فصلنامه‌ی علمی پژوهشی

علم و مهندسی سرامیک

دوره‌ی ۸، شماره‌ی ۴، زمستان ۱۳۹۸

بهبود خواص نانو مکانیکی آلیاژ NiTi بوسیله اعمال پوشش نانوساختار نیترید تانتالیوم با روش کند و پاش مغناطیسی

نوع مقاله: علمی پژوهشی

هاشم سعیدی، علی شانقی، علیرضا سوری*

دانشگاه ملایر، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد

* arsouri@gmail.com

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۹ بهمن ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۱ مهر ۱۳۹۸

کلید واژه:

پوشش نانو ساختار نیترید تانتالیوم، آلیاژ NiTi، کند و پاش معناطیسی، خواص نانومکانیکی

چکیده:

امروزه پوشش‌های نانوساختار نیترید تانتالیوم به دلیل دارا بودن خواص حفاظتی مناسب همانند سختی، مقاومت به سایش بالا و مقاومت به خوردگی بالا دارای کاربرد بسیار زیادی در مهندسی پزشکی و بهبود رفتار بیولوژیکی تیتانیوم و آلیاژهای آن دارد. دراین تحقیق پوشش نانوساختار نیترید تانتالیوم با کمک فرایند کند و پاش مغناطیسی بر روی سطح آلیاژ NiTi اعمال گردید. سپس خواص فازی، ساختاری ومورفولوژی به ترتیب با استفاده از XPS، FESEM، AFM مورد بررسی قرارگرفته است، همچنین خواص نانو مکانیکی پوشش بوسیله روش‌های نانودندانه‌گذاری و نانو خراش در بارهای مختلف ارزیابی شده است. نتایج بیانگر تشکیل پوشش همگن، یکنواخت و عاری از ترک پوشش نانو ساختار نیترید تانتالیوم با اندازه ذرات حدود ۲۰ نانومتر همراه با سختی و مدول الاستیک به ترتیب ۶/۱۲ و ۸۷/۴گیگاپاسکال و عمق نفوذ ۹۱ نانومتر است که منجر به بهبود ۳۴ درصد سختی سطح آلیاژ NiTi گردیده است. همچنین پوشش نانوساختار تانتالیوم منجر به ایجاد ضریب اصطکاک ۰/۲۸ و غالب شدن مکانیزم سایش خراشان نسبت به مکانیزم سایش چسبان برای آلیاژ NiTi گردیده است.

۱- مقدمه

امروزه آلیاز NiTi به دلیل دارا بودن خواصی همانند سوپر الاستیسیته عالی (حافظه‌داری مکانیکی)، حافظه حرارتی خوب، مدول یانگ پایین و سازگاری مناسب با محیط بدن به میزان قابل توجهی در صنایع پزشکی و دندان پزشکی همانند ایمپلنت‌های ارتوپدی، صفحه و میله‌های استخوانی و استنت‌ها مورد استفاده قرار گرفته است [۱-۳]. در طولانی مدت یکی از مشکلات این نوع آلیاژ این است که یون نیکل در اثر خوردگی در محیط بدن آزاد شده و هنگامی‌که میزان یون نیکل در بدن انسان افزایش یابد، منجر به ایجاد عفونت و آلرژی می‌گردد[۲-۵]. معمولا جهت بهبود رفتار خوردگی آلیاژ NiTi از فرایندهای پوشش‌دهی استفاده می‌گردد تا

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.4.2.9]

بتوانند سطحی با قابلیت انطباق پذیری مناسب به همراه مقاومت به خوردگی بالا ایجاد نمایند[۵-۶].

نیترید فلزات انتقالی همانند TiN، CrN و ZrN به دلیل دارا بودن ترکیب عالی خواص مکانیکی همراه با پایداری حرارتی خوب، خنثی بودن شیمیایی و مقاومت الکتریکی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند[۶-۷]. در دهه‌های اخیر تقاضا جهت ایجاد پوشش‌های محافظ با کارایی بالا در محیط بسیار فعال و خشن افزایش یافته و به همین دلیل تلاش‌های قابل توجهی در راستای ساخت پوشش‌های مستحکم با سختی بالا انجام شده است. در میان فلزات انتقالی نیترید تانتالیوم بر خلاف نیترید تیتانیوم، نیترید زیرکونیوم و نیترید کروم به دلیل هزینه‌های بالا و شرایط سخت اعمال پوشش کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با این حال نیترید تانتالیوم جدیدا به عنوان پوشش حفاظتی مناسب بطور گسترده در کاربردهای مختلف همانند مکانیکی، میکروالکترونیک و پزشکی مورد توجه قرار گرفته است[۷]. برخی از تحقیقات نشان داده‌اند که پوشش‌های نیترید تانتالیوم دارای سازگاری انطباق پذیری بهتری با خون و بدن انسان در مقایسه با دیگر آلیاژهای پزشکی است و این پوشش معمولا با استفاده از فرایندهای کند و پاش مغناطیسی، فرایندهای کاشت یونی و تبخیر الکترونی بر روی سطح مواد اعمال می‌شود[۷-۹]. معمولا فرایند کند و پاش جهت اعمال پوشش نیترید تانتالیوم مورد استفاده قرار می‌گیرد و کنترل پارامترهایی همانند فشار جزئی نیتروژن، دما و ولتاژ منجر به ایجاد میکروساختاری حاوی فازهای پایدار و نیمه پایدار می‌گردد [۱۰-۱۳].

در این تحقیق پوشش نانوساختار نیترید تانتالیوم توسط فرایند کند و پاش مغناطیسی بر روی سطح آلیاژ NiTi اعمال گردیده است. سپس خواص فازی، ساختاری و مورفولوژی مورد بررسی قرار گرفته، همچنین خواص نانو مکانیکی پوشش بوسیله روش‌های نانودندانه‌گذاری و نانو خراش در بارهای مختلف ارزیابی شده است.

۲- فعالیت‌های تجربی

نمونه‌های مربعی شکل $Ni_{50.8}$ $Ti_{49.2}$ (درصد اتمی) با دمای شروع مارتنزیتی و دمای پایان آستنیتی به ترتیب ۱۲/۸و ۳۳/۴ درجه سانتیگراد با ابعاد ۰/۵×۱×۱ سانتی‌متر به عنوان زیرلایه استفاده گردید. نمونه‌ها تحت عملیات آماده سازی سطحی بوسیله فرایند سمباده زنی از مش ۸۰۰ تا ۲۵۰۰ و پولیش‌کاری بوسیله آلومینای دوغابی با اندازه ذرات ۱ تا ۳ میکرون قرار گرفتند. در نهایت نمونه‌ها بطور آلتراسونیکی چربی‌گیری و شستشوی سطحی بوسیله استن، الکل و آب مقطر شدند. پوشش نیترید تانتالیوم با فرایند کند و پاش مغناطیسی با تارگت تانتالیوم (با درجه خلوص ۹۹/۹۹ درصد)، گاز نیتروژن و گاز آرگون (با درجه خلوص ۹۹/۹۹۹ درصد) بر روی سطح آلیاژ NiTi اعمال شده است. فاصله متوسط بین نمونه‌ها و تارگت حدود ۶ تا ۱۰ سانتیمتر است. ابتدا هنگامی که نمونه در محفظه پوشش‌دهی قرار می‌گیرد، یک پتانسیل منفی (۱۰۰- ولت) به نمونه جهت ایجاد محیط پلاسما اعمال شده و سپس برای مدت زمان ۱۰ دقیقه با ورود گاز آرگون تا دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد تمیزکاری سطحی نمونه در پلاسمای تشکیل شده انجام می‌گیرد. عملیات پوشش‌دهی با ورود گاز نیتروژن به مدت ۱۵۰ دقیقه در فشار $۳/۸\times۱۰^{-۳}$* میلی بار با توان ۱۴۳ وات انجام شد.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.4.2.9]

رفتار فازی و نوع پیوندهای موجود در پوشش با استفاده از XPS (PHI 5802)، ضخامت، مورفولوژی و ساختار سطحی لایه‌ها بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) ارزیابی شد. توپوگرافی سطحی نمونه‌ها و خواص مکانیکی پوشش همانند نانوسختی و مدول یانگ پوشش نانو ساختار نیترید تانتالیوم به کمک میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) مجهز به فرورونده برکوویچ[1] (منشوری با زاویه رأس°۱۴۲/۳) تحت بارهای مختلف اعمالی همانند ۷۰۰ و ۱۰۰۰ میکرو نیوتن ارزیابی گردید.

۳- نتایج و بحث

پوشش نیترید تانتالیوم متناسب با پارامترهای استفاده شده در فرایند کندو پاش مغناطیسی می‌تواند دارای ساختار آمورف و یا کریستالی با فازهای مختلف پایدار و نیمه پایدار باشد. در این کار سعی شده مطابق با شرایط دستگاه مورد استفاده، بوشش نانوساختار نیترید تانتالیوم با یک ساختار پایدار بر روی زیر لایه آلیاژ NiTi اعمال گردد و سپس خواص فازی، ساختاری و خواص نانو مکانیکی همانند نانو سختی و نانو سایش آن بررسی گردد.

در شکل ۱ منحنی XPS پوشش نانوساختار نیترید تانتالیوم بعد از کند و پاش ۲۰ نانومتری سطح جهت حذف اکسیدهای سطحی، نشان داده شده است، پیک های Ta، N و O بخوبی در منحنی XPS قابل مشاهده است. منابع اکسیژن می‌تواند ناشی از اکسیداسیون سطح، جذب و یا هیدروژن باقی مانده در محفظه پوشش دهی باشند. پیک N 1s (eV 398.1) مربوط به نیتروژن موجود در ساختار نیترید فلزی است که طیف‌های Ta 4f (eV 23.9) و N 1s (eV 398.1) تعیین کننده فاز Ta-N است و نسبت استوکیومتری Ta/N نیز حدود ۱:۲تعیین شده است. البته قابل ذکر است که تانتالیوم دارای تمایل زیادی جهت انجام واکنش با اکسیژن و تشکیل فاز Ta-O دارد که توسط O 1s (eV 529.8) تایید می‌شود[۱۴-۱۶].

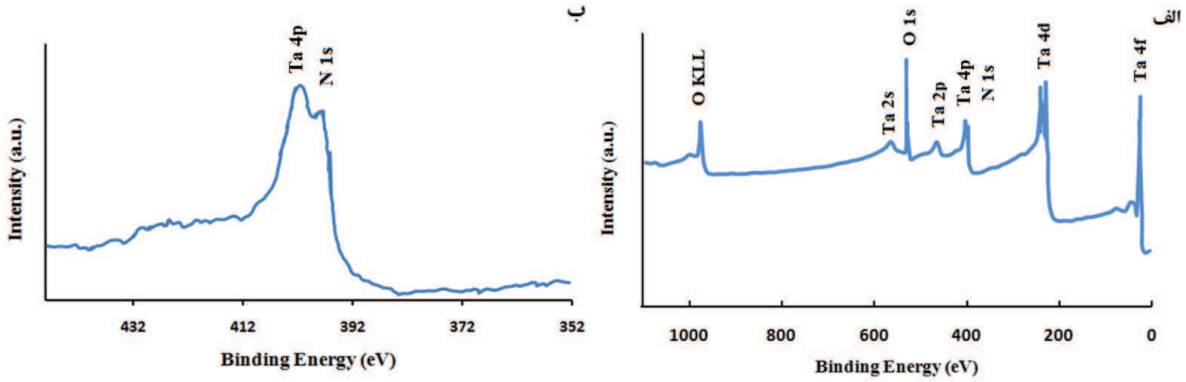
در شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی FE-SEM ساختار، مورفولوژی و ضخامت پوشش نانوساختار نیترید تانتالیوم نشان داده شده است. در شکل ۲- الف، تصویر الکترون ثانویه، بیانگر سطحی کاملا یکنواخت، همگن و نانو ساختار است، در شکل ۲-ب، تصویر الکترون برگشتی، بیانگر توزیع یکنواخت فاز نیترید تانتالیوم در سطح پوشش و در شکل ۲-ج ضخامت پوشش به میزان تقریبا ۱۰۵۰ نانومتر بدست آمده است.

در شکل‌های ۳ و ۴ تصاویر AFM و زبری سطح زیر لایه NiTi و پوشش نانو ساختار نیترید تانتالیوم جهت تایید نتایج حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی در مقیاس $5\times5\mu m^2$ نشان داده شده است، که بخوبی بیانگر همگنی و یکنواختی و همچنین عاری از ترک بودن پوشش نانوساختار نیترید تانتالیوم اعمال شده بر روی سطح آلیاژ NiTi است. مطابق شکل ۳-الف آماده سازی سطح نمونه جهت اعمال پوشش خوب بوده و دارای میانگین زبری سطح (Sa) ۳/۴۵۶ نانومتر است و بعد از اعمال پوشش اگرچه سطح کمی ناهموارتر به نظر می رسد اما میانگین زبری سطح پوشش نیترید تانتالیوم (Sa) ۱/۷۱۶ نانومتر است، که بیانگر کاهش ۵۰ درصد زبری سطح نمونه در اثر اعمال پوشش بوسیله کنترل مناسب پارامترهای پوشش‌دهی در فرایند کند و پاش است.

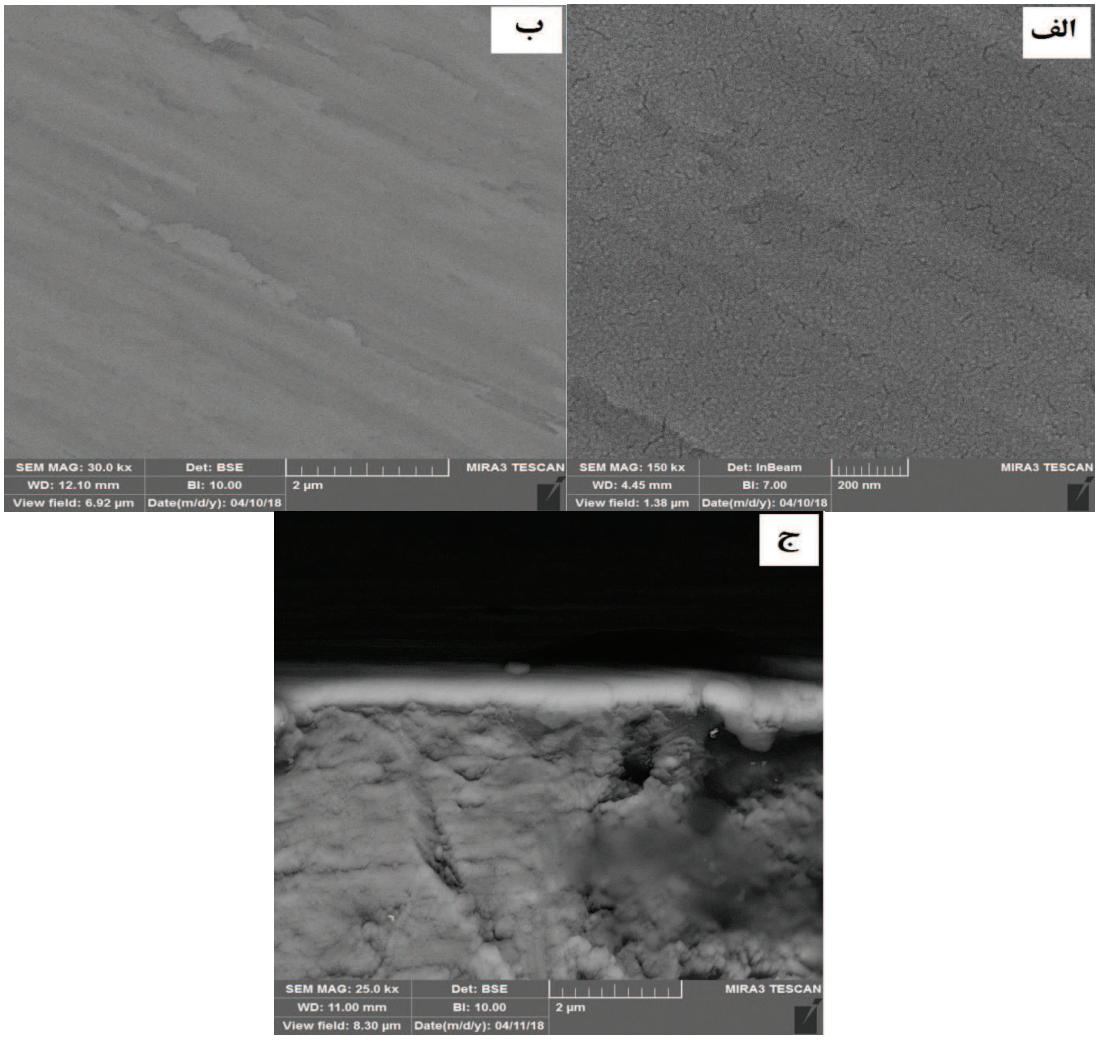
[1] Berkovich Indenter

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.4.2.9]



شکل ۱- الف) طیف کامل XPS پوشش نانو ساختار نیترید تانتالیوم و ب) طیف جزئی XPS برای پیک‌های N 1s و Ta4p.

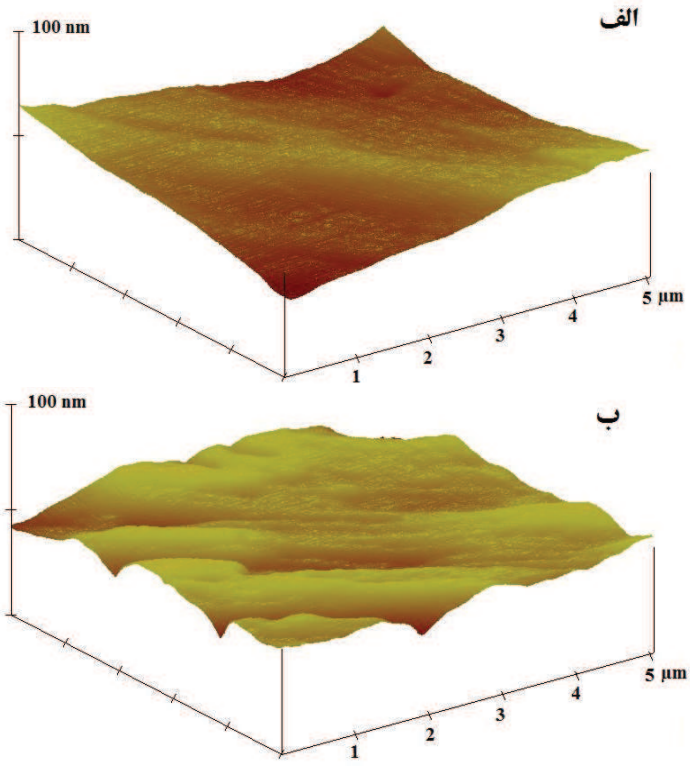


شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پوشش نانوساختار نیترید تانتالیوم،

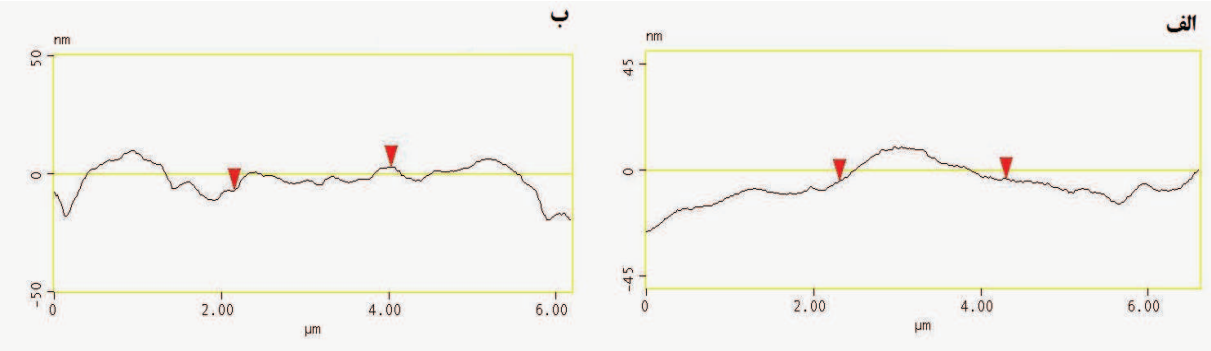
الف) الکترون ثانویه در بزرگنمایی ۱۵۰ هزار برابر، ب) الکترون برگشتی در بزرگنمایی ۳۰ هزار برابرو ج) سطح مقطع.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.4.2.9]



شکل ۳- تصویر AFM، الف) زیرلایه NiTi و ب) پوشش نیترید تانتالیوم.

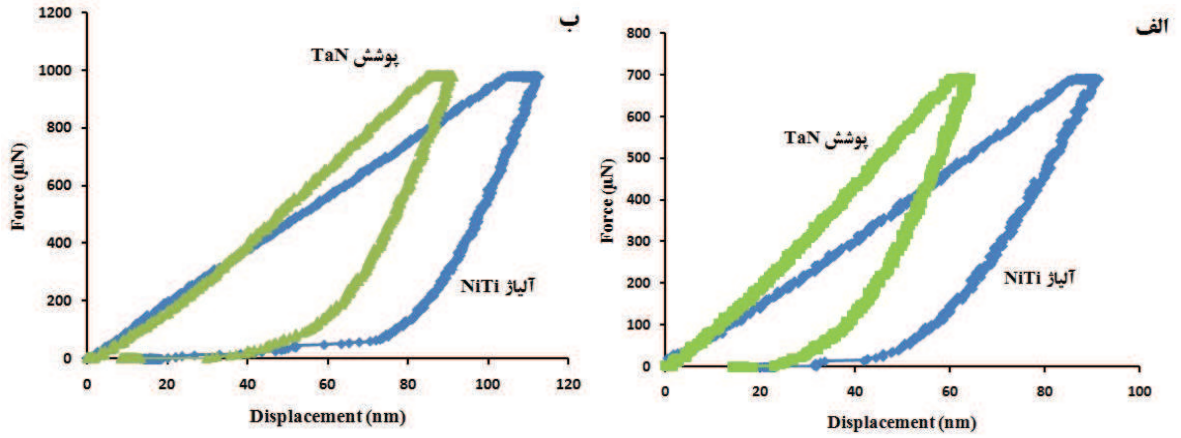


شکل ۴- زبری سطح الف) زیرلایه NiTi و ب) پوشش نیترید تانتالیوم.

خواص نانو مکانیکی پوشش نیترید تانتالیوم بوسیله دو روش نانو دندانه گذاری و نانو خراش به ترتیب جهت بررسی رفتار سختی و رفتار سایشی آن مورد استفاده قرار گرفت. در شکل ۵ منحنی و تصاویر نانو دندانه گذاری زیرلایه NiTi و پوشش نانوساختار نیترید تانتالیوم در دو بار اعمالی مختلف ۷۰۰ و ۱۰۰۰ میکرونیوتن نشان داده شده است و نتایج آن بطور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است. جهت اینکه نتایج تنها مربوط به خصوصیات و رفتار پوشش باشد متناسب با قانون یک دهم ضخامت پوشش دو بار اعمالی ۷۰۰ و ۱۰۰۰ میکرونیوتن با عمق نفوذ به ترتیب ۶۴ و ۹۱ نانومتر برای پوشش نیترید تانتالیوم در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.4.2.9]



شکل ۵- الف) منحنی نانو دندانه گذاری زیرلایه NiTi و پوشش نیترید تانتالیوم تحت بار گذاری‌های مختلف الف) ۷۰۰ میکرونیوتن و ب) ۱۰۰۰ میکرونیوتن.

مطابق منحنی نانو دندانه گذاری و نتایج جدول ۱، پوشش نانوساختار نیترید تانتالیوم منجر به افزایش یک درصدی سختی سطح نمونه از ۶/۱۵ گیگا پاسکال به ۶/۲۲ گیگا پاسکال در بار اعمالی ۷۰۰ میکرو نیوتن و افزایش ۳۰ درصدی سختی از ۴/۷۰ گیگاپاسکال به ۶/۱۲ گیگا پاسکال در بار اعمالی ۱۰۰۰ میکرونیوتن است. در واقع به خوبی می‌توان گفت که با افزایش نیروی اعمالی، مقاومت پوشش نیترید تانتالیوم در برابر فرورونده افزایش یافته و همین امر منجر به افزایش سختی پوشش در مقایسه با زیر لایه گردیده است. همچنین مدول الاستیک نمونه از ۸۶/۳ گیگاپاسکال به ۸۷/۸ گیگا پاسکال در بار اعمالی ۷۰۰ میکرونیوتن و از ۷۶/۴ گیگا پاسکال به ۸۷/۴ در بار اعمالی ۱۰۰۰ میکرو نیوتن گردیده است. دو نکته از این تغییرها می‌توان فهمید که عبارتند از[۱۷-۱۸]:

- در بار اعمالی ۷۰۰ میکرو نیوتن که فرورنده دارای عمق نفوذ ۶۴ نانومتر در پوشش نیترید تانتالیوم است، میزان تغییرات اندکی در اثر اعمال پوشش نیترید تانتالیوم در خواص آلیاژ NiTi مشاهده شده است.
- با افزایش بار اعمالی و همچنین افزایش عمق نفوذ تقریبا سختی و مدول الاستیک نمونه حاوی پوشش نیترید تانتالیوم ثابت مانده، که بیانگر افزایش استحکام سطح آلیاژ NiTi بوسیله اعمال پوشش نیترید تانتالیوم است.

جدول ۱- نتایج خلاصه شده آزمایش دندانه‌گذاری پوشش‌های زیرکونیا و نانوکامپوزیت زیرکونیا- آلومینا تحت بارهای ۵۰ و ۶۰ میلی نیوتن

بار اعمالی (µN)	پوشش	مدول الاستیک (GPa)	سختی (GPa)	ماکزیمم عمق نفوذ (nm)
۷۰۰	NiTi	۸۶/۳	۶/۱۵	۹۰/۵۵
	TaN	۸۷/۸	۶/۲۲	۶۴/۳
۱۰۰۰	NiTi	۷۶/۴	۴/۷۰	۱۱۲/۸
	TaN	۸۷/۴	۶/۱۲	۹۱/۲

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.4.2.9]

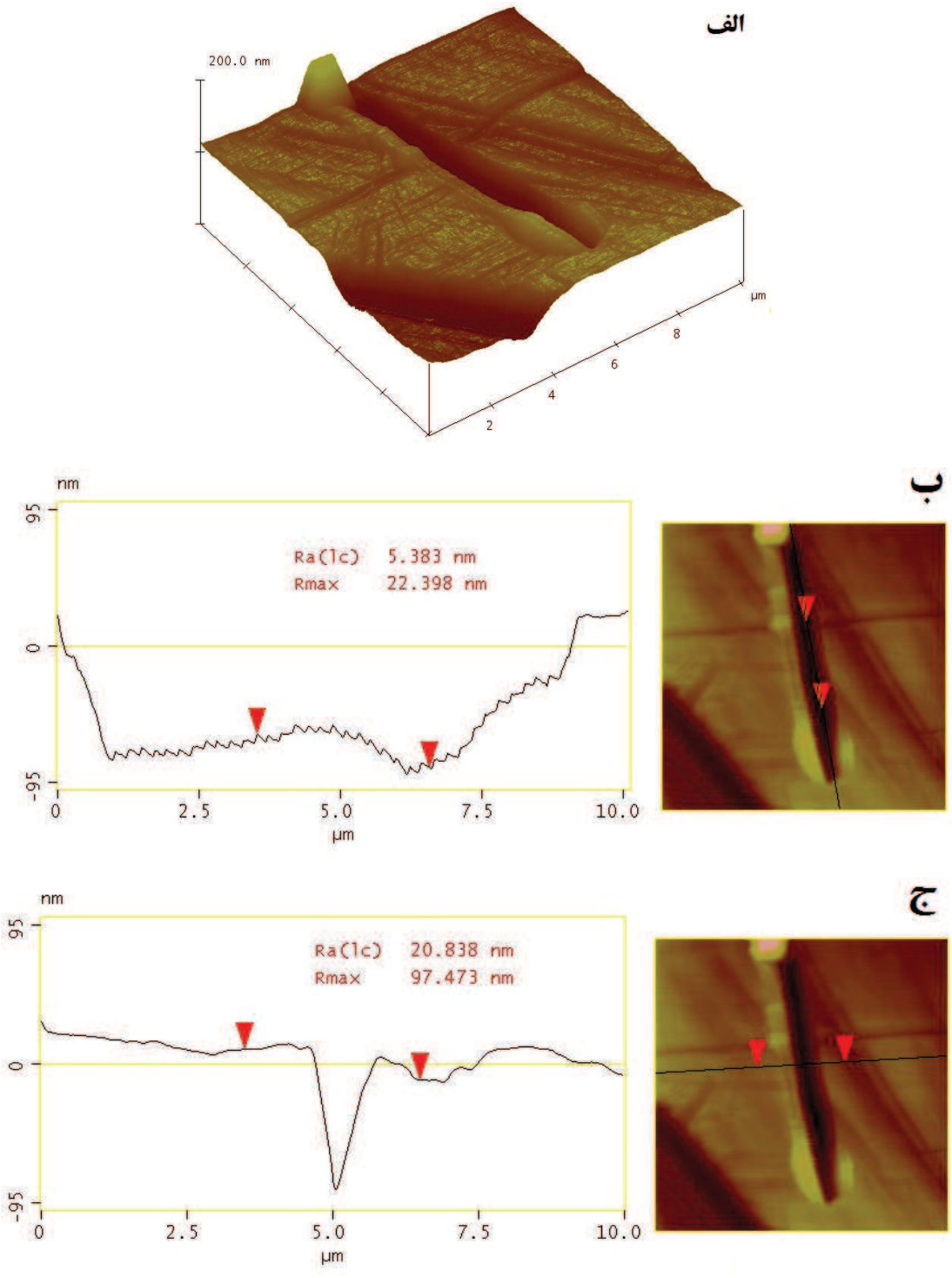
بطور کلی می‌توان گفت که پوشش سرامیکی نیترید تانتالیوم در ضخامت اعمالی حدود ۱۰۵۰ نانومتر، ماهیت سرامیکی خود را کاهش داده و رفتاری مشابه فلزات پر استحکام از خود نشان داده است، زیرا از آنجا که سختی مقاومت جسم در برابر نفوذ فرورنده است، سختی نمونه با افزایش بار اعمالی به میزان حدود ۴۰ درصد، تقریبا ثابت مانده است. البته قابل ذکر است که مطابق نتایج ارائه شده در مقالات، سختی و مدول الاستیک در پوشش نیترید تانتالیوم تابع فازهای موجود در پوشش همانند TaN، Ta_2N، Ta_2O_5 و TaO_xN_y است. در این تحقیق با کنترل پارامترهای پوشش‌دهی همانند میزان گاز نیتروژن سعی شده تا مطابق با منحنی XPS فاز همگن و یکنواخت TaN در پوشش بوجود آید. همچنین قابل ذکر است که با اعمال پوشش نیترید تانتالیوم، میزان جابجایی در اثر اعمال بار ثابت در هنگام تغییر نحوه بارگذاری (قسمت افقی نمونه) کاهش یافته که می‌تواند بیانگر بالاتر بودن مقاومت خزشی سطح نمونه حاوی پوشش نیترید تانتالیوم در مقایسه با سطح نمونه آلیاژ NiTi، به دلیل افزایش استحکام سطح نمونه پوشش‌دار و بالاتر بودن مقاومت در برابر حرکت نابجایی‌ها باشد[۱۹-۲۰].

برای بررسی دقیق‌تر خواص نانو مکانیکی پوشش‌ها، روش نانو خراش مورد استفاده قرار گرفت. در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ تصویر خراش و نمودار زبری زیرلایه NiTi و پوشش نانوساختار نیترید تانتالیوم در بارهای مختلف ۷۰۰ و ۱۰۰۰ میکرو نیوتن نشان داده شده است، که به خوبی بیانگر کاهش انعطاف پذیری سطح نمونه NiTi با اعمال پوشش نانو ساختار نیترید تانتالیوم است. در واقع هموار بودن مسیر حرکت فرورونده و همچنین مشاهده انباشتگی در اطراف مسیر حرکت آن در مقایسه با نمونه بدون پوشش، می‌تواند بیانگر بالاتر بودن استحکام سطح نمونه حاوی پوشش نیترید تانتالیوم و غالب بودن مکانیزم سایش چسبان همراه با تغییر فرم پلاستیک در محل و اطراف حرکت فرورونده است. در حالیکه مطابق شکل ۶، در نمونه بدون پوشش آلیاژ NiTi، مکانیزم سایش چسبان همراه با پدیده شخم‌زنی غالب است. همچنین قابل ذکر است که با افزایش نیروی اعمالی به ۱۰۰۰ میکرو نیوتن، دندانه دندانه شدن مسیر حرکت فرورونده و افزایش زبری آن بیانگر افزایش شدت مکانیزم سایش خراشان نسبت به مکانیزم سایش چسبان برای نیروی اعمالی ۷۰۰ میکرونیوتن است. در واقع می‌توان گفت که افزایش نیرو اعمالی با افزایش میزان تغییر فرم پلاستیک، مقاومت جسم در برابر حرکت نابجایی‌ها در اطراف مسیر حرکت فرورونده را افزایش داده و این امر منجر به ترد شدن ناحیه در تماس با فرورنده گردیده است[۱۹-۲۲].

در شکل ۹ نمودار ضریب اصطکاک نمونه بدون پوشش آلیاژ NiTi و پوشش نیترید تانتالیوم تحت بارهای اعمالی مختلف همانند ۷۰۰ و ۱۰۰۰ میکرو نیوتن نشان داده شده است، که ضریب اصطکاک میانگین نمونه بدون پوشش آلیاژ NiTi حدود ۰/۴ و پوشش نانوساختار نیترید تانتالیوم به ترتیب در بارهای ۷۰۰ و ۱۰۰۰ میکرونیوتن حدود ۰/۲ و ۰/۲۸ است.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-18]

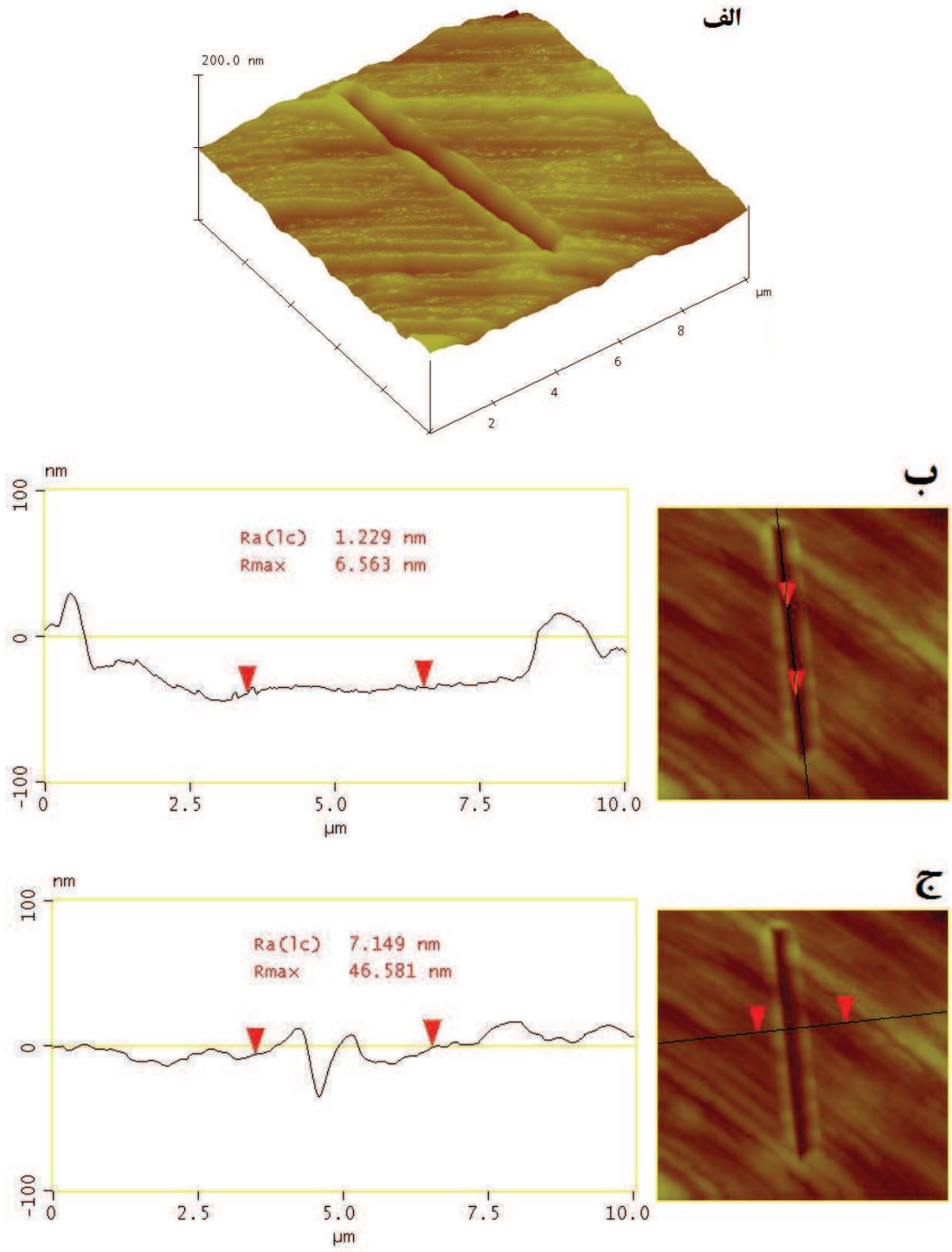
[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.4.2.9]



شکل ۶- الف) تصویر خراش زیر لایه NiTi در بار اعمالی ۱۰۰۰

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-18]

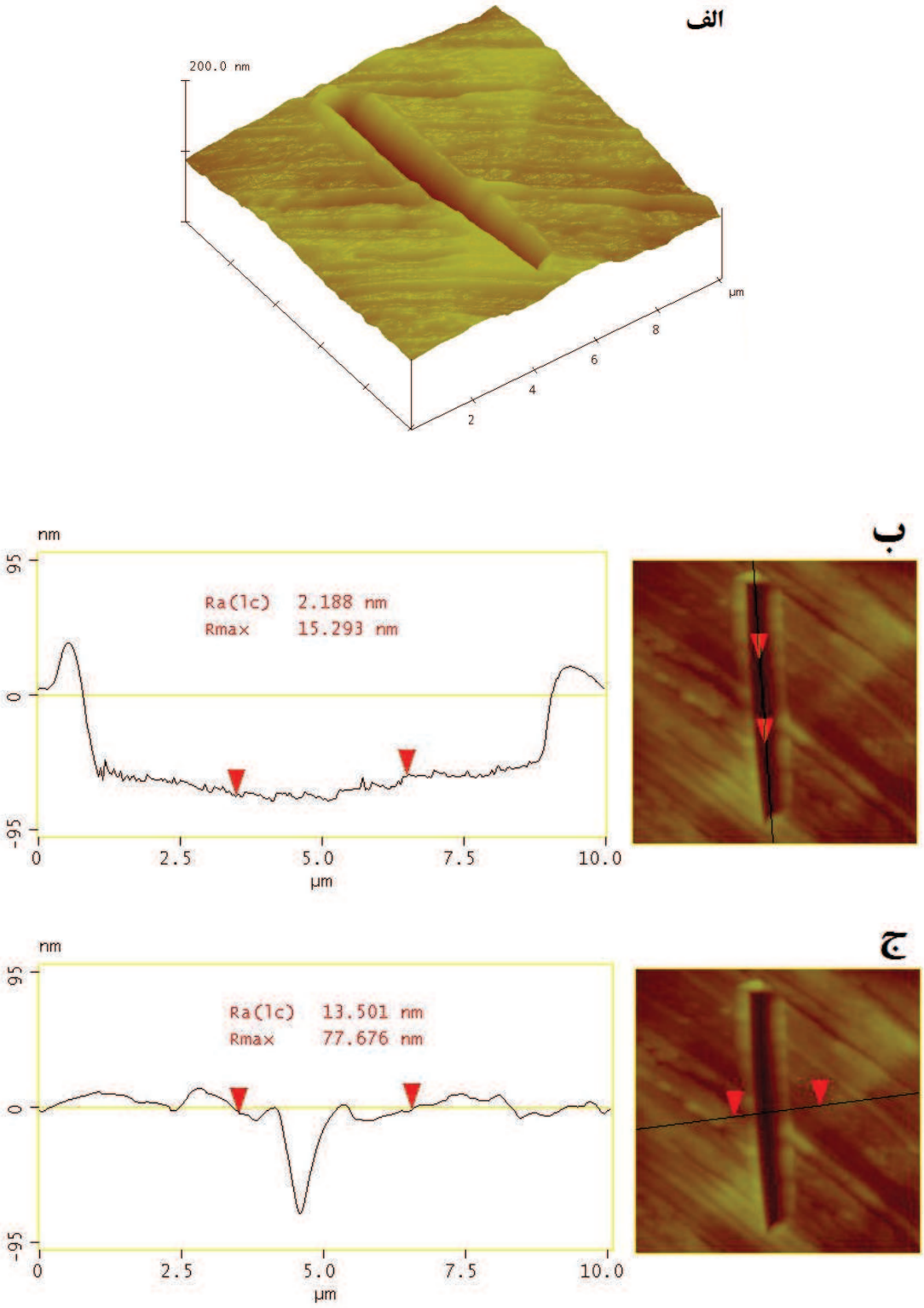
[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.4.2.9]



شکل ۷- الف) تصویر خراش پوشش نیترید تانتالیوم در بار اعمالی ۷۰۰ میکرونیوتن، ب و ج) نمودار مسیر و اطراف خراش

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-18]

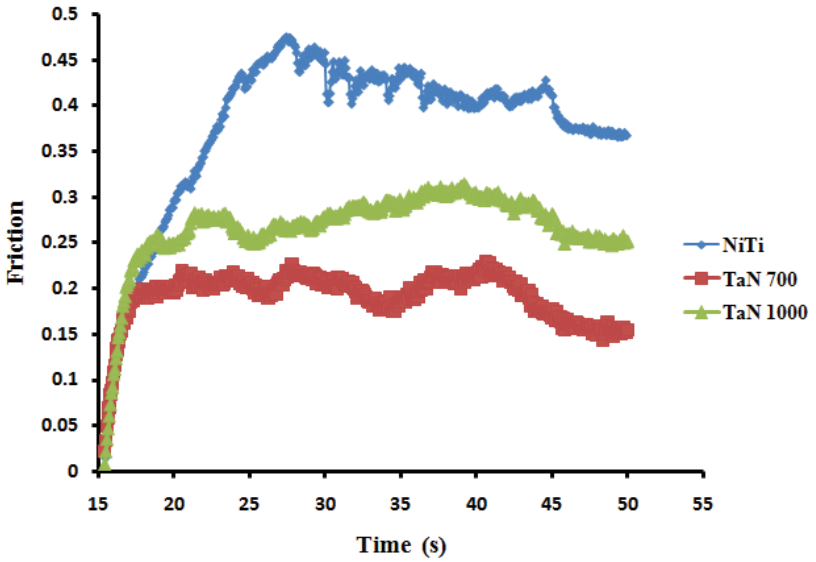
[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.4.2.9]



شکل ۸- الف) تصویر خراش پوشش نیترید تانتالیوم در بار اعمالی ۱۰۰۰ میکرونیوتن، ب و ج) نمودار مسیر و اطراف خراش

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.4.2.9]



شکل ۹- نمودار ضریب اصطکاک نمونه یدون پوشش آلیاژ NiTi و پوشش نیترید تانتالیوم تحت بارهای اعمالی مختلف همانند ۷۰۰ و ۱۰۰۰ میکرو نیوتن.

بطور کلی پوشش نانو ساختار نیترید تانتالیوم منجر به کاهش ضریب اصطکاک سطحی به میزان تقریبا ۵۰ درصد و همچنین بهبود مقاومت به سایش گردیده است. تغییرات اندک مشاهده شده در منحنی ضریب اصطکاک پوشش نانوساختار تانتالیوم در بار اعمالی ۱۰۰۰ میکرو نیوتن به خوبی نشان دهنده غالب بودن مکانیزم سایش خراشان نسبت به مکانیزم سایش چسبان نسبت به بار اعمالی ۷۰۰ میکرو نیتوتن است. البته قابل ذکر است که با افزایش نیرو اعمالی برای پوشش نانو ساختار تانتالیوم شاید بتوان گفت که فشار هرتزین ایجاد شده در بار اعمالی ۱۰۰۰ میکرو نیوتن منجر به سریع فعال شدن مکانیزم‌های تغییر فرم پلاستیک و حرکت نابجایی‌ها و افزایش حجم منطقه تحت تاثیر نیرو اعمالی و در نهایت مقاومت بیشتر در مسیر حرکت فرورونده و افزایش ضریب اصطکاک برای پوشش نانو ساختار تانتالیوم در بار اعمالی ۱۰۰۰ میکرو نیوتن نسبت به بار اعمالی ۷۰۰ میکرو نیوتن گردیده است.

۴- نتیجه‌گیری

پوشش نانو ساختار نیترید تانتالیوم بر روی سطح آلیاژ NiTi با استفاده از روش کند و پاش مغناطیسی در دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد اعمال شده است. نتایج بیانگر تشکیل پوشش همگن، یکنواخت و عاری از ترک پوشش نانو ساختار نیترید تانتالیوم با ضخامت تقریبا ۱۰۵۰ و اندازه ذرات ۲۰ نانو متر و میانگین زبری سطحی (Sa) ۱/۷۱۶ نانومتر است، که منجر به افزایش یک درصدی سختی سطح نمونه از ۶/۱۵ گیگا پاسکال به ۶/۲۲ گیگا پاسکال در بار اعمالی ۷۰۰ میکرو نیوتن و افزایش ۳۰ درصدی سختی از ۴/۷۰ گیگاپاسکال به ۶/۱۲ گیگا پاسکال در بار اعمالی ۱۰۰۰ میکرونیوتن است. در واقع به خوبی می توان گفت که با افزایش نیروی اعمالی، مقاومت پوشش نیترید تانتالیوم در برابر فرورونده افزایش یافته و همین امر منجر به افزایش سختی پوشش در مقایسه با زیر لایه گردیده است. همچنین

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.4.2.9]

مدول الاستیک نمونه از ۸۶/۳ گیگاپاسکال بـه ۸۷/۸ گیگـا پاسکال در بـار اعمـالی ۷۰۰ میکرونیـوتن و از ۷۶/۴ گیگـا پاسکال به ۴/ ۸۷ در بار اعمالی ۱۰۰۰ میکرو نیوتن گردیـده است. بطور کلی در بار اعمالی ۱۰۰۰ میکرو نیوتن، مکـانیزم سایش خراشان نـسبت بـه مکـانیزم سـایش چـسبان بـرای نیروی اعمالی ۷۰۰ میکرونیوتن غالـب اسـت، شـاید بتـوان گفت افزایش نیـرو اعمـالی بـا افـزایش میـزان تغییـر فـرم پلاستیک، مقاومـت جـسم در برابـر حرکـت نابجـاییهـا در اطراف مسیر حرکـت فرورونـده را افـزایش داده و ایـن امـر منجر به ترد شدن ناحیه در تماس با فرورنده گردیده است.

مراجع

[1] E. Espinar, J. M. Llamas, A. Michiardi, M.P. Ginebra, F.J. Gil, "Reduction of Ni releaseand improvement of the friction behaviour of NiTi orthodontic arch wires by oxidation treatments", Journal of Materials Science: Materials in Medicine, Vol. 22 (5), pp. 1119-1125, 2011.

[2] Z. Liqiang, D. Yongli, G. Zhenfei, M. Juan, L. Rui, L. Sijin, T. Zhiqiang, L. Yi, B. Chenghao, C. Lishan, Y. Fan, L. Jingfu, K. Jing, L. Yongfeng, "Graphene enhanced anti-corrosion and biocompatibility of NiTi alloy", Nano Impact, Vol. 7, pp. 7-14, 2017.

[3] J. X. Zhang, R. F. Guan, X. P. Zhang, " Synthesis and characterization of sol- gel hydroxyapatite coatings deposited on porous NiTi alloys", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 509 (13), pp.4643-4648, 2011.

[4] L. Meng, Y. Li, K. Pan, Y. Zhu, W. Wei, X. Li, X. Liu, "Colloidal particle based electrodeposition coatings on NiTi alloy: Reduced releasing of nickel ions and improved biocompatibility", Materials Letters, Vol. 230, pp. 228-231, 2018.

[5] J. J. Marattukalama, A. Kumar Singha, S. Datta, M. Das, V. Krishna Balla, S. Bontha, S. K. Kalpathy, "Microstructure and corrosion behavior of laser processed NiTi alloy", Materials Science and Engineering: C, Vol. 57, pp. 309-313, 2015.

[6] X. Wang, F. Liu, Y. Song, "Enhanced corrosion resistance and in vitro bioactivity of NiTi alloys modified with hydroxyapatite-containing Al_2O_3 coatings", Surface and Coatings Technology, Vol. 344, pp. 288-294, 2018.

[7] S. Xu, P. Munroe, J. Xu, Z.H. Xie, "The microstructure and mechanical properties of tantalum nitride coatings deposited by a plasma assisted bias sputtering deposition process", Surface & Coatings Technology, Vol. 307, pp. 470- 475, 2016.

[8] Y. X. Leng, H. Sun, P. Yang, J. Y. Chen, J. Wang, G. J. Wan, N. Huang, X. B. Tian, L. P. Wang, P. K. Chu, "Biomedical properties of tantalum nitride films synthesized by reactive magnetron sputtering", Thin Solid Films, Vol. 398, pp. 471-475, 2001.

[9] M. Grosser, M. Münch, H. Seidel, C. Bienert, A. Roosen, U. Schmid, "The impact of substrate properties and thermal annealing on tantalum nitride thin films", Applied Surface Science, Vol. 258, 2894- 2900, 2012.

[10] S. K. Kim, B. C. Cha, "Deposition of tantalum nitride thin films by D. C. magnetron sputtering", Thin Solid Films, Vol. 475, pp. 202-207, 2005.

[11] G. R. Lee, H. Kim, H. S. Choi, J. J. Lee, "Superhard tantalum-nitride films formed by inductively coupled plasma-assisted sputtering", Surface and Coatings Technology, Vol. 201, pp. 5207-5210, 2007.

[12] D. Bernoulli, U. Müller, M. Schwarzenberger, R. Hauert, R. Spolenak, "Magnetron sputter deposited tantalum and tantalum nitride thin films: An analysis of phase, hardness and

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.4.2.9]

composition", Thin Solid Films, Vol. 548, pp. 157-161, 2013.
[13] J. Alami, P. Eklund, J. M. Andersson, M. Lattemann, E. Wallin, J. Bohlmark, P. Persson, U. Helmersson, "Phase tailoring of Ta thin films by highly ionized pulsed magnetron sputtering", Thin Solid Films, Vol. 515, 3434-3438, 2007.
[14] C. K. Poh, Z. Shi, T. Y. Lim, K. G. Neoh, W. Wang, "The effect of VEGF functionalization of titanium on endothelial cells in vitro", Biomaterials, Vol. 31, pp. 1578–1585, 2010.
[15] G. M. Ing, S. Kaciulis, A. Mezzi, T. Valente, F. Casadei, G. Gusmano, "Characterization of composite titanium nitride coatings prepared by reactive plasma spraying", Electrochim Acta, Vol. 50, pp. 4531–4537, 2005.
[16] A. Arranz, C. Palacio, "Composition of tantalum nitride thin films grown by low-energy nitrogen implantation: a factor analysis study of the Ta 4f XPS core level", Applied Physics A, Vol. 81, pp. 1405–1410, 2005.
[17] S. Ghasemi, A. Shanaghi, P. K .Chu, "Nano mechanical and wear properties of multi-layer Ti/TiN coatings deposited on Al 7075 by high-vacuum magnetron sputtering", Thin Solid Films, Vol. 638, pp. 96–104, 2017.
[18] E. Österlund, J. Kinnunen, V. Rontu, A. Torkkeli, M. Paulasto-Kröckel, "Mechanical properties and reliability of aluminum nitride thin films", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 772, pp. 306-313, 2019.
[19] B. D. Beake, A. J. Harris, "Nanomechanics to 1000°C for high temperature mechanical properties of bulk materials and hard coatings", Vacuum, Vol. 159, pp. 17-28, 2019.
[20] A. Shanaghi, A. R. Sabour Rouhaghdam, S. Ahangarani, P. K. Chu, "Effect of plasma CVD operating temperature on nanomechanical properties of TiC nanostructured coating investigated by atomic force microscopy", Materials Research Bulletin, Vol. 47, PP. 2200-2205, 2012.
[21] D. Cristea, A. Crisan, D. Munteanu, M. Apreutesei, M. F. Costa, L. Cunha, "Tantalum oxynitride thin films: Mechanical properties and wear behavior dependence on growth conditions", Surface and Coatings Technology, Vol. 258, pp. 587-596, 2014.
[22] L. Mendizabal, A. Lopez, R. Bayón, P. Herrero-Fernandez, J. Barriga, J. J. Gonzalez, "Tribocorrosion response in biological environments of multilayer TaN films deposited by HPPMS", Surface and Coatings Technology, Vol. 295, pp. 60-69, 2016.

[Downloaded from ijcse.ir on 2026-11-18]

[DOR: 20.1001.1.23222352.1398.8.4.2.9]