

## ارزیابی تنش پسماند در پوشش های پاشش حرارتی WC-Co با استفاده از سوراخکاری با تخلیه الکتریکی

حمید رضا سلیمی جزی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

مهدی جلالی عزیزپور و سلمان نوروزی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل

رسول محرمی

دانشکده مکانیک، دانشگاه زنجان

( دریافت مقاله : ۹۰/۰۷/۱۰ - پذیرش مقاله : ۹۰/۱۱/۲۴ )

### چکیده

تنش پسماند که در اثر انرژی جنبشی ذره در حین برخورد و همچنین اختلاف خصوصیات ترموفیزیکی پوشش و زیرلایه ایجاد می شود، خواص مکانیکی پوشش نظیر استحکام چسبندگی و رفتار خستگی را بشدت تحت تأثیر قرار می دهد. اندازه گیری تنش پسماند در امتداد ضخامت پوشش های سخت نظیر کاربید تنگستن - کبالت به علت ویژگی های منحصر به فرد آن همواره با محدودیت هایی روبرو بوده است. در این تحقیق، روش جدید و کارآمدی در اندازه گیری تنش پسماند پوشش کاربید تنگستن - کبالت حاصل از پاشش حرارتی با سرعت بالا و سوخت اکسیژن بر روی زیرلایه فولادی مورد بررسی قرار گرفته است. از روش ایجاد سوراخ با تخلیه الکتریکی بدین منظور استفاده شده و نتایج آن با نتیجه آزمون انحنا مقایسه گردید. آزمایشات میکروسختی سنجی، میکروسکوپی الکترونی روبشی جهت بررسی مورفولوژی پودر و پوشش و تعیین سختی پوشش و همچنین بررسی الگوی پراش پرتو X پودر و پوشش مورد استفاده قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می دهد که تنش در امتداد ضخامت پوشش یکنواخت نبوده و در نزدیکی فصل مشترک تنش فشاری بیشترین مقدار را دارد. تنش مؤثر فون میز میانگین معادل ۱۲۶MPa - با استفاده از روش ایجاد سوراخ بدست آمد که نزدیک به نتایج روش انحنا (۱۶۴ MPa -) در این مطالعه است. در هر دو روش تنش بصورت فشاری به دست آمد.

واژه های کلیدی: تنش پسماند، پاشش حرارتی، پوشش WC-12Co، سوراخکاری با تخلیه الکتریکی.

## Evaluation of through thickness residual stress in WC-Co coatings using electro discharge hole drilling method

M. Jalali Azizpour and S. Nourouzi

Department of mechanical engineering, Babol University of Technology, Babol

H. R Salimijazi

Department of materials engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan

R. Moharami

Department of mechanical engineering, Zanjan University, Zanjan,

(Received 1 Octobr 2011, accepted 12 February 2012)

### Abstract

Thermally sprayed coatings are inherently associated with residual stresses in the coatings. These stresses vary in nature and magnitude, and have a pronounced effect on the mechanical behavior of the system. This study develops the EDM drilling process to measure the residual stress in WC-Co thermally sprayed coatings, the stress state of which is difficult to obtain by a widely used method called high-speed hole-drilling method (ASTM Standard E837). The experimental results reveal that the stress curves are not uniform throughout the coating thickness. It has been found that the mean residual von Mises stress is of approximately 126MPa. Obtained results were confirmed by the value of the residual stress measured by postmortem curvature method in this study (-164MPa). This technique confirms the feasibility of residual stress measurement on HVOF thermally sprayed WC-Co coatings using ED-hole drilling method. Morphological and crystallographical studies were conducted using optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray diffraction, respectively, to evaluate the powder and coating characteristics.

**Keywords:** Residual Stress, Thermal Spray, WC-Co Coating, EDM, Rosette Strain Gage

**E-mail of corresponding author:** mahdi.jalali.azizpour@gmail.com

## مقدمه

ضخامت قابل دستیابی را تحت تأثیر قرار دهد [۵]. اندازه گیری تنش پسماند در سراسر ضخامت پوشش به روش متداول ایجاد سوراخ مطابق استاندارد ASTM-E837 به علت عدم امکان سوراخکاری پوشش های سرمت WC-Co میسر نیست. از طرفی اندازه گیری تنش پسماند به روش XRD به علت عمق نفوذ بسیار کم اشعه X (حدود ۳ میکرون) مستلزم عملیات آماده سازی دقیق و پرهزینه است [۶].

با توجه به اینکه ماشینکاری با تخلیه الکتریکی<sup>۳</sup> مستقل از خصوصیات مکانیکی نظیر سختی قطعه کار است، در این پژوهش ارزیابی تنش پسماند پوشش سخت کاربید تنگستن- کبالت به روش ایجاد سوراخ با تخلیه الکتریکی مورد توجه قرار گرفته است. نتایج روش سوراخکاری با نتایج آزمون انحناء و نتایج مطالعات پیشین اعتبار سازی شد. از آزمایشات میکروسختی سنجی و میکروسکوپی الکترونی روبشی جهت بررسی مورفولوژی پودر و پوشش استفاده شد. همچنین الگوی پراش پرتو X پودر و پوشش مورد بررسی قرار گرفت.

## مواد و روش آزمایش ها

از پودر آگلومره-زینتر WC-12Co در فرآیند پاشش حرارتی با سرعت بالا با تجهیز پاشش حرارتی METJETIII ساخت شرکت متالیزیشن استفاده شد. پارامترهای فرآیند در جدول ۱ نشان داده شده است. از فولاد پرمصرف AISI1045 نیز به عنوان زیرلایه استفاده شد. جهت اندازه گیری تنش پسماند به روش انحناء از زیرلایه به طول ۱۲۰ mm، عرض ۲۰ mm و ضخامت ۱/۲mm و برای روش ایجاد سوراخ از دیسک به قطر ۳۰mm و ضخامت ۱۰ mm استفاده شد. برای اندازه گیری انحناء از ماشین اندازه گیری مختصات<sup>۴</sup> استفاده شد. نمونه های آزمون پس از ماشینکاری با ذرات کاربید سیلیسیم با مش ۱۶ میکرون، سندبلاست شد. سپس نمونه ها در استون خالص به روش التراسونیک شستشو داده شده و پس از تمیزکاری با آب مقطر جهت انجام فرآیند پاشش دهی

پاشش حرارتی با سرعت بالا و سوخت اکسیژن<sup>۱</sup> در سال های اخیر پیشرفت های قابل توجهی یافته است. مزایای کاربرد پوشش دهی با این روش برای جایگزینی کروم سخت امروزه کاملاً پذیرفته شده است. سمی بودن حمام گالوانیزه و کروم شش ظرفیتی، مشکلات زیست محیطی مهمی را به همراه دارد که منجر به هزینه های بالای دفع زباله و حتی وضع محدودیت های قانونی شده است [۲و۱].

خواص مکانیکی و تریبولوژیکی پوشش تحت تأثیر طبیعت و اندازه تنش پسماند است. در فرآیندهای پاشش حرارتی، تنش پسماند قابل توجهی می تواند در حین فرآیند و در اثر انرژی حرارتی و جنبشی بالا و همچنین به دلیل اختلاف خواص ترموفیزیکی پوشش و زیرلایه ایجاد شود. حالت تنش پسماند نهایی جمع آثار تنش های با طبیعت های مختلف است:

- تنش های کوئچ (در حین رسوب)
- تنش های عدم انطباق حرارتی
- تنش های پینینگ<sup>۲</sup>
- تنش های سند بلاست (شن پاشی زیرلایه)

تنش های کوئچ ناشی از سرد شدن سریع ذرات مذاب هنگام برخورد به زیر لایه یا لایه قبلی پوشش است. تنش های عدم انطباق حرارتی در طول سرد شدن ثانویه پوشش به دلیل اختلاف ضرایب انبساط حرارتی بین هر لایه از پوشش و زیر لایه است [۳و۴]. تنش های پینینگ در فرآیند HVOF ناشی از سرعت بالای برخورد ذرات به زیرلایه است. این تنش ها باعث ایجاد تغییر شکل پلاستیک در سطح زیرلایه یا لایه پوشش داده شده قبلی می شود. طبیعت این نوع تنش ها بصورت فشاری است. توزیع تنش، شدت و علامت آن بشدت بستگی به نوع فرآیند پاشش و شرایط فرآیند دارد. تنش های پسماند می تواند رفتار خستگی و چسبندگی و

<sup>3</sup> - Electro Discharge Machining (EDM)

<sup>4</sup> - Coordinate Measurement Machine(CMM)

<sup>1</sup> - High Velocity Oxy-fuel(HVOF)

<sup>2</sup> - Peening

اشاره نمود. کاربرد تنگستن به تنهایی هادی جریان الکتریسته نیست ولی سرمت WC-12Co هدایت الکتریکی مناسبی برای عبور جریان و ایجاد جرقه دارد.

### نتایج و بحث

#### آنالیز پودر و پوشش

از پودر آگلومره- زینتر WC-12Co با اندازه ذرات بین ۱۵ تا ۴۵ میکرون استفاده شد. شکل ۱ مورفولوژی ذرات پودر را در دو بزرگنمایی با استفاده از میکروسکوپی الکترونی روبشی نشان می دهد که عموماً به شکل کروی است. در حین برخورد، کاربرد تنگستن ذراتی جامد در زمینه انعطاف پذیر کبالت هستند و در واقع ذرات در حین برخورد به صورت دو فازی جامد-مایع هستند.

در شکل ۲ الگوی پراش پرتو X پودر مورد استفاده نشان داده شده است. نتایج پراش سنجی، بیانگر وجود کبالت و کاربرد تنگستن در ترکیب پودر است. همچنان که مشاهده می شود پیک غالب مربوط به WC است.

در شکل ۳ نتیجه آزمون پراش پرتو X پوشش اعمالی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود علاوه بر فاز WC فازهای  $W_2C$  و  $Co_3W_3C$  نیز در پوشش وجود دارد. وجود فاز  $W_2C$  به میزان گرما دیدن پودر بستگی دارد. در سیستم های HVOF گازی تبدیل فاز WC بسیار بیشتر از زمانی است که از نفت سفید استفاده می شود. این بدان علت است که سوخت گازی، گرمای بیشتر و سرعت کمتری را به ذره می بخشد. همچنین محل تغذیه پودر نسبت به محفظه احتراق نیز حایز اهمیت است. علاوه بر فازهای مشاهده شده، فازهای نانو ساختار W-C-Co و یا کاربیدهای پیچیده  $Co_3W_6C_4$  ,  $Co_2W_4C$  ,  $Co_6W_6C$  نیز ممکن است ایجاد شود. درصد بالای این فازها می تواند خصوصیات تریبولوژیکی نظیر مقاومت سایشی پوشش را تحت تأثیر قرار دهد [۶-۸]. در شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در بزرگنمایی ۷۰۰۰ برابر از سطح مقطع پوشش نشان داده شده است. ساختار فشرده پوشش کاربرد تنگستن در زمینه

خشک شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی جهت بررسی ساختاری، مورفولوژی ذرات پودر، توپوگرافی سطح پوشش و بررسی فصل مشترک پوشش- زیرلایه استفاده شد. جهت بررسی فازهای پودر و پوشش از پراش سنج پرتو X نوع فیلیپس با طول موج ۱/۵۴ آنگسترون و تشعشع Cu-K $\alpha$  شد. جهت سختی سنجی و بدست آوردن پروفیل سختی نیز از میکروسختی سنجی با نیروی ۲/۹۴ نیوتن بهره لازم حاصل شد. سوراخکاری به روش تخلیه الکتریکی با دستگاه اسپارک ریوند محصول ایران در شرایط پرداخت کاری دقیق و با کرنش سه تایی روست<sup>۱</sup> مدل FRS-2-11 و دستگاه دینامیکی ثبت کرنش TML 221 انجام شد. از دی الکتریک گازوئیل (۸۰ درصد) و نفت (۲۰ درصد) در سوراخکاری الکتروفیزیکی استفاده شد. پارامترهای فرآیند EDM مورد استفاده در جدول ۲ درج شده است.

علاوه بر محدودیت ذکر شده در اندازه گیری تنش پسماند پوشش WC-Co به روش XRD ، می توان به لزوم هادی بودن ابزار و قطعه کار به عنوان محدودیت روش EDM

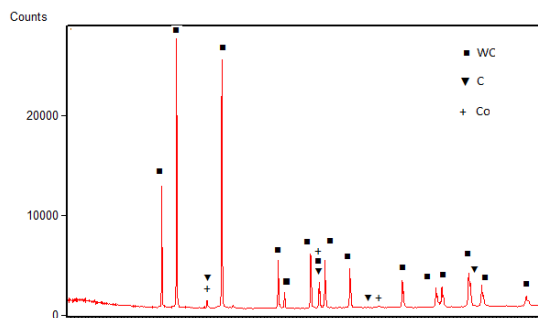
جدول ۱. شرایط پاشش حرارتی مورد استفاده

مقدار	پارامتر
۲۵۰ m l/min	نرخ سوخت
۸۳۰ l/min	نرخ اکسیژن
۲۲۰± ۲۰ mm	فاصله پاشش
۹۰	زاویه پاشش(درجه)

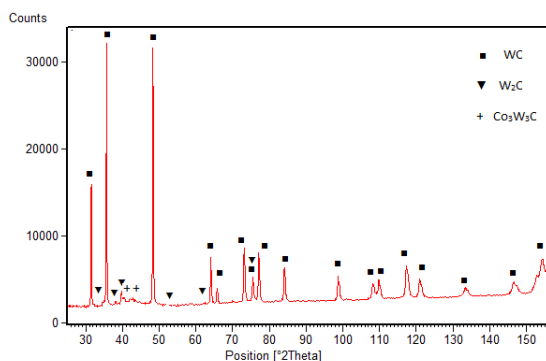
جدول ۲. پارامترهای فرآیند EDM

مقدار	پارامتر
۵۰ V	ولتاژ
۱ A	جریان
۲ $\mu$ s	زمان روشنی پالس
۲ $\mu$ s	زمان خاموشی پالس

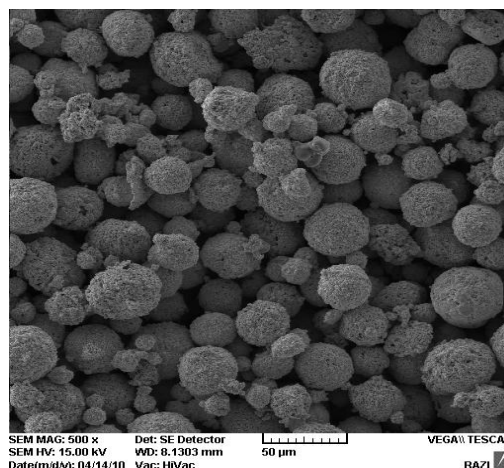
<sup>۱</sup> - Rosette



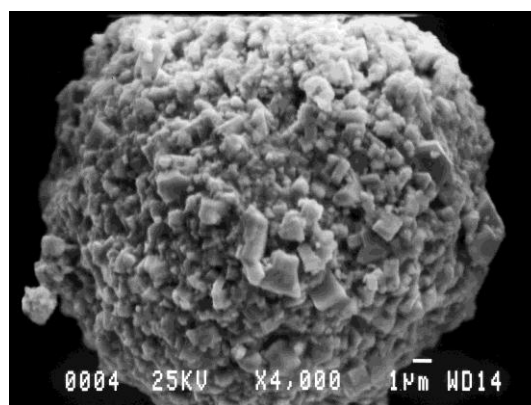
شکل ۲. الگوی پراش پرتو X پودر WC-12Co



شکل ۳. الگوی پراش پرتو X پوشش WC-12Co

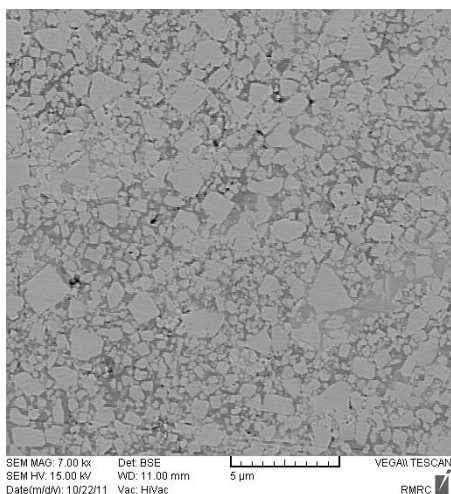


الف) بزرگنمایی ۵۰۰ برابر



ب) بزرگنمایی ۴۰۰۰ برابر

شکل ۱. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ذرات پودر



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پوشش

کبالت کاملاً مشخص است. تخلخل در نقاطی از پوشش نیز مشاهده می‌شود. تخلخل که ناشی از تمایل ذرات کاربید تنگستن برای رفتن به مرکز کلوخه است از خصوصیات بارز پوشش های حاصل از فرآیندهای پاشش حرارتی است. میزان تخلخل سطحی با استفاده از آنالیز تصویر کمتر از ۱ درصد بدست آمد.

در شکل ۵ توپوگرافی سطح پوشش قبل از عملیات پایانی در بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر نشان داده شده است. تخلخل سطحی و زبری سطح پوشش های پاشش حرارتی HVOF اگر چه کمتر از سایر روش های پاشش حرارتی است ولی عملیات پایانی جهت دستیابی به صافی سطح قابل قبول اجتناب ناپذیر است.

### پروفیل سختی

میکرو سختی سنجی ویکرز طبق استاندارد ASTM E384-10 با نیروی ۲/۹۴ N انجام شد. در شکل ۶ پروفیل سختی ویکرز پوشش اعمالی به ضخامت ۰/۹۸ mm نشان داده شده است. پروفیل سختی بدست آمده نشان می دهد که سختی پوشش در سرتاسر ضخامت بصورت یکنواخت نبوده و در

پوشش در رابطه (۱) معادله  $213 \text{ GPa}$  بدست آمد. مدول الاستیسیته پوشش در محاسبه ضرایب کالیبراسیون مورد استفاده قرار گرفت.

### تنش پسماند

روش های مختلف اندازه گیری تنش های پسماند را می توان به سه دسته کلی تقسیم بندی کرد:

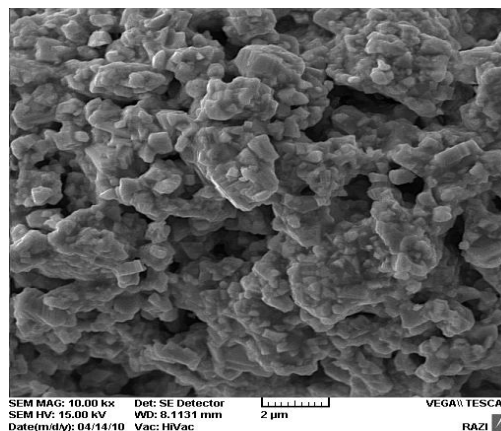
- اندازه گیری پارامترهای شبکه بلوری.
- اندازه گیری کرنش ها به دو روش برداشت لایه و ایجاد سوراخ.
- اندازه گیری انحناى زوج پوشش - زیرلایه.

روش های مذکور در اندازه گیری تنش های پسماند دارای مزایا و معایب ذاتی خاص خود هستند اگر چه روش های مبتنی بر تغییر پارامترهای شبکه بلوری و برداشت لایه هنگامی که به طور صحیح مورد استفاده قرار می گیرند دارای نتایج دقیق و روشنی هستند ولی آماده سازی نمونه و مراحل اندازه گیری معمولاً وقت گیر و پرهزینه است. در عوض روش اندازه گیری انحنا کم هزینه بوده و نیازمند مراحل کمتری در مرحله آماده سازی نمونه است. در روش ایجاد سوراخ از یک کرنش سنج سه تایی روست<sup>۱</sup> (شکل ۷) در سطح مورد نظر استفاده می شود. یک سوراخ در مرکز هندسی کرنش سنج ایجاد می شود که  $D$  قطر متوسط دایره ای است که کرنش ها روی محیط آن قرار دارند و  $D_0$  نیز قطر سوراخ است. تنش های پسماند در اطراف سوراخ ایجاد شده آزاد می شوند و کرنش های آزاد شده با یک وسیله ثبت کننده کرنش اندازه گیری می شوند. اندازه گیری این کرنش ها اطلاعات کافی برای محاسبه تنش های اصلی را در اختیار می گذارد [۶۵].

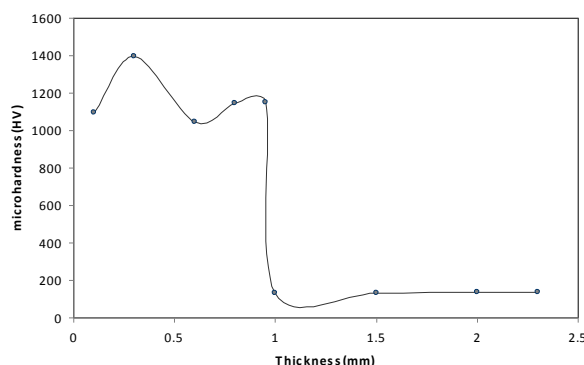
### روش انحنا

به منظور تخمین تنش پسماند در زوج پوشش - زیرلایه از روش اندازه گیری انحنا استفاده شد. از نمونه هایی به ابعاد  $1/2 \text{ mm}^3 * 20 * 120$  استفاده شد. پوشش به ضخامت  $20 \pm 350$  میکرون ایجاد شد. میزان تنش پسماند در زوج پوشش - زیرلایه را می توان با استفاده از رابطه استونی<sup>۲</sup> بدست آورد [۱۰].

فاصله  $0.3$  میلی متر از سطح پوشش دارای بیشترین مقدار (۱۳۹۷ ویکرز) است.



شکل ۵. توپوگرافی سطح پوشش در بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر



شکل ۶. پروفیل سختی پوشش

### اندازه گیری مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته پوشش با استفاده از معادله (۱) و اندازه گیری میکروسختی نوپ پوشش بدست می آید [۹].

$$E = \frac{\alpha HK}{(b/a) - (b'/a')} \quad (1)$$

که  $\alpha$  عدد ثابت و برابر  $0.45$ ،  $HK$  عدد سختی نوپ، نسبت قطر فرعی به اصلی فرورونده نوپ ( $b/a=1/7.11$ ) و  $b'/a'$  نسبت قطر فرعی به اصلی اثر است. میکرو سختی سنجی نوپ پوشش مطابق استاندارد ASTM E384-10 با نیروی  $0.2 \text{ Kg}$  انجام شد. متوسط میکروسختی نوپ برای  $10$  اثر با زمان اثرگذاری  $15$  ثانیه معادل  $1098 \pm 125$  نوپ بدست آمد. مدول الاستیسیته با قرار دادن عدد میکروسختی نوپ



جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده در رابطه انحناء

R(mm)	E <sub>s</sub> (GPa)	ν <sub>s</sub>	t <sub>c</sub>	t <sub>s</sub> (mm)
۱۲۵۰	۲۱۰	۰٫۳	۰٫۳۵	۱٫۲



شکل ۸. اندازه گیری شعاع انحناء با ماشین CMM

**روش ایجاد سوراخ به روش EDM**

در سوراخکاری با تخلیه الکتریکی ابزار به قطب مثبت و قطعه کار به قطب منفی جریان مستقیم وصل می شود. ابزار مسی و قطعه کار در دی الکتریک غوطه ور می شوند. هنگامی که ولتاژ در فاصله بین ابزار و قطعه کار به ولتاژ لازم برای شکست دی الکتریک رسید، مایع دی الکتریک در امتداد یک کانال باریک، هادی جریان الکتریسیته می شود و جرقه ای با انرژی و دمای بالا و متمرکز بین ابزار و قطعه کار ایجاد می شود. دمای کانال پلاسمای ایجاد شده بالغ بر ۲۰۰۰۰ °C است و بدین ترتیب باعث تبخیر نقاط مورد نظر قطعه کار می شود. در فرآیند EDM جهت جلوگیری از ایجاد جرقه پیوسته و گرم شدن دی الکتریک از ولتاژ پالسی منقطع استفاده می شود. به دلیل براده برداری غیر تماسی، رفتار و نرخ براده برداری مستقل از سختی قطعه کار است.

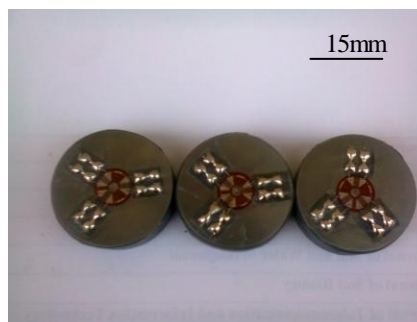
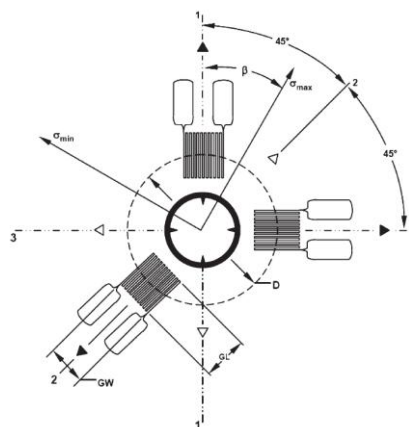
باتوجه به سختی بالای پوشش WC-Co امکان سوراخکاری و ارزیابی تنش در امتداد ضخامت پوشش وجود ندارد. بدین جهت از روش ماشینکاری با تخلیه الکتریکی جهت ایجاد سوراخ و کرنش سنج سه تایی روست به منظور بدست آوردن پروفیل تنش در امتداد ضخامت پوشش استفاده شد.

سه کرنش آزاد شده ε<sub>۱</sub>، ε<sub>۲</sub> و ε<sub>۳</sub> با کرنش سنج اندازه گیری شده و مقادیر تنش ماکزیمم و مینیمم با جایگذاری این مقادیر کرنش در رابطه ۳ بدست آمد [۱۱].

$$\sigma_r = -\frac{kE_s t_s^2}{6(1-\nu_s)t_c} \tag{۲}$$

$$k = \frac{1}{R}$$

که k انحنای نمونه، t<sub>c</sub> ضخامت پوشش، t<sub>s</sub> ضخامت زیرلایه، E<sub>s</sub> و ν<sub>s</sub> به ترتیب مدول الاستیسیته و نسبت پواسون زیرلایه است. میزان انحنای اولیه نمونه برابر صفر در نظر گرفته شد. ارزیابی انحنای نمونه بعد از سرد شدن نشان دهنده وجود تنش فشاری در پوشش بعد از اعمال پاشش HVOF بود. در جدول ۳ مقادیر مربوط به پارامترهای رابطه استونی آورده شده است. میزان انحناء با دستگاه اندازه گیری مختصات اندازه گیری شد (شکل ۸). میزان تنش پسماند برای پوشش های اعمالی با استفاده از رابطه استونی معادل ۱۶۴ MPa بدست آمد که با توجه به جهت انحنای نمونه (تحذب در پوشش)، تنش از نوع فشاری است.



شکل ۷. روش چسباندن کرنش سنج روست به سطح پوشش

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \sigma_2 = \sigma_3 \\ \sigma_1 &= 0 \end{aligned} \quad (۶)$$

تنش در ضخامت ۷۰-۵۰ میکرونی پوشش از نوع کششی است و از آنجا به بعد تماماً فشاری است. بیشترین تنش فشاری در عمق ۳۰۰ میکرونی پوشش و برابر ۲۷۰ MPa - بدست آمد. اختلاف تنش در ضخامت های مختلف می تواند نتیجه جمع آثار تنش های رسوب (کششی)، عدم انطباق حرارتی (فشاری) و تنش های پینینگ باشد. متوسط تنش دو محوری متقارن معادل ۱۲۶ MPa - به دست آمد.

وجود تنش های کششی نزدیک به سطح توسط استوک-لونی<sup>۱</sup> [۴] و وروالد<sup>۲</sup> [۱۲] و همچنین پیشینه بودن تنش های فشاری در فصل مشترک پوشش- زیرلایه توسط بانسال<sup>۳</sup> گزارش شده است [۱۴]. متوسط تنش فون میز در این مطالعه با توجه به حالت تنش، معادل ۱۲۶ MPa - محاسبه گردید.

همانطور که در مراجع مختلف ذکر شده است دقت روش اندازه گیری به روش EDM در مورد فولاد سخت شده، حدود  $\pm 28 \text{Mpa}$  است که نزدیک به دقت روش استاندارد فرزکاری با دور بالا (۳۰۰/۰۰۰ rpm) است [۱۴]. دقت اندازه گیری تنش به میزان انرژی جرقه بستگی دارد به همین دلیل در این مطالعه پارامترهای فرآیند (آمپراژ و فرکانس پالس) به نحوی انتخاب شد تا جرقه، کمترین انرژی ممکن را داشته باشد. جریان ۱ آمپر با زمان روشنی پالس ۲ میکروثانیه و زمان خاموشی پالس ۲ میکروثانیه کمترین انرژی جرقه را در سوراخکاری پوشش مورد نظر ایجاد می نماید. بدین ترتیب، انرژی جرقه در این تحقیق، کمتر از انرژی جرقه در مطالعات دیگران در روش سوراخکاری با تخلیه الکتریکی است.

روش انحناء برای پوشش به ضخامت ۳۵۰ میکرون در شرایط پاشش یکسان، میزان تنش فشاری را ۱۶۴ MPa پیش بینی می کند که نزدیک به نتایج ایجاد سوراخ با تخلیه الکتریکی

$$\sigma_{\min, \max} = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{4A} \pm \sqrt{\frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}{4B}} \quad (۳)$$

ثوابت کالیبراسیون هستند و علامت آنها منفی است. این ثوابت با توجه به خواص مکانیکی پوشش و پارامترهای سوراخ ایجاد شده در پوشش و از رابطه ۴ بدست می آیند.

$$\begin{aligned} \bar{A} &= -\left[\frac{1+\nu}{2E}\right] \bar{a} \\ \bar{B} &= -\left[\frac{1}{2E}\right] \bar{b} \end{aligned} \quad (۴)$$

در جدول ۴ پارامترهای مورد استفاده در محاسبات ثوابت کالیبراسیون درج شده است. ضرایب  $\bar{a}$  و  $\bar{b}$  از استاندارد ASTM E837 و با توجه به قطر سوراخ ایجاد شده بدست آمده اند [۱۱].

جدول ۴. پارامترهای مورد استفاده در محاسبه ثوابت کالیبراسیون

$\bar{a}$	$\bar{b}$	E(GPa)	$\nu$
۰/۸۱۱	۰/۲۲۸	۲۱۳	۰/۲۵ [۱۱]

در شکل ۹ کرنش های آزاد شده که با کرنش سنج سه تایی روست اندازه گیری شده اند نشان داده شده است. کرنش های اندازه گیری شده در هر سه کرنش سنج با علامت مثبت بوده و این امر بیانگر تنش های فشاری در پوشش است. در فاصله ۷۰-۵۰ میکرون از سطح پوشش، مقادیر منفی کرنش از هر سه کرنش سنج بدست آمد که بیانگر وجود تنش پسماند کششی در این محدوده است. شکل ۱۰ توزیع تنش های اندازه گیری شده را نسبت به ضخامت در پوشش کاربرد تنگستن-کبالت اعمال شده به روش HVOF نشان می دهد. تنش مؤثر فون میز از رابطه ۵ بدست می آید:

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{1/2} \quad (۵)$$

نتایج آزمایش نشان می دهد که تنش های موازی سطح با یکدیگر برابرند ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) و با توجه به اینکه مؤلفه تنش عمود بر سطح برابر صفر است ( $\sigma_1 = 0$ )، لذا تنش مؤثر برابر تنش های در جهت ۲ و ۳ است:

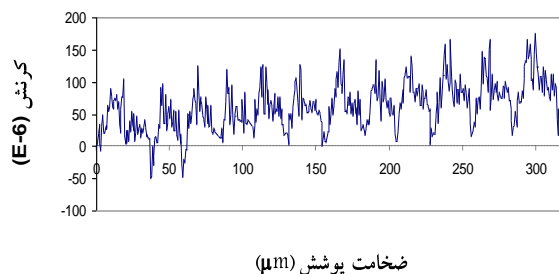
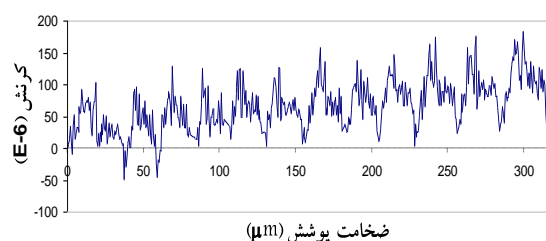
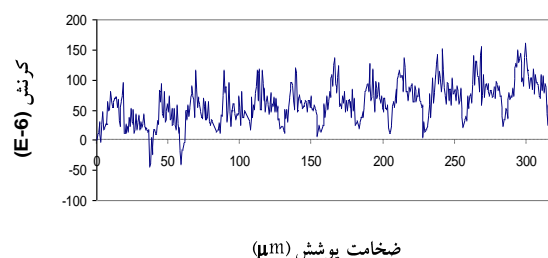
در جدول ۵ نتایج بررسی تنش پسماند به روش ایجاد سوراخ با روش اندازه گیری انحناء در این مطالعه و همچنین با نتایج مطالعات دیگران [۶] جهت اعتبار بخشی به نتایج آزمون مقایسه شده است. به نظر می رسد که نتایج آزمایش اندازه گیری تنش پسماند به روش EDM از دقت قابل قبولی برخوردار است.

جدول ۵. مقایسه نتایج این مطالعه و سایر مطالعات [۶].

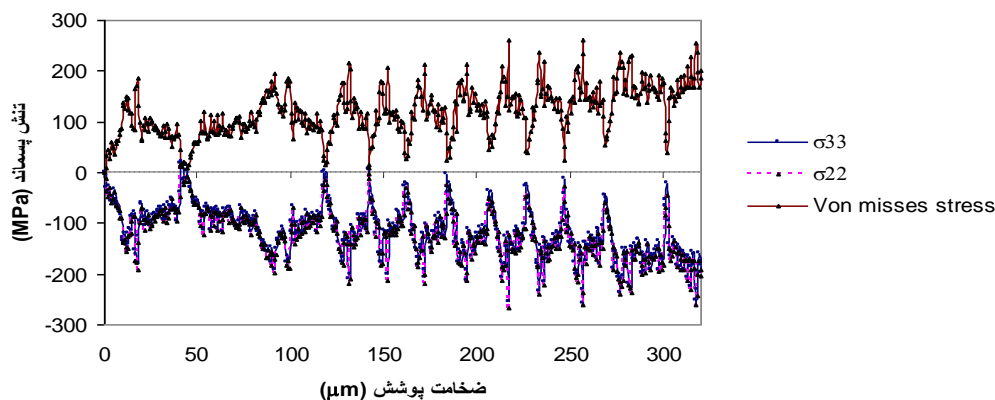
فرزکاری	XRD	انحناء	EDM
$107 \pm 30$	$-183 \pm 50$	-۱۶۴	-۱۲۶

نتایج آزمون تنش پسماند با سوراخکاری تخلیه الکتریکی و فرزکاری به صورت تنش مؤثر و با مقدار مطلق گزارش می شود. تنش فشاری که در اثر سرعت بالای ذرات در پوشش ایجاد شده است با به تأخیر انداختن جوانه زنی ترک در پوشش و سطح زیرلایه باعث بهبود رفتار خستگی قطعات پوشش داده شده می شود و اثرات مخرب زبرسازی بر حد خستگی را تا حدی جبران می نماید [۱۶]. این در حالی است که در پوشش سرمت WC-Co حاصل از فرآیند پاشش پلاسمایی به علت دمای بالا و سرعت پایین تر ذرات، تنش پسماند در پوشش بصورت کششی است [۱۷]. بدین ترتیب می توان به این نکته نیز اشاره نمود که نتیجه اندازه گیری تنش پسماند علاوه بر روش اندازه گیری مورد استفاده به فرآیند پاشش حرارتی مورد استفاده نیز بستگی دارد.

است. بررسی سانتانا [۶] تنش فون میزز را معادل ۱۸۰ مگاپاسکال در پوشش های WC-12Co با ضخامت ۳۵۰ میکرون نشان می دهد [۶].



شکل ۹. مقادیر کرنش آزاد شده (محاسبه شده با سه کرنش سنج)



شکل ۱۰. تغییرات تنش پسماند در امتداد ضخامت پوشش



## نتیجه گیری

مشخصات پوشش WC-۱۲Co و تنش باقیمانده در آن به روش سوراخکاری الکتروفیزیکی و انحناء مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

۱- تنش پسماند موجود در پوشش WC-۱۲Co اعمال شده به روش HVOF به صورت غیر یکنواخت و به جز در عمقی از پوشش که نزدیک به سطح است بیشتر از نوع فشاری است.  
۲- مقدار تنش فشاری از سطح پوشش به سمت فصل مشترک بیشتر می شود و در فصل مشترک به بیشترین مقدار خود می رسد. میانگین تنش پسماند مؤثر در روش EDM معادل ۱۲۶MPa بدست آمد.

۳- مقایسه نتایج اندازه گیری تنش به روش EDM با نتایج روش انحناء و مطالعات پیشین نشان می دهد که این روش از دقت خوبی برخوردار است.

## تشکر و قدردانی

از کادر فنی و مدیریت محترم شرکت پودرافشان و همچنین شرکت یدک ساز قالب صمیمانه قدردانی می شود.

## منابع

- M. Heydarzadeh Sohi and F. Ghadami, *Comparative tribological study of air plasma sprayed WC-12%Co coating versus conventional hard chromium electrodeposit*, Tribology International, 43,(2010),882-886.
- T. Sahraoui, S. Guessasma, M. A. Jeridane and M. Hadji, *HVOF sprayed WC-Co coatings: Microstructure, mechanical properties and friction moment prediction*, Materials and Design 31 (2010) 1431-1437
- Y. C. Tsui and T. W. Clyne, *An analytical model for prediction residual stresses in progressively deposited coatings*, Thin solid films 306(1997)23-33
- J. Stokes and L. Looney, *Residual stress in HVOF thermally sprayed thick deposits*, Surface and Coatings Technology 177 -178 (2004)18-23
- C. Lyphout, *Residual Stresses Distribution through Thick HVOF Sprayed Inconel 718 Coatings*, Journal of Thermal Spray Technology, 17(2008)915-923.
- Y. Y. Santana, *Characterization and residual stresses of WC-Co thermally sprayed coatings*, Surface & Coatings Technology 202(2008) 4560-4565
- H. L. de Villiers Lovelock, P. W. Richter, J. M. Benson, and P. M. Young, *Parameter Study of HP/HVOF Deposited WC-Co Coatings*, Journal of Thermal Spray Technology, 7(1) 1998-97.
- J. A. Picas, Y. Xiong, M. Punset, L. Ajdelsztajn, A. Forn and J. M. Schoenung, *Microstructure and wear resistance of WC-Co by three consolidation processing techniques*, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 27(2009),344-349.
- L. C. Erickson, H. M. Hawthorne and T. Troczynski, *Wear* 250 (2001) 569.
- T. C. Totemeier, R. N. Wright, *Surface and Coatings Technology* 200 (12-13) (2006) 3955.
- Standard Test Method for Determining Residual Stresses by Hole drilling Strain Gage Method. ASTM E837, 1995.
- H. J. C. Voorwald, R. C. Souza, W. L. Pigatin and M. O. H. Cioffi, *Surface and Coatings Technology*, 190 (2005) 155.
- M. Toparli, F. Sen, O. Culha and E. Celik, *Thermal stress analysis of HVOF sprayed WC-Co/NiAl multilayer coatings on stainless steel substrate using finite element methods*, J. Mater. Process. Tech. 190 (2007).
- P. Bansal, P. H. Shipway and S. B. Leen, *Residual stresses in high-velocity oxy-fuel thermally sprayed coatings – Modelling the effect of particle velocity and temperature during the spraying process*, Acta Materialia, 55(2007), 5089-5101
- H. T. Lee and F. C. Hsu, *The feasible evaluation of EDM hole-drilling method for residual stress measurement*, Journal of Materials Science and Technology. 19 (9)(2003) 1261-1265.
- Cabrera, M. H. Staia, *Fatigue behavior of a SAE 1045 steel coated with colmonoy 88 alloy deposited by HVOF thermal spray*, Surface & Coatings Technology, 205 (2010)1119-1126
- J. Pina, A. Dias and J. L. Lebrun, *Study by X-ray diffraction and mechanical analysis of the residual stress generation during thermal spraying*, Materials Science and Engineering A347 (2003)21-31.