

ارزیابی تنش‌های پسماند در پوشش کاربید تنگستن کبالت حاصل از فرآیند HVOF با استفاده از روش XRD

رباب ثالث^۱، سلمان نوروزی^۲

۱- کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد مهندسی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل (robab_sls@yahoo.com)

۲- دانشیار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل (s_nourouzi@nit.ac.ir)

Residual Stresses Evaluation in Tungsten Carbide Cobalt Coating from HVOF Process Using XRD Method

R. Saless¹, S. nourouzi²

1- M.S., Identification and Selection of Engineering Materials, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, E-Mail: robab_sls@yahoo.com

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, E-Mail: s_nourouzi@nit.ac.ir

چکیده

تنش‌های پسماند، خاصیت جدایی‌ناپذیر پوشش‌های پاشش حرارتی مانند پوشش‌های کاربید تنگستن کبالت، بسته به حالت-شان می‌توانند برای عملکرد و عمر قطعه زیان‌بار یا مفید باشند. در پژوهش حاضر، هدف بررسی تنش‌های پسماند در راستای ضخامت پوشش پاشش حرارتی WC-12Co حاصل از فرآیند HVOF بود. این تنش‌ها با استفاده از پراش پرتو X در سطح آزاد پوشش و در راستای ضخامت پوشش در عمق‌های ۵۰، ۱۵۰، ۲۳۰ و ۳۰۰ میکرومتر بررسی شدند. تنش پسماند در عمق ۵۰ میکرومتر کششی و در سطح آزاد پوشش و در عمق‌های دیگر فشاری به دست آمد. دیده شد که با نزدیک شدن به فصل مشترک بعد از ۵۰ میکرومتر بزرگی تنش افزایش می‌یابد که علت آن غالب بودن تنش پینینگ و تنش عدم تطابق حرارتی بر تنش‌های کوئنچ است. متوسط تنش پسماند در امتداد ضخامت برابر $157/1$ MPa - و فشاری به دست آمد که برای کارکرد قطعه مفید است. واژه‌های کلیدی: تنش‌های پسماند، پوشش‌های کاربید تنگستن کبالت، HVOF، تحلیل تنش با پراش پرتو X، پوشش‌های پاشش حرارتی.

Abstract

Residual stresses, that are inherent in thermal spray coatings as in tungsten carbide cobalt thermal coatings, can be useful or damaging for efficiency and life of specimen relate to their state. The present investigation has been done in order to determine the residual stresses through thickness in WC-12Co thermal spray coating from HVOF Process. These stresses were determined in surface of coating and through the thickness in 50, 150, 230 and 300 μm depths. Residual stresses were obtained tensile in 50 μm depth and compressive for surface of coating and other depths. It was observed that by approaching to the interface, further 50 μm , the magnitudes of stresses increase because the peening and thermal mismatch stresses dominant the quenching stresses. The average residual stress through coating thickness was calculated -157.1 MPa and compressive that is useful for the efficiency of specimen.

Keywords: Residual stresses, Tungsten carbide cobalt coatings, HVOF, X-ray diffraction stress analysis, Thermal spray coating.

(کد: ۹۱۱۰۶۲)

از پراش پرتو X و روش $\text{Sin}^2\psi$ استفاده می‌شود. در این تحقیق، از K_α تابش از منبع مس اشعه X برای اندازه‌گیری‌ها استفاده می‌شود. اندازه‌گیری‌های تنش پسماند توسط ارزیابی تغییرات در فاصله d صفحات کریستالوگرافی (0.30) مربوط به پیک $2\theta = 133/48^\circ$ و (112) مربوط به پیک $2\theta = 98/7^\circ$ که مربوط به فاز غالب WC است انجام می‌گیرد. سپس با محاسبه کرنش و استفاده از روش $\text{Sin}^2\psi$ نموداری برای داده‌ها رسم می‌شود و پس از آن با به دست آوردن شیب نمودار $\text{Sin}^2\psi$ -کرنش و داشتن مدول الاستیسیته تنش محاسبه می‌شود. برای بررسی تنش در راستای ضخامت تنش‌های پسماند در سطح آزاد پوشش و در عمق‌های 50 ، 150 ، 230 و 300 میکرون محاسبه و سپس با توجه به منشأهای اصلی برای تنش‌های پسماند در این سیستم تحلیل می‌شوند.

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش نمونه فولادی AISI1045 پس از آماده‌سازی برای پوشش‌دهی با استفاده از فرآیند HVOF پوشش داده شد. در این فرآیند از تجهیز پاشش حرارتی METJET III ساخت شرکت متالیزیشن استفاده شد و نفت سفید (سوخت جت) با نرخ جریان $\text{lit}/250 \text{ min}$ به عنوان سوخت به کار برده شد. نرخ جریان اکسیژن $\text{lit}/820 \text{ min}$ پاشش با زاویه 90° درجه و با فاصله $220 \pm 20 \text{ mm}$ انجام شد و از روانکار روغن استفاده شد. از پودر آگلومره-زینتر کاربید تنگستن کبالت (WC-12Co) با قطر متوسط ذرات $24/7$ میکرومتر با نام تجاری (WOKA 80.71.1) استفاده شد. ترکیب شیمیایی پودر مورد استفاده توسط دستگاه کوانتومتری آنالیز شد. از دستگاه X-ray tube: Cu ($K\alpha = 1.54 \text{ \AA}$) و X>Pert Pro MPD (PANalytical) برای آنالیز فازی پودر استفاده شد. الگوی پراش اشعه X برای پودر به دست آمد و نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی تصاویر SEM و آشکارساز Secondary Electron تصاویر SEM از پودر مورد استفاده گرفته شد.

آماده‌سازی نمونه‌ی زیرلایه شامل ماشین‌کاری، سندبلاست و تمیزکاری است. نمونه آزمون پس از ماشین‌کاری با ذرات کاربید سیلیسیم با مش 16 میکرومتر، سندبلاست شد. سپس در استون خالص به روش اولتراسونیک شستشو داده شده و پس از تمیزکاری با آب مقطر جهت انجام فرآیند پوشش‌دهی خشک شد. نمونه‌ها پس از پوشش‌دهی با دستگاه وایرکات به ابعاد $6 \times 20 \times 20 \text{ mm}$ بریده شدند. سپس نمونه‌ها دو دسته شدند. دسته اول به منظور آماده‌سازی برای متالوگرافی، تهیه تصاویر SEM، سختی‌سنجی و اندازه‌گیری مدول الاستیک و دسته دوم به منظور برداشت از ضخامت پوشش و متالوگرافی برای مطالعه تنش با استفاده از پراش اشعه X .

استفاده روزافزون از پوشش‌های پاشش حرارتی، به ویژه برای مقاومت در محیط دما بالا، نیازمند اطمینان به دوام پوشش است که شامل مقاومت در برابر ترک، جدایی اتصال پوشش و زیرلایه و پوسته پوسته شدن می‌باشد. تنش‌های پسماند نقش مهمی در دوام پوشش‌ها بازی می‌کنند. تنش‌های پسماند در این پوشش‌ها ممکن است کششی یا فشاری باشند. تنش‌های پسماند کششی به طور معمول امکان رخداد ترک و جدایی را افزایش می‌دهند. این تنش‌ها می‌توانند برای عملکرد ماده و عمر قطعه بسیار زیان‌بار باشند. از طرف دیگر تنش‌های پسماند فشاری که غالباً برای قطعه مفید هستند را می‌توان تماماً ایجاد کرد. پیش‌بینی تنش‌های پسماند سخت‌تر از تنش‌های است که حین کار اعمال می‌شوند. پس تعیین تنش‌های پسماند با استفاده از روش‌هایی مطمئن در فرآیندهای پاشش حرارتی هدف مهمی است چرا که وجود سطوح تنش پسماند در پوشش‌ها و علامت آن‌ها اثر قابل توجهی بر عملکرد پوشش دارد (Greving, Rybicki, Shadley, Xiong, 1994; Totemeier & Wright, 2006).

مطالعات بسیاری به اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در پوشش‌ها اختصاص داده شده‌اند. چندین روش مختلف اندازه‌گیری تنش پسماند توسعه یافته است؛ این روش‌ها را به سختی می‌توان در سه دسته طبقه‌بندی کرد: اندازه‌گیری پارامترهای شبکه کریستالوگرافی، اندازه‌گیری کرنش‌ها بعد از لایه‌برداری یا حفر سوراخ، و اندازه‌گیری خمش متناسب با اندازه زوج پوشش-زیرلایه. تعیین تنش‌های پسماند در مواد می‌تواند با استفاده از هر دو روش‌های مخرب و غیرمخرب انجام شود. پراش اشعه X روش غیر-مخرب است که غالباً مورد استفاده است و معمولاً اطلاعاتی در نقاط بسیار نزدیک به سطح به دست می‌دهد و نیازمند دانشی صحیح از خواص مکانیکی ماده مورد ارزیابی است. به طور کلی، اندازه‌گیری تنش پسماند شامل تعیین خواص فیزیکی ماده تحت تنش و سپس مقایسه آن با حالت بی‌تنشی برای همان ماده است (Withers & Bhadeshia, 2001; Totemeier & Wright, 2006).

در این پروژه کاربید تنگستن کبالت (WC-12Co) به روش HVOF بر روی زیرلایه فولاد CK45 پوشش داده شد. پوشش‌های کاربید تنگستن کبالت پاشش حرارتی در گستره وسیعی از کاربردها برای مقاومت در برابر شرایط شدید سایشی استفاده می‌شوند زیرا ذرات سخت کاربید تنگستن موجود در این پوشش‌ها منجر به سختی بالای پوشش و بنابراین مقاومت سایشی بالای آن می‌شود، در حالی که بایندر فلزی کبالت تأمین‌کننده چقرمگی مورد نیاز پوشش است. به منظور بررسی تنش‌های پسماند در این پوشش

جهت آماده سازی نمونه‌ها پس از سنگزنی پرداخت از سنباده الماسه شماره ۴۰۰ تا ۸۰۰ با کد تجاری ۰۴۰۳۴۷۵ و ۰۴۰۳۴۷۶ برای سنباده‌زنی استفاده شد و سپس پولیش با خمیر الماسه ۳ و ۷ میکرون انجام شد. چند نمونه از سری اول برای مطالعه سطح مقطع و چند نمونه نیز برای مطالعه سطح پوشش پس از سنگزنی پرداخت مانت شدند و سپس با استفاده از سنباده شماره ۴۰۰، ۶۰۰ و ۸۰۰ و بعد با خمیر الماسه ۷ میکرون پولیش شدند. سری دوم نمونه‌ها به منظور ارزیابی تنش در راستای ضخامت پوشش برای رسیدن به عمق‌های مورد نظر در پوشش پس از ضخامت‌سنجی پوشش مورد سنگزنی قرار گرفتند. به منظور به دست آوردن تنش در عمق‌های مختلف از پوشش باید با سنگزنی و سپس برای از بین بردن اثر سنگزنی که تا چند میکرومتر است با سنباده‌زنی و پولیش، ضخامت نهایی مورد نظر به دست می‌آید. لذا بعد از سنگزنی به منظور از بین بردن لایه متأثر از سنگزنی در سطح پوشش از سنباده الماسه شماره ۶۰۰ استفاده شد و سپس با خمیر الماسه ۱۰ میکرون پولیش شد. برای بررسی ریزساختار از تصاویر به دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بهره برده شد. در سنگزنی عمق بار در هر باردهی ۵ میکرومتر و از روانکار پایه آبی با روغن حل‌شونده BCS-100 استفاده شد.

اندازه گیری مدول الاستیسیته شامل دو مرحله می‌شود:

الف- به دست آوردن سختی پوشش: میکرو سختی‌سنجی ویکرز طبق استاندارد ASTM E384-10 با نیروی ۰/۳ Kg.f انجام شد. زمان اثرگذاری ۱۵ ثانیه انتخاب شد. میکرو سختی‌سنجی نوپ نیز طبق استاندارد ASTM E384-10 با نیروی ۰/۲ Kg.f انجام شد. در اندازه‌گیری سختی پوشش، به علت حساسیت سختی نوپ به قطر اصلی، قطر بزرگتر فرورونده باید موازی فصل مشترک باشد (Wang et al., 2010). برای هر کدام از روش‌ها ۷ اثر مناسب انتخاب شد و میانگین سختی این ۷ اثر به عنوان سختی در نظر گرفته شد.

ب- به دست آوردن نسبت قطر فرعی به اصلی اثر نوپ: با اثر گذاری نوپ نسبت قطر فرعی به اصلی اثر نوپ به دست آمد. از نتایج ۱۰ اثر نوپ به منظور اندازه‌گیری اثر استفاده شد. سپس مدول الاستیسیته پوشش با استفاده از بازگشت الاستیک اثر نوپ و با استفاده از معادله (۱) و با داشتن عدد سختی نوپ پوشش بدست می‌آید (HK عدد میکروسختی و E مدول الاستیسیته است).

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

که α عدد ثابت و برابر ۰/۴۵، HK عدد سختی نوپ، نسبت قطر فرعی به اصلی فرورونده نوپ (b/a=1/7.11) و b'/a' نسبت قطر

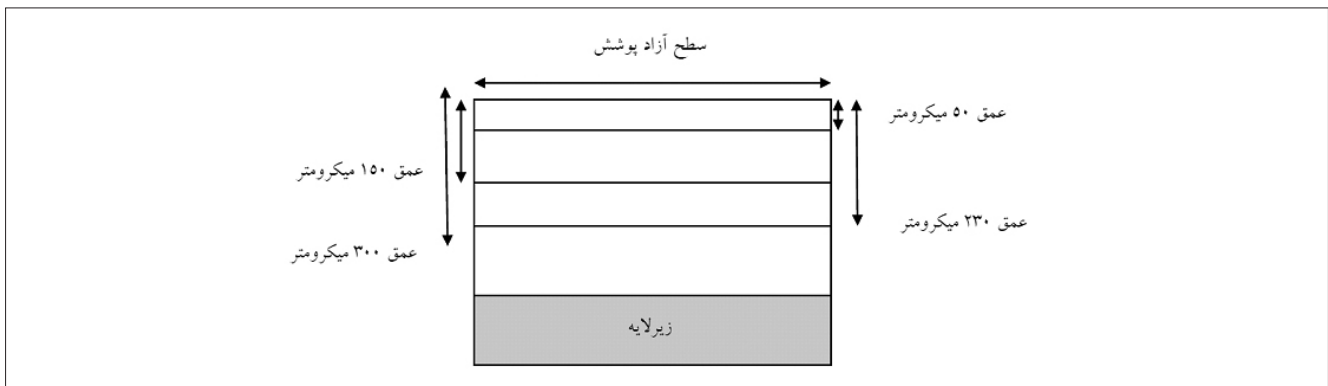
فرعی به اصلی اثر است. عدد میکرو سختی (H) می‌تواند از سختی سنجی نوپ و یا ویکرز بدست آید. با این وجود b'/a' از اثر نوپ اندازه‌گیری می‌شود (Wang et al., 2010). جهت بررسی آنالیز فازی در پودر و پوشش و همچنین اندازه‌گیری تنش پسماند در سطح و امتداد ضخامت از پراش‌سنج پرتو X نوع ۱۱۰۷۹۵۳۵ با جریان ۴۰ mA، ولتاژ ۴۰ kV، طول موج ۱/۵۴ آنگستروم، تشعشع Cu-K α و سطح تابش ۱۰ mm² استفاده شد. از سیستم X^{pert} و نرم‌افزار PANALYTICAL برای آنالیز فازی استفاده شد.

در اندازه‌گیری تنش پسماند به روش پراش پرتو X در سطوح مختلف به ترتیب زیر به منظور ارزیابی تنش در امتداد ضخامت استفاده شد:

- اندازه‌گیری تنش پسماند در سطح آزاد پوشش بدون عملیات آماده‌سازی.

- اندازه‌گیری تنش پسماند پوشش در عمق‌های ۵۰، ۱۵۰، ۲۳۰ و ۳۰۰ میکرومتر، پس از سنگزنی، سنباده‌زنی با سنباده الماسه و پولیش با خمیر الماسه (شکل ۱).

از آنجایی که عمق نفوذ پراش اشعه X کم انرژی با استفاده از طول موج تابش مرسوم K α -Cu بسته به نوع مواد مورد استفاده به چند ده میکرومتر محدود می‌شود، اندازه‌گیری تنش پسماند پوشش در عمق‌ها پس از سنگزنی، سنباده‌کاری با سنباده الماسه و پولیش با خمیر الماسه انجام شد. در اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند با استفاده از پراش اشعه X، کرنش باید در چندین زاویه ψ از یک سری صفحات کریستالوگرافی هم‌خانواده اندازه گرفته شود. شیب خط مستقیم نمودار $[\ln(\frac{d\phi\psi}{d_0})]$ در مقابل $\sin^2\psi$ تعیین می‌شود. تنش پسماند با استفاده از شیب خط و ثوابت الاستیک اشعه X ماده محاسبه می‌شود. لذا در اندازه‌گیری‌های این پژوهش، یک پراش‌سنج اشعه X به کار گرفته شد که به طور ویژه‌ای برای اندازه‌گیری تنش پسماند طراحی شده بود. این پراش-سنج دو آشکارساز خطی برای پوشش دادن زوایای $\psi > 0$ و $\psi < 0$ دارد. لذا در اندازه‌گیری تنش پسماند، زاویه پراش و فاصله صفحات اتمی در زوایای ψ به ترتیبی انتخاب شد که مقادیر $\sin^2\psi$ از صفر تا ۰/۸ افزایش یابد. آزمون در زوایای $\psi > 0$ و $\psi < 0$ انجام شد. از بازتاب (۰۳۰) مربوط به پیک $2\theta = 133/48^\circ$ و بازتاب (۱۱۲) مربوط به پیک $2\theta = 98/7^\circ$ که مربوط به فاز غالب WC است بدین منظور استفاده شد. آزمایش پراش‌سنجی پرتو X بر حدود یک سانتیمتر مربع از وسط سطح نمونه صورت گرفت. با توجه به معادله (۲) برای عمق نفوذ پرتو X، برای زاویه پراش $2\theta = 133/48^\circ$ ، ۷۲ درصد از پرتوهای تابیده شده از ضخامت ۲/۵۴ میکرومتر پراش می‌شود یعنی عمق نفوذ آن ۲/۵۴ میکرومتر خواهد بود و مابقی عبور می‌کنند. بیش از ۹۰٪



شکل ۱- تصویر شماتیک از عمق‌های مختلف مد نظر برای اندازه‌گیری تنش پسماند

جدول ۱- ترکیب شیمیایی پودر مورد استفاده

W	Fe	(C(t	Co	عنصر
Balance	۰/۲	۵/۰-۵/۸	۱۱/۵-۱۳/۵	مقدار(درصد)

دقت‌خوبی قابل قبول است. از طرف دیگر، عملیات سطحی نظیر سندبلاست و نیز خود فرآیند پاشش که به صورت لایه‌نشانی است باعث ایجاد حالت تنش دو محوری متقارن در سطح می‌شود. در حالت تنش صفحه‌ای $\sigma_1 = \sigma_2$ ، می‌توان از تنش برشی در صفحه $\sigma_1 \sigma_2$ صرف‌نظر کرد و از طرفی برای اندازه‌گیری تنش پسماند در عمق‌های بالا با پرتو X نیاز به لایه‌برداری توسط سنگ-زنی خواهد بود. بنابراین کافی است تک تنش $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_\psi$ اندازه‌گیری شود.

- کرنش از رابطه $\epsilon = \ln(d_\psi/d_0)$ به دست می‌آید. معمولاً از d اندازه‌گیری شده در $\psi = 0$ به جای d_0 می‌توان استفاده کرد.

- آماده‌سازی مکانیکی با سنباده الماسه و سپس پولیش باعث حذف لایه‌های متأثر از سنگ‌زنی می‌شود بنابراین تنش‌های ناشی از سنگ‌زنی مدنظر قرار نمی‌گیرند.

- تنش پسماند از معادله (۴) و با قرار دادن شیب نمودار $\epsilon - \sin^2 \psi$ در این معادله به دست می‌آید (He, 2009).

نتایج و بحث

- مورفولوژی و آنالیز فازی پودر ترکیب شیمیایی پودر مورد استفاده توسط دستگاه کوانتومتری آنالیز شد (جدول ۱).

الگوی پراش اشعه X به منظور آنالیز فازی برای پودر آگلومره-زینتر WC-12Co به دست آمد (شکل ۲-الف). دیده می‌شود که فازهای اصلی کاربید تنگستن، کربن و کبالت می‌باشند.

در شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پودر که با استفاده از آشکارساز الکترون ثانویه (Secondary Electron) به دست آمد نشان داده شده است. تصاویر SEM در شکل با بزرگنمایی‌های

از پرتو تابیده شده به سطح پوشش نیز از ضخامت ۵ میکرومتر پراش می‌شود. برای زاویه پراش $\theta = 9.8/7^\circ$ ، $2\theta = 19.6^\circ$ درصد از پرتوهای تابیده شده از ضخامت ۲ میکرومتری پراش می‌شود و مابقی عبور می‌کنند. بیش از ۹۰٪ از پرتو تابیده شده به سطح پوشش نیز از ضخامت ۴/۱ میکرومتری پراش می‌شود.

$$t = -\frac{\sin \theta \ln(1 - C_p)}{2\mu} \quad (2)$$

از پراش اشعه X، d_ψ در زوایای مختلف گفته شده به دست آمد و با تقریب خوبی از d_ψ در $\psi = 0$ به جای d_0 استفاده شد:

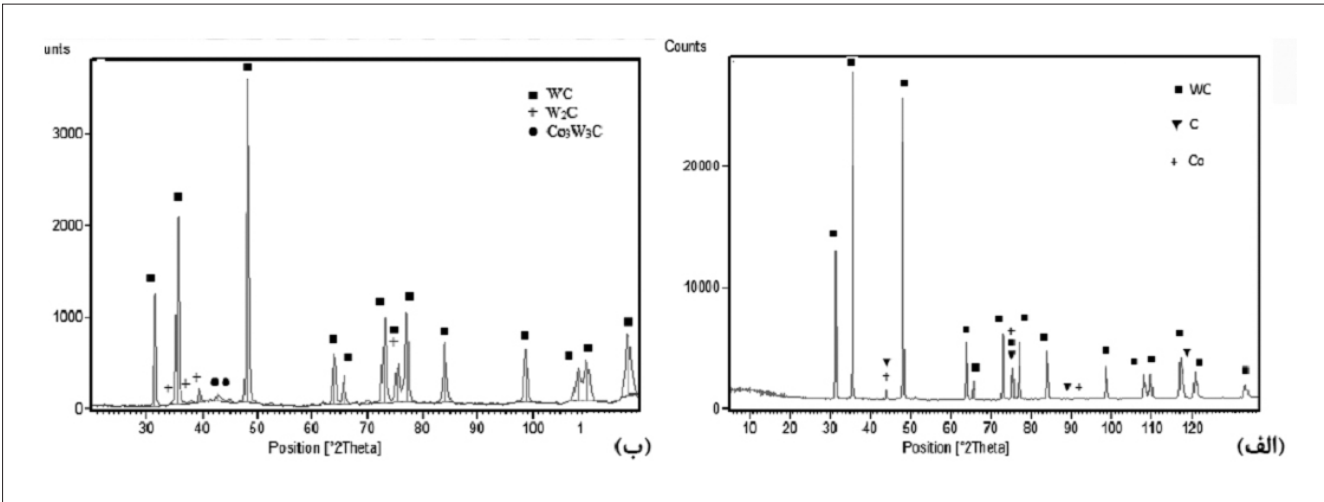
$$\epsilon_{\phi\psi} = \ln \frac{d_\psi}{d_0} \quad (3)$$

سپس با استفاده از فواصل مختلف d_ψ به دست آمده از پراش کرنش در زوایای مختلف به دست آورده شد و با استفاده از این داده‌ها و مقادیر $\sin^2 \psi$ نمودار تغییرات کرنش نسبت به $\sin^2 \psi$ با فیت کردن خط بر نقاط حاصل رسم شد. سپس معادله این خط به دست آمد و از معادله خط شیب آن برای به دست آوردن تنش حاصل شد. با قرار دادن شیب نمودار m و مدول E در معادله (۴) تنش به دست آمد.

$$\sigma_\psi = \frac{m}{\frac{1}{2}S_2} = \frac{mE}{1+\nu} \quad (4)$$

$$\nu = 0.25 \quad E = 213 \pm 21 \text{ (GPa)}$$

با توجه به اینکه عمق نفوذ اشعه X در سرمت کاربید تنگستن-کبالت کمتر از ۵ میکرومتر است، فرض حالت دو محوری با



شکل ۲- (الف) الگوی پراش پرتو X پودر. (ب) الگوی پراش پرتو X پوشش WC-12Co

ککل ۴ شامل تصاویر SEM در حالت الکترون برگشتی (Back-scatter Electron) است. شکل ۵ نیز پوشش را در بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر نشان می‌دهد. فاز روشن کاربید تنگستن و فاز تیره کبالت است. در این تصاویر ساختار فشرده کاربید تنگستن در زمینه کبالت دیده می‌شود. کاملاً مشخص است که بایندر فلزی کبالت ذرات WC را در خود گرفته است. این نشان می‌دهد که کبالت رفتار ترکندگی خوب و حلالیت مطلوب برای کاربید تنگستن دارد و به همین دلیل پرمصرف‌ترین بایندر فلزی استفاده شده در سرمتهای پایه کاربید تنگستن است. در نقاطی از پوشش تخلخل مشاهده می‌شود. نقاط کاملاً سیاه نشان‌دهنده تخلخل هستند. ذرات WC ذرات سخت سرامیکی هستند که در زمینه فلزی کبالت قرار گرفته‌اند. این امر باعث پیوستگی خوب پوشش، تخلخل کم آن و چسبندگی عالی آنها به زیرلایه و خواص مکانیکی خوب مانند سختی بالای این پوشش می‌شود. شکل ۴-الف، یک نمای کلی از سطح مقطع پوشش-زیرلایه را بعد از آماده‌سازی متالوگرافی نشان می‌دهد. پوشش پاشش حرارتی HVOF WC-12Co نسبتاً متراکم بدون ترک‌هایی نزدیک سطح ظاهر می‌شود. ویژگی مورفولوژی معرف پوشش پاشش حرارتی حضور ریزساختار لایه‌ای مرکب از لایه‌های فوق‌العاده فشرده در جهت موازی با سطح است که قابل مشاهده نیستند. اما، در بزرگنمایی‌های بالاتر (شکل ۴-ب) وجود مرزهای لایه‌ها، تخلخل و دانه‌های هم‌محور WC با اندازه‌های متفاوت قرار گرفته در زمینه Co، آشکار است. در نقاطی از پوشش نیز تخلخل مشاهده می‌شود. میزان تخلخل سطحی اندازه‌گیری شده کمتر از ۱ درصد گزارش شده است.

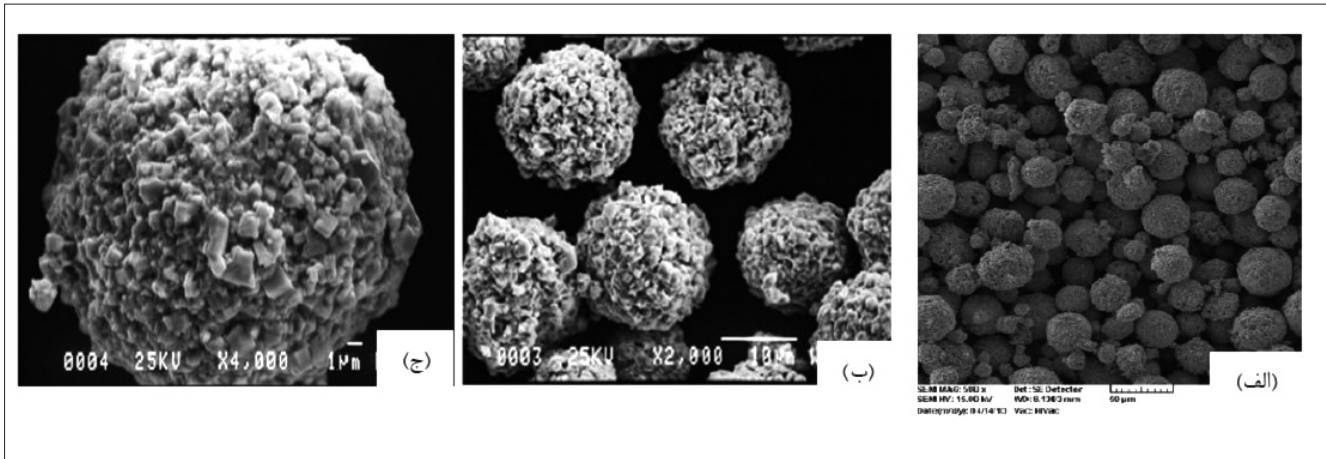
همان طور که در شکل ۵ دیده می‌شود فلز کبالت در نقش یک بایندر شکل‌پذیر با پیوند خوب با دانه‌های کاربید تنگستن می‌باشد که ذرات سخت کاربید تنگستن موجود در این پوشش‌ها

(الف) با بزرگنمایی $\times 500$ ، (ب) با بزرگنمایی $\times 2000$ و (ج) با بزرگنمایی $\times 4000$ آورده شده است. شکل کروی ذرات در هر سه بزرگنمایی به خوبی مشخص است. در فرآیند HVOF این ذرات کروی دارای انرژی جنبشی لازم برای برخورد و چسبندگی کافی به زیرلایه هستند. مطالعات انجام شده روی پوشش شامل آنالیز فازی با استفاده از پراش پرتو X و میکروگرافی آن با استفاده از تصاویر SEM بود؛ همچنین به منظور تعیین تنش پسماند در پوشش میکرو سختی‌سنجی انجام و مدول الاستیک پوشش تعیین شد. سپس به روش پراش پرتو X و استفاده از روش $\sin^2\psi$ تنش در چهار عمق در راستای ضخامت پوشش و در سطح آزاد پوشش به دست آمد.

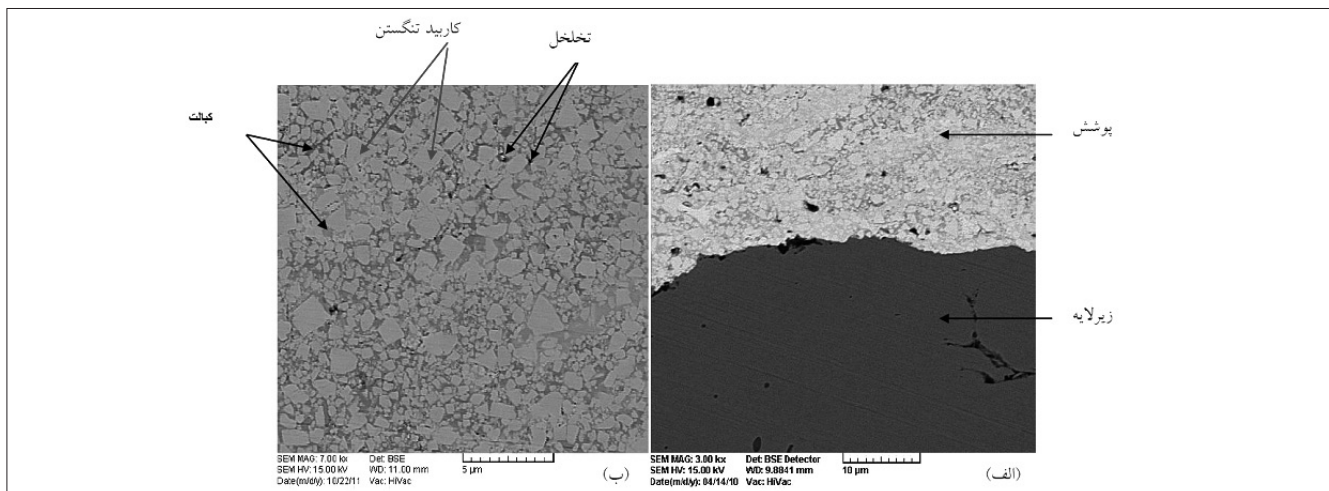
- آنالیز فازی پوشش

در شکل ۲-ب نتایج آزمون پراش پرتو X پوشش اعمالی نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود علاوه بر فاز WC فازهای W_2C و Co_3W_3C نیز وجود دارند. در حالی که در شکل ۲-الف پودر شامل فازهای کاربید تنگستن، کربن و کبالت بود. این بدین دلیل است که طی پاشش حرارتی، ذرات WC-12Co تجزیه شده و چنین فازهای جدیدی به علت اثر متقابل پیچیده بین عناصر تشکیل دهنده و اکسیژن در طی رسوب پاشش حرارتی به وجود می‌آیند. در واقع به علت از دست رفتن کربن در نتیجه‌ی اکسیداسیون و واکنش W با فاز فلزی Co تشکیل می‌شوند. در اینجا فاز جدید W_2C و کاربید پیچیده‌ی Co_3W_3C به وجود آمده است. در طی پاشش HVOF، پودر WC-12Co برای گرم شدن و شتاب یافتن باید در معرض یک جت شعله با دمای بالا قرار گیرد. علاوه بر این چون اکسیژن هم در جت شعله است پس تجزیه و دگرپوره شدن در هر صورت وجود دارد.

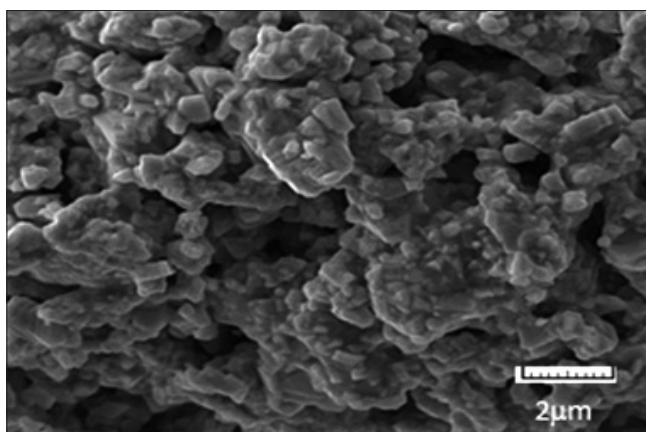
-میکروگرافی پوشش



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر. (الف) با بزرگنمایی ۵۰۰× و (ب) با بزرگنمایی ۲۰۰۰× (ج) با بزرگنمایی ۴۰۰۰×



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پوشش WC-12Co در دو بزرگنمایی. (الف) بزرگنمایی ۳۰۰۰× و (ب) بزرگنمایی ۷۰۰۰×



شکل ۵- سطح پوشش در بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر

منجر به سختی بالای پوشش و بنابراین مقاومت سایشی بالای آن می‌شود، در حالی که بایندر فلزی کبالت تأمین کننده چقرمگی مورد نیاز پوشش است. تخلخل سطحی که ناشی از تمایل ذرات کاربید تنگستن برای رفتن به مرکز آگلومر است از ویژگی‌های بارز فرآیندهای پاشش حرارتی است.

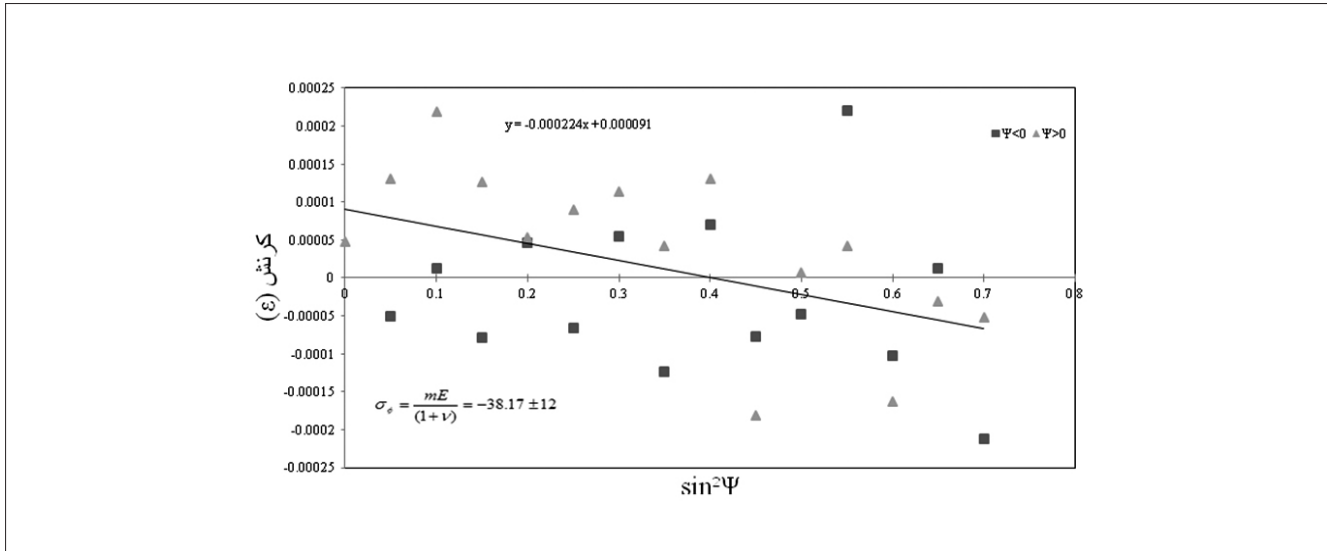
میکرو سختی‌سنجی و اندازه‌گیری مدول الاستیک پوشش یکی از پارامترهای مؤثر در ارزیابی دقیق تنش پسماند به روش پراش پرتو X، مدول الاستیسیته پوشش است. به دلیل تخلخل ذاتی پوشش‌های حاصل از فرآیندهای پاشش حرارتی و پارامترهای انتخابی فرآیند، مدول الاستیسیته پوشش WC-12Co با مدول الاستیسیته شکل حجمی (بالک) آن متفاوت است. بدین لحاظ لزوم اندازه‌گیری صحیح و دقیق مدول الاستیسیته پوشش بسیار حائز اهمیت است. مدول الاستیسیته پوشش در پراش پرتو X به منظور محاسبه تنش با استفاده از شیب نمودار $\epsilon - \sin^2\psi$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. با داشتن شیب نمودار و مدول الاستیسیته، تنش از معادله

(۴) به دست می‌آید.

میکرو سختی‌سنجی ویکرز طبق استاندارد ASTM E384-10 با نیروی ۳/۰ Kg.f و زمان اثرگذاری ۱۵ ثانیه انجام شد.

جدول ۲- میکرو سختی، اندازه اثر نوپ و مدول الاستیسیته پوشش

مقدار سختی (ویکرز)	مقدار سختی (نوپ)	نسبت قطر فرعی به اصلی	مدول الاستیک (GPa)
۱۰۷۰	۱۰۹۸	۰/۱۱۸	۲۱۳±۲۱



شکل ۶- نمودار تغییرات کرنش با $\sin^2\psi$ در دو حالت $\psi < 0$ و $\psi > 0$ در سطح آزاد پوشش

تخلیل $\sin^2\psi$ را توجیه می‌کند. از میانگین کرنش‌های به دست آمده در زوایای $\psi > 0$ و $\psi < 0$ جهت به دست آوردن تنش پسماند از شیب منحنی $\epsilon\text{-}\sin^2\psi$ استفاده شد.

سپس شیب نمودار در سطح آزاد پوشش به دست آمد که برابر با 0.000224 بود. با قرار دادن مقدار شیب نمودار در معادله (۴)، تنش پسماند برابر 12 ± 38.17 MPa به دست آمد. مقدار منفی تنش نشان‌دهنده فشاری بودن تنش در سطح آزاد پوشش است. معادله خط و محاسبه تنش برای سطح آزاد پوشش:

$$y = -0.000224x + 0.000091$$

$$\sigma = \frac{mE}{1+\nu} = -38.17 \pm 12$$

در نمودار شکل ۷ تغییرات کرنش با $\sin^2\psi$ در دو حالت $\psi > 0$ و $\psi < 0$ در عمق 50 میکرومتر نشان داده شده است. با فیت کردن نمودار خطی و به دست آوردن معادله و در نتیجه شیب نمودار و با استفاده از معادله (۴) تنش پسماند برابر با 10.5 ± 59.8 MPa به دست آمد. در اینجا شیب نمودار و علامت تنش نیز مثبت به دست آمده است که نشان دهنده کششی بودن تنش در این عمق است.

معادله خط و محاسبه تنش برای عمق 50 میکرومتر:

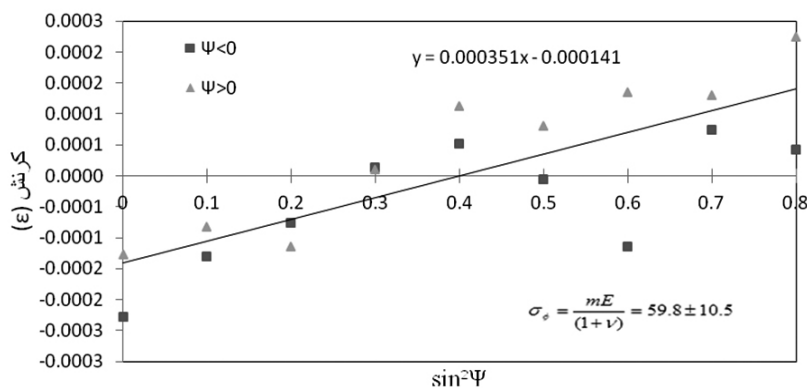
$$y = 0.000351x + 0.00014$$

$$\sigma = \frac{mE}{1+\nu} = 59.8 \pm 10.5$$

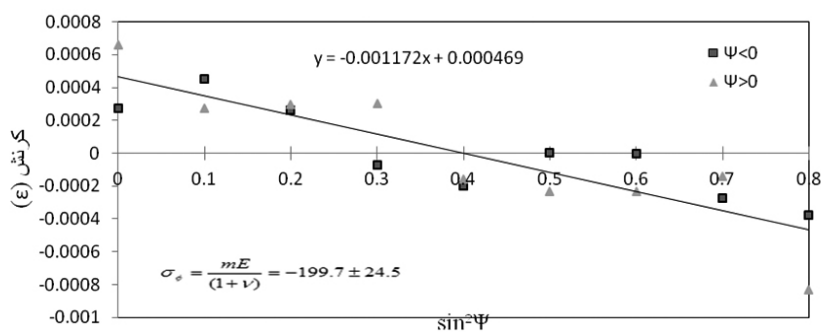
میکرو سختی سنجی نوپ پوشش مطابق استاندارد E384-10 ASTM با نیروی $10/2$ Kg.f انجام شد. متوسط میکرو سختی نوپ برای 10 اثر با زمان اثرگذاری 15 ثانیه بدست آمد. با اثر گذاری نوپ نسبت قطر فرعی به اصلی اثر نوپ به دست آمد. از نتایج 10 اثر نوپ به منظور اندازه‌گیری اثر استفاده شد. در اندازه‌گیری مدول الاستیسیته پوشش قطر بزرگتر فرورونده باید عمود بر فصل مشترک در نظر گرفته شود، در صورتی که برای اندازه‌گیری عدد سختی نوپ قطر بزرگتر فرورونده باید موازی با فصل مشترک پوشش-زیرلایه باشد. سپس مدول الاستیسیته پوشش با استفاده از بازگشت الاستیک اثر نوپ و با استفاده از معادله (۱) و با داشتن عدد سختی نوپ پوشش بدست می‌آید. نتایج مربوط به محاسبه مدول الاستیک در جدول ۲ آمده است.

- بررسی تنش پسماند در پوشش

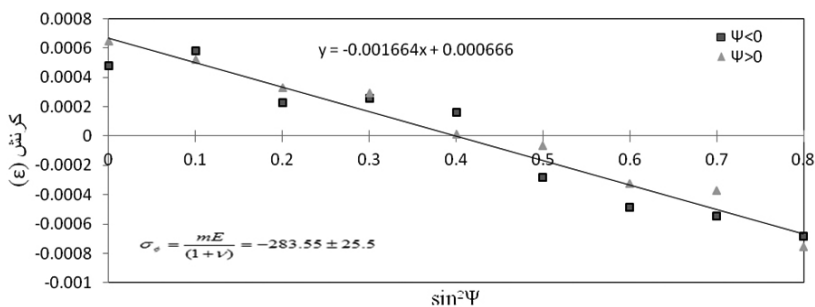
در نمودار شکل ۶ نتایج اندازه‌گیری کرنش نسبت به $\sin^2\psi$ سطح آزاد پوشش WC-12Co نشان داده شده است. نمودار $\epsilon\text{-}\sin^2\psi$ برای زوایای $\psi > 0$ و $\psi < 0$ نشان‌دهنده همپوشانی این دو نمودار است. از آنجایی که هیچ تفاوت فاحشی بین مقادیر موقعیت براگ برای $\psi > 0$ و $\psi < 0$ مشاهده نشده، این نتیجه گرفته شد که مؤلفه‌های تنش برشی ناچیز هستند. این نشان می‌دهد که یک توزیع همگن تنش-کرنش در منطقه پرتو دیده وجود دارد که استفاده از



شکل ۷- نمودار تغییرات کرنش با $\sin^2\Psi$ در دو حالت $\Psi > 0$ و $\Psi < 0$ در عمق ۵۰ میکرومتر



شکل ۸- نمودار تغییرات کرنش با $\sin^2\Psi$ در دو حالت $\Psi > 0$ و $\Psi < 0$ در عمق ۱۵۰ میکرومتر



شکل ۹- نمودار تغییرات کرنش با $\sin^2\Psi$ در دو حالت $\Psi > 0$ و $\Psi < 0$ در عمق ۲۳۰ میکرومتر

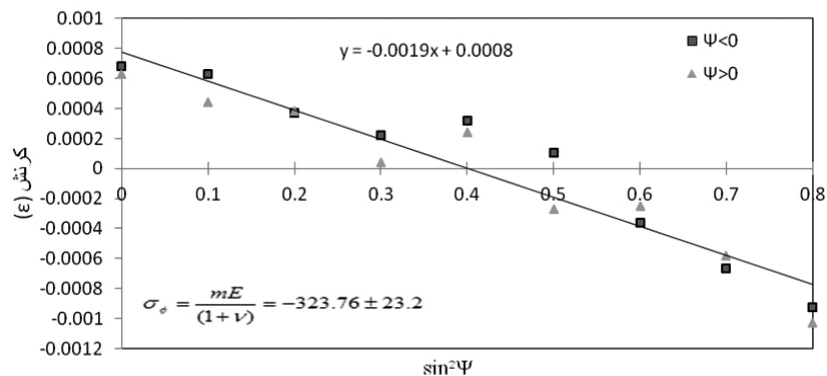
$$y = -0.001172x + 0.000469$$

$$\sigma = \frac{mE}{1+\nu} = -199.7 \pm 24.5$$

شکل ۹ مربوط به عمق ۲۳۰ میکرون است. تنش به دست آمده در این فاصله از سطح آزاد پوشش -283.55 ± 25.5 MPa است. همانند عمق ۱۵۰ میکرون این تنش هم منفی و فشاری است اما بزرگی آن بیشتر از تنش در عمق ۱۵۰ میکرومتر بوده و می‌توان

نمودار تغییرات کرنش با $\sin^2\Psi$ در عمق ۱۵۰ میکرومتر در شکل ۸ نشان داده شده است.

در شکل ۸ دیده می‌شود که شیب نمودار مجدداً منفی شده است. با به دست آوردن تنش مطابق آنچه گفته شد می‌بینیم که تنش این بار منفی و مقدار آن -199.7 ± 24.5 MPa است. مشاهده می‌شود که تنش فشاری شده و بزرگی آن نیز افزایش یافته است. معادله خط و محاسبه تنش برای عمق ۱۵۰ میکرومتر:



شکل ۱۰- نمودار تغییرات کرنش با $\sin^2\psi$ در دو حالت $\psi > 0$ و $\psi < 0$ در عمق ۳۰۰ میکرومتر

جدول ۳- نتایج تنش‌های پسماند در راستای ضخامت

مکان	سطح آزاد پوشش	عمق ۵۰ μm	عمق ۱۵۰ μm	عمق ۲۳۰ μm	عمق ۳۰۰ μm	متوسط تنش پسماند در امتداد ضخامت
تنش پسماند (MPa)	-۳۸/۱۷±۱۲	۵۹/۸±۱۰/۵	-۱۹۹/۸±۲۴/۵	-۲۸۳/۵۵±۲۵/۵	-۳۲۳/۷۶±۲۳/۲	-۱۵۷/۱

گفت فشاری‌تر است.

معادله خط و محاسبه تنش برای عمق ۲۳۰ میکرومتر:

$$y = -0.001664x + 0.000666$$

$$\sigma = \frac{mE}{1+\nu} = -283.55 \pm 25.5$$

نمودار شکل ۱۰ هم که تغییرات کرنش با $\sin^2\psi$ را در عمق ۳۰۰ میکرومتر را نشان می‌دهد. همانند نمودارهای ۸ و ۹ شیب این خط نیز منفی بوده و تنش فشاری برابر با 323.76 ± 23.2 MPa به دست آمد.

معادله خط و محاسبه تنش برای عمق ۳۰۰ میکرومتر:

$$y = -0.0019x + 0.0008$$

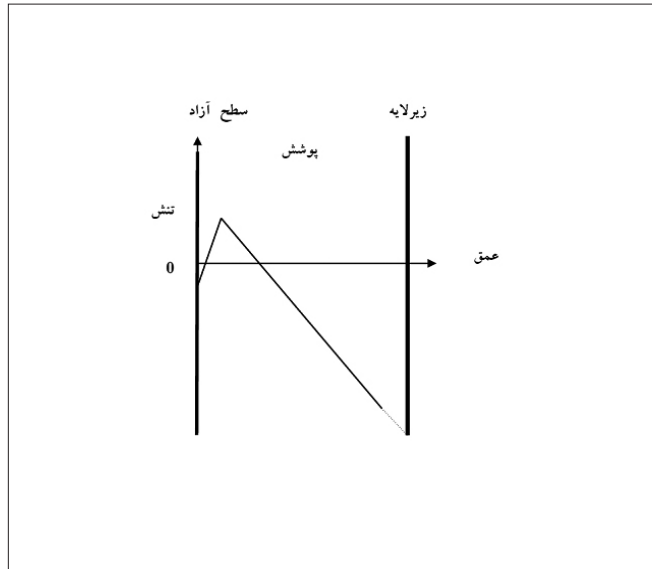
$$\sigma = \frac{mE}{1+\nu} = -323.76 \pm 23.2$$

در این عمق که بیشترین فاصله را از سطح آزاد پوشش دارد و به فصل مشترک پوشش-زیرلایه نزدیک‌تر است (با توجه به اینکه ضخامت پوشش حدود ۲۳۰ میکرومتر است)، بزرگ‌ترین تنش فشاری دیده می‌شود.

نتایج تنش‌های پسماند در راستای ضخامت در جدول ۳ آورده شد. متوسط تنش پسماند در امتداد ضخامت پوشش معادل $157/1$ MPa به دست آمد. حالت تنش نهایی در این پوشش را از طریق انطباق انواع مختلف تنش‌های القا شده در طول فرآیند پاشش:

کوئنچ، عدم تطابق حرارتی و تنش‌های پینینگ می‌توان توضیح داد. تنش کوئنچ در نتیجه سرد شدن سریع ذرات پاشش است، فرآیند سرد شدنی است که از دمای ذوب شروع می‌شود و به دمایی می‌رسد که زیرلایه در طی فرآیند رسوب‌گذاری رسیده است. این تنش‌ها به این علت به وجود می‌آیند که ذرات مذاب به سمت زیرلایه رانده شده به سطح برخورد کرده و به سرعت از دمای بالا کوئنچ می‌شوند اما انقباض آنها توسط زیرلایه مهار می‌شود، که معمولاً تا دمای پایین‌تر ادامه دارد. این پدیده منجر به تشکیل تنش‌های پسماند کششی در پوشش می‌شود. تنش‌های کوئنچ کششی بوده و مقدارشان در راستای عمق رسوب تقریباً ثابت است.

تنش‌های عدم تطابق حرارتی ناشی از تفاوت در ضرایب انبساط حرارتی بین پوشش (α_s) و زیرلایه (α_p) است، که منجر به تنش‌های پسماند ایجاد شده از عدم تطابق انقباض دمایی طی سرد شدن از دمای فرآیند (دمای میانگینی که سیستم پوشش-زیرلایه پس از رسوب‌گذاری به آن می‌رسند) به دمای محیط، موسوم به سرد شدن ثانویه است. چون در اینجا ضریب انبساط حرارتی زیرلایه $(11/7 - 14/7 \times 10^{-6} \text{C}^{-1})$ بالاتر از ضریب انبساط حرارتی پوشش $(4/7 - 6/2 \times 10^{-6} \text{C}^{-1})$ است این تنش در پوشش فشاری است. توزیع عدم تطابق حرارتی گاهی اوقات ممکن است در مقدار بزرگ‌تر از تنش کوئنچینگ باشد. در پاشش HVOF تنش‌های پینینگ قابل توجهی می‌توانند در نتیجه سرعت بالای ذرات نیمه مذاب رخ دهند.



شکل ۱۱- تصویر شماتیک توزیع تنش پسماند از سطح آزاد پوشش به سمت زیرلایه

پسماند فشاری شود که در زیر بیشتر توضیح داده خواهد شد. به نظر می‌رسد در عمق ۱۵۰ میکرومتر میزان مؤلفه فشاری بر مؤلفه کششی تنش نسبت به عمق ۵۰ میکرومتر برتری داشته است. هر چه به طرف فصل مشترک پیش می‌رویم میزان تنش پینینگ افزایش می‌یابد. تنش‌های پینینگ به علت انرژی جنبشی ذرات برخورد کننده با زیرلایه یا مواد رسوب داده شده قبلی ایجاد می‌شوند و القاکننده تنش‌های پسماند فشاری هستند. با نزدیک شدن به فصل مشترک تنش پینینگ افزایش می‌یابد زیرا با هر بار رسوب‌گذاری لایه جدید، برخورد ذرات تشکیل‌دهنده هر لایه به لایه‌های پیشین تنش پینینگ وارد می‌کند. تنش عدم تطابق حرارتی نیز با دور شدن از سطح پوشش و نزدیک شدن به زیرلایه افزایش می‌یابد؛ با بیشتر شدن این دو مؤلفه فشاری و غلبه آن بر مؤلفه کششی تنش که همان تنش کوئنچ است، در این عمق تنش فشاری به دست آمده است. در عمق‌های ۲۳۰ و ۳۰۰ میکرومتر دیده می‌شود که علاوه بر فشاری بودن تنش، بزرگی تنش بیشتر شده است. که همان‌گونه که گفته شد بیشتر شدن دو تنش فشاری پینینگ و عدم تطابق حرارتی و نیز ثابت بودن تنش کوئنچ باعث می‌شود با دور شدن از سطح و نزدیک شدن به زیرلایه تنش پسماند فشاری تر شود.

در مورد تنش‌های پسماند در راستای ضخامت در این پوشش می‌توان گفت که تنش‌های پسماند فشاری که شامل تنش‌های پینینگ و تنش‌های عدم تطابق حرارتی می‌باشند از فصل مشترک پوشش-زیرلایه به سمت سطح پوشش کاهش می‌یابند، از طرف دیگر تنش کوئنچ که کششی است در سراسر ضخامت پوشش تقریباً ثابت است اثر جمعی این تنش‌ها منجر به تنش‌های فشاری در عمق‌های مختلف پوشش می‌شود که با دور شدن از فصل مشترک و نزدیک شدن به سطح پوشش و در سطح آزاد پوشش بزرگی این تنش پسماند فشاری کاهش می‌یابد؛ اما در اینجا یک نقض دیده می‌شود که آن تنش پسماند در عمق ۵۰ میکرومتر است. این تنش کششی و برابر $59/8 \pm 10/5$ MPa به دست آمد. برای توجیه این تنش می‌توان به حضور تخلخل‌ها اشاره کرد. در هر تک عبور مشعل پاشش در نتیجه‌ی برخورد ذرات بیشتر تماس بهتر بین اسپلت‌ها و پوشش-زیرلایه ایجاد می‌شود که همین امر استحکام اتصال را نیز افزایش می‌دهد و به ایجاد یک ریزساختار یکنواخت‌تر لایه‌ای کمک می‌کند و همین امر باعث می‌شود اسپلت‌ها بر روی هدف کمتر تکه تکه شوند و فصل مشترک مستحکم‌تر، با تخلخل کمتر و ظرفیت بیشتر برای حفظ تنش‌های پسماند بزرگ‌تر باشند. حضور تخلخل تنش پسماند فشاری را حذف خواهد کرد زیرا تنش کششی ایجاد می‌کنند. پس با دور شدن از فصل مشترک و با روند کاهش دما از فصل مشترک به سمت سطح پوشش تخلخل‌هایی با مورفولوژی نامنظم

سرعت بالای ذرات در پاشش HVOF ممکن است سبب یک تغییر شکل پلاستیک موضعی منجر شونده به تنش‌های فشاری موضعی در زیرلایه و نیز در لایه رسوب داده شده قبلی بشود. با توجه به توضیحات داده شده در بالا تنش‌های کوئنچ در سراسر ضخامت پوشش ثابت باقی می‌مانند پس حالت تنش در هر عمق بسته به تغییر تنش‌های عدم تطابق حرارتی و پینینگ و نسبت آنها به تنش کوئنچ است.

در شکل ۱۱ تصویری شماتیک از توزیع تنش پسماند در راستای ضخامت پوشش آورده شده است. با مقایسه تنش‌های به دست آمده در امتداد ضخامت دیده می‌شود که با افزایش عمق به طرف فصل مشترک پوشش-زیرلایه تنش فشاری نیز از سطح آزاد به سمت زیرلایه بیشتر می‌شود. در عمق‌های بیشتر از ۵۰ میکرومتر تنش کششی کاهش یافته و تنش پسماند فشاری بالاتری به سمت فصل مشترک به دست آمد.

تنش به دست آمده در فاصله ۵۰ میکرومتری از سطح آزاد (بعد از لایه برداری) به صورت کششی به دست آمد. در لایه‌های نزدیک به سطح، رسوبات پینینگ کمتری را تجربه می‌نمایند و چون تنش پینینگ از نوع فشاری است پس اثر این عامل و مؤلفه فشاری تنش پسماند کل در این عمق کمتر است. از طرف دیگر تنش عدم تطابق حرارتی نزدیک به سطح پوشش کمتر است که کاهش این دو مؤلفه تنش موجب کاهش مؤلفه فشاری تنش در این عمق می‌شود اما در اینجا علت دیگر کششی شدن تنش علاوه بر این عامل حضور تخلخل‌های با مورفولوژی نامنظم در لایه‌های زیر سطح آزاد است که سبب می‌شود در این عمق ۵۰ میکرومتر تنش

در لایه‌های نزدیک به سطح آزاد شکل می‌گیرد که باعث ایجاد تنش کششی می‌شود (Bruno, Fanara, Guglielmetti & Malard, 2006).

از جدول ۲ دیده می‌شود که متوسط تنش پسماند در امتداد ضخامت برابر $107/1$ MPa - و فشاری به دست آمد. پروفیل تنش پسماند برای این پوشش با تنش‌های پسماند کششی بیشتر در پوشش نزدیک به سطح و با تنش‌های فشاری بیشتر نزدیک به فصل مشترک مشخص شده که با نتایج سانتانا و همکاران (Santana et al., 2008) مطابقت دارد. آنها تنش‌های پسماند را در پوشش‌های WC-12Co به ضخامت‌های ۲۰۰ و ۳۵۰ میکرومتر به ترتیب برابر 220 ± 50 و 182 ± 50 MPa - به دست آوردند.

تنش‌های پسماند فشاری در فصل مشترک به عنوان مانع تشکیل ترک‌های در راستای ضخامت و نیز بهبودبخش اتصال چسبندگی شناخته شده‌اند. در حالی که تنش‌های پسماند کششی می‌توانند سبب ترک خوردن و افزایش شکست‌های خستگی شوند اگر از نظر بزرگی بیشتر از استحکام کششی پوشش باشند زیرا تنش‌های کششی تمایل به باز کردن و انتشار ترک‌ها دارند؛ تنش‌های پسماند فشاری در پوشش‌ها اثر مفیدی بر رفتار چسبندگی و خستگی سیستم دارند. این تنش‌ها تمایل به بستن ترک‌های تشکیل یافته دارند و عمر خستگی پوشش را افزایش می‌دهند. همان‌گونه که لیاو و همکاران (Liao, Nor-mand & Codde, 2000) اشاره کردند تنش‌های کششی برای مقاومت به سایش نامطلوب هستند و تنش پسماند فشاری در پوشش باعث بهبود عملکرد پوشش در مقابل سایش می‌شود.

به نظر می‌رسد تنش‌های پینینگ اثرگذارترین عامل بر تنش پسماند کل در این پوشش می‌باشد پس با تغییر در پارامترهای پاشش به گونه‌ای که تنش پینینگ افزایش یابد، با رعایت سایر عوامل مثبت بر پوشش، می‌توان مؤلفه تنش فشاری را در پوشش افزایش داد. پینا و همکاران (Pina, Dias & Lebrun, 2003) نیز نشان دادند که در فرآیندهایی که در آنها ذرات در تفنگ پاشش به طور کامل ذوب شده هستند، مثل فرآیند APS، تنش‌های کوئنچ تنش‌های غالب هستند. ذرات به محض برخورد گسترش می‌یابند، اما انقباض طی خنک شدن و انجماد توسط مواد لایه‌ی زیرین تحمیل می‌شود و تنش‌های کششی در درون هر ذره‌ی پاشش یافته تولید می‌شوند. از طرف دیگر، تنش‌های پینینگ که در آن‌ها ذرات تا حدودی ذوب شده با سرعت بالا به زیرلایه برخورد می‌کنند، مانند پاشش در HVOF، تنش غالب می‌توانند باشند. سطح هدف تغییر شکل پلاستیکی می‌یابد، که سطح قابل توجهی از تنش‌های فشاری را ایجاد می‌کند. در پوشش‌های پاشش یافته به روش HVOF تنش‌های پینینگ می‌توانند به مقادیر مهمی برسند بنابراین حالت تنش پسماند می‌تواند توسط پارامترهای پاشش کنترل شوند. با

استفاده از موادی برای پوشش که ضریب انبساط حرارتی کمتری نسبت به زیرلایه داشته باشند می‌توان تنش عدم تطابق حرارتی را از مؤلفه‌ی کششی به مؤلفه‌ی فشاری تبدیل کرد.

نتیجه‌گیری

۱. تنش در عمق ۵۰ میکرومتر کششی اما در سطح آزاد پوشش و در عمق‌های ۱۵۰، ۲۳۰ و ۳۰۰ میکرومتر فشاری به دست آمد.
۲. تنش‌های پسماند در راستای ضخامت با نزدیک شدن به فصل مشترک بزرگی‌شان بیشتر می‌شود که به دلیل افزایش تنش‌های فشاری پینینگ و عدم تطابق حرارتی و غلبه آنها بر اثر تنش کششی کوئنچ است. بیشترین تنش فشاری نزدیک به فصل مشترک دیده می‌شود زیرا تنش‌های فشاری پینینگ و عدم تطابق حرارتی نزدیک به فصل مشترک بیشترین مقدار را دارند.
۳. تنش متوسط در پوشش $107/1$ MPa - فشاری به دست آمد که برای عملکرد و عمر قطعه مفید است.
۴. در پوشش علاوه بر فاز WC فازهای W_2C و Co_3W_3C نیز وجود دارند که در نتیجه‌ی اکسیداسیون، دگرپوره شدن کاربید تنگستن و واکنش تنگستن با کبالت است؛ در حالی که در پوشش فقط فازهای WC، کربن و کبالت وجود داشت.

منابع و مراجع

- 1- Bruno, G., Fanara, C., Guglielmetti, F., & Malard, B. (2006). Characterization and residual stress analysis of wear resistant Mo thermal spray-coated steel gear wheels. *Surface & Coatings Technology*, 200, 4266-4276.
- 2- Greving, D. J., Rybicki, E. F., Shadley, J. R., & Xiong, Y. (1994). Through-thickness residual stress evaluations for several industrial thermal spray coatings using a modified layer-removal method. *Journal of Thermal Spray Technology*, 3(4), 379-388.
- 3- He, B.B. (2009). Two-dimensional X-Ray diffraction. John Wiley & Sons Publication, 249-329.
- 4- Liao, H., Normand, B., & Codde, C. (2000). Influence of coating microstructure on the abrasive wear resistance of WC/Co cermet coatings. *Surface and Coatings Technology*, 124, 235-242.
- 5- Pina, J., Dias, A., & Lebrun, J.L. (2003). Study by X-ray diffraction and mechanical analysis of the residual stress generation during thermal spraying. *Materials Science and Engineering*, A347, 21-31.
- 6- Santana, Y.Y., Renault, P.O., Sebastiani, M., La Barbera, J.G., Lesage, J., Bemporad, E., Le Bourhis, E., Puchi-Cabrera, E.S., & Staia, M.H. (2008). Characterization and residual stresses of WC-Co thermally sprayed coatings. *Surface & Coatings Technology*, 202, 4560-4565.
- 7- Totemeier, T.C., & Wright, J.K. (2006). Residual stress determination in thermally sprayed coatings—a comparison of curvature models and X-ray techniques. *Surface & Coatings Technology*, 200, 3955-3962.
- 8- Wang, T., Zhao, Sh., Hua, W., Li, J., Gong, J., & Sun, Chao, (2010). Estimation of residual stress and its effects on the mechanical properties of detonation gun sprayed WC-Co coatings. *Materials Science and Engineering*, 527, 454-461.
- 9- Withers, P.J., & Bhadeshia, H.K.D.H. (2001). Residual stress part 1: measurement techniques. *Materials Science and Technology*, 17, 355-365.