

بررسی تجربی و شبیه‌سازی توزیع تنش پسماند در راستای ضخامت پوشش HVOF به روش WC-10Co-4Cr

محمد حسین صادقی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

مائده السادات ضوئی

پژوهشکده مواد و انرژی، پژوهشگاه فضایی ایران

مهدی صالحی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۹۶/۰۴/۱۳ - پذیرش مقاله: ۹۶/۰۷/۰۴)

چکیده

کاربرد پوشش WC-10Co-4Cr ایجاد شده توسط روش پاشش حرارتی با سوخت اکسیژن در سرعت بالا، HVOF، به دلیل مقاومت سایشی و خوردگی بالا، به میزان قابل توجهی توسعه یافته است. تنش‌های پسماند ایجاد شده در طی فرآیند پوشش دهی بر مقاومت سایشی و چسبندگی پوشش به زیرلایه مؤثر هستند. در این مطالعه، تنش پسماند پوشش توسط تکنیک پراش اشعه ایکس (XRD) به روش $\sin^2\psi$ و تحلیل المان محدود تعیین گردید. در اندازه‌گیری تجربی، فرآیند برداشت شیمیایی ماده به منظور تعیین تنش در راستای ضخامت پوشش به کار برده شد. در تحلیل المان محدود، ابتدا برخورد ذره بر زیرلایه انجام شد. سپس نتایج حاصل از تحلیل برخورد، به عنوان ورودی در تحلیل ترمومکانیکی، به منظور تعیین تنش پسماند پوشش به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که تطابق قابل قبولی میان نتایج تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد. پس از فرآیند پاشش حرارتی، تنش پسماند در سطح پوشش WC-10Co-4Cr فشاری بوده و سپس با افزایش عمق از سطح آزاد، مقدار تنش فشاری افزایش یافته و در نزدیکی فصل مشترک پوشش زیرلایه، بیشترین مقدار تنش پسماند فشاری بدست می‌آید. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که توزیع تنش در پوشش به جز لبه‌های نمونه، یکنواخت است. تنش در لبه نمونه دارای تمرکز تنش کششی در فصل مشترک پوشش و زیرلایه است که مستعد ترک، جدایش و شکست پوشش است.

واژه‌های کلیدی: HVOF، پوشش WC-10Co-4Cr، تنش پسماند، تحلیل المان محدود.

Experimental and Simulation Investigation of Through Thickness Residual Stress in HVOF-Deposited WC-10Co- 4Cr Coating

Maedeh Sadat Zoei

Institute of Materials and Energy, Iranian Space Research Center

Mohammad Hosein Sadeghi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University

Mehdi Salehi

Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology

(Received 4 July 2017, accepted 26 September 2017)

Abstract

Application of WC-10Co-4Cr coating deposited by High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) has been widely developed for its high wear and corrosion resistance. The residual stresses created during the coating deposition process greatly effects the wear resistance and the adherence of coating to the substrate. In this study, the residual stress of coating was determined by the X-ray diffraction (XRD) technique using $\sin^2\psi$ method and finite element method (FEM). In the experimental evaluation, the chemical layer removal process was used to measure the through thickness residual stress. In the finite element method, the impingement of the WC-10Co-4Cr particle on substrate was studied. Afterwards, the results from the impingement analysis are subsequently utilized as an input data in thermomechanical model to develop the residual stress of as-sprayed coating. The results showed that there was a good agreement between the experimental and simulation results. Final surface residual stress of WC-10Co-4Cr coating was compressive. The value of residual stress was increased with the greater thickness of coating. These compressive stresses reached to maximum compressive stress at the coating-substrate interface. Simulation results showed that the distribution of stress in the coating, except for the edges of the sample, was uniform. Residual stress on the edge of the sample had a tensile stress concentration in the interface of the coating and substrate which was prone to cracks, separations and defects of coating.

Keywords: HVOF, WC-10Co-4Cr coating, Residual stress, Finite element method.

E-mail of Corresponding author: m.zoei@modares.ac.ir.

مقدمه

پوشش‌های پاشش حرارتی بر مبنای کاربرد تنگستن به عنوان پوشش‌هایی مقاوم در برابر فرآیندهای فرسایشی نظیر سایش و خوردگی به کار برده می‌شوند [۱]. فرآیند پاشش حرارتی سرعت بالا با سوخت اکسیژن، HVOF^۱، یکی از مهم‌ترین فرآیندهای ایجاد پوشش‌های کاربردی است. در پوشش‌های کاربردی حاصل از فرآیند HVOF، به دلیل سرعت بالای ذرات در طی رسوب، مزایای مختلفی از جمله تخلخل کم، استحکام باند و سختی بالا ایجاد می‌گردد [۲، ۳]. پوشش WC-10Co-4Cr ایجاد شده به روش پاشش حرارتی HVOF، یکی از پرکاربردترین پوشش‌های کاربردی است. افزودن Cr به WC-Co، موجب کاهش تجزیه WC و تشکیل تنگستن فلزی می‌شود. همچنین با افزایش چسبندگی ماتریس فلزی به دانه‌های WC، مقاومت سایشی پوشش بهبود می‌یابد [۴، ۵]. این پوشش به عنوان جایگزینی برای کروم‌کاری در کاربردهای سایش و خوردگی، به واسطه حفاظت محیط زیست مورد توجه است [۶].

یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر خواص کاربردی پوشش‌های حاصل از پاشش حرارتی، تنش پسماند است. تنش پسماند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد، پایداری ابعادی، استحکام خستگی و مقاومت سایشی قطعه دارد [۷]. تنش‌های پسماند در پوشش‌های پاشش حرارتی فشاری و یا کششی هستند. تنش‌های پسماند فشاری با ممانعت از احتمال بروز و گسترش ترک، عمر کاری قطعه‌کار را افزایش داده و دارای اثر مثبت بر پیوستگی پوشش و رفتار خستگی سیستم هستند. تنش‌های پسماند کششی موجب ایجاد ترک و کاهش عمر خستگی می‌شوند [۹-۷].

تنش‌های پسماند ایجاد شده در پوشش‌های پاشش حرارتی توسط چندین محقق به صورت تجربی و

شبیه‌سازی [۱۷-۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. این مطالعات نشان داده است که در پوشش‌های حاصل از فرآیند پاشش حرارتی HVOF، تنش پسماند نهایی از ترکیب سه نوع تنش شامل تنش کوبشی^۲، تنش سرمایش^۳ و تنش عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی^۴ حاصل می‌شود. تنش کوبشی، تنش مکانیکی ناشی از برخورد قطرات ماده پوشش با سرعت بالا به زیرلایه و لایه‌های قبلی پوشش بوده که از نوع تنش فشاری است. در بازه زمانی برخورد ذره با دمای بالا به زیرلایه در دمای اتاق، انقباض حرارتی لایه جدید توسط زیرلایه یا لایه قبلی پوشش محدود می‌گردد. در نتیجه تنش پسماند کششی سرمایش در لایه جدید ایجاد می‌شود. پس از اتمام رسوب پوشش، سرد شدن مجدد پوشش و زیرلایه برای رسیدن به دمای محیط اتفاق می‌افتد. در حین این کاهش دما، به دلیل تفاوت بین ضرایب انبساط حرارتی پوشش و زیرلایه، تنش ناشی از عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی به پوشش تحمیل می‌شود. تنش ناشی از عدم مطابقت حرارتی می‌تواند کششی یا فشاری باشد و با میزان اختلاف دو ضریب انبساط حرارتی پوشش و زیرلایه تعیین می‌گردد.

نتایج مطالعات قبلی نشان داده است که تنش پسماند ایجاد شده در هر پوشش، به میزان قابل توجهی به پارامترهای فرآیند پوشش‌دهی، آماده‌سازی سطح زیرلایه و نوع ماده پوشش وابسته است. بنابراین لزوم تعیین تنش پسماند برای شرایط مشخص هر مطالعه مطرح می‌گردد. علاوه بر این، مطالعات قبلی مربوط به اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند در پوشش و روش‌های پوشش‌دهی متفاوت، تنها محدود به اندازه‌گیری تنش پسماند سطحی [۱۰، ۱۱، ۱۵، ۱۶، ۱۷] و یا میانگین توزیع تنش پسماند در راستای ضخامت پوشش [۱۳] هستند. در مطالعه تنش پسماند در

^۲ Peening Stress

^۳ Quenching Stress

^۴ Thermal Mismatch Stress

^۱ High Velocity Oxy Fuel

۱ نشان داده شده‌است. پوششی به ضخامت ۴۰۰ میکرومتر بر روی سطح $20 \times 20 \text{ mm}^2$ نمونه‌ها اعمال شد.

جدول ۱. پارامترهای فرآیند پاشش حرارتی HVOF

پارامتر	مقدار
دبی اکسیژن (mL/min)	۸۳۰
دبی سوخت (mL/min)	۲۷۰
دبی گاز حامل (L/min)	۵
فاصله پاشش (cm)	۳۴/۵
نرخ تغذیه پودر (g/min)	۵۵

اندازه‌گیری تنش پسماند

در پژوهش حاضر از تکنیک پراش اشعه ایکس به روش $\sin^2\psi$ برای اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده شده‌است. در روش XRD، فاصله بین صفحات کریستالی، d ، به عنوان کرنش سنج به کار برده می‌شود. مقدار d توسط موقعیت قله منحنی پراش با کاربرد قانون براگ^۱ به صورت رابطه (۱) تعیین می‌شود:

$$\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta \quad (1)$$

که λ ، hkl و θ به ترتیب طول موج اشعه ایکس، شاخص میلر صفحات پراش و زاویه براگ هستند [۱۸].

در این روش، نمونه در زاویه‌های کجی ψ ، مختلف قرار می‌گیرد. در هر زاویه ψ ، با تابش اشعه ایکس به سطح نمونه، منحنی پراش و موقعیت قله منحنی پراش (2θ) بدست می‌آید. سپس مقدار d ، از قله منحنی پراش و رابطه براگ تعیین می‌شود. در نهایت تنش پسماند توسط شیب (m) خط حاصل از رگرسیون خطی مابین d و $\sin^2\psi$ و کاربرد رابطه (۲) محاسبه می‌گردد [۱۹]:

$$m = \frac{1+\nu}{E} d_0 \sigma_\phi \quad (2)$$

راستای ضخامت پوشش [۱۴] نیز از روش مکانیکی لایه‌برداری پوشش بدون اعمال روش تصحیح تنش، استفاده شده‌است که نتایج دقیق نبوده و تطابق قابل قبولی مابین نتایج تجربی و شبیه‌سازی ارائه نشده‌است.

در این مقاله به اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند در نقاط مشخصی از راستای ضخامت پوشش WC-10Co-4Cr ایجاد شده به روش HVOF، توسط برداشت شیمیایی لایه و اعمال روش تصحیح تنش، پرداخته شده‌است. علاوه بر این به دلیل محدودیت اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند، به منظور تعیین توزیع تنش در تمامی نقاط سطح و عمق پوشش، شبیه‌سازی دقیق تعیین تنش پسماند در پوشش WC-10Co-4Cr پس از فرآیند پاشش حرارتی انجام شده‌است. به منظور صحت‌سنجی مدل اجزای محدود، نتایج توزیع تنش پسماند در راستای ضخامت پوشش با نتایج تنش اندازه‌گیری شده به روش تجربی مقایسه می‌شوند. در صورت تطابق نزدیک نتایج تجربی و شبیه‌سازی، امکان کاربرد شبیه‌سازی در مقایسه با روش‌های هزینه‌بر و زمان‌بر اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند، فراهم می‌گردد. شبیه‌سازی دقیق تعیین تنش‌های پسماند پوشش، دستاورد مهمی برای صنعت خدمات پاشش حرارتی است.

مواد و روش آزمایش‌ها

ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، نمونه‌های آزمایشگاهی از جنس فولاد کم‌کربن AISI 1010 با ابعاد $20 \times 20 \times 4 \text{ mm}^3$ به عنوان زیرلایه در نظر گرفته شد. به منظور افزایش چسبندگی پوشش به زیرلایه، سطح نمونه‌ها توسط ذرات SiC با اندازه مش ۲۴، ماسه‌پاشی شدند. پودر WC-10Co-4Cr (WOKA 3652) به عنوان پودر پوشش با اندازه ذرات ۱۵ تا ۴۵ میکرومتر و شکل کروی به کار گرفته شد.

پوشش‌دهی توسط دستگاه HVOF با نام تجاری METJET-III انجام گرفت. پارامترهای مورد استفاده در پاشش حرارتی HVOF پودر WC-10Co-4Cr، در جدول

¹ Bragg

² Tilt angles

سنگ‌زنی برای برداشتن لایه‌های پوشش استفاده کرده‌اند، که خود این روش می‌تواند تنش اضافی به سیستم پوشش تحمیل کند و نتایج را تحت تأثیر قرار دهد.

به منظور اچ تنگستن و محصولات مرتبط با آن اچ‌کننده‌های مختلفی پیشنهاد شده و بر امکان استفاده از اچ‌کننده‌های تنگستن به منظور اچ کردن آلیاژهای آن شامل کاربید تنگستن نیز تأکید شده است. اچ‌کننده‌های شیمیایی که صورت مؤثر به تنگستن حمله می‌کنند، شامل اسید نیتریک، HNO_3 ، و اسید هیدروفلوئوریک، HF، هستند. نسبت‌های مختلفی برای اسید نیتریک و اسید هیدروفلوئوریک با قابلیت‌های مختلف پیشنهاد شده و بهترین ترکیب درصد حجمی به ترتیب ۶۰ و ۴۰ درصد ذکر شده است [۲۲، ۲۳]. در پژوهش حاضر نیز از همین نسبت اچ‌کننده استفاده شده است. لایه برداری پوشش بترتیب در فاصله ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ میکرومتر از سطح پوشش انجام شده است.

تعیین توزیع تنش پسماند توسط برداشتن قسمتی از پوشش، منجر به آزادسازی بخشی از تنش خواهد شد. در نتیجه مقادیر اندازه‌گیری شده تنش، نماینده تنش‌های واقعی داخلی موجود در پوشش پیش از لایه برداری نبوده و تعیین مقدار آزادسازی و توزیع مجدد در تنش پسماند در سطح مورد نظر، ضروری است. بنابراین لازم است مقادیر اندازه‌گیری شده به نحوی تصحیح گردند تا به مقادیر واقعی نزدیک‌تر باشند. یکی از مهم‌ترین روش‌های تصحیح تنش توسط مور^۶ و همکارانش [۲۴] پیشنهاد شده است که به روش تصحیح سری‌های توانی^۷ معروف است. بر اساس شکل هندسی سطح، روابطی برای تصحیح مقدار تنش، ارائه شده است. در این بررسی با توجه به مسطح بودن سطح نمونه (شکل ۱)، رابطه تصحیح تنش در صفحه مسطح ارایه می‌گردد که عبارت است از:

که θ ، E ، d_0 و σ_ϕ به ترتیب ضریب پواسون، مدول الاستیسیته، پارامتر d بدون تنش و مؤلفه تنش در راستای زاویه آزیموس^۱، ϕ ، است.

در پژوهش حاضر به منظور اندازه‌گیری تنش پسماند به روش XRD از دستگاه پراش پرتو ایکس فیلیپس^۲ مدل X'pert-MPD تحت ولتاژ ۴۰ kV و جریان ۴۰ mA استفاده شد. در تمام آزمایش‌ها پرتو ایکس $Cu K\alpha$ با طول موج 1.5406 \AA به کار گرفته شد. اندازه‌گیری تنش در دو راستای $\phi = 0^\circ$ و $\phi = 90^\circ$ ، به ترتیب برای تعیین تنش طولی^۳ و تنش عرضی^۴ انجام شد. مطالعه قبلی نویسنده و همکارانش [۱۷] نشان داد که از میان سایر روش‌های موقعیت‌یابی قله منحنی پراش در اندازه‌گیری تنش پسماند، روش سهموی، دقیق‌ترین روش برای اندازه‌گیری تنش پسماند پوشش WC-10Co-4Cr به روش HVOF است. بنابراین در این مطالعه، روش سهموی به منظور موقعیت‌یابی قله منحنی پراش در اندازه‌گیری‌های تنش پسماند به کار گرفته شد.

تعیین تجربی توزیع تنش پسماند

به منظور بررسی توزیع تنش پسماند از سطح پوشش تا نزدیکی مرز پوشش با زیرلایه از تکنیک برداشت ماده استفاده شده است. بدین منظور تغییرات تنش پسماند به صورت تابعی از عمق، توسط برداشت شیمیایی لایه^۵ پوشش، اندازه‌گیری تنش پسماند به روش XRD و تصحیح تنش اندازه‌گیری شده، انجام می‌پذیرد. انتخاب اچ شیمیایی برای برداشتن لایه‌های پوشش، به دلیل عدم تأثیر این روش بر وضعیت تنشی نمونه به علت ماهیت شیمیایی فرآیند است. به منظور بررسی توزیع تنش پسماند به روش لایه برداری، برخی از محققین [۱۲، ۲۰، ۲۱] از روش‌های مکانیکی نظیر پولیش مکانیکی و

¹ Azimuth angles

² Philips

³ Longitudinal stress

⁴ Transverse stress

⁵ chemical layer removal

⁶ Moore

⁷ Power Series Correction

است. مرحله اول (دینامیکی) عبارت است از شبیه‌سازی برخورد ذرات تکی ماده پوشش WC-10Co-4Cr بر زیرلایه و انتقال نتایج بدست آمده از تحلیل برخورد شامل تنش و دما به عنوان پارامترهای اولیه به مرحله دوم تحلیل المان محدود. مرحله دوم (استاتیکی) شامل تحلیل لایه به لایه به صورت غیرخطی حرارتی-مکانیکی است. در نهایت پوشش و زیرلایه حاصل از تحلیل لایه به لایه تا رسیدن به دمای محیط خنک می‌شوند. در این مطالعه، شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار ABAQUS CAE version 6.14 انجام شده است. به منظور اعتبارسنجی و بررسی صحت تحلیل المان محدود، نتایج تحلیل المان محدود با نتایج اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند توسط روش XRD، مقایسه می‌شوند. پارامترهای ابعاد قطعه و شرایط پاشش مطابق با مقادیر به کار رفته در بررسی تجربی بوده، بنابراین مقایسه نتایج شبیه‌سازی و بررسی آزمایشگاهی معنی‌دار است.

مدل‌سازی برخورد ذره

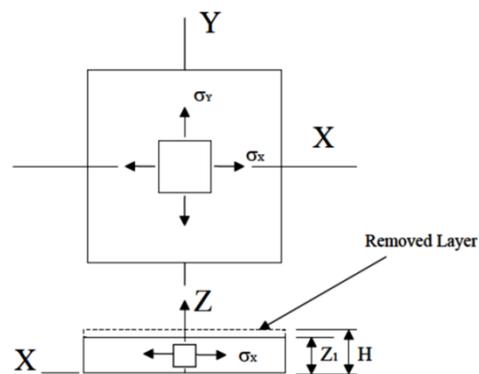
یک مدل دوبعدی متقارن از برخورد ذره‌ای WC-10Co-4Cr به قطر $30 \mu\text{m}$ ، به زیرلایه فولاد کم‌کربن AISI 1010 به ابعاد $(10 \times 4 \text{mm}^2)$ در نرم‌افزار ایجاد شده است. بررسی فرآیند پاشش حرارتی HVOF نشان داده است که در طی فرآیند رسوب، ذرات تکی پودر در جریان گاز به صورت جدا از یکدیگر بوده و هیچ‌گونه ترکیب پودری در حین پرتاب اتفاق نمی‌افتد [۲۶]. بنابراین توزیع اندازه پودر در حین فرآیند پاشش حرارتی بدون تغییر باقی می‌ماند. جهت کاهش حجم محاسبات و با توجه به متقارن بودن شرایط، تحلیل تنها بر روی نیمی از نمونه انجام شد. شکل ۲ مدل متقارن به کار رفته در این تحلیل را نشان می‌دهد. یک ذره با شعاع r با سرعت V به زیرلایه برخورد کرده و T_p و T_s به ترتیب دمای ذره و زیرلایه هستند. در تحلیل المان محدود، شرایط پاشش HVOF، توسط سرعت و دمای ذره مشخص می‌شود.

$$\sigma(z_1) = \sigma_m(z_1) + 2 \int_{z_1}^H \frac{\sigma_m(z)}{z} dz - 6z_1 \int_{z_1}^H \frac{\sigma_m(z)}{z^2} dz \quad (3)$$

بسط تابع تحت انتگرال در رابطه‌ی بالا توسط سری‌های تیلور، انجام شده و پس از ساده‌سازی رابطه زیر به منظور تصحیح تنش پسماند به کار برده می‌شود:

$$\sigma(z_1) = \sigma_m(z_1) + \left(-4\sigma_m(H) \left(\frac{H-Z_1}{H}\right)\right) \quad (4)$$

که H ضخامت اولیه صفحه، Z_1 ضخامت صفحه پس از برداشت لایه، σ_m تنش اندازه‌گیری شده و σ_z تنش تصحیح یافته است.



شکل ۱. تنش در یک صفحه مسطح پس از برداشت ماده [۲۵].

شبیه‌سازی تنش پسماند ناشی از فرآیند پاشش حرارتی

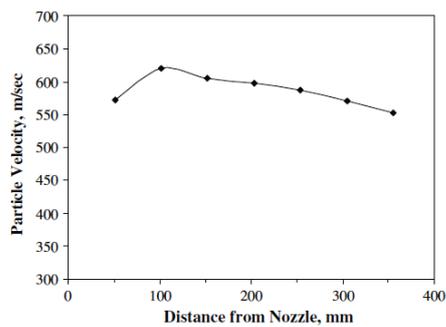
HVOF

رسوب پوشش با کاربرد روش پاشش حرارتی HVOF یک فرآیند دینامیکی به همراه تغییر شکل سریع و انجماد ذرات پاشش شده و در ادامه خنک شدن نمونه تا رسیدن به دمای محیط است. تعیین تنش پسماند ناشی از پاشش توسط یک روش ترکیبی المان محدود غیرخطی explicit-implicit به منظور مطالعه فرآیندهای ترمومکانیکی مرتبط با برخورد ذره^۱ و رسوب‌دهی لایه^۲ انجام می‌پذیرد. بنابراین شبیه‌سازی تشکیل پوشش شامل دو مرحله

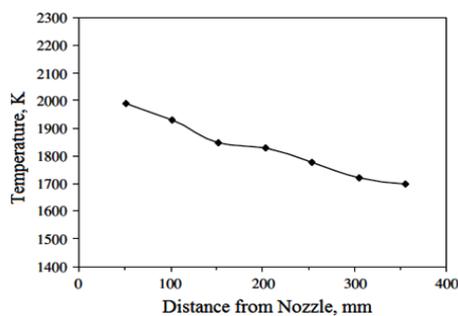
¹ Particle Impingement

² Layer Deposition

برخورد ذرات پاشش حرارتی بر زیرلایه یک پدیده تماسی دینامیکی غیرخطی است. پاسخ میکروسکوپی و ماکروسکوپی ذرات برخورد کننده و زیرلایه تحت چنین شرایط بارگذاری به شدت متأثر از کرنش، نرخ کرنش، دما و میکروساختار ماده است. بنابراین کاربرد معادله متشکله مناسب به منظور تعریف خواص مواد، در مدل‌سازی چنین فرآیندی ضروری است. معادله متشکله ارایه شده توسط جانسون-کوک (مدل J-C) در بسیاری از مدل‌سازی‌های عددی شامل نرخ کرنش و دمای بالا، به منظور در نظر گرفتن اثرات سخت‌شوندگی کرنشی، نرم‌شوندگی حرارتی و نرخ کرنش به کار برده می‌شود.



(الف)

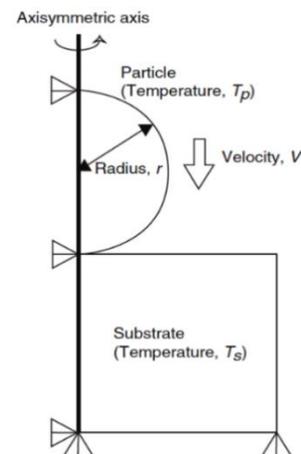


(ب)

شکل ۳. تغییرات (الف) سرعت و (ب) دمای ذرات در فرآیند HVOF نسبت به تغییرات فاصله تفنگ پاشش تا سطح قطعه‌کار [۲۹].

بنابراین رفتار پلاستیک ذرات WC-10Co-4Cr پاشش داده شده در طی فرآیند پوشش‌دهی توسط مدل پلاستیک جانسون-کوک تعریف شده است که برای مدل‌سازی تغییر شکل با نرخ کرنش بالا مناسب است. مدل جانسون-کوک به صورت زیر بیان می‌شود [۳۰]:

امروزه تعیین رفتار و مشخصات ذرات پاشش شده توسط کاربرد روش‌های اندازه‌گیری مانند سنجش داپلر لیزری^۱، سرعت سنجی تصویر ذره^۲ و گرماسنجی دو رنگی سرعت بالا^۳ صورت می‌پذیرد [۲۷، ۲۸]. گیوی^۴ و همکارانش [۲۹] به بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند HVOF شامل نرخ جریان اکسیژن، نرخ تغذیه پودر و فاصله تفنگ پاشش تا سطح قطعه‌کار بر سرعت و دمای برخورد ذرات به سطح در فرآیند ایجاد پوشش WC-10Co-4Cr پرداختند. با توجه به نتایج مطالعه فوق (شکل ۳) و پارامترهای مربوط به فرآیند پاشش حرارتی در این بررسی (جدول ۱)، سرعت و دمای برخورد ذرات به ترتیب برابر با ۵۵۰ m/s و ۱۷۱۰ K انتخاب گردید. در مدل‌سازی دینامیک حرکت ذره، تمامی ذرات دارای سرعت یکسان عمود بر زیرلایه هستند. دمای زیرلایه معادل دمای محیط، برابر با ۲۹۸ K است. در تحلیل برخورد، تمامی جابه‌جایی‌ها در صفحه پایین زیرلایه مقید شده و شرایط مرزی تقارن در سمت چپ مدل اعمال شده است. تحلیل دینامیکی کوپل جابه‌جایی-حرارت^۵ به منظور مطالعه فرآیند ضربه با نرخ کرنش بالا انجام شده است.



شکل ۲. مدل تقارن دو بعدی از ذره در حالت برخورد با زیرلایه.

¹ Laser Doppler Anemometry
² Particle Image Velocimeter
³ High-Speed Two Color Pyrometer
⁴ Gui
⁵ Temperature-displacement coupled

۰/۲۹	۰/۲۲	ضریب پواسون
$12/5e^{-6}$	$6/5e^{-6}$	ضریب انبساط حرارتی، α (1/K)
۲۷۲۱۴۰	۴۲۰۰۰۰	گرمای نهان ذوب، L_f (J/kg)
۱۷۶۷/۱	۱۵۸۰	دمای انجماد، $(K) T_{sol}$
۱۸۰۱/۷	۱۶۴۰	دمای ذوب، $(K) T_{liq}$
۴۶۵	۲۹۵	گرمای ویژه، $(J/kg K) c_p$

به‌منظور تعیین توزیع تنش دقیق، به مش ریز با المان‌های کوچک نیاز است که منجر به ماکزیمم بازه زمانی بسیار کوچک شده و در نتیجه زمان محاسبات تحلیل به شدت افزایش می‌یابد. به‌منظور بهینه‌سازی راندمان محاسباتی مدل ضربه، المان‌های کوچک‌تر فقط در امتداد فصل اشتراک ذره-زیرلایه به‌کار گرفته می‌شود (شکل ۴). در این تحلیل نوع المان CAX4RT بوده که معادل المان دوبعدی چهار گره‌ای تقارن محوری، کوپل مکانیکی- حرارتی دارای فرمول‌بندی کاهش یافته با قابلیت کنترل پدیده ساعت شنی است. تعداد المان در نیمی از ذره و زیرلایه به‌ترتیب برابر با ۳۰۵ و ۱۰۰۰۰ است. تعداد المان‌ها با توجه به بررسی حساسیت خروجی نسبت به اندازه مش تعیین گردید. بدین منظور ابتدا مساله با المان‌های درشت تحلیل شده و تنش در یک مسیر دلخواه از قطعه ثبت گردید. سپس با کاهش اندازه المان‌ها، مساله مجدد تحلیل شد. فرآیند ریز کردن المان‌ها تا جایی ادامه می‌یابد که اختلاف میان نتایج بسیار کم شود، به عبارت دیگر جواب‌ها مستقل از اندازه المان گردد. در این شرایط، هرگاه همگرایی آغاز می‌شود، از بین اندازه المان‌هایی با جواب همگرا، اندازه بزرگ‌تر المان در نظر گرفته می‌شود، چرا که در این حالت زمان حل مساله کمتر از حالتی است که اندازه المان‌ها بسیار ریزتر شود. در این بررسی با افزایش تعداد المان‌ها از مقادیر فوق، تغییرات تنش کمتر از ۲٪ بوده و در نتیجه تعداد بیش‌تر المان و به عبارتی دیگر اندازه کوچک‌تر المان به‌منظور جلوگیری از افزایش زمان حل انتخاب نمی‌گردد.

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_0} \right) \right] (1 - \bar{T}^m) \quad (5)$$

در این رابطه $\bar{\sigma}$ تنش جاری، A تنش تسلیم، B ثابت سخت‌شوندگی کرنشی، $\bar{\epsilon}^{pl}$ کرنش پلاستیک معادل، n توان سخت‌شوندگی کرنشی، C ضریب نرخ کرنش، $\bar{\epsilon}_0$ نرخ کرنش پلاستیک معادل، $\bar{\epsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع، m توان نرم‌شوندگی حرارتی و \bar{T} دمای بدون بعد و برابر با $\frac{(T-T_r)}{(T_m-T_r)}$ است. در رابطه دمای بدون بعد، T دما، T_r دمای مرجع (دمای محیط) و T_m دمای ذوب است. پارامترهای مدل جانسون-کوک به کار رفته در مدل تحلیل المان محدود برای پوشش WC-10Co-4Cr و زیرلایه فولاد AISI 1010 در جدول ۲ نشان داده شده‌است. خواص ترمومکانیکی به کار رفته برای پوشش WC-10Co-4Cr و زیرلایه فولاد AISI 1010 در جدول ۳ نشان داده شده‌است.

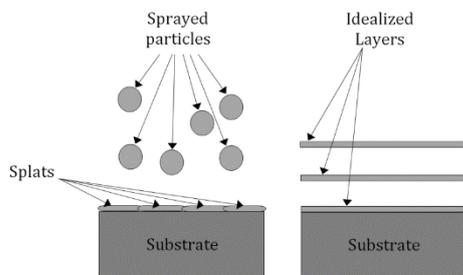
جدول ۲. پارامترهای مدل جانسون-کوک برای ذره WC-Co-Cr [۳۱] و زیرلایه فولادی [۳۲].

AISI 1010	WC-Co-Cr	پارامترهای J-C
۲۶۸/۷۴	۱۵۵۰	(MPa) A
۱۶۱/۷۷	۲۲۰۰۰	(MPa) B
۰/۰۸۸۸	۰/۴۵	n
۰/۰۲۲	۰/۰۳۱۲	C
۱/۰۰	۱/۳۴	m
۱۷۷۳	۱۷۶۸	دمای ذوب (K)
۱	۱	نرخ کرنش مرجع

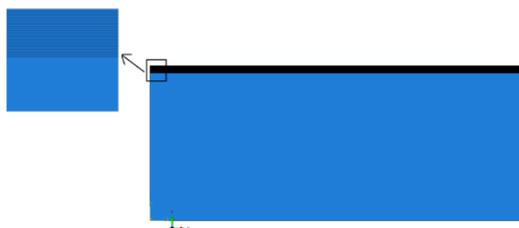
جدول ۳. خواص ترمومکانیکی زیرلایه فولاد کم‌کربن AISI 1010 [۳۳، ۳۴] و پوشش WC-Co-Cr [۳۵]

AISI 1010	WC-Co-Cr	خواص
۴۸/۰۷	۲۵	ضریب رسانندگی گرمایی، (W/mK) k
۷۸۵۰	۱۴۳۲۰	چگالی (kg/m ³)
۲۰۵	۳۱۱	مدول الاستیک، (GPa) E

گردد. با توجه به نتایج تحلیل برخورد و تغییرات اندازه ذره برخورد کننده به زیرلایه و لایه پوشش قبلی، ضخامت نهایی پوشش توسط افزودن ۲۲ لایه به ضخامت $18 \mu\text{m}$ بر زیرلایه مدل‌سازی می‌شود (شکل ۶). در تحلیل انتقال حرارت، نوع المان DC2D4 بوده که معادل المان خطی چهار گره‌ای انتقال حرارت است. در تحلیل تنش، نوع المان CPE4R بوده که معادل المان دوبعدی چهار گره‌ای کرنش صفحه‌ای دارای فرمول‌بندی کاهش یافته با قابلیت کنترل پدیده ساعت شنی است. تعداد المان در آخرین تحلیل لایه به لایه معادل ۲۲ لایه اضافه شده به زیرلایه برابر با ۴۷۶۰۰ است.



شکل ۵. نمایش شماتیک تشکیل لایه‌های پوشش در فرآیند پاشش حرارتی و شکل معادل آن در مدل المان محدود.

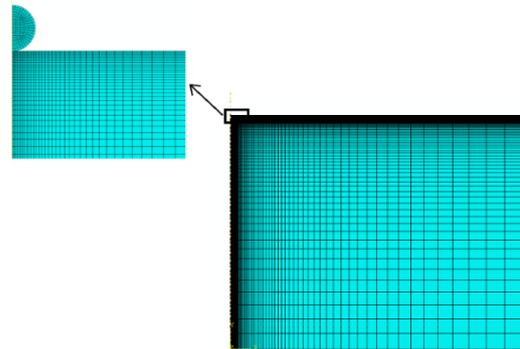


شکل ۶. مدل دوبعدی تحلیل المان محدود در تحلیل لایه به لایه.

نتایج و بحث

نتایج اندازه‌گیری تنش پسماند سطحی

نتایج اندازه‌گیری تجربی تنش نشان می‌دهد که تنش سطحی در جهت طولی و عرضی نمونه پاشش حرارتی به ترتیب برابر با $\sigma_{xx} = -78/3 \pm 9/7 \text{ MPa}$ و $\sigma_{yy} = -71/8 \pm 8/1 \text{ MPa}$ است. این نتیجه بدین معنا است که تنش پسماند سطحی فشاری بوده و مقدار اختلاف تنش طولی و عرضی ناچیز است. مطالعات قبلی [۱۷-۱۴] نیز نشان



شکل ۴. مدل متقارن برخورد ذره WC-10Co-4Cr به زیرلایه فولاد کم‌کربن AISI 1010.

مدل‌سازی تحلیل لایه به لایه

در تحلیل explicit امکان مدل‌سازی رسوب تمامی لایه‌ها بر اساس شرایط ذره به ذره وجود ندارد. در حقیقت، به دلیل زمان کوتاه برخورد، انتقال حرارت به واسطه خنک‌کاری ذره در طی زمان برخورد نادیده گرفته شده و تنش حرارتی در تحلیل برخورد محاسبه نمی‌شود. در نتیجه مدل لایه به لایه^۱ یعنی رسوب‌دهی پی‌درپی لایه‌ها با ضخامت ثابت برای ساده‌سازی فرآیند رسوب‌دهی به کار برده می‌شود (شکل ۵). پس از تشکیل همه لایه‌ها مرحله خنک‌کاری شروع می‌شود که در این مرحله تمامی سطوح قطعه در شرایط همرفت با هوا قرار دارد. در تحلیل لایه به لایه، تنش پسماند توسط تحلیل متوالی حرارتی-تنش^۲ انجام شده در دو مرحله پیش‌بینی می‌شود. در مرحله اول، تحلیل انتقال حرارت^۳ با اعمال توزیع دمایی حاصل از تحلیل explicit به هر لایه اضافه شده، برای تعیین تاریخچه دمایی^۴ نمونه انجام می‌شود. سپس توزیع دمایی وابسته به زمان حاصل از مرحله اول به همراه پروفیل تنش برخورد از مدل explicit در یک تحلیل تنش^۵، به صورت متوالی به هر لایه اعمال می‌شود تا توزیع تنش پسماند نهایی نمونه پس از پاشش تعیین

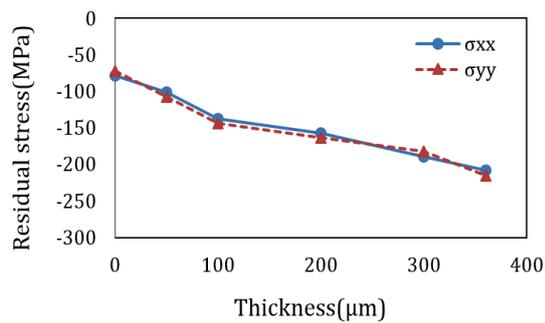
¹ Layer-by-layer Model

² Sequentially Coupled Thermal Stress Analysis

³ Heat Transfer Analysis

⁴ Thermal History

⁵ Stress Analysis



شکل ۷. نتایج توزیع تنش پسماند در راستای ضخامت پوشش در اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند.

رسوب‌های پوشش، در لایه‌های نزدیک به سطح، تنش کوبشی کم‌تری را تجربه می‌نمایند و چون تنش کوبشی از نوع فشاری است، بنابراین اثر مؤلفه فشاری بر تنش پسماند کل در این عمق کم‌تر است. به دلیل ماهیت کششی تنش کوئینچ و علت وجود آمدن آن، توزیع این تنش سراسر ضخامت پوشش از سطح پوشش تا مرز پوشش و زیرلایه را می‌توان تقریباً ثابت و بدون تغییر فرض کرد [۱۳]. از طرف دیگر تنش عدم مطابقت حرارتی نزدیک به سطح پوشش کم‌تر است. در حقیقت تمرکز اصلی تنش عدم مطابقت حرارتی، بیش‌تر در محدوده‌ی مرز پوشش و زیرلایه بوده، اما در صورتی‌که ساختار پوشش به اندازه کافی متراکم باشد، و یا سفتی پوشش در حد بالایی باشد، تا سطح پوشش نیز گسترش می‌یابد [۱۳]. بنابراین با نزدیک شدن به فصل اشتراک پوشش و زیرلایه در راستای ضخامت پوشش، افزایش دو مؤلفه تنش کوبشی و تنش عدم مطابقت حرارتی، موجب افزایش مؤلفه فشاری تنش پسماند می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی تنش پسماند پوشش

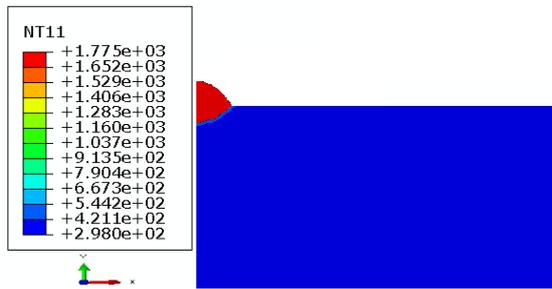
نتایج تحلیل برخورد ذره

در تشکیل پوشش، ابتدا ذره WC-10Co-4Cr به زیرلایه فولادی برخورد کرده و لایه اول پوشش تشکیل می‌شود. سپس در مراحل بعدی ذره WC-10Co-4Cr به لایه‌های قبلی پوشش WC-10Co-4Cr برخورد می‌کنند. بنابراین از

داده‌اند که میان تنش طولی و عرضی اختلافی ناچیز وجود دارد. وجود تنش‌های پسماند فشاری حاصل از سرعت بالای ذرات سخت WC توسط فرآیند پاشش HVOF است. ذرات WC سنگین بوده و توسط دمای پاشش نرم نشده‌اند. این ذرات هنگام برخورد، زیرلایه فلزی و لایه‌های پوشش قبلی را چکش‌کاری کرده و انرژی جنبشی جرمی به تنش فشاری تبدیل می‌شود. علاوه بر این، ضریب انبساط حرارتی پوشش WC-10Co-4Cr ($10^{-6} / 5K$) کم‌تر از زیرلایه با جنس فولاد کم‌کربن ($10^{-6} / 5K$) بوده (جدول ۳) و تنش پسماند ناشی از عدم مطابقت حرارتی، فشاری است. بنابراین تنش پسماند نهایی پس از پاشش حرارتی، حاصل از تأثیر همزمان دو تنش فشاری (تنش کوبشی و تنش عدم مطابقت حرارتی) و یک تنش کششی (تنش کوئینچ) است. با وجود حداقل تنش فشاری کوبشی در سطح، جهت‌گیری فشاری تنش پسماند نهایی حاکی از نقش برجسته‌تر تنش عدم مطابقت حرارتی در مقایسه با تنش کوئینچ است.

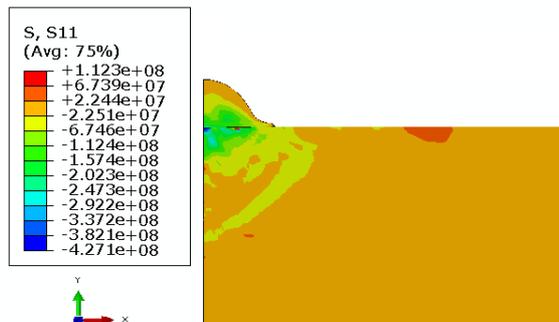
نتایج توزیع تنش پسماند

نتایج اندازه‌گیری توزیع تنش پسماند در راستای ضخامت پوشش در مرکز نمونه، پس از تصحیح به صورت شماتیک در شکل ۷ نشان داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که تنش پسماند در سطح فشاری بوده و سپس با افزایش عمق از سطح آزاد، مقدار تنش فشاری افزایش یافته و در نزدیکی فصل اشتراک پوشش-زیرلایه بیش‌ترین مقدار تنش پسماند فشاری بدست می‌آید.



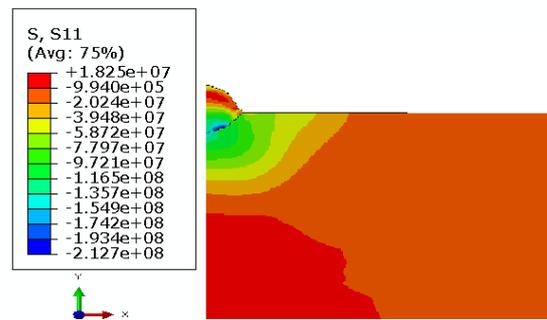
شکل ۹. توزیع دما در مدل حاصل از تحلیل المان محدود برخورد ذره WC-10Co-4Cr به زیرلایه فولادی.

زمان تحلیل در هر دو بررسی برخورد ذره WC-10Co-4Cr با 4Cr به زیرلایه فولادی و زیرلایه WC-10Co-4Cr، با توجه به پایداری تنش در بازه زمانی انتخابی، تعیین گردید. به گونه ای که، این مدت زمان برای پراکندگی انرژی جنبشی، گسترش ذره، تغییر شکل زیرلایه و تثبیت دمایی کافی باشد. نتایج توزیع دما در ذره و زیرلایه (شکل ۹ و ۱۱) نشان دهنده افزایش دما در زیرلایه ناشی از فرآیند برخورد تا عمق حدود $30 \mu\text{m}$ از سطح زیرلایه است. این افزایش دما به حرارت تولید شده به واسطه تغییر شکل پلاستیک مرتبط است.

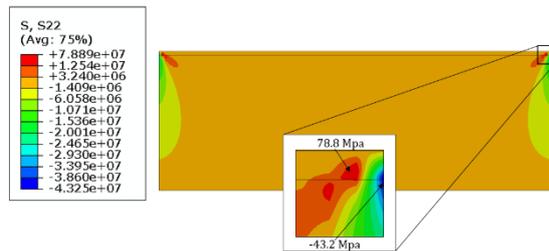


شکل ۱۰. توزیع تنش S11 در مدل حاصل از تحلیل المان محدود برخورد ذره WC-10Co-4Cr به زیرلایه WC-10Co-4Cr.

لایه دوم به بعد، زیرلایه WC-10Co-4Cr است. بر همین اساس دو دسته تحلیل برخورد ذره انجام گرفت. نتایج توزیع مؤلفه شعاعی تنش (S11) و دما حاصل از برخورد ذره WC-10Co-4Cr به زیرلایه فولادی به ترتیب در شکل های ۸ و ۹ ارایه شده است. نتایج توزیع مؤلفه شعاعی تنش (S11) و دما حاصل از برخورد ذره WC-10Co-4Cr به زیرلایه WC-10Co-4Cr به ترتیب در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. این نتایج به عنوان ورودی به تحلیل لایه به لایه اعمال می شوند. مقایسه دو مجموعه برخورد ذره به زیرلایه های متفاوت نشان می دهد که در برخورد ذره WC-10Co-4Cr به زیرلایه فولادی، زیرلایه تغییر شکل یافته و ذره برخورد کننده داخل زیرلایه فرو می رود (شکل ۸)، اما در برخورد ذره WC-10Co-4Cr به زیرلایه WC-10Co-4Cr، زیرلایه تقریباً بدون تغییر شکل باقی می ماند (شکل ۱۰). در هر دو تحلیل برخورد، ذره بلافاصله پس از برخورد شروع به تغییر شکل می کند. در مرحله اولیه برخورد، تغییر شکل سطح تماس و تغییرات دمایی شدید است. پس از مرحله اولیه، تغییر شکل قابل توجهی در تغییر شکل پلاستیکی ذره و زیرلایه وجود ندارد. علاوه بر این مشاهده می شود که هیچ کاهش دمایی در طی زمان رسیدن ذره به ضخامت نهایی پایدار، پیش بینی نمی شود، بنابراین خنک سازی قابل توجه ذره پس از تکمیل فرآیند پهن شدگی شروع می شود.

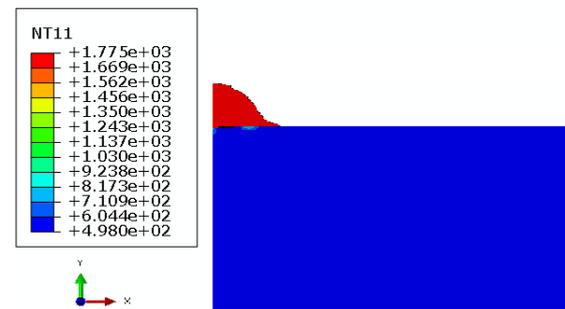


شکل ۸. توزیع تنش S11 در مدل حاصل از تحلیل المان محدود برخورد ذره WC-10Co-4Cr به زیرلایه فولادی.



شکل ۱۳. توزیع تنش S22 در مدل پس از فرآیند HVOF.

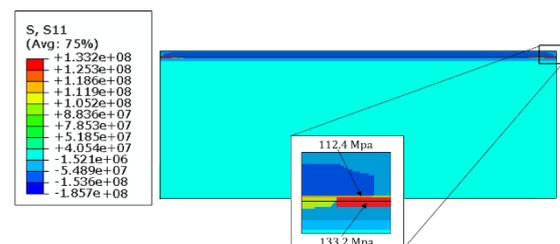
نتایج نشان می‌دهند که توزیع تنش محوری و شعاعی در نمونه به جز لبه‌های قطعه، یکنواخت است. نتایج بدست آمده، لزوم شبیه‌سازی تنش با وجود اندازه‌گیری تجربی تنش‌ها در مرکز نمونه را به خوبی نشان می‌دهند. تنش S11 در لبه جانبی قطعه دارای تمرکز تنش کششی در فصل مشترک پوشش و زیرلایه است. تنش S22 نیز در نزدیک لبه آزاد نمونه، دارای تمرکز تنش کششی و فشاری در فصل مشترک پوشش و زیرلایه است. تنش‌های صفحه‌ای (شعاعی و مماسی) کششی موجب ایجاد ترک داخل صفحه‌ای در پوشش‌های سرامیکی می‌شوند. ترک‌های شروع شونده در لبه آزاد، به سمت بخش مرکزی گسترش یافته و موجب لایه لایه‌شدگی پیشرونده پوشش می‌شوند. تنش محوری کششی، ترک عمودی (عمود بر سطح زیرلایه) در پوشش‌های سرامیکی را ایجاد کرده و در نتیجه موجب جدایش و لایه لایه شدن پوشش می‌شوند. با افزایش تنش پسماند کششی، حساسیت به ایجاد و رشد ترک افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر تنش پسماند کششی بدست آمده در محدوده استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه [۱، ۳۶] است. بنابراین در صورت تغییر شرایط فرآیند پاشش حرارتی که منجر به افزایش تنش پسماند کششی در لبه‌های آزاد شود، امکان تغییر شکل شدید در نزدیکی لبه‌های آزاد قطعه وجود خواهد داشت.



شکل ۱۱. توزیع دما در مدل حاصل از تحلیل المان محدود برخورد ذره WC-10Co-4Cr به زیرلایه WC-10Co-4Cr.

نتایج تحلیل لایه به لایه

تحلیل حرارتی افزودن لایه‌های پوشش نشان می‌دهد که با افزودن لایه پوشش جدید به زیرلایه و لایه‌های قبلی، افزایش دما در فصل مشترک لایه جدید و ساختار قبلی اتفاق می‌افتد. سپس رسانش حرارتی در قطعه، ناپیوستگی دمایی را کاهش داده و در نهایت از بین می‌برد. پس از تکمیل تمامی لایه‌های پوشش، زمان مورد نیاز برای رسیدن پوشش و زیرلایه، به دمای اتاق برابر با ۱۸۰۰ s است. با انتقال تاریخچه دمایی در مرحله نهایی خنک‌سازی به تحلیل تنش بالاترین لایه پوشش، توزیع نهایی تنش پسماند حاصل از فرآیند HVOF تعیین می‌شود. نتایج به صورت کانتور تنش در کل مدل و توزیع تنش در راستای مسیر عبوری از مرکز قطعه از سطح بالایی پوشش تا داخل زیرلایه ارائه می‌شوند. شکل ۱۲ و ۱۳، توزیع مؤلفه شعاعی (S11) و محوری (S22) تنش پسماند در سیستم پوشش و زیرلایه در طی فرآیند پاشش حرارتی، پس از خنک‌سازی سیستم تا رسیدن به دمای اتاق را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲. توزیع تنش S11 در مدل پس از فرآیند HVOF.

مدل المان محدود فرض شده‌است که پس از اولین برخورد، ذره متصل به زیرلایه باقی می‌ماند، به عبارتی دیگر در مدل تحلیل المان محدود، هیچ‌گونه برگشت ذره وجود ندارد که معادل راندمان رسوب‌دهی ۱۰۰٪ است. اما در واقعیت راندمان رسوب‌دهی کم‌تری مشاهده شده و از میان تعدادی ذره برخورد کننده، تنها یک ذره متصل به زیرلایه باقی می‌ماند. هر ذره برخوردکننده با وجود عدم اتصال به زیرلایه، کوبش را به ماده تحت برخورد منتقل خواهد کرد و افزایش ناگهانی حرارت مرتبط با تغییر شکل پلاستیک تولید خواهد کرد. به همین دلیل، مدل تحلیل المان محدود تنش کوبشی کم‌تری از مقدار واقعی را تخمین زده که منجر به حصول تنش‌های پسماند فشاری کم‌تر از مقادیر مشاهده شده در بررسی آزمایشگاهی می‌شود. همچنین در مدل تحلیل المان محدود، به جز تسلیم ماده‌ی رسوب داده شده در طی فرآیند خنک‌سازی، روش دیگر آزادسازی تنش حاصل از پاشش حرارتی، توسط فرآیندهایی مانند خزش، میکروترک و لغزش بین وجهی اسپلت [۱۲]، در نظر گرفته نشده‌است. عدم اعمال چنین فرآیندهایی، منجر به تفاوت مقادیر تنش پسماند حاصل از تحلیل المان محدود در مقایسه با نتایج اندازه‌گیری تجربی تنش می‌گردد.

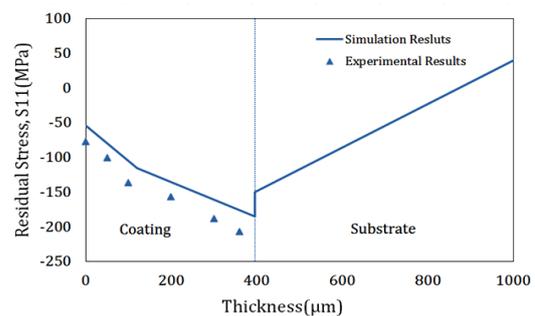
نتیجه‌گیری

در این مقاله با توجه به اهمیت تأثیر تنش‌های پسماند پوشش‌های پاشش حرارتی بر خواص پوشش همچون مقاومت سایشی، به تعیین تجربی و شبیه‌سازی توزیع تنش پسماند پوشش WC-10Co-4Cr به روش HVOF پرداخته شد. مهم‌ترین نتایج بدست آمده عبارتند از:

۱- نتایج اندازه‌گیری تنش پسماند نشان داد که تنش پسماند سطحی پوشش WC-10Co-4Cr پس از فرآیند HVOF فشاری بوده و مقدار اختلاف تنش طولی و عرضی ناچیز است. با وجود حداقل تنش فشاری کوبشی در سطح پوشش، جهت‌گیری فشاری تنش پسماند نهایی

مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی توزیع تنش پسماند

به‌منظور بررسی صحت شبیه‌سازی، تنش S11 حاصل از شبیه‌سازی و تنش حاصل از اندازه‌گیری تجربی در $\phi = 0^\circ$ در راستای خط مرکزی ضخامت پوشش و زیرلایه مقایسه شده و در شکل ۱۴ نشان داده شده‌است. مطابق شکل ۱۴، تنش S11 حاصل از شبیه‌سازی، به صورت خطی در پوشش و زیرلایه تغییر می‌کند. سطح پوشش در مرکز قطعه، دارای تنش فشاری است. سپس با افزایش عمق، تنش فشاری افزایش یافته و در فصل اشتراک پوشش و زیرلایه مقدار تنش فشاری در پوشش، به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. تنش شعاعی در زیرلایه، در فصل اشتراک پوشش و زیرلایه نیز فشاری بوده و با دور شدن از فصل اشتراک بزرگی تنش فشاری کاهش یافته و سپس به تنش کششی تبدیل می‌شود.



شکل ۱۴. توزیع تنش S11 پس از فرآیند HVOF در راستای خط مرکزی ضخامت پوشش و زیرلایه حاصل از بررسی تجربی و شبیه‌سازی.

مقایسه میان نتایج اندازه‌گیری تجربی و شبیه‌سازی توزیع تنش پسماند در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که تنش‌های پیش‌بینی شده در تحلیل المان محدود تطابق خوبی با توزیع تنش پسماند اندازه‌گیری شده توسط روش XRD در این مطالعه دارند. در این شکل، بزرگی مقادیر تنش‌های پسماند فشاری پیش‌بینی شده توسط مدل تحلیل المان محدود کم‌تر از مقادیر اندازه‌گیری شده تنش پسماند توسط اندازه‌گیری تجربی بوده و ماکزیمم درصد اختلاف حدود ۱۸٪ است. دو عامل در ایجاد این نتیجه مؤثرند. در

5. K. Murugan, A. Ragupathy, V. Balasubramanian, K. Sridhar, *Optimizing HVOF spray process parameters to attain minimum porosity and maximum hardness in WC-10Co-4Cr coatings*, Surface and Coatings Technology, 247(2014)90-102.
6. J. A. Picas, A. Forn, G. Matthäus, *HVOF coatings as an alternative to hard chrome for pistons and valves*, Wear, 261(5)(2006) 477-484.
7. W. Luo, U. Selvadurai, W. Tillmann, *Effect of Residual Stress on the Wear Resistance of Thermal Spray Coatings*, Journal of Thermal Spray Technology, 25(1-2)(2016)321-330.
8. J. Stokes, L. Looney, *Residual stress in HVOF thermally sprayed thick deposits*, Surface and Coatings Technology, 177(2004)18-23.
9. Y. Y. Santana, P. O. Renault, M. Sebastiani, J. G. La Barbera, J. Lesage, E. Bemporad, E. Le Bourhis, E. S. Puchi-Cabrera, M. H. Staia, *Characterization and residual stresses of WC-Co thermally sprayed coatings*, Surface and Coatings Technology, 202(18)(2008)4560-4565.
10. Y. C. Tsui, T. W. Clyne, *an analytical model for predicting residual stresses in progressively deposited coatings Part 1: Planar geometry*, Thin Solid Films, 306(1) (1997)23-33.
11. J. Pina, A. Dias, J. L. Lebrun, *Study by X-ray diffraction and mechanical analysis of the residual stress generation during thermal spraying*, Materials Science and Engineering: A, 347(1)(2003)21-31.
12. P. Bansal, P. H. Shipway, S. B. Leen, *Effect of particle impact on residual stress development in HVOF sprayed coatings*, Journal of thermal spray technology, 15(4) (2006)570-575.
13. C. Lyphout, P. Nylén, A. Manescu, T. Pirling, *Residual stresses distribution through thick HVOF sprayed Inconel 718 coatings*, Journal of Thermal Spray Technology, 17(5-6) (2008)915-923.
14. M. Jalali Azizpour, S. Nourouzi, H. Salimijazi, D. Sajedipour, F. Saadi, *Experimental and Numerical Study of Residual Stress in the WC-12Co HVOF Sprayed Coatings*, Journal of Advanced Materials and Processing, 1(4)(2013)3-14.
15. X. Liu, B. Zhang, *Effects of grinding process on residual stresses in nanostructured*

پوشش، حاکی از نقش برجسته‌تر تنش عدم مطابقت حرارتی در مقایسه با تنش کوئینچ است.

۲- پس از فرآیند پاشش حرارتی، تنش پسماند در سطح فشاری بوده و سپس با افزایش عمق از سطح آزاد، مقدار تنش فشاری افزایش یافته و در نزدیکی فصل مشترک پوشش-زیرلایه بیش‌ترین مقدار تنش پسماند فشاری بدست می‌آید.

۳- نتایج توزیع تنش پسماند حاصل از شبیه‌سازی منطبق بر اندازه‌گیری تجربی است. بنابراین شبیه‌سازی انجام شده در این پژوهش ابزاری مناسب و دقیق به‌منظور پیش‌بینی تنش‌های پسماند در تمامی نقاط پوشش است.

۴- نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که توزیع تنش در نمونه به جز لبه‌های قطعه یکنواخت است. تنش در لبه قطعه دارای تمرکز تنش کششی در فصل مشترک پوشش و زیرلایه است. محل ماکزیمم تنش پسماند کششی در پوشش، مستعد ترک، ایجاد لایه لایه شدن، جدایش و شکست پوشش است.

مراجع

1. M. Xie, S. Zhang, M. Li, *Comparative investigation on HVOF sprayed carbide-based coatings*, Applied Surface Science, 273(2013)799-805.
2. Y. Wu, B. Wang, S. Hong, J. Zhang, Y. Qin, G. Li, *Dry sliding wear properties of HVOF sprayed WC-10Co-4Cr coating*, Transactions of the Indian Institute of Metals, 68(4) (2015)581-586.
3. A. K. Maiti, N. Mukhopadhyay, R. Raman, *Improving the wear behavior of WC-CoCr-based HVOF coating by surface grinding*, Journal of Materials Engineering and Performance, 18(8)(2009)1060-1066.
4. S. Hong, Y. P. Wu, W. W. Gao, B. Wang, W. M. Guo, J. R. Lin, *Microstructural characterisation and microhardness distribution of HVOF sprayed WC-10Co-4Cr coating*, Surface Engineering, 30(1)(2014)53-58.

27. B. K. Pant, V. Arya, B. S. Mann, *Development of low-oxide MCrAlY coatings for gas turbine applications*, Journal of thermal spray technology, 16(2) (2007) 275-280.
28. M. Li, P. D. Christofides, *Modeling and control of high-velocity oxygen-fuel (HVOF) thermal spray: A tutorial review*, Journal of thermal spray technology, 18(5-6)(2009)753-768.
29. M. Gui, R. Eybel, B. Asselin, S. Radhakrishnan, J. Cerps, *Influence of processing parameters on residual stress of high velocity oxy-fuel thermally sprayed WC-Co-Cr coating*, Journal of materials engineering and performance, 21(10)(2012)2090-2098.
30. G. R. Johnson, W. H. Cook, *A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures*, In Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, 21(1983)541-547.
31. S. Gu, S. Kamnis, *Bonding mechanism from the impact of thermally sprayed solid particles*, Metallurgical and Materials Transactions A, 40, (11)(2009)2664-2674.
32. R. Muhammad, N. Ahmed, M. Abid, V. V. Silberschmidt, *3D modeling of drilling process of AISI 1010 steel*, Journal of Machining and Forming Technologies ISSN, 1947 (2010).
33. M. Iordachescu, J. Ruiz Hervías, D. Iordachescu, A. Valiente Cancho, L. Caballero Molano, *Thermal influence of welding process on strength overmatching of thin dissimilar sheets joints*, (2010).
34. M. Alizadeh, H. Edris, A. Shafyei, *Mathematical modeling of heat transfer for steel continuous casting process*, International Journal of Iron & Steel Society of Iran, 3(2)(2006)7-16.
35. L. M. Berger, S. Saaro, T. Naumann, M. Wiener, V. Wehnacht, S. Thiele, J. Suchánek, *Microstructure and properties of HVOF-sprayed chromium alloyed WC-Co and WC-Ni coatings*, Surface and Coatings Technology, 202(18)(2008)4417-4421.
36. L. Pawlowski, *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*, John Wiley and Sons Ltd, (2008).
- ceramic coatings*, Journal of materials science, 37(15)(2002)3229-3239.
16. H. Masoumi, S.M. Safavi, M. Salehi, S.M. Nahvi, *Effect of grinding on the residual stress and adhesion strength of HVOF thermally sprayed WC-10Co-4Cr coating*, Materials and Manufacturing Processes, 29(9)(2014)1139-1151.
17. M. S. Zoei, M. H. Sadeghi, M. Salehi, *Effect of grinding parameters on the wear resistance and residual stress of HVOF-deposited WC-10Co-4Cr coating*, Surface and Coatings Technology, 307(2016)886-891.
18. G.S. Schajer, *Practical Residual Stress Measurement Methods*, John Wiley & Sons, 2013.
19. Q. Luo, A. H. Jones, *High-precision determination of residual stress of polycrystalline coatings using optimised XRD-sin² ψ technique*, Surface and Coatings Technology, 205(5)(2010)1403-1408.
20. A. Ghabchi, T. Varis, E. Turunen, T. Suhonen, X. Liu, S. P. Hannula, *Behavior of HVOF WC-10Co4Cr coatings with different carbide size in fine and coarse particle abrasion*, Journal of thermal spray technology, 19 (2010)368-377.
21. T. C. Totemeier, R.N. Wright, W. D. Swank, *Residual stresses in high-velocity oxy-fuel metallic coatings*, Metallurgical and materials transactions A, 35(6)(2004)1807-1814.
22. D. C. Zipperian, *Metallographic handbook*, PACE Technologies Tucson, Arizona USA, 2011.
23. R. Polini, F. Bravi, F. Casadei, P. D'Antonio, E. Traversa, *Effect of substrate grain size and surface treatments on the cutting properties of diamond coated Co-cemented tungsten carbide tools*, Diamond and related materials, 11(3)(2002)726-730.
24. M. G. Moore, W. P. Evans, *Mathematical correction for stress in removed layers in X-ray diffraction residual stress analysis (No. 580035)*, SAE Technical Paper, (1958).
25. M. E. Fitzpatrick, A.T. Fry, P. Holdway, F. A. Kandil, J. Shackleton, L. Suominen, *Determination of residual stresses by X-ray diffraction*, (2005).
26. M. Li, P. D. Christofides, *Multi-scale modeling and analysis of an industrial HVOF thermal spray process*, Chemical engineering science. 60(13)(2005)3649-3669.