علوم و مهندسی سطح، شماره ٦٥ (سال ١٤٠٤)، صفحات ١١-٢٣



نشریه علوم و مهندسی سطح

انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران

عوامل موثر بر رفتار ترشوندگی پوشش CrN اعمال شده به روش تبخیر قوس کاتدی

مریم رحیمی[1]، فرزاد محبوبی*[1]، حسن علم‌خواه[2]

۱. دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲. دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

واژگان کلیدی:

ترشوندگی

آب‌گریزی

زاویه تماس با آب

پوشش CrN

تبخیر قوس کاتدی

تاریخ دریافت:

١٤٠٤/١٠/١٤

تاریخ بازنگری:

١٤٠٥/٠٣/٢٤

تاریخ پذیرش:

١٤٠٥/٠٤/٠٩

چکیده

پوشش‌های آبگریز به دلیل کاربردهای گسترده در صنایع مختلف، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ (CCD) برای بررسی هم‌زمان اثر ولتاژ بایاس زیرلایه (۳۵ تا ۲۰۰ ولت) و فشار گاز نیتروژن (۰/۰۰۳ تا ۰/۰۱۷ تور) بر رفتار ترشوندگی و زبری پوشش CrN تولیدشده به روش تبخیر قوس کاتدی استفاده شد. زیرلایه‌های فولاد زنگ‌نزن AISI ۳۰۴ با این روش پوشش‌دهی شدند و در هر آزمون، زاویه تماس با آب و زبری سطح (Ra) اندازه‌گیری شد و به نرم‌افزار DesignExpert برای مدل‌سازی داده‌ها معرفی شد تا روابط کمّی بین دو عامل فشار و ولتاژ بایاس با پاسخ‌های زاویه تماس و زبری به‌دست آید. تحلیل واریانس نشان داد هر دو عامل فشار و ولتاژ (به‌ویژه جمله‌های درجه دوم آن‌ها) بر زاویه تماس و زبری اثر معنادار دارند و پاسخ‌ها رفتاری غیرخطی نسبت به تغییر شرایط لایه‌نشانی نشان می‌دهند. بر اساس مدل، ناحیه‌ای در حوالی فشار تقریبی Torr ۰/۰۰۶ و ولتاژ بایاس حدود ۹۵- ولت به‌عنوان شرایط بهینه پیش‌بینی شد. نمونه تهیه‌شده در این شرایط زاویه تماس با آب حدود ۹۳ درجه و زبری در بازه ۶۱ تا ۹۹ نانومتر نشان داد. آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) تشکیل فاز غالب CrN با ساختار FCC و حضور مقداری فاز Cr_2N را تأیید کرد و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح مقطع، رشد یکنواخت و ضخامت ۳/۴۲ µm را نشان داد. در مجموع، نتایج بیان می‌کنند که تنها با تنظیم کنترل‌شده فشار نیتروژن و ولتاژ بایاس در فرآیند قوس کاتدی می‌توان آب‌گریزی پوشش CrNرا بدون نیاز به اصلاح سطحی بهبود داد.

DOI: https://doi.org/10.22034/issst.2026.2082473.1669

Evaluation of parameters affecting the wettability of a CrN coating deposited via cathodic arc evaporation

Abstract

Hydrophobic coatings have attracted considerable attention due to their wide range of applications in various industries. In this research, a response surface methodology (CCD) design of experiments was used to simultaneously investigate the effects of substrate bias voltage (35–200 V) and nitrogen gas pressure (0.003–0.017 Torr) on the wettability behavior and surface roughness of CrN coatings deposited by the cathodic arc evaporation technique. AISI 304 stainless steel substrates were coated using this method, and in each experiment, the water contact angle and surface roughness (Ra) were measured and imported into the Design Expert software for data modeling in order to establish quantitative relationships between the pressure and bias voltage with the responses of contact angle and roughness. Analysis of variance revealed that both pressure and bias voltage (particularly their quadratic terms) exert significant effects on the contact angle and roughness, and the responses exhibit nonlinear behavior with respect to changes in the deposition conditions. Based on the model, a region near a nitrogen pressure of approximately 0.006 Torr and a bias voltage of about –95 V was predicted as the optimal condition. The sample produced under these conditions showed a water contact angle of about 93° and a surface roughness in the range of 61–99 nm. X-ray diffraction (XRD) confirmed the formation of a predominant CrN phase with an FCC structure along with a small amount of Cr_2N, and cross-sectional SEM images showed uniform growth and a thickness of 3.42 µm. Overall, the results indicate that the hydrophobicity of CrN coatings can be improved without any surface modification, solely through controlled adjustment of nitrogen pressure and bias voltage in the cathodic arc process.

Keywords: Hydrophobicity, Water contact angle, CrN coating, Cathodic arc evaporation

* *Corresponding author E-mail: mahboubi@aut.ac.ir*

١- مقدمه

آب‌گریزی به عنوان یک خاصیت صنعتی موردنیاز و رو به رشد، توجه بسیاری از محققان را در رشته‌های مواد، شیمی و نانو به خود جلب کرده است. سطحی که زاویه تماس با آب بالاتر از $^{\circ}$٩٠ داشته باشد آب‌گریز و سطحی که زاویه تماس بالاتر از $^{\circ}$١٥٠ و در حالت کاسی باکستر[1] باشد، ابرآب‌گریز است. برای آب‌گریز کردن یک سطح از مواد با انرژی سطحی کم استفاده می‌شود و زبری سطح طوری تنظیم می‌گردد تا فصل مشترکی مرکب از هوا و ماده با آب تشکیل شود. در این حالت بالشتک‌های هوا در خلل و فرج سطح به دام می‌افتد [١-٣]. آب‌گریزی با خواص مختلفی از جمله خودتمیزشوندگی [٤]، کاهش اصطکاک [٥]، کاهش تجمع آلودگی زیستی [٦]، کاهش چسبندگی [٧] و بسیاری خواص دیگر مرتبط است. این خواص باعث شده پوشش‌های آب‌گریز در صنایع مختلف مانند قالب‌سازی [٨]، تولید فیلترهای صنعتی [٩]، حفاظت و خوردگی [١٠]، نساجی [١١]، تجهیزات پزشکی، خودروسازی [١٢]، هواپیماسازی [١٣]، ساختمان‌سازی [١٤]، سلول‌های خورشیدی [١٥] و بسیاری از زمینه‌های دیگر کاربرد داشته باشد. پوشش‌های آب‌گریز به روش‌های مختلفی از جمله حکاکی شیمیایی، حکاکی با لیزر، سل‌ژل، CVD، PVD و روش‌های دیگر تولید می‌شوند. از بین این روش‌ها، روش PVD اگرچه به تجهیزات اولیه گران‌قیمت نیاز دارد، اما از نظر هزینه تمام شده اجرای پوشش روی هر قطعه، بهره‌وری، سازگاری با محیط زیست و دوام نسبت به سایر روش‌ها برتری دارد [١٦]. یک روش برای تولید پوشش‌های آب‌گریز به روش PVD، رشد نانومیله‌های اکسیدی است. نانومیله‌های V_2O_5 یا ZnO دارای زبری مناسب برای ایجاد پوششی آب‌گریز هستند. این پوشش‌ها بدون اصلاح سطحی بسیار آبدوست هستند و با اصلاح سطحی توسط برخی فلوروسیلان‌ها و کلروسیلان‌ها به آب‌گریزی با درجات بالا می‌رسند [١٧ و ١٨]. برخی پوشش‌های تولید شده به روش PVD از جنس نیتریدهای فلزات واسطه، به طور ذاتی و بدون نیاز به اصلاح سطحی خاصیت آب‌گریزی از خود نشان داده‌اند و انرژی سطحی کمی دارند. یکی از این پوشش‌ها، پوشش CrN است.

پوشش‌دهی قوس کاتدی نوعی از رسوب‌دهی فیزیکی از حالت بخار است که در آن از قوس الکتریکی برای تبخیر مواد از اهداف کاتدی استفاده می‌شود. مواد تبخیر شده روی یک بستر یا زیرلایه متراکم می‌شوند و یک لایه نازک را تشکیل می‌دهند. از قوس کاتدی به طور گسترده‌ای برای ایجاد پوشش‌های نیتریدی متراکم و مستحکم برای محافظت از ابزار برشی، قالب‌ها و سایر ابزارها در صنعت استفاده می‌شود. به عنوان مثال، پوشش‌های مختلف نیتریدی مانند TiN، CrN و ZrN با موفقیت برای مقابله با سایش و خوردگی در انواع صنایع توسعه یافته‌اند. دما، ولتاژ بایاس اعمالی به زیرلایه و جریان هدف از مهم‌ترین عوامل تأثیر گذار بر خواص زیرلایه هستند [١٩].

در فرآیند تبخیر قوس کاتدی به‌دلیل یونش بالای پلاسما و شار قابل‌توجه یون‌های پرانرژی، ریزساختار و عملکرد پوشش نتیجه‌ی برهم‌کنش همزمان شیمی پلاسما و انرژی بمباران یونی در سطح است. از این منظر، فشار گاز واکنشی (به‌ویژه نیتروژن در رسوب‌دهی نیتریدها) با کنترل نرخ نیترداسیون و نسبت فلز/نیتروژن، می‌تواند استوکیومتری و فازهای تشکیل‌شونده، بافت و حتی نرخ لایه‌نشانی را تغییر دهد؛ به‌طور نمونه در پوشش‌های نیتریدی، تغییر فشار نیتروژن می‌تواند گذار فازی از زیرنیترید به نیترید مکعبی یا همزیستی فازها را رقم بزند [٢٠ - ٢٢]. هم‌زمان، افزایش فشار کاری با کاهش طول آزاد میانگین و افزایش برخوردها، انرژی و جهت‌داری شار گونه‌ها را تعدیل کرده و بر چگالی، رشد ستونی/ریزدانگی و نیز ویژگی‌های مورفولوژیکی مرتبط با ماکروذرات اثر می‌گذارد [٢٣]. از سوی دیگر، ولتاژ بایاس منفی زیرلایه با

[1] Cassie Baxter

افزایش انرژی برخورد یون‌ها، پدیده‌های چگال‌سازی ناشی از بمباران یونی و بازپاشش را تقویت می‌کند؛ در نتیجه معمولاً بهبود چسبندگی، تغییر اندازه دانه و جهت‌گیری ترجیحی و نیز تغییر تنش‌های پسماند رخ می‌دهد، در حالی‌که در مقادیر زیادِ بایاس می‌تواند تنش فشاری بالا، تغییرات شدید در نرخ رسوب‌دهی و تشدید/کاهش برخی عیوب سطحی (وابسته به سیستم و شرایط) را به‌دنبال داشته باشد. بنابراین انتظارِ رفتار غیرخطی و وجود بازه‌های بهینه (به‌علت رقابت مکانیزم‌هایی مثل تحرک سطحی/چگال‌سازی در برابر بازپاشش/تنش) در پاسخ پوشش به فشار گاز و بایاس، یک نتیجه‌ی کاملاً رایج در تاریخچه قوس کاتدی برای نیتریدهای مختلف است[٢٤-٢٧].

در پژوهش‌ها برای پوشش CrN تولید شده به روش قوس کاتدی مقادیر مختلفی از زاویه تماس با آب، گزارش شده است. سان[2] و همکارانش با هدف کاهش چسبندگی سطح قالب تولید بسته‌بندی ادوات الکترونیک به مواد پایه اپوکسی تعدادی از پوشش‌ها را به روش کندوپاش مگنترونی غیرتعادلی با میدان بسته ایجاد کردند. زاویه تماس آب با پوشش CrN حاصل از این روش، ^{o}١٠١ اندازه‌گیری شد [١٨]. در پژوهشی دیگر به منظور بررسی استفاده از پوشش مذکور در سطح داخلی قالب‌های تزریق پلاستیک، از پوشش CrN به عنوان زیرلایه استفاده شد و سپس با ثابت در نظر گرفتن جریان گاز نیتروژن، مقادیر مختلفی از گاز اکسیژن برای تولید پوشش Cr(N,O) به روش تبخیر قوس کاتدی، ساختار دولایه Cr(N,O)/CrN ایجاد شد. مشاهده شد که با افزودن اکسیژن به ترکیب پوشش، زاویه تماس پوشش CrN از حدود ^{o}٩٤ به ^{o}١٠٢ افزایش پیدا کرد [٢٨]. به طور مشابه سو[3] و همکاران با هدف بکارگیری CrN در قالب تزریق پلاستیک، پوشش Cr_2O_3/CrN را به روش تبخیر قوس کاتدی با نگهداری نمونه به صورت ثابت در برابر هدف کروم تولید کردند. مطابق با یافته‌ها زاویه تماس با آب از حدود ^{o}٧٥ برای CrN به ^{o}١٠٣ با افزودن اکسیژن به ترکیب پوشش افزایش پیدا کرد [٢٩].

در پژوهشی دیگر به روش تبخیر قوس کاتدی، تأثیر زمان لایه‌نشانی و نوع ولتاژ بایاس اعمال شده (مستقیم، پالسی و یا بدون اعمال ولتاژ) بر زاویه تماس با آب پوشش CrN مورد توجه قرار گرفت و زاویه تماس با آب از حدود ^{o}٢٠ (بدون اعمال ولتاژ بایاس) تا ^{o}٨٨ با ولتاژ پالسی ٣٠ kV تغییر کرد. اعمال ولتاژ پالسی و افزودن زمان لایه‌نشانی سبب افزایش زاویه تماس در بازه مورد آزمون شد [٣٠] . لی[4] و همکاران با تولید پوشش $(Cr/CrN)_n$ به روش کندوپاش مگنترون و با هدف بررسی خواص خوردگی پوشش در دمای بالا، مشاهده کردند که با افزایش تعداد لایه‌ها از ٣ به ٢٤، زاویه تماس با آب از ^{o}٩٤ به ^{o}١٠٤ افزایش پیدا می‌کند [٣١]. در لایه‌نشانی پوشش Cr-N، فاز Cr_2N به دلیل مقدار کم جزء قطبی انرژی سطحی تأثیر بیشتری در افزایش آب‌گریزی نسبت به فاز CrN دارد که می‌تواند سرعت جدا شدن قطعه از قالب تزریق پلاستیک را افزایش دهد. ینگ[5] و همکاران به روش کندوپاش مگنترون غیرتعادلی میدان بسته، برای مقادیر مختلفی از تغذیه گاز نیتروژن در مخلوط نیتروژن و آرگون در فشار ثابت Torr ٠/٠٠٢، بیشترین زاویه تماس را به میزان ^{o}١٠٦ به دست آوردند [٣٢].

مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد اگرچه اثر ترکیب پوشش‌ها، نوع منبع انرژی و شرایط لایه‌نشانی بر رفتار ترشوندگی پوشش‌های CrN گزارش شده است، اما بررسی هم‌زمان عوامل کلیدی فرآیند از جمله ولتاژ بایاس و فشار گاز نیتروژن در روش تبخیر قوس کاتدی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، به ارتباط کمّی میان این عوامل با ویژگی‌های سطحی مانند زاویه تماس و زبری کمتر پرداخته شده است. از این رو پرداختن به این موضوع

[2] Sun
[3] Hsu
[4] Li
[5] Yang

می‌تواند دید دقیق‌تری از بهینه‌سازی فرآیند و بهبود رفتار ترشوندگی پوشش CrN فراهم آورد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد و تجهیزات

برای ایجاد پوشش از دستگاه قوس کاتدی شرکت یارنیکان صالح مدل ٤٠٥٠ دارای ماده هدف دیسکی با قطر ٨ cm که روی هر کاتد یک جرقه‌زن پنوماتیک متصل است، استفاده شد. سامانه خلأ شامل پمپ روتاری، روتس و دیفیوژن است. این دستگاه قابلیت افزایش دما تا ٢٠٠°C را دارد و دارای نگهدارنده چرخنده دو گردشی و منبع تغذیه بایاس با توان ٤٠ kW است. به منظور تمیزکاری، زدودن اکسیدهای سطحی و فعال‌سازی زیرلایه، تمام زیرلایه‌ها به مدت ٦ دقیقه در ولتاژ بایاس ٧٥٠ V-، فشار گاز Torr ٠/٠٠٦ و چرخه کاری ٥٠٪ تحت عملیات با پلاسمای آرگون قرار گرفتند. قبل از ایجاد پوشش اصلی به منظور بهبود چسبندگی، یک لایه نازک از کروم به مدت ١ دقیقه با ولتاژ بایاس ٢٥٠V- و فشار آرگون Torr ٠/٠٠٣ و چرخه کاری ٥٠٪ لایه‌نشانی شد. کلیه نمونه‌ها در فاصله ٣٠cm از هدف کروم و به صورت ثابت در محفظه قرار داده شدند. برای ایجاد پوشش CrN از هدف کروم (با خلوص ٩٩/٩٥٪) استفاده شد. گازهای مورد استفاده آرگون و نیتروژن درجه ٥ (هر دو با خلوص ٩٩/٩٩٩٪) بودند. برای لایه‌نشانی پوشش CrN از ورق فولاد زنگ‌نزن AISI ٣٠٤ آینه‌ای با زبری ٠/٠١ µm (Ra) ضخامت ١mm برش خورده در ابعاد cm^2 ٣×٣ به عنوان زیرلایه استفاده شد. به منظور زدودن هر گونه چربی و آلودگی از سطح نمونه‌ها هر نمونه قبل از انجام لایه‌نشانی با آب مقطر و شوینده قلیایی تمیز شد، سپس به مدت ٢٠ دقیقه در حمام اولتراسونیک استون قرار گرفت، با آب مقطر شسته و با یک دمنده باد خشک شد.

۲-۲- آزمون‌ها

جهت اندازه‌گیری زاویه تماس سطح پوشش‌ها با آب مقطر، در دمای کنترل شده $٢٠^{o}C$، از یک دوربین CCD با وضوح تصویر ٦٠٠×٨٠٠ دارای نرم‌افزار پردازش تصویر و گونیومتر دیجیتال با دقت $\pm ١^{\circ}$ استفاده شد. به منظور فازشناسی، دستگاه پراش پرتو ایکس شرکت Philips مدل PW1730 به کار برده شد. به این منظور از پیک K_{α} تک فام شده لامپ مس از زاویه (2θ) از ١٠^{o} تا ٨٠^{o} استفاده شد. برای مشاهده سطح مقطع لایه نازک، میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) مدل MIRA3 ساخت شرکت TESCAN مورد استفاده قرار گرفت. شاخصه زبری R_a با طول نمونه‌برداری ٠/٨ mm و سرعت پیمایش استاندارد، به وسیله دستگاه زبری‌سنج پرتابل برند Time مدل TR200 اندازه‌گیری شد. دقت دستگاه مطابق با مشخصات سازنده برابر با (١٠٪ مقدار اندازه‌گیری شده)± است. برای هر نمونه، اندازه‌گیری پنج بار تکرار شد و مقادیر گزارش‌شده به‌صورت میانگین ± انحراف معیار ارائه گردید. به منظور بررسی توپوگرافی سطح پوشش، از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM، مدل NanoWizard 2) در حالت تماسی استفاده شد. تصاویر سطحی از نمونه بهینه در ناحیه اسکن μm^2 ٣ × ٣ تهیه گردید تا ویژگی‌های مورفولوژیکی و توزیع ناهمواری‌های سطح مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲-۳- طراحی آزمایش

مطالعه اثر ولتاژ بایاس (٣٥ V- تا ٢٠٠V-) و فشار گاز نیتروژن (٠/٠٠٣ Torr تا ٠/٠١٧ Torr) بر خواص ترشوندگی (زاویه تماس با آب) و زبری پوشش CrN مورد بررسی قرار گرفت. در طراحی آزمایش با نرم‌افزار دیزاین اکسپرت[6] تأثیر دو عامل ولتاژ بایاس و فشار گاز نیتروژن به شکل هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفت. پس از لایه‌نشانی، زاویه تماس با آب و زبری سطح نمونه‌ها اندازه

[6] Design Expert

گرفته شد. به منظور مدل‌سازی از روش سطح پاسخ طراحی مرکب مرکزی[7] (CCD) شرایط نقطه مرکزی در این طراحی آزمایش ٦ بار تکرار شده است. در این مرحله شرایط بهینه لایه‌نشانی از منظر ترشوندگی پوشش CrN مشخص شد. پس از مشخص شدن شرایط بهینه از منظر دست‌یابی به بیشینه آب‌گریزی، این نمونه تولید شد.

٣- نتایج و بحث

به منظور یافتن مهم‌ترین شرایط لایه‌نشانی یعنی فشار گاز نیتروژن و ولتاژ بایاس به منظور دستیابی به بالاترین میزان آب‌گریزی، مدل‌سازی انجام شد. نتایج زبری و زاویه تماس با آب نمونه‌های CrN که مطابق با طراحی آزمایش به روش مکعب مرکزی لایه‌نشانی شده‌اند، در جدول ١ ذکر شده است. تحلیل آماری و نتایج مدل‌سازی زاویه تماس با آب و زبری R_a نمونه‌ها بر حسب فشار و ولتاژ بایاس به ترتیب در جدول ٢ و ٣ ارائه شده است.

جدول١: طراحی آزمایش به روش مکعب مرکزی

آزمون	فشار (تور)	ولتاژ بایاس (ولت)	زاویه تماس با آب (درجه)	زبری (نانومتر)
١	٠/٠١	−١١٧/٥	٨٢	٦٦ ± ٤
٢	٠/٠١	−٠/٨٢	٧٥	٩٩ ± ٣
٣	٠/٠٠٠١	−١١٧/٥	٨٣	٧٤ ± ٤
٤	٠/٠١	−١١٧/٥	٩٢	٧١ ± ٢
٥	٠/٠١	−٢٣٤/١٧٣	٧٩	٧٤ ± ٤
٦	٠/٠١٩	−١١٧/٥	٧٠	٦٨ ± ٤
٧	٠/٠١	−١١٧/٥	٩١	٦٢ ± ١
٨	٠/٠١	−١١٧/٥	٩٠	٦٧ ± ١
٩	٠/٠١٧	−٣٥	٧١	٧٩ ± ٤
١٠	٠/٠٠٣	−٢٠٠	٧٤	٦٥ ± ٣
١١	٠/٠١	−١١٧/٥	٨٤	٦٨ ± ٤
١٢	٠/٠٠٣	−٣٥	٨٩	٩٤ ± ٢
١٣	٠/٠١٧	−٢٠٠	٦٩	٦١ ± ٣

[7] Central Composite Design

جدول٢: تحلیل واریانس مدل درجه ٢ زاویه تماس با آب پوشش CrN بر حسب ولتاژ بایاس و فشار

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	٦٨٣/١٤	٥	١٣٦/٦٣	٦/٣٩	٠/٠١٥٢
A فشار	٢١٤/٠٩	١	٢١٤/٠٩	١٠/٠٢	٠/٠١٥٨
B ولتاژ بایاس	١٦/٠٨	١	١٦/٠٨	٠/٧٥٢٤	٠/٤١٤٥
AB	٤٢/٢٥	١	٤٢/٢٥	١/٩٨	٠/٢٠٢٦
A^2	٢٤٢/١٦	١	٢٤٢/١٦	١١/٣٣	٠/٠١٢٠
B^2	٢٢٢/٠٧	١	٢٢٢/٠٧	١٠/٣٩	٠/٠١٤٦
خطای باقیمانده	١٤٩/٦٣	٧	٢١/٣٨	-	-
نابرازش	٦٨/٨٣	٣	٢٢/٩٤	١/١٤	٠/٤٣٥٣
خطای خالص	٨٠/٨٠	٤	٢٠/٢٠	-	-
کل تصحیح شده	٨٣٢/٧٧	١٢	-	-	-

مطابق با جدول ٢ و طبق تحلیل نرم‌افزار، مقدار F (درجه تأثیر عامل بر پاسخ) برابر با ٦/٣٩ نشان می‌دهد مدل به طور کلی معتبر است و تنها ١/٥٢٪ احتمال دارد عامل F ناشی از سیگنال ناخواسته باشد. همچنین شاخص عدم تناسب قابل اهمیت نیست.

جدول٣: تحلیل واریانس مدل درجه ٢ زبری پوشش CrN بر حسب ولتاژ بایاس و فشار

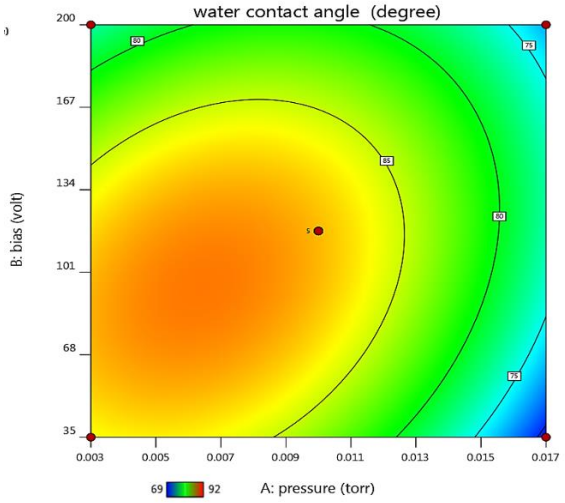
عامل	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F	مقدار P
مدل	٣٧٧/٢٣	٤	١٥٠٨/٩٤	٢٦/٤٨	٠/٠٠٠١
A فشار	٩٤/٤٣	١	٩٤/٤٣	٦/٦٣	٠/٠٣٢٩
B ولتاژ بایاس	٨٤٧/٨٠	١	٨٤٧/٨٠	٥٩/٥٠	< ٠/٠٠٠١
AB	٣٠/٢٥	١	٣٠/٢٥	٢/١٢	٠/١٨٣٢
B^2	٥٣٦/٤٦	١	٥٣٦/٤٦	٣٧/٦٥	٠/٠٠٠٣
خطای باقیمانده	١٤/٢٥	٧	١١٣/٩٩	-	-
نابرازش	١٧/٨٠	٣	٧١/١٩	١/٦٦	٠/٣١٧١

خطای خالص	١٠/٧٠	٤	٤٢/٨٠	-	-
کل تصحیح شده	-	١٢	١٦٢٢/٩٢	-	-

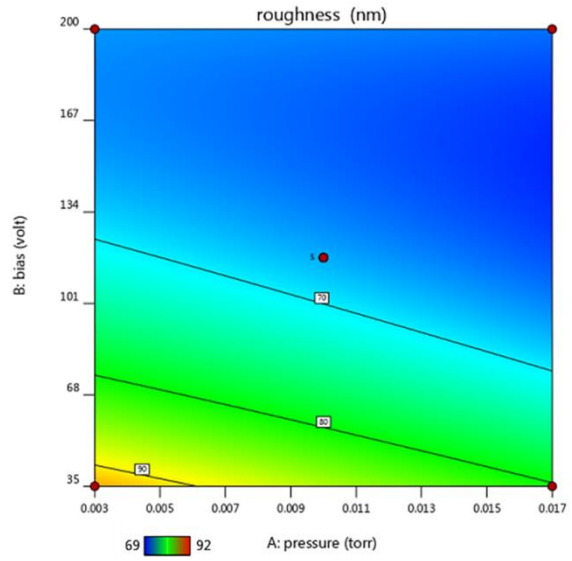
اکثر ضرایب عامل‌های مدل (٣ از ٥)، مقادیر P کمتر از ٠/٠٥ را دارا هستند، لذا نیاز به کاهش مدل نیز وجود ندارد و مدل قابل استناد است. بر این اساس رابطه زاویه تماس پوشش CrN (WCA_{CrN}) با ٢ عامل فشار (A) و ولتاژ بایاس (B) به شکل رابطه ١ قابل ارائه است:

$$WCA_{CrN} = 87.80 - 5.17A - 1.42B + 3.25AB - 5.90A^2 - 5.65B^2 \quad (1)$$

زاویه تماس پوشش CrN متاثر از هر دو عامل ولتاژ بایاس و فشار لایه‌نشانی است. نمودار ٢ بُعدی این رابطه در شکل ١، ارائه شده است. ناحیه نارنجی رنگ، ناحیه‌ای است که احتمالا بیشینه زاویه تماس در آن رخ می‌دهد. حداکثر زبری نمونه‌های CrN لایه‌نشانی شده با ولتاژ بایاس و فشار گاز نیتروژن، ٩٩ nm و حداقل زبری ٦١ nm اندازه‌گیری شد (جدول ١). نتایج تحلیل آماری مدل‌سازی زبری تحت تأثیر ولتاژ بایاس و فشار گاز نیتروژن در جدول ٣ ارائه شده است. مطابق با جدول ٣ و طبق تحلیل نرم‌افزار، مدل پس از یک مرحله کاهش و حذف ضریب A^2، عامل F به میزان ٢٦/٤٨ نشان می‌دهد مدل به طور کلی معتبر است و تنها ٠/٠١٪ احتمال دارد عامل F ناشی از سیگنال ناخواسته (نویز) باشد. مقدار عدم تناسب نیز قابل اهمیت نیست.



شکل ١: تصویر مدل متناسب شده با داده‌ها؛ رابطه زاویه تماس با فشار و ولتاژ بایاس.



شکل ٢: تصویر مدل متناسب شده با داده‌ها؛ رابطه زبری با فشار گاز نیتروژن و ولتاژ بایاس.

تغییرات زبری بر حسب ولتاژ بایاس و فشار گاز نیتروژن در شکل ٢ نشان داده شده است. طبق مدل، بیشینه زاویه تماس در فشاری حدودا برابر با ٠/٠٠٦ Torr و ولتاژی حدودا برابر با ٩٥ V، با احتمال ٦٢/٤٪، به میزان حدودا ٨٩° به دست خواهد آمد. بعد از نمونه‌سازی در شرایط پیش‌بینی شده توسط مدل، زاویه تماس با آب با سه بار تکرار به میزان ٩٣° اندازه‌گیری شد(شکل٣).

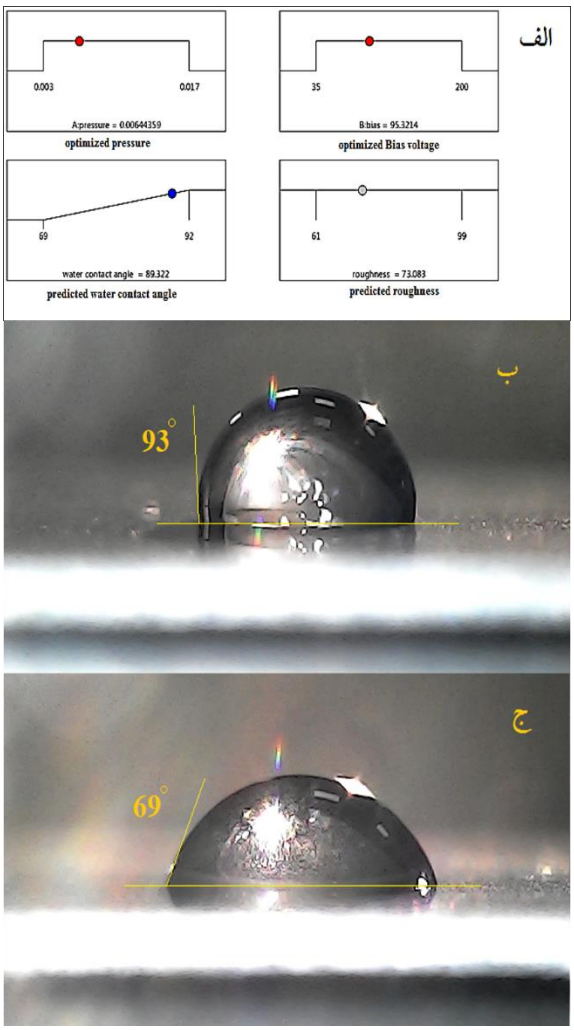
برای پوشش‌های CrN تولیدشده به روش‌های مختلف PVD، مقادیر زاویه تماس در بازه‌ای حدود ٧٥ تا ١٠٦ درجه گزارش شده است [٢٨-٣٢]. بنابراین مقدار اندازه‌گیری‌شده در پژوهش حاضر در محدوده گزارش شده و متعارف رفتار ترشوندگی این پوشش قرار دارد. از دیدگاه ریزساختاری، آبگریزی مشاهده‌شده را می‌توان به اثر همزمان ترکیب فازی و ویژگی‌های مورفولوژیکی سطح نسبت داد.

الگوی پراش پرتو X پوشش، نشان‌دهنده‌ی تشکیل فاز CrN با ساختار FCC (NaCl) است. پیک‌های غالب در حوالی 2θ به اندازه ٣٧ و ٤٤ درجه به‌ترتیب به صفحات (١١١) و (٢٠٠) نسبت داده می‌شوند و پیک ضعیف در حدود ٦٥ درجه به صفحه (٢٢٠) مربوط است (شکل ٤). مقایسه شدت نسبی پیک‌ها با الگوی پراش استاندارد CrN- (ICDD Card No. 01-076-2494) نشان می‌دهد که در الگوی پودری تصادفی مطابق این مرجع، شدت پیک (٢٠٠) نسبت به (١١١) بیشتر است که با نتایج نمونه حاضر نیز همخوانی دارد. بنابراین، صرف تفاوت شدت پیک‌ها با گزارش‌های موجود در برخی مطالعات [٣٣، ٣٤ و ٣٥] نمی‌تواند مبنای نتیجه‌گیری درباره بافت ترجیحی باشد. تعیین قطعی بافت نیازمند تحلیل‌های تکمیلی مانند محاسبه ضریب بافت یا نقشه قطبی[8] است. حضور چند پیک ضعیف در ناحیه‌ی پرزاویه ٦٥ و ٧٦ درجه به فاز Cr_2N هگزاگونال نسبت داده می‌شود؛ این فاز معمولاً در کمبود نسبی نیتروژن یا در شرایط باياس/انرژی بالاتر، تشکیل می‌شود. نبودِ پیک‌های مشخص کروم فلزی قابل توجه است، هرچند باید توجه داشت که پیک Cr(BCC)-(110) با ناحیه‌ی CrN(200) هم‌پوشانی دارد و تنها با روش‌های دقیق‌تر (برازش گوسی/لورنتسی یا ریته‌ولد) قابل تفکیک قطعی است. زمینه نسبتاً بالای الگوی پراش محتمل است ناشی از ریزبلوری بودن پوشش و وجود کرنش/عیوب شبکه‌ای باشد که موجب افزایش پراکندگی غیرمنسجم می‌شود. همچنین سهم جزئی زیرلایه نیز در افزایش شدت زمینه می‌تواند نقش داشته باشد.

مطابق گزارش ینگ و همکاران [٣٢]، در لایه‌نشانی پوشش Cr-N، فاز Cr_2N به دلیل مقدار کم جزء قطبیِ انرژی سطحی، تأثیر بیشتری در افزایش آب‌گریزی نسبت به فاز CrN دارد. همچنین زبری سطح نمونه‌ها در بازه ٦١ تا ٩٩ نانومتر تغییر کرد که بیانگر نقش ناهمواری‌های سطحی در تقویت رفتار آبگریز پوشش است. بنابراین دستیابی به زاویه تماس ٩٣ درجه در این پژوهش را می‌توان احتمالاً ناشی از برهم‌کنش میان ترکیب فازی پوشش و ریزتوپوگرافی سطح دانست. اگرچه در این پژوهش زبری متوسط سطح (Ra) و زاویه تماس به عنوان پاسخ‌های مستقل در طراحی آزمایش مدل‌سازی شدند، رفتار ترشوندگی تنها تابع مقدار Ra نیست. عوامل دیگری نظیر مورفولوژی سطح، شکل و توزیع ناهمواری‌ها و ویژگی‌های توپوگرافی نیز می‌توانند بر زاویه تماس اثرگذار باشند. در این راستا، تصویر AFM نمونه بهینه (شکل ٥) نشان می‌دهد که سطح پوشش دارای توپوگرافی ناهموار شامل قله‌ها و دره‌های پیوسته با انحنای نسبتاً ملایم (شبه‌سهموی) است. زبری متوسط این نمونه بر اساس مدل طراحی آزمایش حدود ٧٣ نانومتر پیش‌بینی شد، که مقدار اندازه‌گیری‌شده از تصویر AFM حدود ٨٢ نانومتر به دست آمد که بیانگر هم‌خوانی قابل قبول مرتبه زبری سطح است. این مورفولوژی پیچیده احتمالاً در کنار زبری متوسط در تعیین رفتار ترشوندگی نقش دارد. بنابراین، اگرچه افزایش زبری می‌تواند در بهبود آب‌گریزی پوشش نقش داشته باشد، اما توپوگرافی سطح و نحوه توزیع ناهمواری‌ها نیز از

[8] Pole Figure

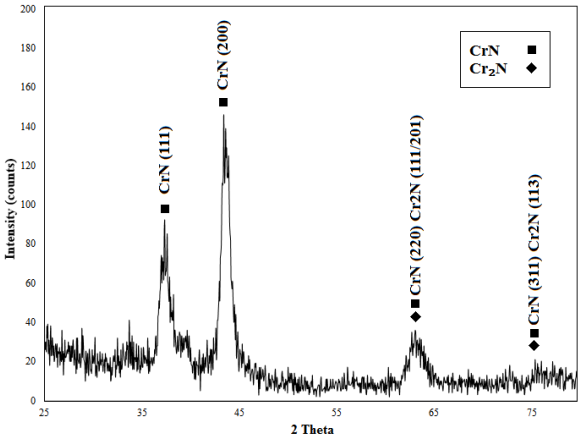
عوامل مؤثر بر زاویه تماس محسوب می‌شوند. بر اساس مدل‌های کلاسیک ترشوندگی سطوح زبر، چنین مورفولوژی‌ای می‌تواند احتمالا با شرایطی سازگار باشد که در آن برهم‌کنش مایع با ناهمواری‌های سطح افزایش یافته و رفتاری نزدیک به رژیم ونزل[9] مشاهده شود [٣٦ و ٣٧]. در شکل ٥، رگه‌های موازی کم‌دامنه‌ای با جهت‌گیری یکنواخت در سراسر ناحیه اسکن مشاهده می‌شوند. تداوم این رگه‌ها در یک راستای ثابت و عدم انطباق آن‌ها با ویژگی‌های موضعی سطح نشان می‌دهد که منشأ آن‌ها آرتیفکت‌های ناشی از فرآیند روبش AFM است. همچنین بررسی داده‌های خام، ماهیت نویزی این رگه‌ها را تأیید کرد. بنابراین، این ویژگی‌ها به‌عنوان بخشی از مورفولوژی واقعی پوشش در نظر گرفته نشدند.



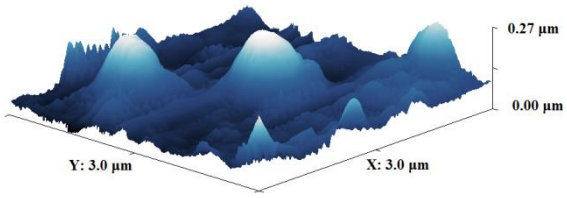
شکل٣: (الف) شرایط دستیابی به بیشینه زاویه تماس ارائه شده توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت، (ب) زاویه تماس با آب پوشش ایجاد شده با شرایط پیش‌بینی شده طبق مدل، (ج) کمینه زاویه تماس با آب پوشش CrN.

پیوستگی پوشش CrN به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدان بررسی شد. تصویر مقطع عرضی پوشش در شکل ٦ نشان می‌دهد که لایه CrN به صورت یکنواخت بر روی زیرلایه فولاد زنگ‌نزن ٣٠٤ رشد کرده و ضخامت آن (اندازه‌گیری شده از ١٠ نقطه مختلف مقطع) به میزان ٠/٠٥ ± ٣/٤٢ µm است. ریزساختار لایه متراکم بوده و تخلخل‌های درشت یا ترک‌های عبوری در ضخامت پوشش مشاهده نمی‌شود. مرز بین پوشش و زیرلایه پیوسته است و جدایش یا حفره قابل ملاحظه‌ای در فصل مشترک پوشش و زیرلایه مشاهده نشد.

[9] Wenzel

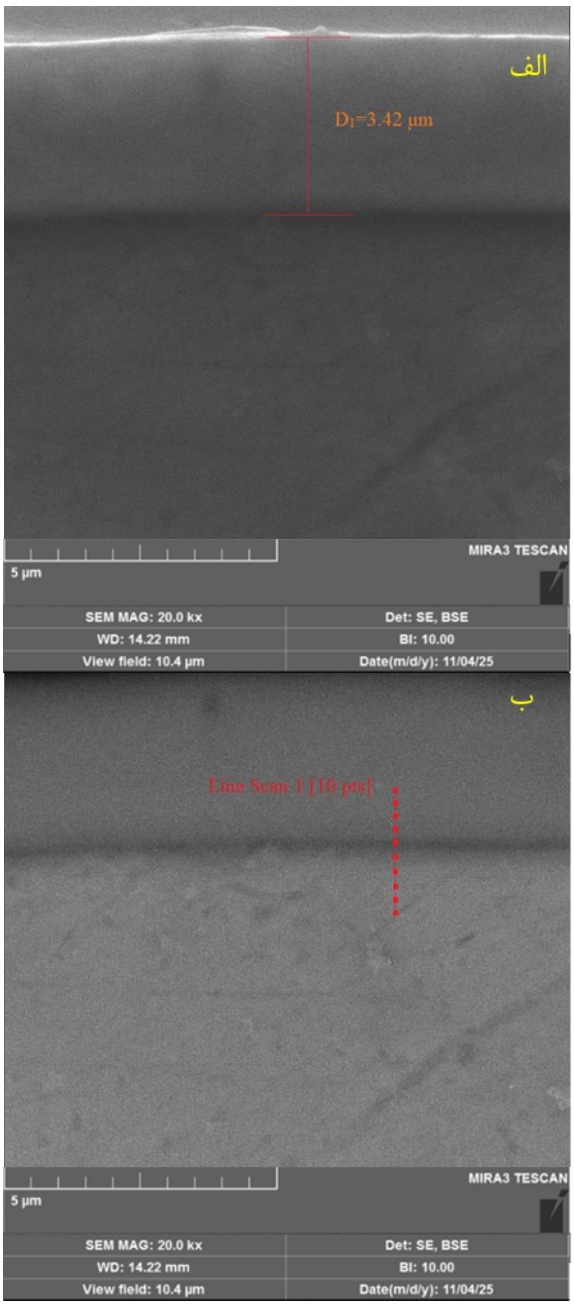


شکل ٤: الگوی پراش اشعه ایکس پوشش CrN ایجاد شده به روش تبخیر قوس کاتدی.



شکل ٥: تصویر AFM از سطح نمونه بهینه پوشش CrN در ناحیه اسکن ۳ × ۳ µm².

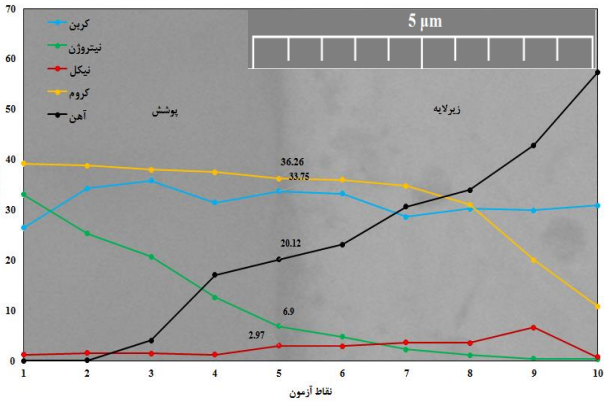
این مشاهدات با روال آماده‌سازی زیرلایه در این پژوهش، شامل بمباران یونی آرگون تحت بایاس منفی و لایه‌نشانی اولیه یک لایه نازک کروم به‌منظور بهبود اتصال پوشش به زیرلایه، سازگار است. چگالی بالای لایه و نبود ترک‌های عمودی پیوسته را می‌توان به اعمال ولتاژ بایاس منفی در حین رشد نسبت داد؛ در این شرایط، بمباران یونی سبب افزایش تراکم لایه در حال رشد و کاهش تخلخل می‌شود که با رفتار شناخته‌شده پوشش‌های PVD مطابقت دارد. لازم به ذکر است که در برخی نقاط، یک نوار تیره باریک در فصل مشترک پوشش و زیرلایه در تصویر SEM مشاهده می‌شود. این ناحیه تیره احتمالاً ناشی از اختلاف ارتفاع موضعی ایجاد شده در حین آماده‌سازی مقطع و تغییر کنتراست الکترونی بوده و لزوماً بیانگر وجود حفره یا جدایش در فصل مشترک نیست.



شکل ٦: تصویر SEM از مقطع عرضی پوشش CrN رسوب‌داده‌شده به روش تبخیر قوس کاتدی بر روی فولاد زنگ‌نزن ۳۰٤ در شرایط بهینه (فشار نیتروژن ۰/۰۰٦ Torr و ولتاژ بایاس V ۹۵-)، (الف) آشکارسازی الکترون ثانویه (ضخامت پوشش)، (ب) آشکارسازی الکترون برگشتی، (پویش خطی ۱۰ نقطه در مرز پوشش و زیرلایه).

برای بررسی پیوستگی فصل مشترک پوشش و زیرلایه و تعیین ماهیت ناحیه تیره مشاهده شده در تصویر SEM از امتداد عمود بر مرز پوشش/زیرلایه پویش خطی EDS انجام شد. این پویش در شکل ۷ به صورت تغییرات درصد

اتمی عناصر کروم، نیتروژن، نیکل و آهن در امتداد خط پویش نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل ٧ نشان داده شده است، غلظت کروم و نیتروژن در پوشش مقادیر بیشتری داشته و با رفتن به سمت زیرلایه کاهش پیدا می‌کند و غلظت آهن به تدریج افزایش می‌یابد. این تغییرات تدریجی و پیوسته در غلظت عناصر بدون وجود پرش یا ناحیه فاقد سیگنال مشخص نشان‌دهنده اتصال متراکم و پیوسته پوشش به زیرلایه و نبود جدایش و حفره در فصل مشترک است. بنابراین هاله مشاهده شده در تصویر مقطع به دلیل اختلاف پراش الکترونی ناشی از تفاوت ارتفاع پوشش و زیرلایه است.



شکل٧: پویش خطی از ده نقطه در مرز پوشش و زیرلایه به روش SEM.

٤- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پوشش CrN به روش تبخیر قوس کاتدی بر روی زیرلایه فولاد زنگ‌نزن ٣٠٤ رسوب‌دهی شد و اثر دو عامل کلیدی فرآیند، یعنی فشار گاز نیتروژن (در بازه حدود ٠/٠٠٣ Torr تا ٠/٠١٧ Torr) و ولتاژ بایاس اعمالی به زیرلایه (در بازه ٣٥ تا ٢٠٠ ولت)، بر رفتار ترشوندگی (زاویه تماس با آب) و زبری سطح R_a بررسی و مدل‌سازی شد. به منظور کمی‌سازی این وابستگی، طراحی آزمایش بر پایه روش سطح پاسخ از نوع طراحی مرکب مرکزی (CCD) انجام شد و نتایج زاویه تماس و زبری برای هر ترکیب فرایندی اندازه‌گیری و با تحلیل آماری (ANOVA) تفسیر شدند.

نتایج نشان داد که هر دو عامل فشار نیتروژن و ولتاژ بایاس بر زاویه تماس با آب و زبری سطح اثرگذار هستند، اما این اثر به صورت خطی ساده نبوده و مؤلفه‌های مربعی (درجه دوم) این عوامل از نظر آماری معنادار تشخیص داده شدند. تحلیل آماری همچنین نشان داد که در مورد زبری سطح، ولتاژ بایاس نقش بسیار تعیین‌کننده‌ای دارد و با افزایش شدت بمباران یونی زیرلایه، زبری سطح در بازه‌ای بین حدود ٦١ تا ٩٩ نانومتر تغییر می‌کند.

بر پایه خروجی مدل، شرایط بهینه برای بیشینه‌سازی زاویه تماس با آب در حدود فشار نیتروژن ≈ ٠.٠٠٦ Torr و ولتاژ بایاس نزدیک به ٩٥ V- به دست آمد. مدل در این نقطه زاویه تماسی در حدود ٨٩ درجه پیش‌بینی کرد. نمونه‌ای با همین شرایط فرآیندی به طور مجزا لایه‌نشانی و آزمون شد و زاویه تماس با آب برای آن (با سه بار تکرار اندازه‌گیری) حدود ٩٣ درجه ثبت گردید. این نتیجه بیانگر آن است که با تنظیم کنترل‌شده فشار گاز و بایاس در فرآیند قوس کاتدی، می‌توان رفتار آب‌گریزی پوشش CrN را تا محدوده زاویه تماس نزدیک به ٩٠ درجه و بالاتر بدون نیاز به مرحله اصلاح سطحی پس از رسوب‌دهی افزایش داد. این رفتار برای کاربری‌هایی که کاهش چسبندگی سطح و سهولت جدایش از قالب اهمیت دارد (مانند قالب‌گیری قطعات پلیمری و رزینی) از نظر صنعتی حائز اهمیت است.

بررسی ریزساختار نشان داد که پوشش ایجادشده در این شرایط ضخامت یکنواخت در حد چند میکرومتر دارد، متراکم است و ترک عبوری یا تخلخل در مقیاس میکرومتری در آن مشاهده نشد. مطابق نتایج پراش پرتو ایکس، فاز غالب در پوشش CrN با ساختار (FCC) نوع NaClاست و همچنین حضور فاز Cr_2N نیز شناسایی شد.

در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که: (١) فرآیند تبخیر قوس کاتدی قادر است پوشش CrN متراکم و پیوسته بر

زیرلایه فولاد زنگ‌نزن ۳۰٤ ایجاد کند، (۲) فشار نیتروژن و ولتاژ بایاس زیرلایه دو عامل کلیدی در تعیین هم‌زمان آب‌گریزی (زاویه تماس با آب) و ریززبری سطح هستند، و (۳) در یک بازه محدود از این عوامل می‌توان به زاویه تماس حدود ۹۳ درجه دست یافت، که نشان‌دهنده آب‌گریزی پایدار پوشش است. این نتایج نشان می‌دهند که امکان تنظیم رفتار ترشوندگی پوشش CrN تنها از طریق مهندسی شرایط لایه‌نشانی و بدون افزودن عناصر خارجی یا اصلاح شیمیایی پس‌فرایندی فراهم است.

۵- مراجع

[1] Zhang X, Wu J, Lin X, Fan X, Zhang X. Dual-phase nanostructured coating with high hydrophobicity. Mater Lett. 2023;333:133563.

[2] Awasthi SK, Sharma K, Gupta A. Zirconia based hydrophobic coatings exhibiting excellent durability for versatile use. J Electrochem Sci Eng. 2024;14(4):441-457.

[3] Zhuo X, Sun X, Wu J, Dong H, Shen P, Zhang X, Mei X, Cui J, Fan Z. Molten CMAS resistance strategy for PS-PVD TBCs based on laser textured and Al-modified bionic structure. npj Mater Degrad. 2024;8(1):85.

[4] Ishak A, Sonnier R, Otazaghine B, Longuet C. A one-step approach for a durable and highly hydrophobic coating for flax fabrics for self-cleaning application. Molecules. 2024;29(4):829.

[5] Wróblewski P, Kachel S. Novel approach to analyzing friction losses by modelling the microflow of lubricating oil between the piston rings and cylinder in internal combustion engines. Energies. 2024;17:3697.

[6] Wang Z, Jin Z, Liu H, Liu R, Zhang Y, Yin Y, Liu H, Yuan X, Fan S, Liu H. Insights into the hydrophobic coating with integrated high-efficiency anti-corrosion, anti-biofouling and self-healing properties based on anti-bacterial nano LDH materials. Corros Sci. 2024;231:111995.

[7] Wang Q, Liu S, Liu S, Zuo Z, Gao Y, Wu C, Liang X. Super-hydrophobic silicone rubber for outdoor electrical insulation. Nano Today. 2024;58:102406.

[8] Sun C-C, Lee S-C, Dai S-B, Tien S-L, Chang C-C, Fu Y-S. Surface free energy of non-stick coatings deposited using closed field unbalanced magnetron sputter ion plating. Appl Surf Sci. 2007;253(8):4094-4098.

[9] Zhu Y, Chang H, Yan Z, Liu C, Liang Y, Qu F, Liang H, Vidic RD. Review of ammonia recovery and removal from wastewater using hydrophobic membrane distillation and membrane contactor. Sep Purif Technol. 2024;328:125094.

[10] Huang X, Weng Q, Chen Y, Zhang L, Sheng X. Accelerating phosphating process via hydrophobic MXene@SA nanocomposites for the significant improvement in anti-corrosion performance of plain carbon steel. Surfaces Interfaces. 2024;45:103911.

[11] He B, Hou X, Liu Y, Hu J, Song L, Tong Z, Zhan X, Ren Y, Liu Q, Zhang Q. Design of fluorine-free waterborne fabric coating with robust hydrophobicity, water-resistant and breathability. Sep Purif Technol. 2023;311:123308.

[12] Rahman AU, Kabeb SM, Zulfkifli FH. Functional hydrophobic coatings: Insight into mechanisms and industrial applications. Prog Org Coat. 2025;203:109187.

[13] Hu H, Tian L, Eluchie C, Sista H, Hu H. On the usage of hydrophobic and icephobic coatings for aircraft icing mitigation. Prog Adhes Adhes. 2025;9:1-33.

[14] Gnanaraj J, Vasugi K. A comprehensive review of hydrophobic concrete: surface and bulk modifications for enhancing corrosion resistance. Eng Res Express. 2024.

[15] Daghigh Shirazi H, Mirmohammadi SM, Mousavi SM, Markkanen M, Halme J, Jokinen V, Vapaavuori J. Bio-inspired surface structures promote optical transmittance and hydrophobicity in cellulose-based films for self-cleaning perovskite solar cells. Commun Mater. 2024;5(1):88.

[16] Ge-Zhang S, Yang H, Ni H, Mu H, Zhang M. Biomimetic superhydrophobic metal/nonmetal surface manufactured by etching methods: A mini review. Frontiers

in Bioengineering and Biotechnology. 2022 Aug 5;10:958095.

[17] Senthil K, Kwak G, Yong K. Fabrication of superhydrophobic vanadium pentoxide nanowires surface by chemical modification. Appl Surf Sci. 2012;258(19):7455-7459.

[18] Zuo Z, Liao R, Zhao X, Song X, Qiao Z, Guo C, Zhuang A, Yuan Y. Anti-frosting performance of superhydrophobic surface with ZnO nanorods. Appl Therm Eng. 2017;110:39-48.

[19] Muhammed M, Javidani M, Ebrahimi Sadrabadi T, Heidari M, Levasseur T, Jahazi M. A comprehensive review of cathodic arc evaporation physical vapour deposition (CAE-PVD) coatings for enhanced tribological performance. Coatings. 2024;14(3):246.

[20] Brown IG. Cathodic arc deposition of films. Annual review of materials science. 1998 Aug;28(1):243-69.

[21] Kuprin AS, Gilewicz A, Tolmachova GN, Klimenko IO, Kolodiy IV, Vasilenko RL, Warcholinski B. Effect of nitrogen pressure and substrate bias voltage on structure and mechanical properties of vacuum arc deposited VN coatings. Metallurgical and Materials Transactions A. 2023 Nov;54(11):4438-55.

[22] Warcholinski B, Gilewicz A, Kuprin AS, Kolodiy IV. Structure and properties of CrN coatings formed using cathodic arc evaporation in stationary system. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2019 Apr 1;29(4):799-810.

[23] Warcholinski B, Gilewicz A, Ratajski J, Kuklinski Z, Rochowicz J. An analysis of macroparticle-related defects on CrCN and CrN coatings in dependence of the substrate bias voltage. Vacuum. 2012 Mar 14;86(9):1235-9.

[24] Wan XS, Zhao SS, Yang Y, Gong J, Sun C. Effects of nitrogen pressure and pulse bias voltage on the properties of Cr–N coatings deposited by arc ion plating. surface and coatings Technology. 2010 Feb 25;204(11):1800-10.

[25] Ovcharenko VD, Kuprin AS, Tolmachova GN, Kolodiy IV, Gilewicz A, Lupicka O, Rochowicz J, Warcholinski B. Deposition of chromium nitride coatings using vacuum arc plasma in increased negative substrate bias voltage. Vacuum. 2015 Jul 1;117:27-34.

[26] Krülle T, Kuczyk M, Leonhardt M, Zimmer O, Leyens C. The Influence of Nitrogen Partial Pressure on the Microstructure and Mechanical Properties of HfNbTaTiVZr High-Entropy Nitride Coating Deposited via Direct Current Cathodic Vacuum Arc Deposition. Coatings. 2024 Mar 28;14(4):398.

[27] Warcholinski B, Gilewicz A, Myslinski P, Dobruchowska E, Murzynski D, Kochmanski P, Rokosz K, Raaen S. Effect of nitrogen pressure and substrate bias voltage on the properties of Al–Cr–B–N coatings deposited using cathodic arc evaporation. Tribology International. 2021 Feb 1;154:106744.

[28] Ho W-Y, Hsu C-H, Huang D-H, Cheng Y-P, Lin Y-C, Chang C-L. Oxygen effect on the mechanical behaviors of Cr(N,O)/CrN double-layered coatings by cathodic arc evaporation. Surf Coat Technol. 2004;188:129-134.

[29] Hsu C-H, Huang D-H, Ho W-Y, Huang L-T, Chang C-L. Characteristics and performance of Cr2O3/CrN double-layered coatings deposited by cathodic arc plasma deposition. Mater Sci Eng A. 2006;429(1-2):212-218.

[30] Kuze E, Teramoto T, Yukimura K, Maruyama T. Contact angle of water on chromium nitride thin film prepared on three-dimensional materials by chromium plasma-based ion implantation. Surf Coat Technol. 2002;158:577-581.

[31] Li Z, Liu C, Chen Q, Yang J, Liu J, Yang H, Zhang W, et al. Microstructure, high-temperature corrosion and steam oxidation properties of Cr/CrN multilayer coatings prepared by magnetron sputtering. Corros Sci. 2021;191:109755.

[32] Yang Y-S, Cho T-P, Huang C-F. Annealing effect on the hydrophobic property of Cr2N coatings. Surf Coat Technol. 2013;231:107-111.

[33] Barata A, Cunha L, Moura C. Characterisation of chromium nitride films produced by PVD techniques. Thin solid films. 2001 Nov 1;398:501-6.

[34] Ruden-Muñoz A, Restrepo-Parra E, Sequeda F. CrN coatings deposited by magnetron sputtering: Mechanical and

tribological properties. Dyna. 2015;82(191):147-55.
[35] Mouche PA, Ang C, Koyanagi T, Doyle P, Katoh Y. Characterization of pvd cr, crn, and tin coatings on sic. Journal of Nuclear Materials. 2019 Dec 15;527:151781.
[36] Huang X, Gates I. Apparent contact angle around the periphery of a liquid drop on roughened surfaces. Scientific Reports. 2020 May 19;10(1):8220.
[37] Marmur A. Soft contact: measurement and interpretation of contact angles. Soft Matter. 2006;2(1):12-7.