

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

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.

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

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

چکیده

تنش‌های پسماند، خاصیت جدایی‌ناپذیر پوشش‌های پاشش حرارتی مانند پوشش‌های کاربید تنگستن کبالت، بسته به حالت‌شان 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 MPa ۱۵۷/۱- و فشاری به دست آمد که برای کارکرد قطعه مفید است.

کلمات کلیدی: تنش‌های پسماند، پوشش‌های کاربید تنگستن کبالت، HVOF، تحلیل تنش با پراش پرتو X، پوشش‌های پاشش حرارتی.

مقدمه

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 تعمداً 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 (Totemeier و Wright، ۲۰۰۶؛ Xiong, Shadley, Rybicki, Greving، ۱۹۹۴).

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 غیرمخربی 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 و Bhadeshia، ۲۰۰۱؛ Wright و Totemeier، ۲۰۰۶).

در این پروژه کاربرد تنگستن کبالت (WC-12Co) به روش HVOF بر روی زیرلایه فولاد CK45 پوشش داده شد. پوشش‌های کاربرد تنگستن کبالت پاشش حرارتی در گستره وسیعی از کاربردها برای مقاومت در برابر شرایط شدید سایشی استفاده می‌شوند زیرا ذرات سخت کاربرد تنگستن موجود در این پوشش‌ها 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. به منظور بررسی تنش‌های پسماند در این پوشش از پراش پرتو X و روش $\sin^2\psi$ 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 $\sin^2\psi$ نموداری برای داده‌ها رسم می‌شود و پس از آن با به دست آوردن شیب نمودار $\sin^2\psi$ -کرنش و داشتن مدول الاستیسیته تنش محاسبه می‌شود. برای بررسی تنش در راستای ضخامت تنش‌های پسماند در سطح آزاد پوشش و در عمق‌های ۵۰، ۱۵۰، ۲۳۰ و ۳۰۰ میکرون محاسبه و سپس با توجه به منشأهای اصلی برای تنش‌های پسماند در این سیستم تحلیل می‌شوند.

مبانی نظری پژوهش

فناوری پاشش حرارتی بخش مهمی از صنعت مدرن در تهیه پوشش‌هایی است که خواص سطحی مطلوب برای انواع کاربردهای صنعتی را ارائه می‌دهد و به صرفه است. پاشش حرارتی عنوانی کلی برای یک گروه از فرآیندهایی است که در آن‌ها محدوده گسترده‌ای از مواد مانند مواد فلزی، سرامیکی، سرمت و برخی مواد پلیمری به شکل پودر، سیم یا میله به یک مشعل یا تفنگ تغذیه می‌شوند که نزدیک یا تا حدی بالای نقطه ذوب‌شان گرم می‌شوند. قطرات مذاب یا تقریباً مذاب از این مواد در یک جریان گاز شتاب داده می‌شوند و به سوی زیرلایه پرتاب می‌شوند. در اثر برخورد، قطرات به شکل ذرات نازک لایه‌ای چسبنده، روی هم و به هم پیوسته

به سطح فرو می‌نشینند و جامد می‌شوند (Kamara و Davey، ۲۰۰۷؛ Metals Handbook، ۱۹۹۴؛ Santana و et al، ۲۰۰۸). مزیت اصلی فرآیندهای پاشش حرارتی این است که طیف بسیار گسترده‌ای از مواد برای ساخت پوشش می‌توانند به کار برده شوند. دومین مزیت عمده‌ی این فرآیندها قابلیت اکثر آنها در اعمال پوشش به یک زیرلایه است بدون اینکه زیرلایه به مقدار قابل ملاحظه‌ای گرم شود. بنابراین، مواد با نقطه ذوب بسیار بالا می‌توانند به قطعات ماشینکاری نهایی شده، کاملاً عملیات حرارتی شده بدون تغییر خواص و بدون اعوجاج حرارتی قطعه اعمال شود. مزیت سوم، در اکثر موارد، قابلیت برهنه کردن و دوباره پوشش دادن پوشش‌های ساییده یا تخریب شده بدون تغییر خواص یا ابعاد قطعه است (Metals Handbook، ۱۹۹۴).

پاشش سوخت اکسیژنی سرعت بالا (HVOF) شامل احتراق اکسیژن و یک گاز سوختی در فشار بالا برای تولید جت خروجی سرعت بالا است. در فرآیندهای گوناگون در دسترس پاشش، HVOF یکی از پر کاربردترین‌ها است زیرا پوشش‌هایی با چگالی بالا، استحکام اتصال عالی و تخریب کمتری نسبت به پوشش‌های حاصل از بسیاری از فرآیندهای دیگر پاشش حرارتی به دست می‌دهد. خواص فوق‌العاده پوشش با سرعت بالای ذره ۴۰۰-۸۰۰ m/s و دمای پایه شعله ۲۸۰۰-۳۲۰۰ K ایجاد می‌شوند. این پارامترهای پاشش به گازهای به کار رفته، نرخ جریان گاز و هندسه تفنگ پاشش بستگی دارند. در فرآیند HVOF انرژی غالب منتقل شده به ذرات انرژی جنبشی است. پاشش سوخت اکسیژنی با سرعت بالا نشان داده است که یکی از بهترین روش‌ها برای رسوب‌دهی پودرهای کاربردی تنگستن کبالت، به علت داشتن سرعت‌های بالاتر و دماهای پایین‌تر ذرات پودری نسبت به دیگر روش‌های رسوب‌دهی است که منجر به تجزیه کمتر WC در حین پاشش می‌شود (Santana و et al، ۲۰۰۸؛ Xu، Mellor، Guilemany، Miguel، ۲۰۰۳؛ Lebrun، Dias، Pina، ۲۰۰۳).

تنش‌های پسماند بدون نیروهای خارجی وجود دارند یا بعد از برداشتن نیروهای خارجی در جسم جامد باقی می‌مانند. نیروی خالص و ممان در یک جسم جامد در حالت تعادل باید صفر باشد، پس تنش‌های پسماند در جسم باید در درون جسم در تعادل باشند. یعنی اینکه یک تنش فشاری در یک قسمت از جسم جامد باید با یک تنش کششی در قسمت دیگری از جسم جامد همراه باشد. برای مثال، تنش پسماند در یک لایه نازک با تنش‌های موجود در زیرلایه خنثی می‌شود (He، ۲۰۰۹).

تعیین تنش‌های پسماند در فرآیندهای پاشش حرارتی هدف تکنولوژیکی مهمی است چرا که وجود سطوح تنش پسماند در پوشش‌ها و علامت آن‌ها اثر قابل توجهی بر عملکرد پوشش دارد. دو منشأ اصلی برای تنش‌های پسماند در سیستم پوشش‌های پاشش حرارتی وجود دارد. منبع اول در نتیجه‌ی سرد شدن سریع ذرات پاشش است، که یک فرآیند سرد شدنی است که از دمای ذوب شروع می‌شود و به دمایی می‌رسد که زیرلایه در طی فرآیند رسوب‌گذاری رسیده است (سرد شدن اولیه). این تنش‌ها تنش‌های درونی (ذاتی)، رسوب-گذاری یا کوئنچ نامیده می‌شوند. 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 سرد می‌شوند اما انقباض آنها توسط زیرلایه مهار می‌شود، که معمولاً تا دمایی پایین‌تر ادامه دارد. این پدیده منجر به تشکیل تنش‌های پسماند کششی در پوشش و فرآیند می‌شود و در ماده تک فاز نیز ظاهر می‌شود. منبع دوم تنش‌های پسماند ناشی از تفاوت در ضرایب انبساط حرارتی بین پوشش (α_c) و زیرلایه (α_s) 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. این تنش‌ها به علت خواص فیزیکی متفاوت فازها منحصراً در یک ماده دو فازي یا بیشتر ایجاد می‌شود. این تنش به طور کلی در پوشش فشاری است اگر ضریب انبساط حرارتی زیرلایه بالاتر باشد. استفاده از یک فرآیند مداوم بعد از خنک شدن فشار در پوشش ایجاد می‌کند. توزیع عدم تطابق حرارتی گاهی اوقات ممکن است در مقدار بزرگ‌تر از تنش کوئنچینگ باشد. افزایش دمای زیرلایه تنش‌های کششی را کاهش می‌دهد. به ویژه برای پوشش‌های با تخلخل بالا یک رفتار شبه الاستیک ممکن است حاصل شود. این امر در مقابل شوک‌های حرارتی مفید واقع خواهد شد. بنابراین، بسته به علامت این تفاوت و دمای رسوب‌گذاری تکامل "تنش‌های حرارتی" می‌تواند کششی یا فشاری باشد. تنش‌های پسماند فشاری در پوشش‌ها اثر مفیدی بر

استحکام چسبندگی و خستگی سیستم دارند. تنش های پسماند کششی، از طرف دیگر، نتیجه ی انقباض ذرات در حین سرد شدن هستند که همچنین می تواند سبب ترک و شکست خستگی بشوند اگر مقدار آن ها بیش از استحکام کششی پوشش باشد. توزیع تنش، شدت و علامت آن در پوشش به شدت به فرآیند مشخص پاشش و شرایط آماده سازی بستگی دارد. در فرآیندهای HVOF که از دماهای پایین پاشش و ذرات با سرعت بالای برخورد استفاده می شود تنش های پنینگ قابل توجهی به وجود می آیند. این تنش ها که به علت انرژی جنبشی ذرات برخورد کننده با زیرلایه یا مواد رسوب داده شده قبلی ایجاد می شوند، القا کننده تنش های پسماند فشاری موضعی در زیرلایه و نیز در لایه رسوب داده شده هستند. بنابراین، علاوه بر تنش های حرارتی و کوئنچ، تنش های پسماند در پوشش های HVOF هم می تواند در نتیجه تنش های پنینگ باشد (Santana و et al، ۲۰۰۸؛ Bruno، Fanara، Guglielmetti، Malard، ۲۰۰۶؛ Matejcek و Sampath، ۲۰۰۱؛ Santana و et al، ۲۰۰۶).

به طور کلی، اندازه گیری تنش پسماند شامل تعیین خواص فیزیکی ماده تحت تنش و سپس مقایسه آن با حالت بی تنش برای همان ماده است. با تکنیک های تحلیلی و محاسباتی مدرن غالباً امکان برآورد تنش هایی که به یک قطعه در حال کار وارد می شود وجود دارد. این به تنهایی برای رسیدن به یک پیش بینی قابل اطمینان از عملکرد قطعه کافی نیست. در واقع، در بسیاری از موارد که شکست غیرمنتظره رخ داده ناشی از حضور تنش های پسماند بوده که با تنش های در حال کار ترکیب شده و عمر قطعه را به طور جدی کاهش داده است. تکنیک های اندازه گیری تنش پسماند را به سختی می توان در سه دسته طبقه بندی کرد: اندازه گیری پارامترهای شبکه کریستالوگرافی، اندازه گیری کرنش ها بعد از لایه برداری یا حفر سوراخ، و اندازه گیری خمش متناسب با اندازه زوج پوشش-زیرلایه. هر کدام از این تکنیک ها مزایا و معایبی دارند. با اینکه تکنیک های بر پایه شبکه و لایه برداری به عنوان روش هایی در نظر گرفته می شوند که اگر به درستی انجام شوند نتایج بدون ابهام نسبتاً دقیقی ارائه می کنند اما آماده سازی نمونه و تجهیزات و ابزار دقیق غالباً وقت گیر و گران هستند (Withers و Bhadeshia، ۲۰۰۱؛ Totemeier و Wright، ۲۰۰۶؛ Sathish، Moran، Martin، Reibel، ۲۰۰۵). تنش های اندازه گرفته شده با روش پراش اشعه X اکثراً تنش های پسماند هستند. تحلیل تنش با اشعه X بر اساس دو تئوری پایه ای است: تئوری الاستیسیته، که رابطه بین تنش ها و کرنش ها را تعریف می کند، و تئوری پراش اشعه X که رابطه بین چینش اتمی در یک جامد و الگوی پراش آن را می دهد. قانون براگ پایه ی تحلیل تنش توسط پراش اشعه X است.

پیشینه پژوهش

در سال ۱۹۹۸ کسِلِر و همکاران (Kesler و et al، ۱۹۹۸) از هر دو پراش نوترونی و اشعه X و نیز تکنیک انحناء بر روی پوشش مولیبدن خالص پوشش داده شده روی فولاد به روش پاشش پلاسما استفاده کردند. آنها دریافتند که در زیرلایه فولادی تنش های فشاری و در پوشش تنش های کششی وجود دارد، در حالی که گرادیان های کوچک مثبت تنش بر سطح نمونه های مختلف متداول هستند. از نظر آنها، محتمل است که برخوردهای موفق ذره تنش های کششی را با بالا بردن لایه های زیرین به طور فزاینده به مقادیر بزرگ تر فشاری توسعه دهد و نیز دریافتند که ضرایب انبساط حرارتی و خواص مکانیکی پوشش مهمترین تأثیر را بر اندازه تنش پسماند دارد. آنها تطابق خوبی بین روندهای تنش پسماند با ضخامت پوشش مشاهده کردند، اما تطابق اندکی در بزرگی تنش به دست آوردند؛ تنش های اندازه گیری شده با روش های پراش تقریباً نصف تنش های اندازه گیری شده با روش انحناء بودند. در سال ۲۰۰۳ پینا و همکاران (Pina و et al، ۲۰۰۳) در پژوهشی طیف گسترده ای از مواد و دو روش پاشش (APS) پاشش اتمسفر-پلاسما و اکسی سوخت سرعت بالا HVOF را مورد بررسی قرار دادند. آنها تنش ها را توسط روش پراش اشعه X (XRD) تعیین کردند، سپس این نتایج را با نتایج به دست آمده از تحلیل مکانیکی رهایی تنش در پوشش های جدا شده از زیرلایه (آزاد) مقایسه نمودند. مقایسه نتایج برای پوشش های چسبنده و جدا نشان داد که حالت تنش پسماند می تواند از لحاظ مؤلفه ای توسط مدل های پیشنهاد

شده تجزیه شود که دو مرحله از تولید تنش را پیشنهاد می‌کند: تنش‌های کوئنچ و تنش‌های سرد کردن ثانویه. آنها توزیع تنش‌های پسماند در عمق، در راستای ضخامت پوشش، از لحاظ ماهیت سیستم پوشش‌دهی را مورد بحث قرار دادند. در پوشش‌های پاشش حرارتی شده سطوح مهمی از تنش‌های پسماند به عنوان نتیجه‌ی انرژی‌های بالای جنبشی و حرارتی موجود در فرآیند و ناشی از خواص مکانیکی و ترموفیزیکی زیرلایه و مواد پودر مورد انتظار است. مدل‌های پیشنهاد شده آنها برای توضیح تولید تنش پسماند در دو دیدگاه بود، یکی بر روی ذرات منفرد متمرکز شده و دیگری بر روی کل رسوب تمرکز کرده است. آنها در نظر گرفتند که سطح تنش پسماند در دو مرحله از فرآیند تعریف شده است: رسوب‌گذاری، وقتی که ذرات پاشش یافته به هدف برخورد می‌کنند و تا دمای ماده لایه‌ی زیرین کوئنچ می‌شوند؛ و مرحله بیشتر سرد شدن تا دمای اتاق وقتی که مشعل پاشش خاموش شده است. این تئوری نشان می‌دهد که تنش‌های پسماند در دو مقیاس تولید می‌شوند: مقیاس میکروسکوپی هر ذره پاشش یافته و مقیاس ماکروسکوپی پوشش. اثرات پارامترهای کلی، مثل ضخامت پوشش، دمای زیرلایه، فاصله پاشش، نرخ رسوب‌گذاری و غیره بررسی شدند. آنها به این نتیجه رسیدند که مقایسه‌ی چنین مدل‌هایی با داده‌های تجربی از پراش اشعه X، یا روش‌های مکانیکی، انحرافات مهمی را نشان می‌دهد. به عنوان یک نتیجه، این تئوری تماماً پذیرفته نشده است. مدل‌هایی که دو مرحله برای تولید تنش‌های پسماند ارائه می‌دهند بین دو نوع تنش تمایز قائل می‌شوند. اولی در طی رسوب تولید می‌شوند وقتی که ذرات به زیرلایه یا لایه‌های رسوب شده قبلی برخورد می‌کنند. آنها توسط آزاد شدن انرژی حرارتی درگیر در فرآیند توضیح داده می‌شوند و تنش‌های کوئنچ نامیده می‌شوند. نتایج نشان داد که تنش‌های پسماند به دست آمده در سطح به شرایط پاشش و ماده زیرلایه حساس هستند، تا زمانی که ضخامت پوشش بیشتر از ۱۰ mm باشد، اما آنها تحت تأثیر دمای زیرلایه قرار می‌گیرند مخصوصاً وقتی که مواد فلزی پاشش شده باشند. نوع دوم تنش‌ها در طی خنک شدن به خصوص پس از پاشش ایجاد می‌شوند؛ در برخی از این موارد آزمایشات یک کاهش در انحنای نمونه یا حتی یک وارونگی شکل آن را نشان داده‌اند. آنها به عدم تطابق انبساط حرارتی بین مواد پوشش و زیرلایه نسبت داده می‌شوند. به عنوان یک نتیجه، این تنش‌ها می‌توانند کششی یا فشاری باشند. اگرچه اثرات محدود به منطقه فصل مشترک است، اثرات می‌توانند در امتداد پوشش منتقل شوند و به سطح برسند اگر ساختار رسوب به میزان کافی فشرده باشد. بزرگی این تنش‌ها به پوشش‌ها و درجه حرارت‌های زیرلایه و ضرایب انبساط حرارتی پوشش‌ها و زیرلایه و مدول یانگ مربوط می‌شود. این پارامترها می‌توانند کاملاً متفاوت با پارامترها در مواد بالک (اولیه) باشند.

در سال ۲۰۰۸ لی پوت و همکاران (Pirling, Manescu, Nylen, Lyphout, ۲۰۰۸) توزیع تنش پسماند پوشش پاششی اینکونل ۷۱۸ بر روی زیرلایه اینکونل ۷۱۸ را به منظور فهم رابطه بین ضخامت پوشش و تنش‌های پسماند بررسی کردند. در این کار هر دو روش عددی که روش اجزای محدود (FEM)^۱ است و روش‌های تجربی که روش لایه‌برداری اصلاح شده (MLRM)^۲ و روش پراش نوترونی هستند برای محاسبه تنش‌های کوئنچینگ و پینینگ به کار بردند. در فرآیند پاشش HVOF، تنش‌های پینینگ قابل توجهی هنگام برخورد ذرات نیمه مذاب به زیرلایه ایجاد می‌شوند. ترکیب این تنش‌های پینینگ همراه با تنش‌های کوئنچینگ و تنش‌های عدم تطابق حرارتی که بعد از رسوب‌گذاری افزایش می‌یابد اهمیت زیادی دارد. پروفیل تنش مقادیر تنش کم مثبت و منفی در راستای ضخامت پوشش را نشان داد؛ که از تطابق محلی هر لایه رسوب یافته با ماهیت مختلف تنش‌های ایجاد شده حین پاشش نشأت می‌گیرد. بالای هر پوشش تنش‌های کششی نشان داده شد در حالی که تنش‌های با ماهیت فشاری در فصل مشترک باقی ماندند. تنش‌های فشاری بالا در فصل مشترک هم در پوشش و هم در زیرلایه یافت شدند و این تنش‌ها به سرعت تبدیل به تنش‌های کششی درون اولین صدها

1 . Finite Element Method

2 . Modified Layer Removal Method

میکرون زیرلایه می‌شوند. آنها دریافتند که ظاهراً افزایش ضخامت پوشش توزیع تنش پسماند را در راستای ضخامت پوشش تغییر نمی‌دهد و مقادیر تنش متناظر باید برای همه‌ی ضخامت‌های پوشش پایین در نظر گرفته شود. تنش فشاری در فصل مشترک هم در پوشش و هم در زیرلایه به دست آمد، اما به نظر رسید که اختلاف در دامنه تنش در فصل مشترک با افزایش ضخامت پوشش به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. این تنش‌های فشاری ممکن است دلیل اتصال خوب پوشش‌ها باشند که بالای ۸۰ MPa برای همه ضخامت‌ها اندازه‌گیری شد.

در سال ۲۰۰۸ سانتانا و همکاران (Santana et al, ۲۰۰۸) به منظور تعیین تنش‌های پسماند در یک پوشش WC-as-ground 12Co با دو ضخامت متفاوت ۲۰۰ و ۳۰۰ μm از دو روش مختلف استفاده کردند. ابتدا تکنیک‌های پراش اشعه ایکس، که تعیین تنش‌های پسماند سطحی پوشش را از طریق روش موسوم به " $\sin^2\psi$ " ممکن ساخت. سپس، یک تکنیک حفر سوراخ با افزایش تدریجی به همراه روش انتگرال، که امکان تحلیل تنش‌های پسماند غیریکنواخت در طول ضخامت در پوشش را فراهم کرد. روش حفر سوراخ با افزایش تدریجی به علت مزایای آن در رابطه با مستقل بودن از هندسه قطعه، امکان انجام اندازه‌گیری‌های درجا و تعیین مشخصات تنش‌های پسماند تا عمق‌های نسبتاً زیاد انتخاب شد. همچنین این روش به منظور جبران اثرات تغییر شکل پلاستیک و خواص ناهمسانگردی مواد بهینه شد. معلوم شد که تنش‌های پسماند سطح تعیین شده توسط تکنیک‌های پراش اشعه X از نوع فشاری هستند و می‌توانند ناشی از فرآیند سنگ‌زنی مؤثر بر دو میکرون اول باشند. در مقابل، نتایج آزمایشات حفر سوراخ افزایشی نشان داد که توزیع-های تنش پسماند در راستای ضخامت، مشخص شده با حضور تنش‌های پیک کششی، در عمق محدوده ۵۰-۱۲۵ μm یکنواخت نیستند. آنها مشاهده کردند که این تنش‌ها به سمت سطح مشترک پوشش-زیرلایه کاهش می‌یابند تا جایی که مؤلفه فشاری تنش بزرگ‌تر از مؤلفه کششی می‌شود. آنها دریافتند این واقعیت که مقدار تنش‌های پسماند فشاری نزدیک فصل مشترک بزرگتر از تنش‌های کششی است می‌تواند به تنش‌های ساچمه‌زنی، حرارتی و کوئنچ کردن نسبت داده شوند. پروفیل تنش پسماند برای این پوشش، توسط تنش‌های پسماند کششی بالاتر در پوشش نزدیک به سطح همراه با تنش‌های فشاری بالاتر نزدیک به فصل مشترک مشخص می‌شود. توسعه‌ی آن می‌تواند از نظر وقوع پدیده‌های مختلف شامل تغییر شکل پلاستیک زیرلایه طی رسوب‌گذاری، توزیع متغیری از تنش‌های کوئنچ کردن در راستای ضخامت و اثر متقابل غیر خطی بین تنش‌های حرارتی و کوئنچ کردن باشد.

روش پژوهش:

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 ۲۵۰ lit/min به عنوان سوخت به کار برده شد. نرخ جریان اکسیژن ۸۳۰ lit/min پاشش با زاویه ۹۰ درجه و با فاصله ۲۰±۲۲۰ mm انجام شد و از روانکار روغن استفاده شد. از پودر آگلومره-زینتر کاربید تنگستن کبالت (WC-12Co) با قطر متوسط ذرات ۲۴/۷ میکرومتر با نام تجاری (WOKA 80.71.1) استفاده شد. ترکیب شیمیایی پودر مورد استفاده توسط دستگاه کوانتومتری آنالیز شد. از دستگاه X'Pert Pro MPD (PANalytical) و $\text{Cu } (K\alpha = 1.54 \text{ \AA})$ X-ray tube 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 ۱۶ 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 ۲۰×۲۰×۴ 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 جهت آماده‌سازی 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.

اندازه‌گیری 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, ۲۰۱۰). 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. جهت بررسی آنالیز فازی در پودر و پوشش و همچنین اندازه‌گیری تنش پسماند در سطح و امتداد ضخامت از پراش سنج 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.

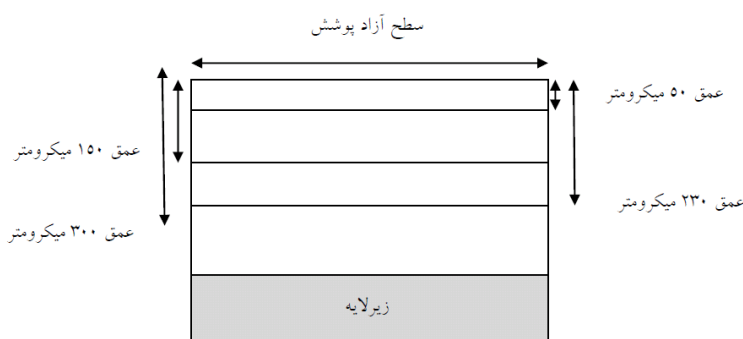
در اندازه‌گیری تنش پسماند به روش پراش پرتو X در سطوح مختلف به ترتیب زیر به منظور ارزیابی تنش در امتداد ضخامت استفاده شد:

- 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 $\left[\ln\left(\frac{d_{\phi\psi}}{d_0}\right)\right]$ 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 پراش‌سنج 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 پراش-سنجی 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٪ از پرتو تابیده شده به سطح پوشش نیز از ضخامت ۵ میکرومتر پراش می‌شود. برای زاویه پراش $2\theta = 98/7^\circ$ ، ۷۲ 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.

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



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

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

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

سپس با استفاده از فواصل مختلف $d_{\phi\psi}$ 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.

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

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

با توجه به اینکه عمق نفوذ اشعه X در سرمت کاربید تنگستن-کبالت کمتر از ۵ میکرومتر است، فرض حالت دو محوری با دقت خوبی 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 سنگ‌زنی خواهد بود. بنابراین کافی است تک تنش $\sigma_\phi = \sigma_1 = \sigma_2$ اندازه‌گیری شود.

- کرنش از رابطه $\varepsilon = \ln(d_{\psi\phi}/d_0)$ 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 $\varepsilon - \sin^2 \psi$ در این معادله به دست می‌آید.

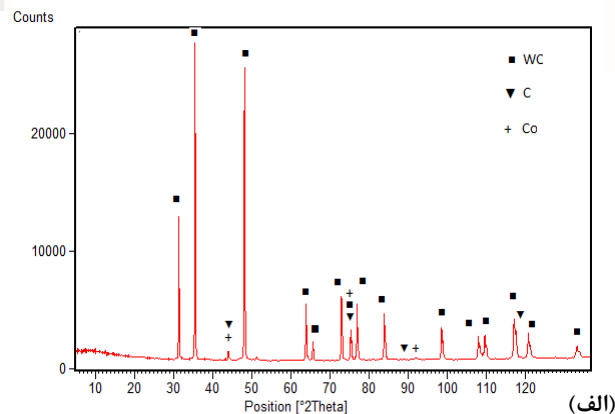
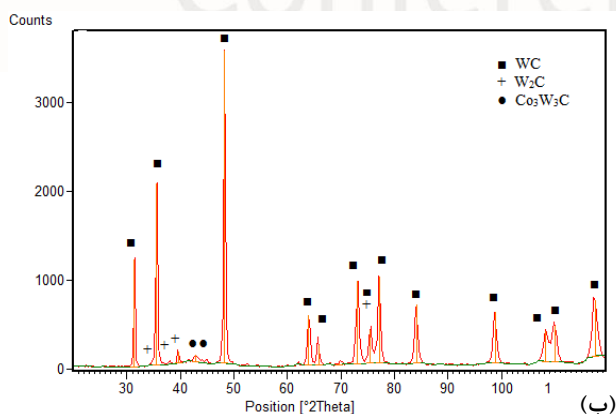
تجزیه و تحلیل داده‌ها:

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

جدول ۱- ترکیب شیمیایی پودر مورد استفاده

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

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.



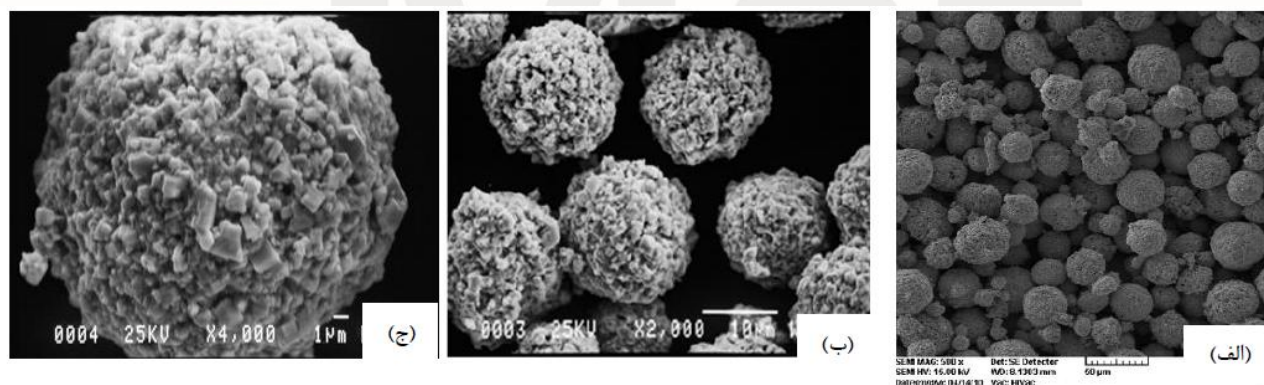
شکل ۲- (الف) الگوی پراش پرتو X پودر. (ب) الگوی پراش پرتو X پوشش WC-12Co

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 (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 سختی سنجی 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. همان گونه که در شکل دیده می شود 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 می آیند. در واقع به علت از دست رفتن کربن در نتیجه اکسیداسیون و واکنش W با فاز فلزی Co تشکیل می شوند. در اینجا فاز جدید W_2C و کاربید پیچیده 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.

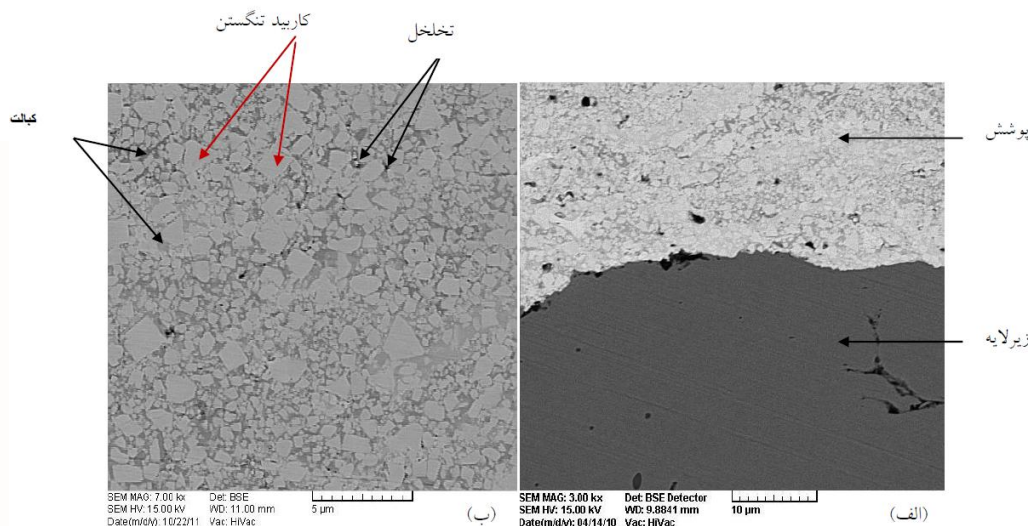


شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودر. (الف) با بزرگنمایی $\times 500$ و (ب) با بزرگنمایی $\times 2000$ (ج) با بزرگنمایی $\times 4000$

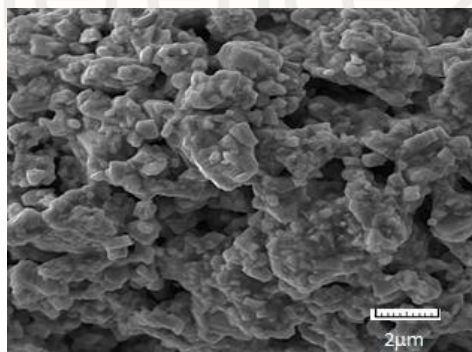
-میکروگرافی پوشش

شکل ۴ شامل تصاویر SEM در حالت الکترون برگشتی (Backscatter Electron) است. شکل ۵ نیز پوشش را در بزرگنمایی $\times 10000$ برابر نشان می دهد. فاز روشن کاربید تنگستن و فاز تیره کبالت است. در این تصاویر ساختار فشرده کاربید تنگستن در زمینه کبالت دیده می شود. کاملاً مشخص است که بایندر فلزی کبالت ذرات WC را در خود گرفته است. این نشان می دهد که کبالت رفتار ترکنندگی خوب و حلالیت مطلوب برای کاربید تنگستن دارد و به همین دلیل پرمصرف ترین بایندر فلزی استفاده شده در سرامت های پایه کاربید تنگستن است. در نقاطی از پوشش تخلخل مشاهده می شود. نقاط کاملاً سیاه نشان دهنده تخلخل هستند. ذرات WC سخت سرامیکی هستند که در زمینه فلزی کبالت قرار گرفته اند. این امر باعث پیوستگی خوب پوشش، تخلخل کم آن و چسبندگی عالی آنها به زیرلایه و خواص مکانیکی خوب مانند سختی بالای این پوشش می شود. شکل ۴-الف، یک نمای کلی از سطح مقطع پوشش-زیرلایه را بعد از آماده سازی متالوگرافی نشان می دهد. پوشش پاشش حرارتی WC-12Co HVOF نسبتاً متراکم بدون ترک هایی

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. همان‌طور 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 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.



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

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

الاستیسیتة شکل حجمی (بالک) آن متفاوت است. بدین لحاظ لزوم اندازه گیری صحیح و دقیق مدول الاستیسیتة پوشش بسیار حائز اهمیت است. مدول الاستیسیتة پوشش در پراش پرتو X به منظور محاسبه تنش با استفاده از شیب نمودار $\varepsilon - \sin^2\psi$ مورد استفاده قرار می گیرد. با داشتن شیب نمودار و مدول الاستیسیتة، تنش از معادله (۴) به دست می آید. میکرو سختی سنجی ویکرز طبق استاندارد ASTM E384-10 با نیروی ۰/۳ Kg.f و زمان اثرگذاری ۱۵ ثانیه انجام شد. میکرو سختی-سنجی نوپ پوشش مطابق استاندارد ASTM E384-10 با نیروی ۰/۲ Kg.f انجام شد. متوسط میکرو سختی نوپ برای ۱۰ اثر با زمان اثرگذاری ۱۵ ثانیه بدست آمد. با اثرگذاری نوپ نسبت قطر فرعی به اصلی اثر نوپ به دست آمد. از نتایج ۱۰ اثر نوپ به منظور اندازه گیری اثر استفاده شد. در اندازه گیری مدول الاستیسیتة پوشش قطر بزرگتر فرورونده باید عمود بر فصل مشترک در نظر گرفته شود، در صورتی که برای اندازه گیری عدد سختی نوپ قطر بزرگتر فرورونده باید موازی با فصل مشترک پوشش-زیرلایه باشد. سپس مدول الاستیسیتة پوشش با استفاده از بازگشت الاستیک اثر نوپ و با استفاده از معادله (۱) و با داشتن عدد سختی نوپ پوشش بدست می آید. نتایج مربوط به محاسبه مدول الاستیک در جدول ۲ آمده است.

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

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

- بررسی تنش پسماند در پوشش

در نمودار شکل ۶ نتایج اندازه گیری کرنش نسبت به $\sin^2\psi$ سطح آزاد پوشش WC-12Co نشان داده شده است. نمودار $\varepsilon - \sin^2\psi$ برای زوایای $\psi > 0$ و $\psi < 0$ نشان دهنده 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 مؤلفه های تنش برشی ناچیز هستند. این نشان می دهد که یک توزیع همگن تنش-کرنش در منطقه پرتو دیده وجود دارد که استفاده از تحلیل $\sin^2\psi$ را توجیه می کند. از میانگین کرنش های به دست آمده در زوایای $\psi > 0$ و $\psi < 0$ جهت به دست آوردن تنش پسماند از شیب منحنی $\varepsilon - \sin^2\psi$ استفاده شد. سپس شیب نمودار در سطح آزاد پوشش به دست آمد که برابر با ۰/۰۰۰۲۲۴- بود. با قرار دادن مقدار شیب نمودار در معادله (۴)، تنش پسماند برابر $38/17 \pm 12$ MPa- به دست آمد. مقدار منفی تنش نشان دهنده فشاری بودن تنش در سطح آزاد پوشش است. معادله خط و محاسبه تنش برای سطح آزاد پوشش:

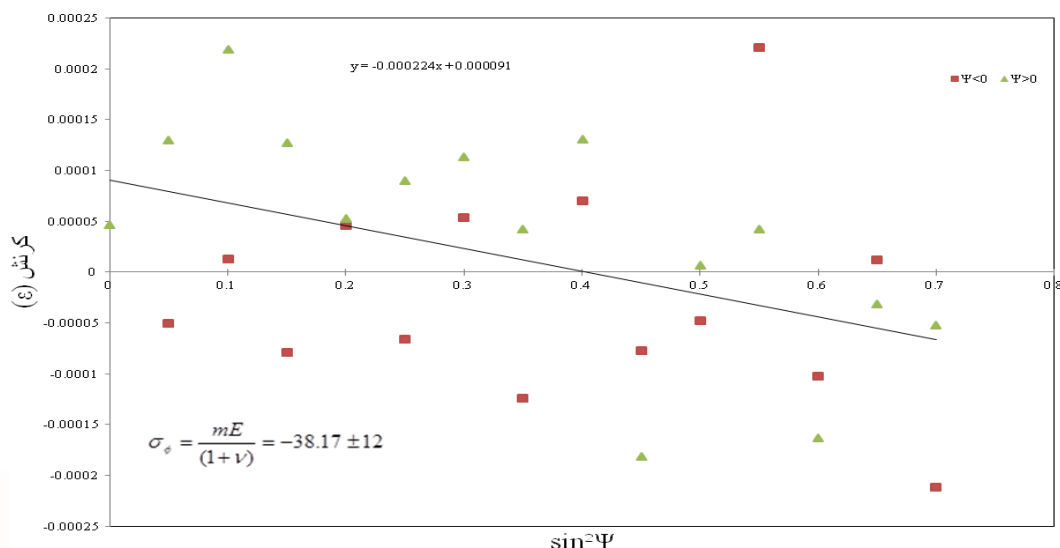
$$y = -0.000224 x + 0.000091$$

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

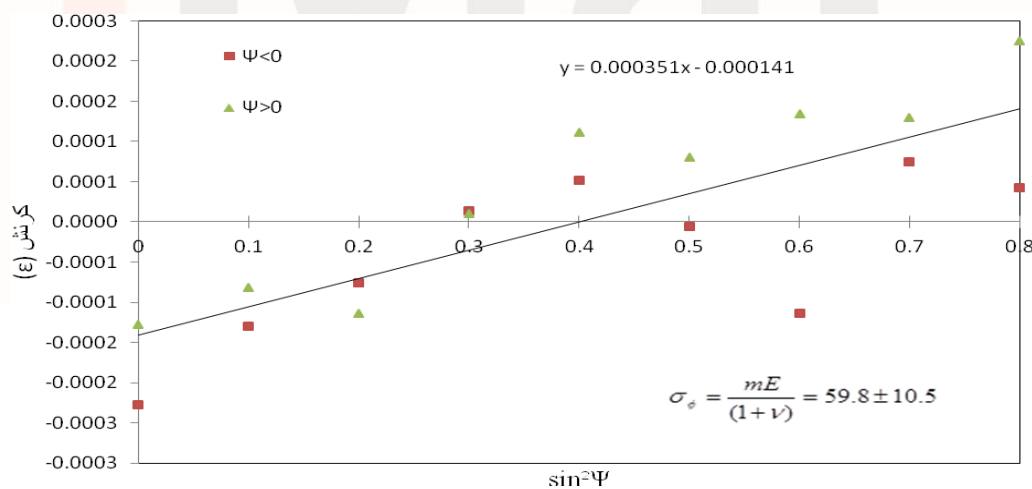
در نمودار شکل ۷ تغییرات کرنش با $\sin^2\psi$ در دو حالت $\psi > 0$ و $\psi < 0$ در عمق ۵۰ میکرومتر نشان داده شده است. با فیت کردن نمودار خطی و به دست آوردن معادله و در نتیجه شیب نمودار و با استفاده از معادله (۴) تنش پسماند برابر با $59/8 \pm 10/5$ MPa به دست آمد. در اینجا شیب نمودار و علامت تنش نیز مثبت به دست آمده است که نشان دهنده کششی بودن تنش در این عمق است. معادله خط و محاسبه تنش برای عمق ۵۰ میکرومتر:

$$y = 0.000351 x + 0.000141$$

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



شکل ۶- نمودار تغییرات کرنش با $\sin^2\Psi$ در دو حالت $\Psi < 0$ و $\Psi > 0$ در سطح آزاد پوشش
نمودار تغییرات کرنش با $\sin^2\Psi$ در عمق ۱۵۰ میکرومتر در شکل ۸ نشان داده شده است.



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

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 $199/8 \pm 24/5$ MPa است. مشاهده می‌شود که تنش فشاری شده و بزرگی آن نیز افزایش یافته است. معادله خط و محاسبه تنش برای عمق ۱۵۰ میکرومتر:

$$y = -0.001172x + 0.000469$$

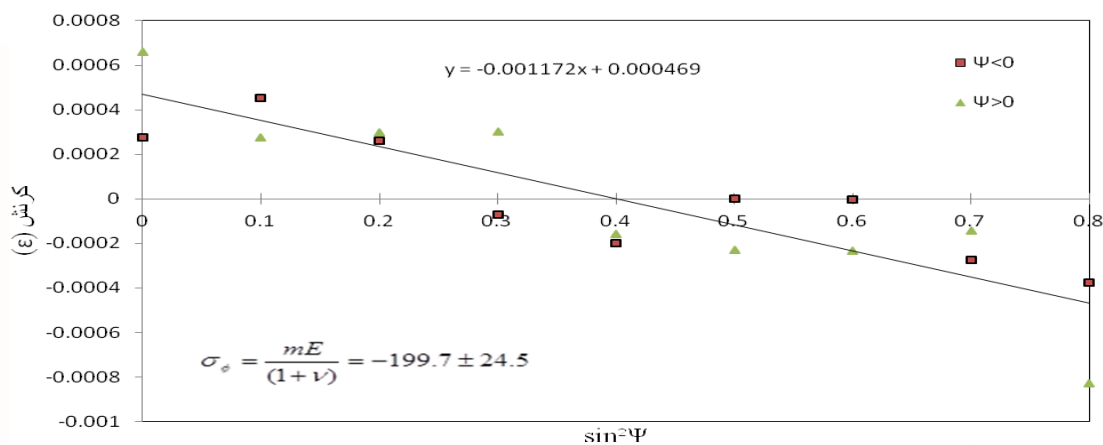
$$\sigma = \frac{mE}{1+\nu} = -199.7 \pm 24.5$$

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 گفت فشاری‌تر است.

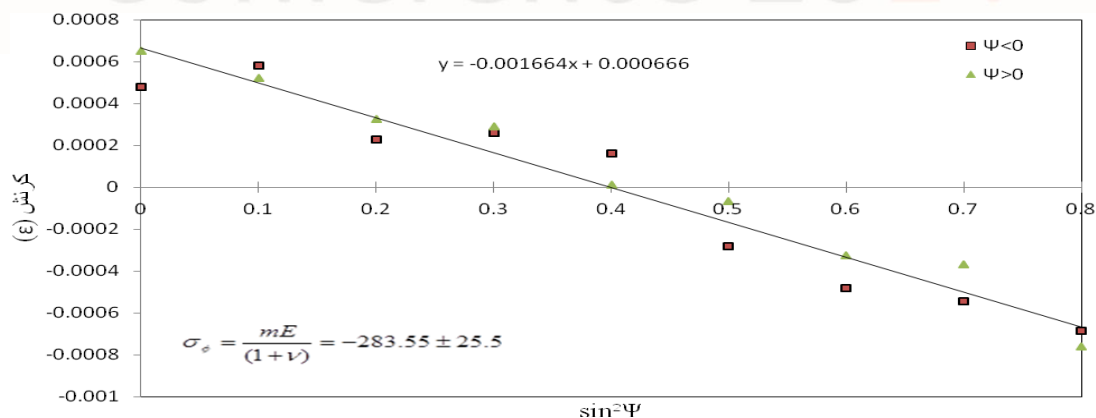
معادله خط و محاسبه تنش برای عمق ۲۳۰ میکرومتر:

$$y = -0.001664x + 0.000666$$

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



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

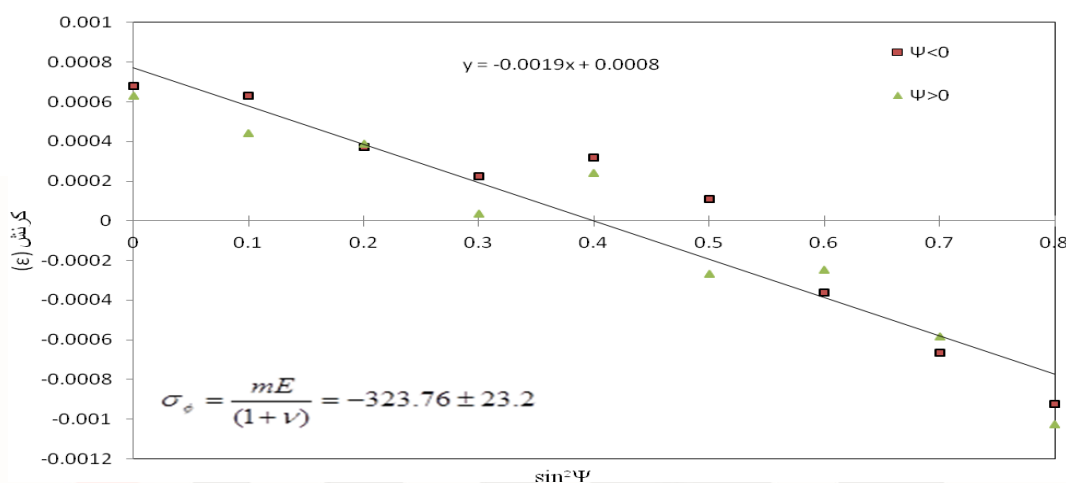


شکل ۹- نمودار تغییرات کرنش با $\sin^2\psi$ در دو حالت $\psi < 0$ و $\psi > 0$ در عمق ۲۳۰ میکرومتر

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:

$$y = -0.0019x + 0.0008$$

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



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

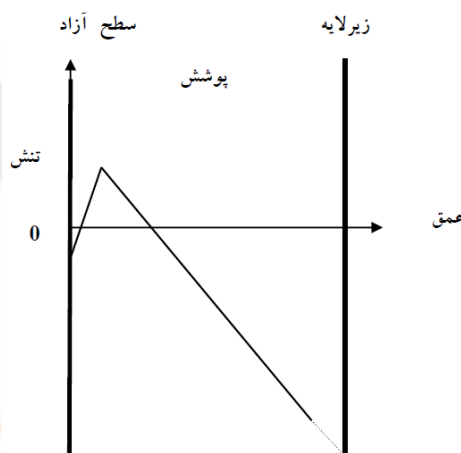
در این عمق که بیشترین فاصله را از سطح آزاد پوشش دارد و به فصل مشترک پوشش-زیرلایه نزدیک‌تر است (با توجه به اینکه ضخامت پوشش حدود ۳۲۰ میکرومتر است)، بزرگ‌ترین تنش فشاری دیده می‌شود.

نتایج تنش‌های پسماند در راستای ضخامت در جدول ۳ آورده شد. متوسط تنش پسماند در امتداد ضخامت پوشش معادل ۱۵۷/۱- 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 نتیجه‌ی 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.

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)	$-38/17 \pm 12$	$59/8 \pm 10/5$	$-199/8 \pm 24/5$	$-282/55 \pm 25/5$	$-323/76 \pm 23/2$	-۱۵۷/۱

تنش‌های عدم تطابق حرارتی ناشی از تفاوت در ضرایب انبساط حرارتی بین پوشش (α_c) و زیرلایه (α_s) 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 ($1-10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) بالاتر از ضریب انبساط حرارتی پوشش ($1-10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) 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. 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.



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

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.

نتیجه‌گیری

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 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 الفاکنده 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 کوئچ 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 کوئچ باعث می‌شود با دور شدن از سطح و نزدیک شدن به زیرلایه تنش پسماند فشاری‌تر 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 کوئچ که کششی است در سراسر ضخامت پوشش تقریباً ثابت است اثر تجمعی 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 کاهشی دما از فصل مشترک به سمت سطح پوشش تخلخل‌هایی با مورفولوژی نامنظم در لایه‌های نزدیک به سطح آزاد شکل می‌گیرد که باعث ایجاد تنش کششی می‌شود (Bruno et al, ۲۰۰۶).

از جدول ۳ دیده می‌شود که متوسط تنش پسماند در امتداد ضخامت برابر $157/1$ 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 (۲۰۰۸) مطابقت دارد. آنها تنش‌های پسماند را در پوشش‌های WC-12Co به ضخامت‌های ۲۰۰ و ۳۵۰ میکرومتر به ترتیب برابر 220 ± 50 - و 183 ± 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 لیائو و همکاران (Codde, Normand, Liao, ۲۰۰۰) 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 (۲۰۰۳) نیز نشان دادند که در فرآیندهایی که در آنها ذرات در تفنگ پاشش به طور کامل ذوب شده هستند، مثل فرآیند

APS، تنش های کوئنچ تنش های غالب هستند. ذرات به محض برخورد گسترش می یابند، اما انقباض طی خنک شدن و انجماد توسط مواد لایه ی زیرین تحمیل می شود و تنش های کششی در درون هر ذره ی پاشش یافته تولید می شوند. از طرف دیگر، تنش های پینینگ که در آن ها ذرات تا حدودی ذوب شده با سرعت بالا به زیرلایه برخورد می کنند، مانند پاشش در HVOF، تنش غالب می توانند باشند. سطح هدف تغییر شکل پلاستیکی می یابد، که سطح قابل توجهی از تنش های فشاری را ایجاد می کند. در پوشش های پاشش یافته به روش HVOF تنش های پینینگ می توانند به مقادیر مهمی برسند بنابراین حالت تنش پسماند می تواند توسط پارامترهای پاشش کنترل شوند. با استفاده از موادی برای پوشش که ضریب انبساط حرارتی کمتری نسبت به زیرلایه داشته باشند می توان تنش عدم تطابق حرارتی را از مؤلفه های کششی به مؤلفه های فشاری تبدیل کرد.

۱. تنش در عمق ۵۰ میکرومتر کششی اما در سطح آزاد پوشش و در عمق های ۱۵۰، ۲۳۰ و ۳۰۰ میکرومتر فشاری به دست آمد.
۲. تنش های پسماند در راستای ضخامت با نزدیک شدن به فصل مشترک بزرگی شان بیشتر می شود که به دلیل افزایش تنش های فشاری پینینگ و عدم تطابق حرارتی و غلبه آنها بر اثر تنش کششی کوئنچ است. بیشترین تنش فشاری نزدیک به فصل مشترک دیده می شود زیرا تنش های فشاری پینینگ و عدم تطابق حرارتی نزدیک به فصل مشترک بیشترین مقدار را دارند.
۳. تنش متوسط در پوشش ۱۵۷/۱ 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 نتیجه ی 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

- 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, No. 200, Pp. 4266-4276.
- 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, Vol. 3(4), Pp. 379-388.
- He, B.B. (2009). "Two-dimensional X-Ray diffraction". John Wiley & Sons Publication, Pp. 249-329.
- Kamara, A.M., & Davey, K. (2007) "A numerical and experimental investigation into residual stress in thermally sprayed coatings". International Journal of Solids and Structures, No. 44, Pp. 8532-8555.
- Kesler, O., Matejcek, J., Sampath, S., Suresh, S., Gnaeupel-Herold, T., Brand, P.C., & Prask, H.J. (1998). "Measurement of residual stress in plasma-sprayed metallic, ceramic and composite coatings". Materials Science and Engineering: A, Vol. 257, Pp. 215-224.
- 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, Vol. 124, Issues 2-3, Pp. 235-242.
- Lyphout, C., Nylen, P., Manescu, A., & Pirling, T. (2008). "Residual stresses distribution through thick HVOF sprayed Inconel 718 coatings". Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 17(5-6), Pp. 915-923.
- Matejcek, J., & Sampath, S. (2001). "Intrinsic residual stresses in single splats produced by thermal spray processes". Acta Materialia, No. 49, Pp. 1993-1999.
- Metals Handbook Vol. 5 (1994). "Surface engineering", ASM International.
- Miguel, J.M., Guilemany, J.M., Mellor, B.G., & Xu, Y.M. (2003). "Acoustic emission study on WC-Co thermal sprayed coatings". Materials Science and Engineering, A352, Pp. 55-63.
- 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, No. A347, Pp. 21-31.

- Santana, Y.Y., La Barbera-Sosa, J.G., Staia, M.H., Lesage, J., Puchi-Cabrera, E.S., Chicot, D., & Bemporad, E. (2006). "Measurement of residual stress in thermal spray coatings by the incremental hole drilling method". Surface & Coatings Technology, No. 201, Pp. 2092-2098.
- 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, No. 202, Pp. 4560-4565.
- Sathish, Sh., Moran, Thomas J., Martin, Richard W., & Reibel, Richard. (2005) "Residual stress measurement with focused acoustic waves and direct comparison with X-ray diffraction stress measurements". Materials Science and Engineering, No. A 399, Pp. 84-91.
- 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, No. 200, Pp. 3955-3962.
- 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: A, Vol. 527, Pp. 454-461.
- Withers, P.J., & Bhadeshia, H.K.D.H. (2001). "Residual stress part 1: measurement techniques". Materials Science and Technology, Vol. 17, Pp. 355-365.

iMat
Conference 2014