



ارائه الگوی توسعه یافته جهت محاسبه سختی ترکیبی پوشش $TiN/Ti_{33}Al_{67}N$ حاصل از فرایند رسوب دهی فیزیکی از فاز بخار

یاسر آشکارمقدم^۱، سید رحمان حسینی^۲، اکبر اسحاقی^۳، مهدی احمدی^۴

^۱. دانشگاه صنعتی مالک اشتر (دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد)

^۲. دانشگاه صنعتی مالک اشتر (استادیار دانشکده مهندسی مواد)

^۳. دانشگاه صنعتی مالک اشتر (استادیار دانشکده مهندسی مواد)

^۴. دانشگاه صنعتی مالک اشتر (دانشجوی دکتری رشته مهندسی مواد)

چکیده

هدف از پژوهش حاضر بررسی رفتار سختی سطح و ارائه الگویی جدید جهت پیش بینی سختی ترکیبی پوشش $TiN/Ti_{33}Al_{67}N$ حاصل از فرایند رسوب فیزیکی فاز بخار روی آلیاژ آلومیناید تیتانیم گاما است. عملیات رسوب دهی در ولتاژ بایاس ۲۰۰ ولت، جریان ۱۲۰ آمپر، دمای ۳۰۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۱۵۰ دقیقه با استفاده از هدف های تیتانیمی و آلومیناید تیتانیمی انجام شد. جهت مطالعه پوشش از آزمون ریزسختی سنجی در مقیاس ویکرز و تصاویر میکروسکپ الکترونی با نشر میدانی استفاده شد. در این مطالعه با استفاده از تصاویر اثر فرورفتگی ویکرز، قطر و عمق اثر فرورفتگی در بارهای مختلف محاسبه شد. به منظور ارائه الگوی جامع، الگوهای موجود مورد بررسی قرار گرفت و ضمن اعمال تاثیرات زیرلایه، جنس و تعداد لایه های پوشش، الگوی جدیدی برای محاسبه سختی پوشش دولایه $TiN/Ti_{33}Al_{67}N$ ارائه شد. نتایج سختی سنجی نشان داد که سختی آلومیناید تیتانیم گاما بعد از فرایند رسوب دهی از فاز بخار در حدود ۳ برابر سختی زیرلایه افزایش یافته است. مقایسه نتایج حاصل از الگوهای مختلف با نتایج آزمون های تجربی سختی سنجی، تطابق بالای الگوی ارائه شده را در نیروهای مختلف تأیید می کند.

واژه های کلیدی: آلومیناید تیتانیم گاما؛ رسوب فیزیکی از فاز بخار؛ پوشش های دولایه، سختی ترکیبی.

^۱. Yaserashkar69@gmail.com

مقدمه

استفاده از مواد با نسبت استحکام به چگالی بالا، به منظور کاهش وزن، مصرف سوخت و نیز افزایش سرعت و ایمنی وسایل پرنده در صنایع هوایی دارای اهمیت زیادی است. آلومیناید های تیتانیوم نظیر $TiAl$ (γ) و Ti_3Al (O_2)، از جمله آلیاژ های تیتانیومی هستند که گزینه مناسبی برای کاربردهای دما بالا در اجزای موتور هواپیماها و سوپاپ های توربوشارژر^۱ خودروها هستند [۱]. از ویژگی های آلومیناید تیتانیوم گاما می توان به چگالی پایین، استحکام مناسب در دماهای بالا، ضریب انبساط حرارتی پایین و دمای ذوب بالا اشاره کرد [۲]. با این وجود این آلیاژها همانند دیگر آلیاژ های تیتانیومی، رفتار تریبولوژی ضعیفی دارند. با توجه به نوع کاربرد این آلیاژ به عنوان پره های کمپرسور متورهای جت، نوسان هایی در اثر ارتعاش های موجود، جریان شدید هوا و نیروی گریز از مرکز حین روشن و خاموش شدن موتور وجود دارد که منجر به نوعی سایش نوسانی در سطوح در گیر می شود. از آنجا که هر گونه اشکال در موتور منجر به حوادث جبران ناپذیری در حین پرواز می شود، بهبود رفتار سطحی این ماده بسیار با اهمیت خواهد بود [۳]. فرایند رسوب فیزیکی از فاز بخار از جمله روش های شناخته شده جهت اصلاح رفتار تریبولوژی مواد به خصوص در صنایع هوافضایی است. پوشش های لایه نازک از خانواده $TiAlN$ که به روش رسوب فیزیکی از فاز بخار ایجاد می شوند، از مهم ترین پوشش ها در زمینه اصلاح رفتار تریبولوژی مواد هستند. سختی بالا، ضریب اصطکاک پایین و مقاومت به سایش خوب پوشش $TiAlN$ از ویژگی های این پوشش محسوب می شود [۴]. اندازه گیری سختی لایه های نازک در حقیقت با مشکل تأثیر زیر لایه بر نتایج اندازه گیری مواجه است و زمانی که پوشش از چند لایه تشکیل شده باشد، حل این مشکل به دلیل تأثیر لایه های متفاوت و نیز نقش زیر لایه دشوار تر خواهد بود [۵]. با توجه به رفتار مکانیکی متفاوت مواد، معمولاً برای آزمون فرورونده در سامانه زیر لایه-پوشش، قانون یک دهم توصیه می شود. مقدار سختی ویکرز فیلم در این روش تنها در صورتی قابل اعتماد است که عمق فرورفتگی کم تر از یک دهم ضخامت پوشش باشد [۶]. اگر پوشش اعمالی از اجزای مختلفی تشکیل شده باشد، اندازه گیری مستقیم سختی کلی، نمی تواند معیار دقیقی از سختی واقعی پوشش باشد. جهت رفع این محدودیت، الگوی های مختلفی برای توصیف و پیش بینی سختی پوشش و زیر لایه^۲ تحت عنوان سختی ترکیبی^۳ برای پوشش های تک لایه و چند لایه ارائه شده است.

جانسون و هوگمارگ^۴ (J & H) در سال ۱۹۸۴ الگویی برای سختی ترکیبی پوشش کرومی رسوب شده روی زیر لایه های مختلف مس الکترولیز شده، فولاد زنگ نزن، فولاد کم آلیاژ استحکام بالا ارائه دادند. این الگو فقط

1. Turbocharger

2. Substrate

3. Composite Hardness

4. Jonsson and Hogmark (J&H)

برای پوشش کرومی بررسی شد [۷]. الگوی جامع تر دیگری توسط چیسوت و لسیج^۱ (C&L) برای محاسبه سختی ترکیبی پوشش دولایه Ti/TiC ارائه شد [۸]. کورسانسکی^۲ نیز مدلی را برای محاسبه سختی ترکیبی پوشش های TiN، TiCN، CrN و ZrN حاصل از فرایند رسوب فیزیکی از فاز بخار روی فولاد ابزار M2 ارائه داد [۹]. بر اساس مطالعات انجام شده و دانش نویسندگان این مقاله، تاکنون گزارشی در خصوص محاسبه سختی ترکیبی مجموعه پوشش دولایه TiN/Ti₃₃Al₆₇N و زیرلایه γ -TiAl منتشر نشده است. در این پژوهش با توجه به کاربردهای صنعتی و خواص مناسب پوشش های نیتريد تیتانیم-آلومینیم، این پوشش انتخاب شد و تاثیر آن بر سختی سطح آلومیناید تیتانیم گاما مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه ضمن مقایسه نتایج آزمون های تجربی با الگوهای موجود، الگویی با تطابق بالا (توسعه یافته^۳ الگوی کورسانسکی) جهت حصول سختی ترکیبی پوشش دولایه TiN/Ti₃₃Al₆₇N ارائه شده است. برای انجام این تحقیق از دستگاه رسوب فیزیکی بخار به روش قوسی استفاده شد. از تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی با نشر میدانی و نیز نتایج آزمون ریزسختی سنجی در مقیاس ویکرز برای تحلیل نتایج کمک گرفته شد.

روش تحقیق

در این تحقیق از آلیاژ آلومیناید تیتانیم گاما با ترکیب شیمیایی اسمی (Ti-48Al-2Cr-2Nb (at.%)) به عنوان ماده اولیه استفاده شد. با استفاده از دستگاه برش با سیم^۴ (Charmilles Robofil 200)، قرص هایی با قطر ۵۸ و ضخامت ۴ میلی متر تهیه شد. جهت حصول ریزساختاری با دانه های هم محور، فرایند نرماله کردن نمونه ها در دمای ۱۳۸۵ درجه سانتی گراد و به مدت ۱۵ دقیقه در مجاورت با گاز آرگن انجام شد. پس از اتمام فرایند، همه نمونه ها در هوای محیط و با سرعت متوسط ۳۰ درجه سانتی گراد بر دقیقه سرد شدند. به منظور حصول صافی سطح مناسب و نیز حذف لایه های اکسیدی ناشی از عملیات حرارتی و برش کاری، سطوح نمونه ها با استفاده از سنگ مغناطیس به اندازه ۲۰۰ میکرومتر باربرداری شدند. در نهایت جهت کاهش زبری سطح، نمونه ها با استفاده از سنباده های شماره ۸۰ تا ۳۰۰۰ به صورت دستی و یکنواخت پرداخت کاری شدند.

فرایند رسوب دهی از فاز بخار به روش تبخیر قوس کاتدی (الگوی دستگاه) انجام شد. جهت ایجاد پوشش TiN از هدف تیتانیمی و برای ایجاد پوشش Ti₃₃Al₆₇N از هدف آلومیناید تیتانیمی با ترکیب Ti-67Al (at.%) استفاده شد. نمونه ها پس از خشک کردن، از پایه نگه دارنده دستگاه آویزان شدند. عملیات

^۱. Chicota and Lesage (C&L)

^۲. Korsunsky

^۳. Extended

^۴ -wire cut

پراکنش جهت حذف آلودگی‌های سطحی در فشار ۳ تا ۱۰ میلی‌بار و به مدت ۳۰ دقیقه با استفاده از گاز آرگن انجام شد. نوع و مقدار عامل‌های انتخابی در فرایند رسوب‌دهی از فاز بخار در جدول ۱ گزارش شده است. پس از مرحله پراکنش، سطح کاتد تیتانیومی در اثر ایجاد قوس الکتریکی تبخیر شده به مدت ۵ دقیقه لایه نازکی از تیتانیم خالص روی سطح نمونه‌ها رسوب داده شد. در ادامه فرایند، گاز نیتروژن با خلوص ۹۹/۹۹۹ درصد جهت انجام واکنش با یون‌های فلزی وارد محفظه شد. یون‌های فلزی و غیر فلزی (N^+ و Ti^+) با هم ترکیب شده در اثر نیروی گرانش و اختلاف پتانسیل موجود در کاتد روی سطح نمونه‌ها رسوب کردند. فرایند رسوب نیتريد تیتانیم حدود ۶۰ دقیقه به طول انجامید. در مرحله بعدی ولتاژ اعمالی از هدف تیتانیومی قطع و به هدف آلومیناید تیتانیومی اعمال شد. در این مرحله از رسوب‌دهی لایه‌ای از جنس $Ti_{33}Al_{67}N$ در مدت زمان ۶۰ دقیقه روی سطح رسوب داده شد. به منظور ارزیابی خواص سطحی، ریزسختی‌سنجی سطح زیرلایه و نمونه پوشش‌دار در بارهای اعمالی ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲، ۳، ۵ و ۱۰ نیوتن با استفاده از دستگاه سختی‌سنجی (Wilson-MVD402) با زمان اعمال نیروی ۱۰ ثانیه و در مقیاس ویکرز استفاده شد. تمامی آزمون‌های سختی‌سنجی با ۱۰ بار تکرار انجام شدند. برای ارزیابی الگوی مناسب سختی ترکیبی این سامانه، از الگوهای جانسون و چیسوت و الگو کورسانسکی استفاده شد. الگو کورسانسکی برای پوشش‌های دولایه توسعه داده شد و نتایج همه الگوها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. الگوهای مربوط به سختی ترکیبی پوشش چندلایه در جدول ۲ آورده شده است.

نتایج و بحث

نتایج ریزسختی‌سنجی زیرلایه و نمونه پوشش‌داده‌شده تحت بارهای مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. مطابق شکل ۱، فرایند رسوب فیزیکی فاز بخار سختی سطح نمونه‌ها را افزایش داده است. نتایج آزمون ریزسختی‌سنجی نمونه‌های رسوب‌دهی‌شده تحت بار اعمالی ۰/۰۱ نیوتن، به علت سختی بالای پوشش و نامشخص بودن اثر سختی قابل دستیابی نبود.

به طور کلی سختی همه نمونه‌ها با افزایش بار اعمالی، کاهش یافته است. همچنین مشخص شد که با انجام فرایند پوشش‌دهی سختی سطح افزایش یافته است که نقش مثبت پوشش در افزایش سختی سطح را نشان می‌دهد. سختی پوشش $TiAlN$ به شدت وابسته به مقدار آلومینیم موجود در فیلم است و با افزایش مقدار آلومینیم در پوشش نیتريدی، سختی بالاتری حاصل می‌شود [۱۰]. با افزودن مقدار آلومینیم به شبکه نیتريد تیتانیم، اتم‌های آلومینیم جایگزین اتم‌های تیتانیم می‌شوند و چون اندازه اتم‌های آلومینیم نسبت به اتم‌های تیتانیم

کوچک تر هستند، ثابت شبکه رفته رفته کاهش یافته است. در نتیجه فاصله بین صفحات اتمی کاهش (افزایش انرژی پیوند کوالانسی) می یابد. مطابق معادله ۱ فاصله بین صفحات اتمی، و انرژی پیوند کوالانسی مط با یکدیگر در ارتباط هستند. در این رابطه E_h انرژی پیوند و d فاصله بین صفحات اتمی است. بر این اساس به علت بالا بودن مقدار آلومینیم در پوشش $Ti_{33}Al_{67}N$ و کاهش فاصله بین صفحات اتمی، مقدار سختی نسبت به TiN افزایش یافته است.

$$E_h = Kd^{-2.5} \quad (1)$$

با مقایسه عدد سختی تئوری دو پوشش، منشأ اصلی افزایش سختی سطح را می توان به افزایش انرژی کوالانسی در فیلم $TiAlN$ مربوط دانست. [۱۰]. همچنین با افزایش تعداد لایه های پوشش، به دلیل افزایش تعداد فصل-مشترک های ایجاد شده بین لایه ها مقدار ریزسختی سطح افزایش قابل ملاحظه ای می یابد [۱۰]. قسمت های الف و ب شکل ۲ به ترتیب تغییرات قطر فرورفتگی و عمق نفوذ فرورونده را تحت بارهای مختلف نشان می دهد. مطابق قسمت الف شکل ۲، با افزایش بار اعمالی قطر فرورفتگی افزایش یافته است. از آنجا که در آزمون فرورونده و یکرز، عمق فرورفتگی برابر یک هفتم قطر فرورفتگی است، مقدار عمق فرورفتگی در بارهای مختلف محاسبه شد. نتایج بررسی ها نشان داد که با افزایش بار اعمالی، عمق فرورفتگی نیز افزایش یافته است.

نتایج مربوط به داده های سختی برای پوشش با استفاده از معادله های سختی ترکیبی موجود در جدول ۲ با تغییر بار اعمالی و قطر فرورفتگی به ترتیب در شکل ۳ الف و ب گزارش شده است. نتایج مربوط به الگو C & L با داده های تجربی تطبیق خوبی ندارد. برای این الگو، مقدار زاویه، ۷۳ درجه و مقدار ضریب الاستیک برای لایه های $TiAlN$ ، TiN و زیر لایه ۴۸۳، ۵۲۶ و ۱۷۰ گیگاپاسکال در نظر گرفته شد. بر اساس شواهد موجود نتایج حاصل از این الگو برای هیچکدام از داده ها تطابق خوبی ندارد. نتایج الگو C & L از مقدار نتایج تجربی بیش تر است و تطابق خوبی را با نتایج تجربی نشان نمی دهد. در الگو J & H مقدار C برابر ۰/۵ برای پوشش ترد و ۱ برای پوشش های ترد گزارش شده است که در این پژوهش از هر دو مقدار استفاده شده است [۸].

نتایج الگو J & H برای C=۱ با نتایج تجربی تطابق خوبی ندارد و نتایج در همه بارهای اعمالی بسیار کم و نزدیک به مقدار سختی زیر لایه است. نتایج الگو J & H برای C=۰/۵ نسبت به دو الگو گذشته تطابق بیش تری را با نتایج تجربی نشان می دهد. در بارهای مختلف نتایج الگو J & H نزدیک به نتایج مربوط به نمونه پوشش دار است که با افزایش بار اعمالی مقدار سختی حاصل از این الگو به سختی زیر لایه نزدیک شده است.

در ادامه الگوی کورسانسکی مورد اصلاح قرار گرفت به گونه‌ای که تطابق مناسبی بین نتایج الگوی جدید و داده‌های تجربی حاصل شود. این الگوی توسعه‌یافته در معادله ۲ نمایش داده شده است. در این معادله β عمق نفوذ نسبی، K ضریب وابسته به هندسه فرورونده، H_S سختی زیرلایه و H_C سختی ترکیبی سامانه پوش و زیرلایه است.

$$H_C = H_S + 4/3 (\sum_{i=1}^n H_f - nH_S) / (2 + K\beta^2) \quad (2)$$

مطابق شکل ۳ الگوی توسعه‌یافته تطابق بالایی را با نتایج تجربی نشان می‌دهد. بر اساس الگوی جدید، سختی ترکیبی در بارهای کم (قطر فرورفتگی و مقدار عمق فرورفتگی کم) به مقدار سختی نمونه پوشش‌دار و در بارهای زیاد (قطر فرورفتگی و مقدار عمق فرورفتگی زیاد) به مقدار سختی زیرلایه نزدیک شده است. به عبارت دیگر با افزایش بار اعمالی و افزایش عمق فرورفتگی تاثیر زیرلایه بر سختی ترکیبی افزایش یافته است. [۶]. در جدول ۳ میزان خطای مربوط به هر الگو در بارهای مختلف ارائه شده است. میزان این خطا بر اساس اختلاف داده‌های تجربی و تئوری محاسبه و گزارش شده است. بر اساس این جدول الگوی توسعه‌یافته کم‌ترین میزان خطا و الگو جانسون و هوگمارگ (J & H) در $C=1$ بیش‌ترین میزان خطا را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

(۱) با ایجاد پوشش دولایه $TiN/Ti_{33}Al_{67}N$ سختی در حدود ۳ برابر سختی زیرلایه حاصل شد.

(۲) لایه $Ti_{33}Al_{67}N$ در مقایسه با لایه TiN سختی بالاتری را ارائه می‌دهد.

(۳) الگوی توسعه‌یافته در تعیین سختی ترکیبی پوشش چندلایه $TiN/Ti_{33}Al_{67}N$ مطابقت بالایی را با نتایج تجربی نشان داد. استفاده از الگوی جانسون و هوگمارگ (J & H) در $C=1$ با بیش‌ترین میزان خطا و عدم تطابق همراه است.

(۴) با توجه به میزان خطای پایین الگوی توسعه‌یافته، امکان پیش‌بینی سختی ترکیبی بدون استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری وجود دارد.

1. X. Wu, "Review of alloy and process development of TiAl alloys", *Intermetallics* 14 (2006) 1114-1122.
2. K. Hackl, B. Skrotzki, and G. Eggeler, "Thermo-mechanical fatigue behaviour of the near- γ -titanium aluminide alloy TNB-V5 under uniaxial and multiaxial loading", Springer, England, 2009.
3. K. Miyoshi, B. A. Lerch and S. L. Draper, "Fretting wear of Ti-48Al-2Cr-2Nb", *Surface & Coatings Technology* 201 (2006) 3911-3917.
4. D. Jianxin, L. Aihua, "Dry sliding wear behavior of PVD TiN, Ti55Al45N", and Ti35Al65N coatings at temperatures up to 600 °C, *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 41 (2013) 241-24.
6. D. Beegan and M.T. Laugier, "Application of composite hardness models to copper thin film hardness measurement", *Surface & Coatings Technology* 199 (2005) 32 – 37.
7. E.S. Puchi-Cabrera, "A new model for the computation of the composite hardness of coated systems", *Surface and Coatings Technology* 160 (2002) 177–186
8. D. Chicota,, Y. BeAnariouab and J. Lesage, "Hardness measurements of Ti and TiC multilayers: a model", *Thin Solid Films* 359 (2000) 228-235.
9. J.R. Tuck, A.M. Korsunsky, D.G. Bhat and S.J. Bull, "Indentation hardness evaluation of cathodic arc deposited thin hard coatings", *Surface and Coatings Technology* 139 (2001) 63-74.
10. S. PalDey, S.C. Deevi, "Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review", *Materials Science and Engineering A342* (2003) 58-79.

جدول ۱: عامل‌های ثابت در فرایند رسوب‌دهی از فاز بخار.

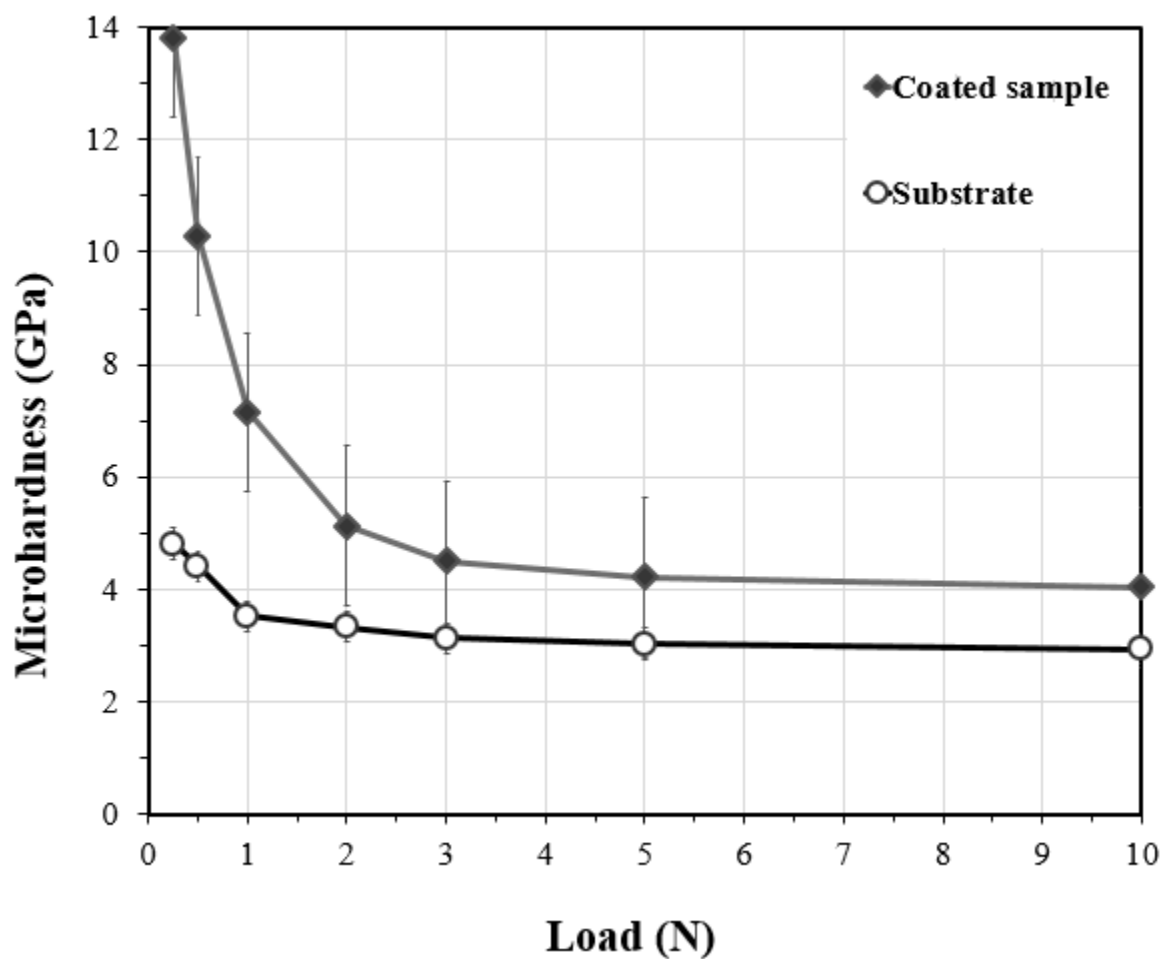
مقدار	شاخص	ردیف
۱۰ ^{-۳}	فشار محفظه (mbar)	۱
۲۰۰	ولتاژ بایاس (V)	۲
۲۰	ولتاژ اعمالی به هدف (V)	۳
۱۵	فاصله نمونه‌ها از کاتد (cm)	۴
۵۰	سرعت چرخش نمونه‌ها به دور خود (rpm)	۵
۳	سرعت چرخش نمونه‌ها به دور محور مرکزی (rpm)	۶

جدول ۲: الگوهای سختی ترکیبی پوشش - زیرلایه.

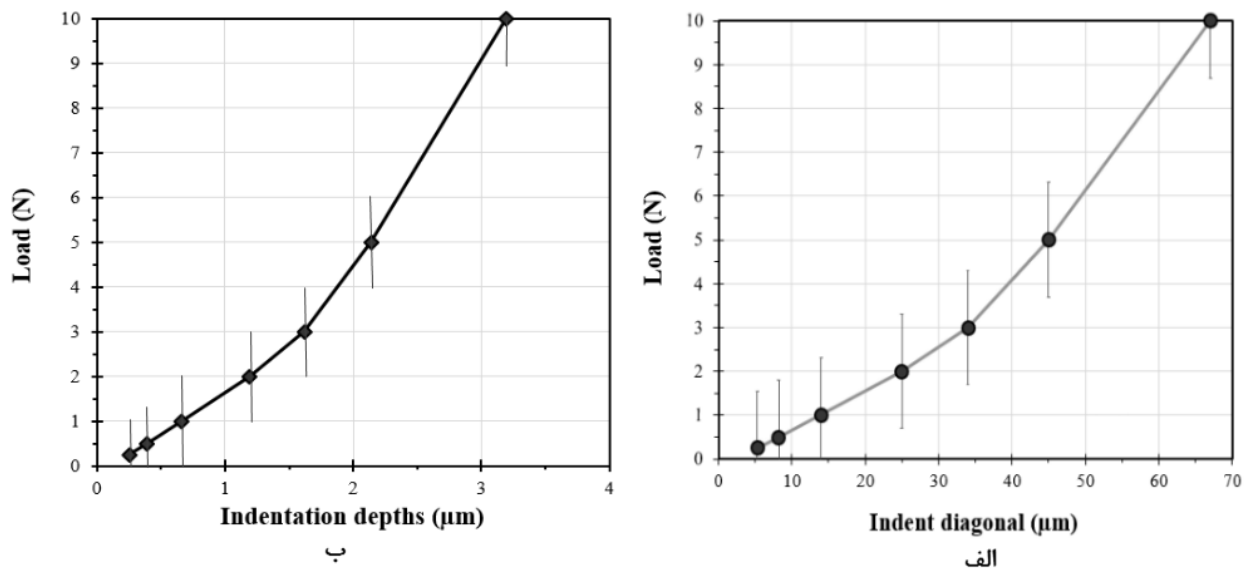
توضیحات	معادله جهت محاسبه سختی زیرلایه - پوشش	الگوی
Hs سختی زیرلایه، Hc سختی ترکیبی، e ضخامت پوشش، d قطر فرورفتگی، Hf سختی پوشش ضریب C برای مواد ترد برابر ۰/۵ و برای مواد نرم برابر ۱	$H_c = H_s + [2c \frac{e}{d} - (c \frac{e}{d})^2] (H_f - H_s)$	جانسون و هوگمارگ (J & H)
E ضریب الاستیک، Hs سختی زیرلایه، Hc سختی ترکیبی، ei ضخامت لایه‌ها، d قطر فرورفتگی، Hi سختی پوشش، N تعداد لایه‌ها، ξ زاویه لبه فرورونده	$H_c = H_s + \frac{1}{1+N} \left\{ 3 \frac{1}{d} \left[\left(\sum_{j=1}^n \left(\frac{H_j}{E_j} \right)^{1/2} + \left(\frac{H_s}{E_s} \right)^{1/2} \right) \right] \right. \\ \left. \right\} \text{tag}^{1/3} \xi \sum_{i=1}^n (H_i - H_s) e_i$	چیسوت و لسیج (C & L)
β عمق نفوذ نسبی، K ضریب وابسته به هندسه فرورونده، HS سختی زیرلایه، Hc سختی ترکیبی	$H_c = H_s + (H_f - H_s) / (1 + K\beta^2)$	کورسانسکی

جدول ۳: نتایج تغییرات درصد خطای الگوهای مختلف با بار اعمالی.

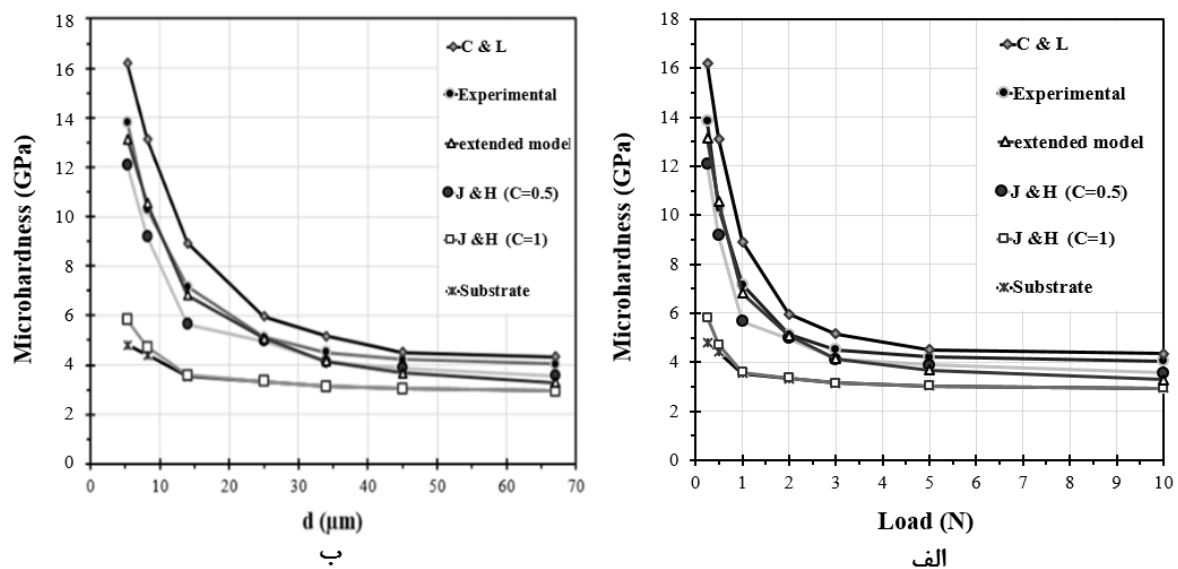
درصد خطا				بار اعمالی (نیوتن)	ردیف
مدل توسعه یافته	چیسوت و لسیج (C&L)	جانسون و هوگمارگ C=۱ در (J & H)	جانسون و هوگمارگ C=۰/۵ در (J & H)		
۰/۰۵	۰/۵۸	۰/۶۲	۰/۱۳	۰/۲۵	۱
۰/۰۲	۰/۵۴	۰/۵۶	۰/۱۱	۰/۵	۲
۰/۰۵	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۲۱	۱	۳
۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۳۵	۰/۰۳	۲	۴
۰/۰۸	۰/۱۴	۰/۳۰	۰/۰۹	۳	۵
۰/۱۲	۰/۰۷	۰/۲۸	۰/۰۸	۵	۶
۰/۱۹	۰/۰۷	۰/۲۷	۰/۱۲	۱۰	۷



شکل ۱: تغییرات سختی با بار اعمالی مربوط به نمونه پوشش داده شده و زیرلایه



شکل ۲: تغییرات الف) قطر فرورفتگی ب) عمق فرورفتگی در آزمون ریزسختی سنجی ویکرز نسبت به بار اعمالی



شکل ۳: مقایسه تغییرات سختی تجربی زیرلایه و نمونه پوشش دار با نتایج الگوهای پیش‌بینی کننده نسبت به الف) بار اعمالی ب) قطر فرورفتگی