین از طرفی در زمان روشن‌بودن، یونیزاسیون بیشتری خواهیم داشت و در زمان خاموش‌بودن، رشد اتفاق می‌افتد. به همین دلیل با افزایش درصد چرخه‌کار نرخ لایه‌نشانی و ضخامت کاهش پیدا می‌کند^[13].



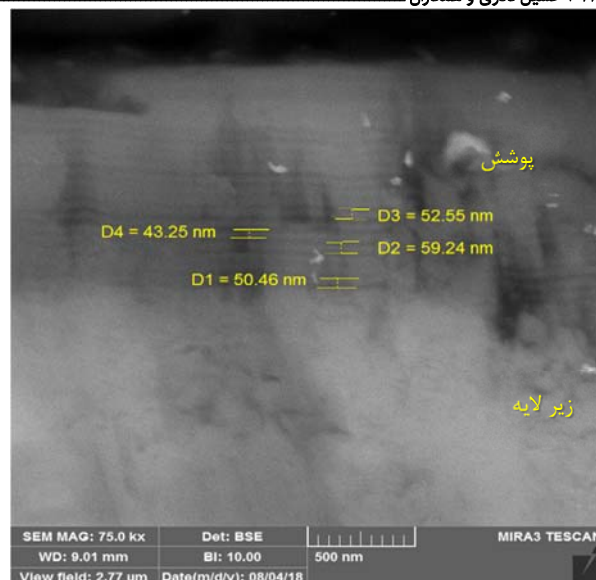
شکل ۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح پوشش TiAlN در چرخه‌های: a و a'، ۲۵، b و b'، ۵۰ و c و c' ۷۵٪

۳-۲- بررسی خواص مکانیکی پوشش‌ها

نمودار ۳ الگوی EDX از پوشش TiAlN در چرخه‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ با استفاده از برنامه Get Data را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار ملاحظه می‌شود، با افزایش درصد چرخه‌کار، به‌طور نسبی، مقدار Al در پوشش کاهش پیدا کرده است که احتمالاً به دلیل کندوپاش ثانویه است که با سبک‌بودن اتم Al، تعداد بیشتری Al از سطح پوشش جدا می‌شوند که این امر می‌تواند در ویژگی‌هایی از قبیل خواص مکانیکی پوشش تاثیرگذار باشد.



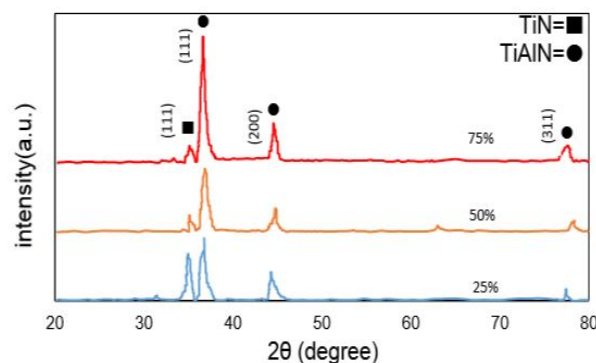
نمودار ۳) الگوی آنالیز EDX از سطح پوشش TiAlN در چرخه‌های: (a) ۲۵، (b) ۵۰ و (c) ۷۵٪



شکل ۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع پوشش TiAlN

نمودار ۲ الگوی پراش XRD از سطح پوشش TiAlN در چرخه‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ را نشان می‌دهد. عرض پیک در جهت‌گیری (۱۱۱) خیلی باریک است که نشان‌دهنده درجه بالای بلورینگی می‌باشد. همچنین در چرخه‌های مختلف، شدت پیک در صفحات (۱۱۱) متفاوت است که تغییر در جهت‌گیری دانه‌ها را نشان می‌دهد [14]. افزایش چرخه‌کار باعث افزایش بمباران یونی می‌شود؛ در نتیجه شدت پیک‌ها در صفحات (۱۱۱) افزایش پیدا می‌کند و پیک‌ها باریک‌تر می‌شوند که نشان‌دهنده افزایش بلوری‌شدن است [15].

شکل ۴ تصاویر SEM از سطح پوشش TiAlN در چرخه‌های ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ در دو بزرگنمایی ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ را نشان می‌دهد. چالش اصلی در روش پوشش‌دهی به روش قوس‌کاتدی، وجود ماکروذرات در پوشش است که می‌تواند اثر منفی بر خواص مکانیکی پوشش بگذارد [16, 17]. افزایش میزان درصد چرخه‌کار باعث ایجاد نوسان در مقدار شار منفی در یون‌ها هنگام پوشش‌دهی می‌شود و به دلیل این که ماکروذرات اندازه بزرگتری نسبت به یون‌های دیگر دارند به وسیله الکترون‌های زیادی مورد توجه قرار می‌گیرند که سبب می‌شود ماکروذرات دارای بار منفی بیشتری شوند [18]. بنابراین مقدار ماکروذرات کمتری قدرت رسیدن به زیرلایه را خواهند داشت در نتیجه با افزایش درصد چرخه‌کار، کیفیت سطحی پوشش افزایش پیدا کرده و سطحی متراکم‌تر به دست می‌آید [8, 19, 20].



نمودار ۲) الگوهای XRD مختلف از پوشش TiAlN در درصد چرخه‌های متفاوت

بررسی عددی و تجربی رفتار مکانیکی پوشش‌های سخت نانو ساختار TiAlN اعمال شده ... ۳۰۶۷
با در نظر گرفتن مقادیر ضخامت لایه t ، سختی ترکیب H_c و سختی زیرلایه H_s ، به شکل زیر قابل محاسبه است [21]:

$$H_F = H_s + \frac{H_c - H_s}{2 C \frac{t}{d} - C^2 \left(\frac{t}{d}\right)^2} \quad (3)$$

لذا مقادیر سختی به دست آمده از آزمون ویکرز و سختی محاسبه شده از رابطه ۳، در جدول ۱ آمده است. ملاحظه می شود که عدد سختی محاسبه شده بسیار نزدیک به عدد سختی واقعی است که در سایر منابع [22] گزارش شده است.

جدول ۱) سختی اندازه گیری شده و سختی محاسبه شده طبق رابطه ۳

درصد چرخه کار	سختی اندازه گیری شده	سختی محاسبه شده
۲۵	۲۰۶۰	۳۱۶۸
۵۰	۲۳۱۷	۳۸۱۷
۷۵	۲۱۵۵	۳۵۸۲

بیشترین مقدار سختی پوشش در چرخه کار ۵۰٪ اندازه گیری می شود که معادل ۳۸۱۷ ویکرز است. با افزایش درصد چرخه کار از ۲۵ به ۵۰ سختی پوشش از ۳۱۶۸ به ۳۸۱۷ ویکرز افزایش پیدا کرده است. به طور کلی در چرخه کارهای پایین به دلایل پایین بودن دما هنگام پوشش دهی و مقدار زیاد ماکروذرات، سختی پوشش پایین می باشد و با افزایش درصد چرخه کار، دمای پوشش دهی افزایش پیدا کرده و مقدار ماکروذرات در پوشش کاهش پیدا می کند. اما با توجه به نمودار ۳ با افزایش درصد چرخه کار، مقدار آلومینیم در پوشش کاهش پیدا می کند که با توجه به این که شعاع اتمی آلومینیم (۰/۱۴۴nm) کمتر از شعاع اتمی تیتانیم (۰/۱۴۶nm) می باشد، هرچه مقدار آلومینیم در پوشش کاهش پیدا کند باعث کاهش تنش پسماند شده و سختی کاهش می یابد. در چرخه کارهای کمتر از ۵۰٪، پارامترهای افزایش دما و کاهش مقدار ماکروذرات بر کاهش مقدار آلومینیم غالب هستند. در نتیجه افزایش درصد چرخه کار، باعث افزایش سختی پوشش می شود. اما بعد از چرخه کار ۵۰٪، مقدار ماکروذرات، پارامتر غالب می شود. بنابراین در این بازه با افزایش درصد چرخه کار از ۵۰ به ۷۵، سختی پوشش از ۳۸۱۷ به ۳۵۸۲ ویکرز کاهش پیدا می کند [2, 19]. لازم به ذکر است که افزایش درصد چرخه کار در مقادیر بالا (بین ۵۰ و ۷۵٪) سبب می شود به حالت جریان مستقیم نزدیک می شود که امکان افزایش مقدار ماکروذرات وجود دارد که این امر نیز باعث کاهش سختی می شود [8]. همچنین برای بررسی دقیق تر خواص مکانیکی پوشش (سختی و مدول یانگ) از دستگاه نانو سختی استفاده می شود که در مقاله دیگر مورد توجه نگارنده خواهد بود.

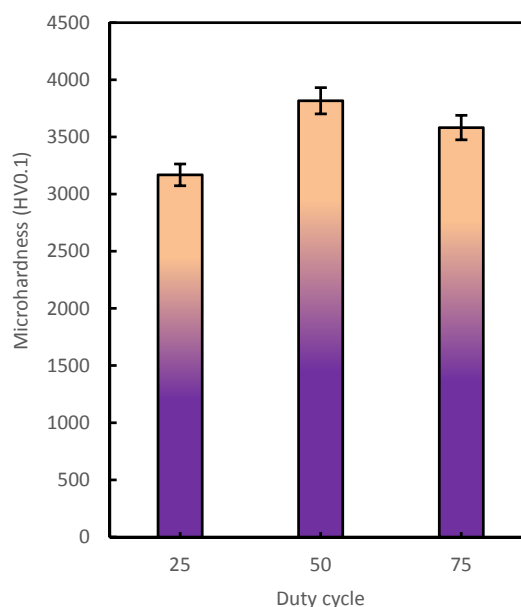
مطابق شکل ۵ چسبندگی پوشش ها مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور از استاندارد ASTM B 571-97 استفاده شد. مطابق این استاندارد هر گونه کندگی، ورقه ورقه شدن یا پوسته شدن لایه پس از آزمون چسبندگی توسط دستگاه راکول سی نشان دهنده چسبندگی ضعیف لایه به زیرلایه می باشد. بررسی تصاویر نشان می دهد که هیچ اثری از کندگی یا پوسته پوسته شدن در هیچ یک از چرخه کارها مشاهده نشد که این امر بیانگر چسبندگی عالی پوشش به زیرلایه می باشد.

شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از اثر تست سختی سنجی ویکرز بر سطح پوشش TiAlN را نشان می دهد. همان طور که در شکل مشخص است، هیچ گونه ترک در پوشش مشاهده نمی شود که این نشانگر چقرمگی بالای پوشش است.

نمودار ۴، نتایج حاصل از آزمون سختی سنجی پوشش TiAlN در درصد چرخه کارهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵ را نشان می دهد. اندازه گیری مستقیم سختی پوشش های لایه نازک با استفاده از آزمون میکروسختی دقیق نیست. زیرا مقدار بار اعمالی زیاد بوده و احتمال دارد که سختی زیرلایه بر سختی به دست آمده از پوشش تأثیر بگذارد. در چنین حالتی مقدار عددی سختی اندازه گیری شده H_c حاصل ترکیب سختی زیرلایه و سختی پوشش است. برای به دست آوردن اندازه گیری دقیق، این دو (سختی پوشش و زیرلایه) باید از هم جدا شوند. برای رفع این چالش، در سال های اخیر بر اساس فرضیات مختلف، مدل های ریاضی فراوانی پیشنهاد شده است. ولی تمام مدل ها از یک قانون خطی تبعیت می کنند که بر اساس آن سختی ترکیب H_c ، تابعی از سختی لایه نازک H_F و سختی زیرلایه H_s است [21]:

$$H_c = H_s + a_0 (H_F - H_s) \quad (1)$$

که در آن a_0 ثابتی مربوط به سختی پوشش است. تفاوت میان مدل های مختلف تنها از اختلاف ضریب a_0 که تابع بار اعمالی است، ناشی می شود.



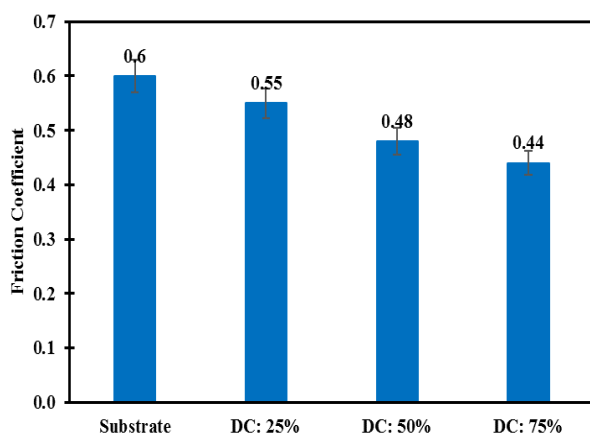
نمودار ۴) رابطه بین سختی پوشش های TiAlN و درصد چرخه کار

یکی از اولین مدل های محاسبه سختی توسط باکل ارائه شد، او ضریب a_0 را به صورت تابعی از فاکتور وزن مربوط به حجم هر لایه در ناحیه ای که تحت فرورفتگی قرار گرفته است تعریف کرد. پس از آن مدل بهتری توسط جانسون و هوگاکر ارائه شد که در آن بار مناطق تحت تورفتگی در زیرلایه و پوشش در نظر گرفته شده است. آنها ضریب a_0 را برحسب نسبت (t/d) ، با رابطه ۱ بیان کردند [21]:

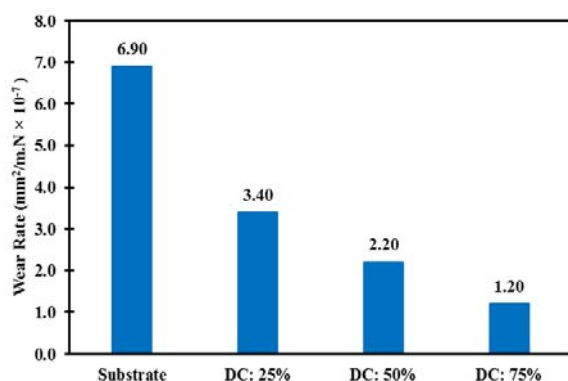
$$a_0 = C \left(\frac{t}{d}\right) - C^2 \left(\frac{t}{d}\right)^2 \quad (2)$$

که در آن t ضخامت پوشش، d قطر فرورفتگی و C ثابتی است که بسته به رفتار لایه آن را ۱ در نظر می گیریم. در نتیجه، سختی لایه H_F

چرخه‌کار باعث کاهش ضریب اصطکاک می‌شود. همچنین در این نمودار مشخص است که نمونه‌های دارای پوشش، ضریب اصطکاک کمتری نسبت به زیرلایه دارند. همین‌طور که در نمودار ۶ مشخص است، با افزایش درصد چرخه‌کار، نرخ سایش کاهش پیدا می‌کند. افزایش درصد چرخه‌کار باعث افزایش انرژی بمباران یونی، متراکم‌تر شدن ساختار و کاهش زبری سطح می‌شود. با افزایش درصد چرخه‌کار از ۲۵ به ۷۵، مقدار آلومینیوم پوشش کاسته شده و از طرفی پوشش متراکم‌تر می‌شود، همچنین زبری سطح از ۱۹۵ به ۱۷۱ نانومتر کاهش می‌یابد. کاهش زبری سطح یکی از عوامل کاهش ضریب اصطکاک می‌باشد. از طرفی، همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، افزایش میزان آلومینیوم در پوشش باعث تشکیل آلومینا شده و نرخ سایش افزایش می‌یابد. این عوامل باعث افزایش مقاومت به سایش پوشش در درصد چرخه‌کار ۷۵ و کاهش نرخ سایش آن شده است.



نمودار ۵) مقایسه ضریب اصطکاک زیرلایه و پوشش TiAlN اعمال شده در درصد چرخه‌کارهای مختلف

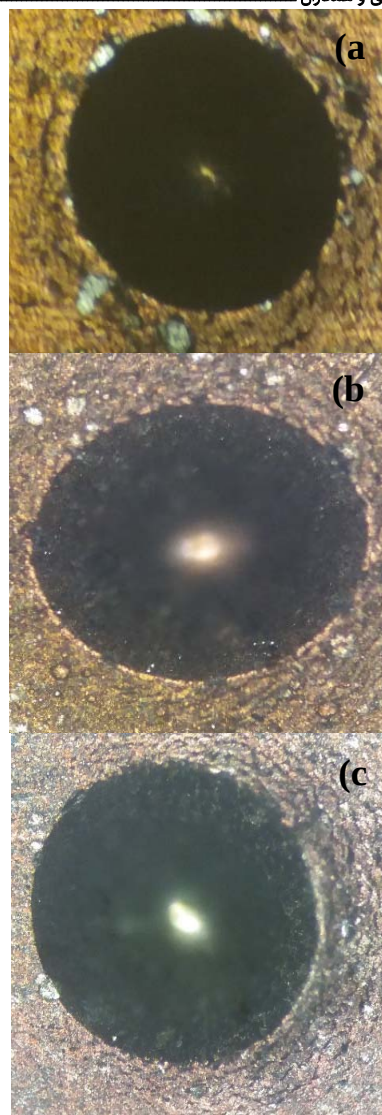


نمودار ۶) مقایسه نرخ سایش زیرلایه و پوشش TiAlN اعمال شده در درصد چرخه‌کارهای مختلف

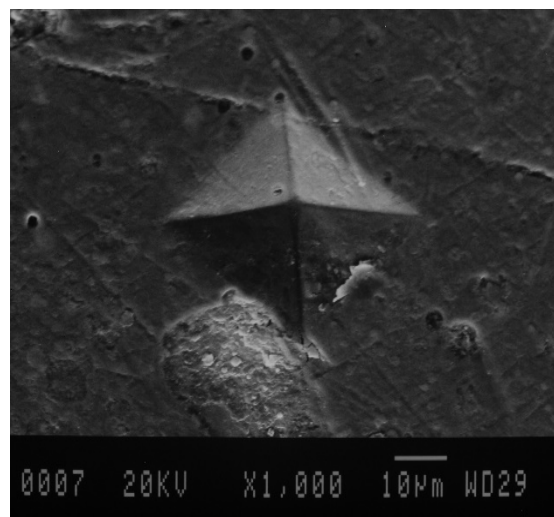
۴- نتیجه‌گیری

۱) با افزایش درصد چرخه‌کار از ۲۵ به ۷۵، ضخامت پوشش TiAlN از ۲/۵۵ به ۱/۹ میکرومتر کاهش پیدا می‌کند.
 ۲) افزایش درصد چرخه‌کار از ۲۵ به ۵۰ با افزایش سختی همراه است در حالی که افزایش درصد چرخه‌کار از ۵۰ به ۷۵ باعث کاهش سختی می‌شود. بیشینه سختی در چرخه‌کار ۵۰٪ و معادل با ۳۸۱۷ ویکرز به دست آمد.

۳) در تصاویر مربوط به آزمون چسبندگی (با روش راکول‌سی) هیچ اثری از گندگی یا پوسته‌پوسته شدن پوشش مشاهده نشد که این امر نشان بیانگر چسبندگی عالی پوشش به زیرلایه می‌باشد.



شکل ۵) نتایج تست چسبندگی پوشش‌های نانو ساختار TiAlN در چرخه‌کارهای: (a) ۲۵، (b) ۵۰ و (c) ۷۵٪



شکل ۶) تصویر میکروسکوپ الکترونی از اثر فرورونده ویکرز بر پوشش TiAlN

۳-۳- مقایسه رفتار سایشی پوشش‌ها

نمودار ۵ میزان ضریب اصطکاک را برای چهار نمونه مورد آزمایش نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشخص است، افزایش درصد

- 10- Zhao H, Wang XH, Liu QL, Chen LJ, Liu Z. Structure and wear resistance of TiN and TiAlN coatings on az 91 alloy deposited by multi-arc ion plating. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2010;20:s679-s682.
- 11- Zhang GP, Gao GJ, Wang XQ, Lv GH, Zhou L, Chen H, et al. Influence of pulse substrate bias on the structure and properties of TiAlN films deposited by cathodic vacuum arc. Applied Surface Science. 2012;258(19):7274-7279.
- 12- Ou YX, Lin J, Che HL, Moore HL, Sproul WD, Lei MK. Mechanical and tribological properties of CrN/TiN superlattice coating deposited by a combination of arc-free deep oscillation magnetron sputtering. Thin Solid Films. 2015;594(Part A):147-155.
- 13- Alat E, Motta AT, Comstock RJ, Partezana JM, Wolfe DE. Multilayer (TiN, TiAlN) Ceramic coatings for nuclear fuel cladding. Journal of Nuclear Materials. 2016;478:236-244.
- 14- Elmkhah H, Zhang TF, Abdollah-zadeh A, Kim KH, Mahboubi F. Surface characteristics for the Ti-Al-N coatings deposited by high power impulse magnetron sputtering technique at the different bias voltages. Journal of Alloys and Compounds. 2016;688(Pt A):820-827.
- 15- Glatz SA, Koller CM, Bolvardi H, Kolozsvári S, Riedl H, Mayrhofer PH. Influence of Mo on the structure and the tribomechanical properties of arc evaporated TiAlN. Surface & Coatings Technology. 2017;311:330-336.
- 16- Niu R, Li J, Wang Y, Chen J, Xue Q. Structure and high temperature tribological behavior of TiAlN duplex treated coating on Ti6Al4V. Surface & Coatings Technology. 2017;309:232-241.
- 17- Chang CL, Shih SG, Chen PH, Chen WC, Ho CT, Wu WY. Effect of duty cycle on the deposition and characteristics of HIPIMS deposited TiN thin films. Surface & Coatings Technology. 2014;259(Part B):232-237.
- 18- Taghavi Pourian Azar G, Er D, Jürgen M. The role of superimposing pulse bias voltage on DC bias on the macroparticle attachment and structure of TiAlN coatings produced with CA-PVD. Surface and Coatings Technology. 2018;350:1050-1057.
- 19- Wei Y, Gong C. Effect of pulsed bias duty ratio on microstructure and mechanical properties of TiN/TiAlN multilayer coatings. Applied Surface Science. 2011;257(17):7881-7886.
- 20- Bai WQ, Wang XL, Gu CD, Tu JP. Influence of duty cycle on microstructure, tribological and corrosion behaviors of a-c/a-c; Ti multilayer films. Thin Solid Films. 2015;584:214-221.
- 21- Jonsson B, Hogmark S. Hardness measurements of thin films. Thin Solid Films. 1984;114(3):257-269.
- 22- Abdollahzadeh A, Elmkhah H, Mahboubi F, Sabour Roohaghdam AR, Kim KH. Qualitative evaluation of mechanical properties of nanostructured TiAlN coatings deposited on cutting tools by analysis of XRD results. Modares Mechanical Engineering. 2015;14(12):61-66. [Persian]

۴) حداقل ضریب اصطکاک ۰/۴۴ و حداقل نرخ سایش، برای پوشش TiAlN با درصد چرخه کار ۷۵٪ تعیین شد که این می‌تواند به صافی بهتر و تراکم بالاتر این پوشش نسبت داده شود.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشد.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشد.

سهم نویسندگان: حسین نادری (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۳۰٪)؛ حسن علم‌خواه (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۴۰٪)؛ یوسف مظاهری (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی (۳۰٪)

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشد.

منابع

- 1- Hsiao YC, Lee JW, Yang YC, Lou BS. Effects of duty cycle and pulsed frequency on the fabrication AlCrN thin films deposited by high power impulse magnetron sputtering. Thin solid films. 2013;549:281-291.
- 2- Raoufi M, Mirdamad S, Mahboubi F, Ahangarani S, Mahdipoor MS, Elmkhah H. Correlation between the surface characteristics and the duty cycle for the PACVD-derived TiN nanostructure films. Surface & Coatings Technology. 2011;205(21-22):4980-4984.
- 3- Wiesing M, Baben MT, Schneider JM, de los Arcos T, Grundmeier G. Combined electrochemical and electron spectroscopic investigations of the surface oxidation of TiAlN HPPMS hard coatings. Electrochimica Acta. 2016;208:120-128.
- 4- Pohler M, Franz R, Ramm J, Polcik P, Mitterer C. Influence of pulsed bias duty cycle variations on structural and mechanical properties arc evaporated (Al,Cl)2O3 coatings. Surface & Coatings Technology. 2015;282:43-51.
- 5- Sen R, Das S, Das K. Influence of duty cycle on the microstructure and microhardness of pulse electrodeposition Ni-CeO2 nanocomposite coatings. Materials Research Bulletin. 2012;47(2):478-485.
- 6- Uysal M, Centikaya T, Alp A, Akbulut H. Fabrication of Sn-Ni/MWCNT composite coating for li-ion batteries by pulse electro deposition: effect of duty cycle. Applied Surface Science. 2015;334:80-86.
- 7- Tillmann W, Stangier D, Schröder P. Investigation and optimization of the trib-mechanical properties of CrAlCN coatings using design of experiments. Surface & Coatings Technology. 2016;308:147-157.
- 8- Yongqiang W, Xiaoxia C, Xiub T, Chunzhi G, Shiqin Y, Zhiqiang J, et al. Effects of pulsed bias duty ratio on microstructure and surface properties of TiN films. Vacuum. 2013;89:185-189.
- 9- Zhao SS, Du H, Zheng JD, Yang Y, Wang W, Gong J, et al. Deposition of thick TiAlN coatings on 2024 AL/SiCp substrate by arc ion plating. Surface & Coatings Technology. 2008;202(21):5170-5174.