

ارزیابی عملکرد ابزار با پوشش‌های چند لایه نانو کریستال در ماشین کاری سوپر آلیاژ اینکونل 718

رسول مختاری همای^۱، بهروز موحدی^{۲*}، ایرج لیرابی^۳، مهدی بازرگان حقیقی^۴

* نویسنده مسئول: b.movahedi@ast.ui.ac.ir

واژه‌های کلیدی

تراشکاری خشک و مرطوب، سوپر آلیاژ اینکونل 718، پوشش‌های چند لایه نانو کریستال.

چکیده

در این مقاله، عملکرد ابزار با پوشش‌های چند لایه نانو کریستال با ترکیب $TiN+TiAlN$ برای ماشین کاری سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل 718 در شرایط برشکاری خشک و مرطوب مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور پوشش چند لایه TiN و $TiAlN$ با ساختار نانو کریستال توسط فرایند رسوب فیزیکی بخار و با روش قوس تبخیری بر اینسرت‌هایی با ترکیب کاربید تنگستن - کبالت اعمال شد. نتایج حاصل از آزمون سایشی بال بر دیسک و همچنین ماشین کاری سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل 718 در شرایط برشکاری خشک و مرطوب نشان داد که نانو کریستال بودن لایه‌ای، عملکرد بسیار عالی را برای ابزارها در حین ماشین کاری به وجود می‌آورد. وجود کریستال‌ها یا دانه‌هایی در ابعاد ۴۰-۱۵ نانومتر همراه با درصد بهینه‌ای از آلومینیوم در پوشش $TiAlN$ ، مقاومت سایشی بالا ایجاد می‌کند و ترکیب مناسبی از مقاومت به سایش خراشان و چسبندگی به زیر لایه به همراه چقرمگی و پایداری حرارتی مطلوب را فراهم می‌نماید.

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲- استادیار، دانشکده علوم و فناوریهای نوین، گروه مهندسی نانو فناوری، دانشگاه اصفهان.

۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه بیرجند.

۴- مدرس، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر.

۱- مقدمه

ماشین ابزارهای مدرن با عملکرد دینامیکی، استحکام و قدرت بالا، به ابزارهای برشی با خواص سطحی بهبود یافته نیازمنداند. این موضوع حتی در مورد ماشینکاری آلیاژهای سخت‌برش حساس‌تر به نظر می‌رسد؛ این نوع ماشینکاری به مهندسی ابزار با خصوصیات سطحی، مقاومت سایشی، سختی، استحکام، چقرمگی و پایداری حرارتی بالا در دماهای زیاد نیازمند است. ارتباط بین ویژگیهای فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی سطوح ابزارهای برشی و عملکردشان در عملیات ماشینکاری مسئله‌ای کلیدی است که برای تولیدکننده و کاربر ابزار از اهمیت به‌سزایی برخوردار است [۱-۲]. آلیاژهای پایه نیکل به ویژه سوپر آلیاژ اینکونل 718 دارای ویژگی‌های مناسبی هستند که از آنها در ساخت اجزای مختلف موتور جت هواپیما مانند پره‌های توربین استفاده می‌شود [۳-۶]. از جمله مشکلاتی که در حین ماشین‌کاری این آلیاژ به وجود می‌آید، ذرات ساینده کاربیدی حاصل از قطعه کار است که به سایش خراشان منجر می‌شود. از طرف دیگر هدایت حرارتی ضعیف سوپر آلیاژ اینکونل 718 به افزایش موضعی درجه حرارت در سطح برشکاری منجر می‌شود که نتیجه آن افزایش میل ترکیبی سطح این آلیاژ با مواد موجود در ابزار برش است؛ این پدیده باعث ایجاد سایش نفوذی می‌شود [۷]. عامل دیگر فرسایش ناگهانی ابزار، پدیده سایش چسبان است که بر سطح برشکاری شده خرابی ایجاد می‌کند [۲-۶]. سرعت‌های برشی بالا دمای ابزار را تا حد تغییر شکل پلاستیکی بالا می‌برد و سایش نفوذی را گسترش می‌دهد که این خود به مشکلات حادث‌تر در حین ماشین‌کاری اینکونل 718 منجر می‌شود [۶-۱۰].

در این مقاله عملکرد ابزارهایی با پوشش‌های چند لایه TiN+TiAlN با ساختار نانو کریستال که بر اینسرت‌های کاربرد تنگستن - کبالت با استفاده از فرایند رسوب فیزیکی بخار لایه-نشانی شده، مورد مطالعه قرار گرفته است. انتخاب لایه‌ها بر پایه TiAlN به دلیل سختی بالای آن‌ها (۱۵ تا ۳۰ گیگا پاسکال) و

مقاومت در برابر سایش چسبان در حین ماشین‌کاری انجام شده است [۱۱-۱۵]. کارهای انجام شده توسط سایر محققان [۲-۸] بیشتر در راستای مطالعه خواص ماشین‌کاری پوشش‌هایی با ساختارهای متعارف معطوف شده است. در حالی که هدف این تحقیق ساخت و ارزیابی عملکرد ابزارهای برش با ساختارهای پیشرفته نانو کریستال در حین ماشین‌کاری سوپر آلیاژ اینکونل 718 است. برای این هدف پارامترهای فرایند رسوب فیزیکی بخار، با هدف دستیابی به پوششی با ساختار نانو کریستال انتخاب شده است تا خصوصیات مکانیکی ابزار در حین برشکاری را بهبود بخشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ترکیب پوشش چند لایه و فرایند ماشینکاری

اینسرت‌های به کار برده شده به عنوان زیرلایه در این مقاله دارای ترکیب WC-۶٪ Co با سختی $91/9 \pm 0/7$ راکول A است و دارای هندسه SNMG120412 است. پوشش‌های چند لایه با ترکیب TiN+TiAlN توسط فرایند رسوب فیزیکی بخار و با روش قوس تبخیری بر اینسرت‌ها رسوب داده شد تا یک ساختار ۸ لایه‌ای از TiN و TiAlN به ضخامت $4/2$ میکرومتر به وجود آید. هر کدام از این تک لایه‌ها به صورت متناوب و یک در میان رسوب داده شده‌اند به طوری که تک لایه در تماس با زیر لایه TiN و تک لایه رویی TiAlN باشد.

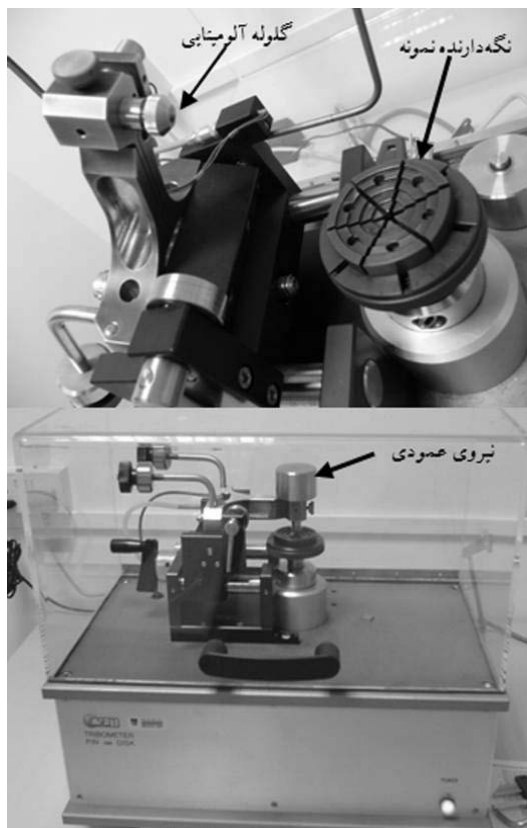
به منظور انجام آزمون‌های ماشین‌کاری ۲۴ اینسرت برای نمونه‌های پوشش‌دار و ۳ اینسرت برای نمونه‌های بدون پوشش آماده شدند. این اینسرت‌ها برای تراشکاری سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل 718 با مشخصه AMS5662 با چگالی $8/18$ (g/cm³) و ظرفیت گرمایی $0/104$ (cal/g°C) در سرعت‌های برشی مختلف و شرایط خشک و مرطوب به کار گرفته شدند. آزمون‌های تراشکاری بر روی یک ماشین تراش CNC TC-20 با قدرت ۱۴/۷ اسب بخار و حداکثر دور ۴۵۰۰ دور بر دقیقه انجام گرفت. شرایط برشکاری در جدول (۱) آورده شده است.

به منظور انتخاب بار مناسب در آزمون سایش از روش بار پذیری استفاده شد.

به منظور اندازه گیری عمق و عرض شیارهای ایجاد شده در آزمون سایش بال بر دیسک، از دستگاه اندازه گیری پروفیل سطحی مدل KLA-Tencor Alpha Step IQ استفاده شد. در این روش اندازه گیری از یک کاوشگر الماسی جهت اسکن کردن سطح نمونه ساییده شده استفاده می شود.

۳- نتایج و بحث

مطالعه ساختاری با کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی از پوشش های چند لایه اعمال شده بر اینسرت ها، در شکل (۲) نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می شود ریز ساختار پوشش شامل کریستال هایی در ابعاد نانومتری (۴۰-۱۵ نانومتر) است. الگوی پراش ناحیه انتخابی نیز از حلقه های نازک بهم پیوسته ای تشکیل شده اند که نشان دهنده نانو ساختار بودن این نوع پوشش ها است.



شکل (۱) نمایی از دستگاه تریبومتر و قسمت های مختلف آن.

جدول (۱) شرایط آزمون ماشین کاری برای اینسرت های بدون پوشش و با پوشش نانو کریستال.

متغیر	سطوح متغیر		
	۱	۲	۳
V_c (m/min)	۳۵	۹۵	۱۴۵
a_f (mm/rev)	۰/۲	۰/۲۵	---
r_c (mm)	۰/۸	۱/۲	---
X (deg)	۴۵	---	---
a_p (mm)	۰/۵	---	---

در این جدول V_c سرعت برشی، a_f سرعت پیشروی، r_c شعاع نوک ابزار، X زاویه تنظیم اصلی ابزار و a_p عمق برش است.

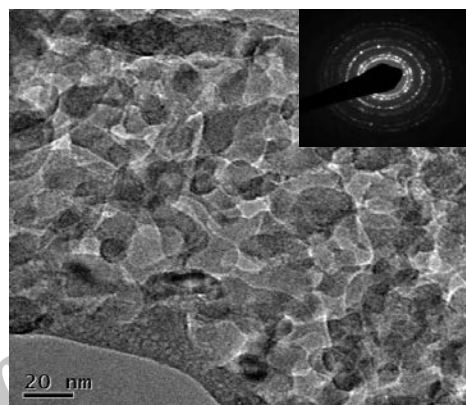
۲-۲- روش های ارزیابی خواص پوشش های چند لایه

مطالعه نواحی سایش یافته اینسرت ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل JSM-6360A JEOL مورد ارزیابی قرار گرفت. قبل از بررسی، نمونه ها به روش اسپاترینگ توسط لایه نازکی از طلا پوشش داده شد. به منظور مطالعه جزئیات ساختاری پوشش ها از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری JEOL مدل JEM 2010 با مشخصات ولتاژ شتاب دهنده ۲۰۰ کیلو ولت و قدرت بزرگ نمایی ۰/۱۹ نانومتر استفاده شد.

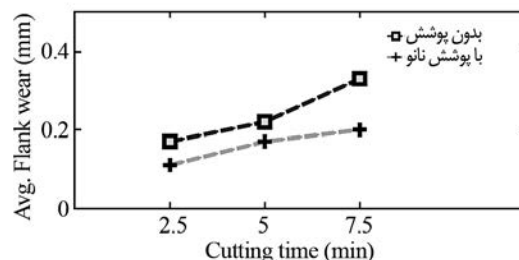
ارزیابی مقاومت سایشی پوشش ها توسط آزمون سایش بال روی دیسک و بر اساس استاندارد ASTM G99-95a انجام گرفت. در این آزمون از دستگاه تریبومتر CSEM با گلوله آلومینایی با زبری ۰/۰۲ و به قطر ۶ میلیمتر تحت بار عمودی ۱۵ نیوتن استفاده شد، نمونه دستگاه در شکل (۱) نمایش داده شده است. سرعت لغزش ۱۰ سانتی متر بر ثانیه و مسافت ۱۰۰۰ متر برای کلیه نمونه ها در نظر گرفته شد. تکرار پذیری هر نمونه به تعداد ۳ مرتبه آزمایش مورد ارزیابی قرار گرفت.

با استفاده از آزمون سایشی بال بر دیسک مقادیر ضریب اصطکاک پوشش‌های چند لایه نانوکریستال و نمونه‌های کاربرد تنگستن-کبالت بدون پوشش در برابر ساچمه آلومینایی در دمای اتاق و در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد در جدول (۲) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما میزان ضریب اصطکاک نیز افزایش می‌یابد که این افزایش برای نمونه‌های بدون پوشش بیشتر است. یکی از مزایای استفاده از پوشش‌های نانوکریستال بر پایه TiAlN بر روی ابزارهای برش، علاوه بر کاهش ضریب اصطکاک نسبت به نمونه‌های بدون پوشش، مقاومت بالای سایشی این نوع پوشش‌ها است. در حقیقت ساختار نانوکریستالی این نوع پوشش‌ها با سختی بالا میزان سایش چسبان ابزار با سطح آلیاژ اینکونل 718 در حین برش‌کاری را به شدت کاهش می‌دهد؛ که این عامل به افزایش کارایی و عمر ابزار منجر می‌شود [۱۲-۱۴]. نتایج کار فاکس و همکاران [۱۴] نشان داده است که بعد از گذشت ۹۰۰۰ متر ماشین‌کاری میزان سایش سطح آزاد در پوشش‌های نانوساختار TiAlN به حدود ۰/۳ میلی‌متر رسیده است، در صورتی که در پوشش‌های متعارف TiAlN این مقدار سایش بعد از ۲۰۰۰ متر تحقق یافته است. از طرفی چون طول ماشین‌کاری با زمان ماشین‌کاری رابطه مستقیم دارد [۱۵] شکل‌های (۳) و (۴) این مطلب را می‌رسانند که پوشش‌نانو ساختار طول ماشین‌کاری و به تبع آن زمان ماشین‌کاری را تا رسیدن به سایش سطح آزاد ۰/۳ میلی‌متر افزایش داده است. شکل‌های (۵) و (۶) عمق و عرض اثر نمونه سایشی در آزمون بال بر دیسک بر حسب مسافت لغزش در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد برای نمونه‌های بدون پوشش و با پوشش نانوکریستال را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مسافت لغزش عمق و عرض شیارهای سایشی برای نمونه با پوشش نانوکریستال به مراتب کمتر از نمونه بدون پوشش است. از طرف دیگر در نمونه با پوشش نانوکریستال نرخ سایش بسیار پایین‌تر است. این پدیده را می‌توان به سختی بالا و ضریب اصطکاک پایین پوشش نانوکریستال ارتباط داد [۱۰، ۱۴، ۱۶].

سایش سطح آزاد، VB_B ، بر حسب زمان ماشین‌کاری در شرایط خشک با سرعت بهینه شده $V_C = 35 (m/min)$ و در شرایط مرطوب با سرعت بهینه شده $V_C = 145 (m/min)$ در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. نقاط مشخص شده در این نمودارها بیانگر مقدار میانگین سه اندازه‌گیری VB_B برای هر نوع اینسرت می‌باشد.

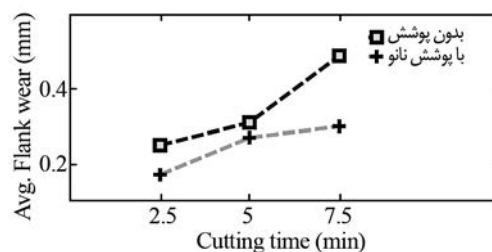


شکل (۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی از سطح ریزساختار پوشش‌های نانوکریستال اعمال شده بر اینسرت‌های کاربرد تنگستن-کبالت.



شکل (۳) منحنی سایش در شرایط خشک در سرعت

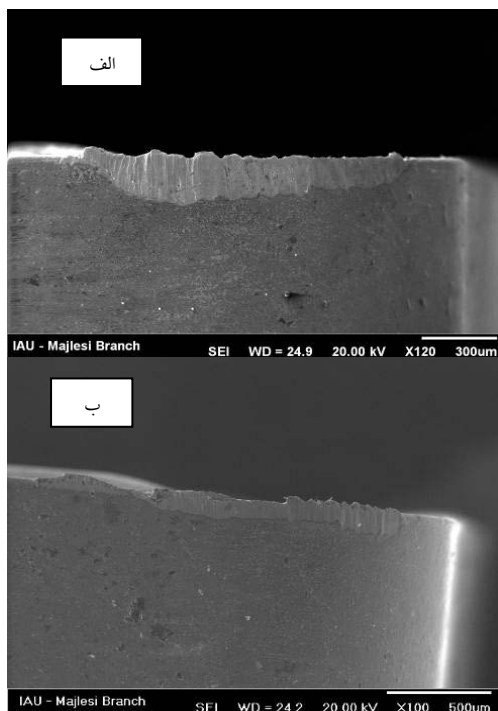
$$V_C = 35 (m/min)$$



شکل (۴) منحنی سایش در شرایط مرطوب در سرعت

$$V_C = 145 (m/min)$$

آلیاژ اینکونل 718 منجر می‌شود [۱۳]. از آنجایی که این پدیده تخریبی در دماهای بالاتر از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد، انتظار می‌رود در شرایط خشک زمانی که سرعت برش کاری به بیش از ۶۰ متر بر دقیقه می‌رسد [۷]، با افزایش نرخ سایش همراه باشد. مورفولوژی سایشی ابزار در سطح آزاد اصلی در سرعت برشی ۱۴۵ متر بر دقیقه برای اینسرت‌هایی با پوشش نانو کریستال و بدون پوشش در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سایش خراشان و چسبان مکانیزم‌های عمده استهلاک ابزارهای برش در مقابل اینکونل 718 هستند. زمانی که نیروهای چسبندگی بین براده و پوشش بیشتر از نیروهای بین پوشش و زیر لایه باشد، گسیختگی به سرعت اتفاق می‌افتد [۱۰]. با وجود اینکه سایش در هر دو نوع اینسرت مشاهده می‌شود، اما میزان سایش برای اینسرتی که با پوشش نانو کریستال حفاظت شده است، در سرعت‌های بالا بسیار کمتر از اینسرت بدون پوشش است.



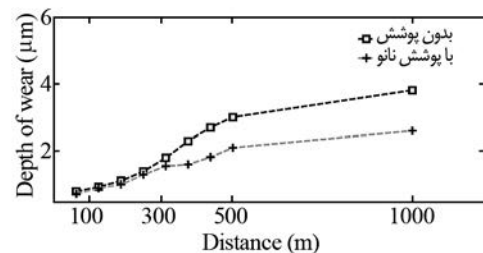
شکل (۷) مورفولوژی سایش ابزار برای اینسرت‌های الف) بدون پوشش

ب) با پوشش نانو کریستال در سرعت برشی $V_C = 145 \text{ m/min}$

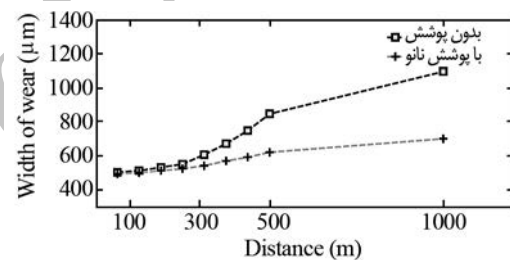
در شرایط خشک

جدول (۲) ضریب اصطکاک برای نمونه‌های بدون پوشش و با پوشش نانو کریستال

نمونه	ضریب اصطکاک در دمای اتاق	ضریب اصطکاک در دمای 800°C
پوشش نانو کریستال	۰/۳۷	۰/۵۵
بدون پوشش	۰/۶۵	۰/۸۹

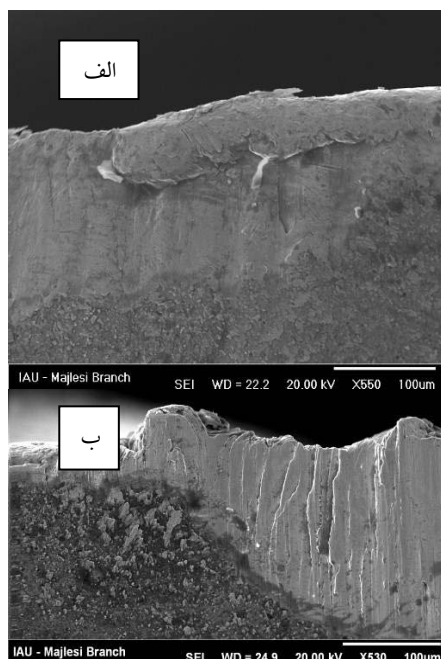


شکل (۵) عمق سایش نمونه در برابر مسافت لغزش در دمای 800°C



شکل (۶) عرض سایش نمونه در برابر مسافت لغزش در دمای 800°C

نتایج حاصل از ماشین کاری آلیاژ اینکونل 718 نشان می‌دهد که اینسرت با پوشش نانو کریستال عملکرد بسیار مطلوب‌تری در مقایسه با اینسرت بدون پوشش دارد، شکل‌های (۳) و (۴) را ببینید. این عملکرد به‌ویژه در سرعت‌های بالای برش کاری برای اینسرت‌ها با پوشش نانو کریستال بیشتر نمود پیدا می‌کند. در حقیقت با افزایش سرعت برش کاری دما نیز افزایش می‌یابد که نتیجه آن واکنش اینسرت با اتمسفر محیط به‌ویژه اکسیژن و تشکیل ترکیب WO_x در اثر دگرگونی شیمیایی کاربرد تنگستن موجود در اینسرت با اکسیژن محیط است. با تشکیل این ماده خواص مکانیکی اینسرت مانند سختی و چقرمگی به شدت کاهش می‌یابد و به افت کارایی اینسرت در حین ماشین کاری



شکل (۸) تصاویر میکروسکوپ الکترونی اینسرت‌های سایش یافته

(الف) با پوشش نانو کریستال (ب) بدون پوشش در سرعت برشی

$$V_c = 145 \text{ m/min}$$

مراجع

- [1] Wang Z.M., Titanium alloys and their machinability with coated carbide inserts, Ph.D Thesis, South Bank University, London, 1997.
- [2] Thakur D.G., Ramamoorthy B., Vijayaraghavan L., Study on the machinability characteristics of superalloy Inconel 718 during high speed turning, *Materials & Design*, Vol. 30, Issue 5, May 2009, pp. 1718-1725.
- [3] Khrais S.K., Lin Y.J., Wear mechanisms and tool performance of TiAlN PVD coated inserts during machining of AISI 1440 steel, *Wear*, Vol. 262, Issues 1-2, 4 January 2007, pp. 64-69.
- [4] Ezugwu E.O., Wang Z.M., *Performance of PVD and CVD coated tools when machining nickel-based Inconel 718 alloy*, in: N. Narutaki, et al. (Eds.), *Progress of Cutting and Grinding*, Vol. 111, 1996, pp. 102-107.
- [5] Liao Y.S., Lin H.M., Wang J.H., Behaviors of end milling Inconel 718 superalloy by cemented carbide tools, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 201, Issues 1-3, 26 May 2008, pp. 460-465.

همان‌طور که در تصاویر میکروسکوپ الکترونی نیز برای اینسرت‌های بدون پوشش ملاحظه می‌شود سایش خراشان و جوش خوردگی مکانیزم‌های عمده سایشی هستند که باعث ایجاد مقادیر زیادی لبه انباشته در لبه برشی اینسرت‌ها شده‌اند، نتیجه این امر ورقه‌ای شدن و ایجاد گودال فرسایشی است. اما در اینسرت‌ها با پوشش نانو کریستال عملکرد بهتری دیده می‌شود. در این نوع پوشش علاوه بر ریز بودن کریستال‌ها در مقیاس نانومتری که خود به افزایش سختی و کاهش ضریب اصطکاک منجر می‌شود، وجود درصد بالایی از آلومینیوم در پوشش TiAlN (با نسبت آلومینیوم به تیتانیوم ۶۰ به ۴۰) پایداری حرارتی بیشتری را فراهم می‌کند، زیرا تمایل به تشکیل لایه محافظ Al_2O_3 در حین فرایند ماشینکاری باعث ایجاد مقاومت بیشتر در مقابل سایش خراشان و چسبان می‌شود. از طرف دیگر رسانایی حرارتی کم TiAlN اتلاف حرارتی را کم کرده و شیب حرارتی بالایی را ایجاد می‌کند. این عامل منجر به ایجاد ترک‌های حرارتی خصوصاً در حضور تنش‌های پسماند منجر می‌شود [۷، ۱۴]. اما با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی شکل (۸) به علت نانو کریستال بودن ساختار پوشش چقرمگی آن نیز افزایش یافته است که این عامل باعث مقاومت بالای پوشش در برابر ترک‌های حرارتی و یا خستگی سطحی در حین عملیات ماشین‌کاری آلیاژ اینکونل 718 شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله ماشین‌کاری سوپر آلیاژ اینکونل 718 با اینسرت‌هایی با پوشش نانو کریستال با ترکیب TiAlN و اینسرت‌هایی بدون پوشش مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که عملکرد اینسرت‌ها با پوشش نانو کریستال به مراتب مطلوب‌تر از اینسرت‌های بدون پوشش است. وجود کریستال‌های نانومتری در ابعاد ۴۰-۱۵ نانومتر به همراه درصد بهینه‌ای از آلومینیوم در پوشش TiAlN، ترکیب مناسبی از مقاومت به سایش خراشان و چسبندگی به زیر لایه به همراه چقرمگی مطلوب را فراهم نموده است.

- alloyed TiAlN-based hard coatings, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 200, Issues 16-17, 27 April 2006, pp. 4693-4700.
- [14] Fox-Rabinovich G.S., Weatherly G.C., Dodonov A.I., Kovalev A.I., Shuster L.S., Veldhuis S.C., Dosbaeva G.K., Wainstein D.L., Migranov M.S., Nano-crystalline filtered arc deposited (FAD) TiAlN PVD coatings for high-speed machining applications, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 177-178, 30 January 2004, pp. 800-811.
- [15] Walsh R., Hndbook of Machining and Metalworking Calculations, ISBN-13: 978-0071360661, December 22, 2000.
- [16] Devia D.M., Restrepo-Parra E., Arango P.J., Tschiptschin A.P., Velez J.M., TiAlN coatings deposited by triode magnetron sputtering varying the bias voltage, *Applied Surface Science*, Vol. 257, Issue 14, 1 May 2011, pp. 6181-6185.
- [6] Kamata Y., Obikawa T., High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with defferent coated tools, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 192-193, October 2007, pp. 281-286.
- [7] Fox-Rabinovich G.S., Beake B.D., Endrion J.L., Veldhuis S.C., Parkinson R., Shuster L.S., Migranov M.S., Effect of mechanical properties measured at room and elevated temperatures on the wear resistance of cutting tools with TiAlN and AlCrN coatings, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 200, Issues 20-21, 22 May 2006, pp. 5738-5742.
- [8] Devillez A, Schneider F., Dominiak S., Dudzinski D., Larrouquere D., Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools, *Wear*, Vol. 262, Issues 7-8, 15 March 2007, pp. 931-942.
- [9] Ezugwu E.O., Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45 Issues 12-13, October 2005, pp. 1353-1367.
- [10] Biksa A., Yamamoto K., Dosbaeva G., Veldhuis S.C., Fox-Rabinovich G.S., Elfizy A., Wagg T., Shuster L.S., Wear behavior of adaptive nano-multilayered AlTiN/Me_xN PVD coatings during machining of aerospace alloys, *Tribology Interamntional*, Vol. 43, Issue 8, August 2010, pp. 1491-1499.
- [11] Prengel H.G., Jindal P.C., Wendt K.H., Santhanam A.T., Hegde P.L., Penich R.M., A new class of high performance PVD coatings for carbide cutting tools, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 139, Issue 1, May 2001, pp. 25-34.
- [12] Knutsson A, Johansson M.P., Karlsson L., Oden M., Machining performance and decomposition of TiAlN/TiN multilayer coated metal cutting inserts, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 205, Issue 16, 15 May 2011, pp. 4005-4010.
- [13] Derflinger V.H., Schutze A., Anter M., Mechanical and Structural properties of various