

تعیین تاثیر فرایند سنگزنی بر توزیع تنش پسماند در راستای ضخامت پوشش WC-10Co-4Cr به روش HVOF

مائده السادات ضوئی

پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشگاه فضایی ایران

محمدحسین صادقی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

مهدی صالحی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۹۷/۰۷/۲۳ - پذیرش مقاله: ۹۸/۰۳/۱۳)

چکیده

امروزه کاربرد پوشش WC-10Co-4Cr ایجاد شده توسط HVOF، در قطعات کلیدی صنایع مختلف، به میزان قابل توجهی توسعه یافته است. این پوشش‌ها به منظور دستیابی به صافی سطحی مطلوب سنگزنی می‌شوند. در این مطالعه، به بررسی اندازه‌گیری تجربی و تحلیل المان محدود تنش پسماند پوشش پس از فرایند سنگزنی، پرداخته شد. در اندازه‌گیری تجربی، تنش پسماند پوشش توسط تکنیک پراش اشعه ایکس (XRD) به روش $\sin^2\psi$ تعیین شده و از فرایند برداشت شیمیایی ماده به منظور اندازه‌گیری تنش در راستای ضخامت پوشش به کار برده شد. در تحلیل المان محدود فرایند سنگزنی پوشش، در ابتدا با اعمال فلاکس حرارتی ناشی از سنگزنی، توزیع دمایی در قطعه حاصل می‌شود. سپس قطعه تا رسیدن به دمای محیط خنک می‌شود. تاریخچه دمایی حاصل از تحلیل حرارتی به تحلیل تنش اعمال شده و با اعمال نیروهای سنگزنی و تنش پسماند ناشی از فرایند HVOF، توزیع نهایی تنش تعیین می‌شود. نتایج نشان داد که تطابق قابل قبولی مابین نتایج تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد و پس از فرایند سنگزنی، مقدار تنش پسماند فشاری سطحی پوشش، افزایش می‌یابد. همچنین در بررسی تجربی و شبیه‌سازی، افزایش تنش پسماند فشاری، در مقایسه با شرایط قبل از سنگزنی به ترتیب تا عمق $100\ \mu\text{m}$ و $120\ \mu\text{m}$ می‌باشد. در عمق بیش‌تر پوشش و همچنین در فصل اشتراک پوشش - زیرلایه افزایش تنش پسماند فشاری مشاهده نمی‌گردد.

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

Determination of Grinding Process Effect on the 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 15 October 2018, accepted 3 June 2019)

Abstract

Application of WC-10Co-4Cr coating deposited by High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) has been significantly developed in key parts of various industries, nowadays. These coatings are ground to achieve the desired surface roughness. In this study, the residual stress of as-sprayed and ground 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 analysis of the grinding process, the temperature distribution of workpiece is initially obtained by applying the thermal field from the grinding process. Then the workpiece cools until it reaches the ambient temperature. The temperature history of thermal analysis is applied to the stress analysis and the final distribution of residual stress is determined by applying grinding forces and residual stress caused by the HVOF process. The results showed that there was a good agreement between the experimental and simulation results and after the grinding process, the value of compressive residual stress of coating surface increases. Also, in the experimental and simulation investigation, the increase in compressive residual stress compared with the pre-grinding was up to $100\ \mu\text{m}$ and $120\ \mu\text{m}$, respectively. There is no increase in compressive residual stress in the higher depth of coating and also in the interface of the coating and substrate.

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

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

مقدمه

مطالعات قبلی مربوط به اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند در پوشش پس از فرایند سنگزنی، تنها محدود به اندازه‌گیری تنش پسماند سطحی [۱۷-۱۰] می‌باشند. بررسی تجربی تاثیر فرایند سنگزنی بر توزیع تنش پسماند در راستای ضخامت پوشش و همچنین تعیین تنش پسماند پوشش پس از فرایند سنگزنی توسط تحلیل المان محدود تاکنون گزارش نشده است.

در این مقاله به اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند در نقاط مشخصی از راستای ضخامت پوشش WC-10Co-4Cr ایجاد شده به روش HVOF پس از فرایند سنگزنی، توسط برداشت شیمیایی لایه و اعمال روش تصحیح تنش، پرداخته شده است. علاوه بر این، شبیه‌سازی دقیق تعیین تنش پسماند در پوشش WC-10Co-4Cr پس از فرایند سنگزنی، به دلیل محدودیت اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند، انجام شده است. 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 پس از فرایند سنگزنی، دستاورد مهمی برای صنعت خدمات پوشش حرارتی می‌باشد.

مواد و روش آزمایش‌ها

پاشش حرارتی HVOF

در این پژوهش، زیرلایه‌ی نمونه‌ها از جنس فولاد کم‌کربن AISI 1010 با ابعاد $4 \times 20 \times 20$ mm³ ساخته شد. ماسه‌پاشی سطح نمونه‌ها توسط ذرات SiC با اندازه مش ۲۴ به منظور افزایش چسبندگی پوشش به زیرلایه انجام شده است. پودر WC-10Co-4Cr (WOKA 3652) با اندازه ذرات ۱۵ تا ۴۵ میکرومتر و شکل کرولی بر روی زیرلایه به منظور ایجاد پوشش به ضخامت ۴۰۰ میکرومتر توسط دستگاه HVOF با نام تجاری METJET-III اعمال گردید.

فرایند پاشش حرارتی سرعت بالا با سوخت اکسیژن، HVOF^۱، یکی از مهم‌ترین فرایندهای ایجاد پوشش‌های کاربردی به‌عنوان پوشش‌هایی مقاوم در برابر سایش و خوردگی می‌باشد [۱]. در پوشش‌های کاربردی حاصل از فرایند HVOF، به دلیل سرعت ذرات بالا در طی رسوب، مزایای مختلفی از جمله تخلخل کم، استحکام چسبندگی و سختی بالا ایجاد می‌گردد [۲، ۳]. پوشش WC-10Co-4Cr ایجاد شده به روش پاشش حرارتی HVOF، یکی از پرکاربردترین پوشش‌های کاربردی است [۲-۵]. این پوشش به عنوان جایگزینی برای آبکاری کروم در کاربردهای سایش و خوردگی، به واسطه حفاظت محیط زیست مورد توجه می‌باشد [۶].

در بسیاری از شرایط کاربردی، زبری سطح در پوشش‌های کاربردی پس از فرایند پاشش حرارتی، بالاتر از مقادیر قابل قبول زبری است به منظور دستیابی به زبری سطح مطلوب، پوشش توسط فرایند سنگزنی پرداخت می‌شود. فرایند سنگزنی، بر خصوصیات و ویژگی‌های پوشش ناشی از فرایند HVOF، تأثیر می‌گذارد. بنابراین تعیین خواص نهایی پوشش پس از فرایند سنگزنی الزامی است.

یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر خواص کاربردی پوشش‌های حاصل از پاشش حرارتی، تنش پسماند است که تأثیر قابل توجه‌ای بر عملکرد، پایداری ابعادی، استحکام خستگی و مقاومت سایشی قطعه دارد [۷]. تنش‌های پسماند در پوشش‌های پاشش حرارتی فشاری و یا کششی می‌باشند. تنش‌های پسماند کششی موجب ایجاد ترک و کاهش عمر خستگی می‌شوند. 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 می‌باشند [۹-۷].

¹High Velocity Oxy Fuel

برداشت شیمیایی لایه^۱ پوشش، اندازه‌گیری تنش پسماند توسط پراش اشعه‌ی ایکس، XRD، به روش $\sin^2\psi$ و تصحیح تنش اندازه‌گیری شده توسط روش مور^۲، انجام می‌پذیرد. به‌منظور اندازه‌گیری تنش پسماند به روش XRD از دستگاه پراش پرتو ایکس فیلیپس^۳ مدل X'pert-MPD تحت ولتاژ ۴۰ kV، جریان ۴۰ mA و اندازه گام ۰/۰۵ درجه استفاده شد. اندازه‌گیری تنش در دو راستای $\phi = 0$ و $\phi = 90$ ، به ترتیب برای تعیین تنش طولی^۴ و تنش عرضی^۵ انجام شد. همچنین روش سهموی به‌منظور موقعیت‌یابی قله منحنی پراش در اندازه‌گیری‌های تنش پسماند به‌کار گرفته شد [۱۴]. اچ‌کننده‌های شیمیایی شامل اسید نیتریک، HNO_3 ، و اسید هیدروفلوئوریک، HF با ترکیب درصد حجمی به ترتیب ۶۰ و ۴۰ درصد، به‌منظور لایه‌برداری در فاصله‌ی ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ میکرومتر از سطح پوشش به کار گرفته شد. جزئیات کامل در مورد اندازه‌گیری توزیع تنش پسماند و روش تصحیح تنش در مقاله قبلی توسط نویسنده بیان شده‌است [۱۷].

شبیه‌سازی فرایند سنگزنی پوشش WC-10Co-4Cr

ایجاد شده به روش HVOF

در این پژوهش، شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار ABAQUS CAE version 6.14 به‌منظور تعیین مقدار و توزیع تنش پسماند در پوشش WC-10Co-4Cr پس از فرایند سنگزنی انجام شد. تنش پسماند در پوشش قبل از فرایند سنگزنی، ناشی از فرایند پاشش حرارتی HVOF بوده و پس از فرایند سنگزنی، تنش‌های پسماند ناشی از سنگزنی به تنش‌های قبلی اعمال می‌گردند. بنابراین شبیه‌سازی تنش‌های پسماند در فرایند سنگزنی پوشش سرمت WC-10Co-4Cr بر زیرلایه‌ی فولادی در دو مرحله انجام می‌شود، مرحله اول تعیین تنش پسماند ناشی

پارامترهای مورد استفاده در پاشش حرارتی HVOF پودر WC-10Co-4Cr، در جدول ۱ نشان داده شده‌است.

جدول ۱. پارامترهای فرایند 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

فرایند سنگزنی

سنگزنی نمونه‌ها توسط ماشین سنگ تخت نوع I.M.T.I با محور افقی اسپیندل و دارای میز مغناطیس توسط چرخ سنگ الماس با باند رزینی، همراه با سیال روان‌کار ZI به روش غوطه‌وری انجام شده‌است. سایر پارامترهای فرایند سنگزنی در جدول ۲ نشان داده شده‌است.

جدول ۲. پارامترهای فرایند سنگزنی پوشش

پارامتر	مقدار
قطر چرخ سنگ (d _s) (mm)	۳۵۰
عمق برش (a) (μm)	۴
سرعت برش (v _c) (m/s)	۳۰
سرعت قطعه (v _w) (mm/s)	۴۱۳
پهنای درگیری (b _{wp}) (mm)	۱۵
نیروی مماسی سنگزنی (F _t) (N)	۱۲/۱۶
نیروی عمودی سنگزنی (F _n) (N)	۳۵/۳۲
فلاکس حرارتی (q _{wp}) (W/mm ²)	۱۱/۵۸

اندازه‌گیری تجربی توزیع تنش پسماند در راستای

ضخامت پوشش

در پژوهش حاضر، به منظور بررسی توزیع تنش پسماند از سطح پوشش تا نزدیکی مرز پوشش با زیرلایه از تکنیک برداشت ماده استفاده شده‌است. بدین منظور تغییرات تنش پسماند به صورت تابعی از عمق، توسط

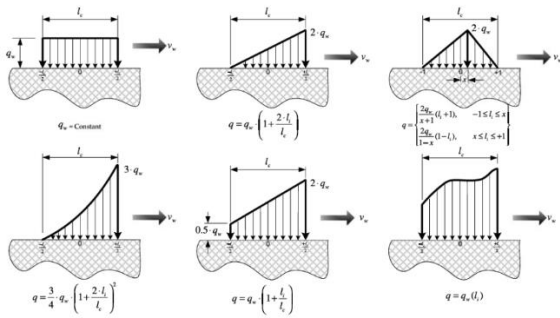
¹ chemical layer removal

² Moore

³ Philips

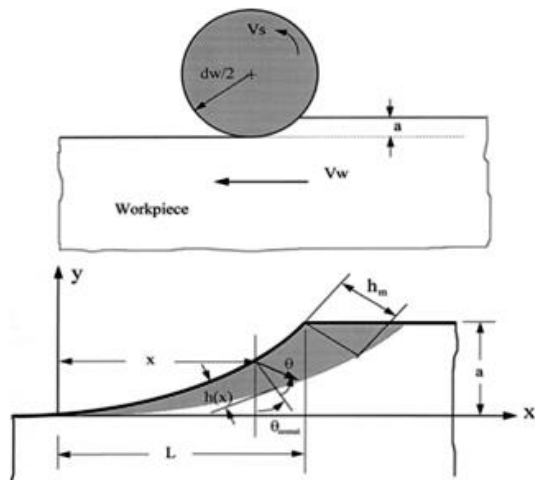
⁴ Longitudinal stress

⁵ Transverse stress



شکل ۱. انواع توزیع فلاکس حرارتی [۱۸]

به علت این که ضخامت براده برداشته شده در هنگام سنگزنی مخالف، در قسمت ورود سنگ صفر بوده و تا انتهای درگیری، به حداکثر ضخامت براده افزایش می یابد، توزیع فلاکس حرارتی مثلی در منطقه سنگزنی در نظر گرفته می شود (شکل ۲). بر اساس نتایج تجربی و شبیه سازی محققین نیز، توزیع فلاکس حرارتی مثلی دقت بیشتری از نظر توزیع مکانی و اندازه دما در منطقه سنگزنی در مقایسه با توزیع یکنواخت دارد [۱۹].



شکل ۲. فرایند براده برداری و توزیع فلاکس حرارتی در منطقه برای سنگزنی مخالف [۱۹]

در تحلیل حرارتی، مدل دوبعدی قطعه کار با شرایط مرزی نشان داده شده در شکل ۳ مدل سازی گردید. به منظور تعیین توزیع تنش دقیق، به مش ریز با المان های کوچک نیاز است که منجر به ماکزیمم بازه زمانی بسیار کوچک شده و در نتیجه زمان محاسبات تحلیل به شدت افزایش می یابد. به منظور بهینه سازی راندمان محاسباتی

از فرایند پاشش حرارتی و مرحله دوم تعیین تنش های پسماند نهایی حاصل از فرایند سنگزنی می باشد. روند کامل شبیه سازی تعیین تنش پسماند ناشی از فرایند پاشش حرارتی HVOF در مقاله قبلی نویسنده [۱۷] بیان شده و از نتایج آن مقاله به عنوان ورودی شبیه سازی فرایند سنگزنی پوشش استفاده می گردد. به منظور اعتبارسنجی و بررسی صحت تحلیل المان محدود، نتایج تحلیل المان محدود با نتایج اندازه گیری تجربی تنش پسماند توسط روش XRD، مقایسه می شوند. پارامترهای ابعاد قطعه و شرایط سنگزنی مطابق با مقادیر به کار رفته در بررسی تجربی بوده، بنابراین مقایسه نتایج شبیه سازی و بررسی آزمایشگاهی معنی دار می باشد.

به منظور تعیین تنش پسماند فرایند سنگزنی از تحلیل متوالی حرارتی- تنش در مقیاس ماکرو استفاده شد. در شبیه سازی فرایند سنگزنی در مقیاس ماکرو، فلاکس حرارتی متحرک و نیروهای مکانیکی بر سطح بالایی قطعه کار جایگزین چرخ سنگ، در تعامل سنگ-قطعه کار می باشند. در تحلیل المان محدود فرایند سنگزنی، فلاکس های حرارتی مختلفی مطابق شکل ۱ به کار برده می شود. در اغلب کاربردهای تحقیقاتی، توزیع فلاکس حرارتی متحرک q در طول تماس به صورت یکنواخت (مستطیلی^۱) و یا توزیع مثلی^۲ می باشد. توزیع فلاکس حرارتی مستطیلی به صورت زیر تعریف می شود:

$$q = q_{wp} \quad (1)$$

و فلاکس حرارتی مثلی در هر نقطه ی l_i به صورت زیر تعریف می شود:

$$q = q_{wp} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot l_i}{l_c}\right) \quad (2)$$

که l_i در محدوده ی $-\frac{l_c}{2} \leq l_i \leq \frac{l_c}{2}$ قرار دارد [۱۸].

^۱ Rectangular
^۲ Triangular

خواص ترمومکانیکی به کار رفته برای پوشش WC-10Co-4Cr و زیرلایه فولاد AISI 1010 در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. خواص ترمومکانیکی زیرلایه فولاد کم کربن AISI 1010 [۲۰، ۲۱] و پوشش WC-Co-Cr [۲۲]

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، E (GPa)
۰/۲۹	۰/۲۲	ضریب پواسون
۱۲/۵e ^{-۶}	۶/۵e ^{-۶}	ضریب انبساط حرارتی، α (1/K)
۲۷۲۱۴۰	۴۲۰۰۰۰	گرمای نهان ذوب، L _f (J/kg)
۱۷۶۷/۱	۱۵۸۰	دمای انجماد، T _{sol} (K)
۱۸۰۱/۷	۱۶۴۰	دمای ذوب، T _{liq} (K)
۴۶۵	۲۹۵	گرمای ویژه، c _p (J/kg K)

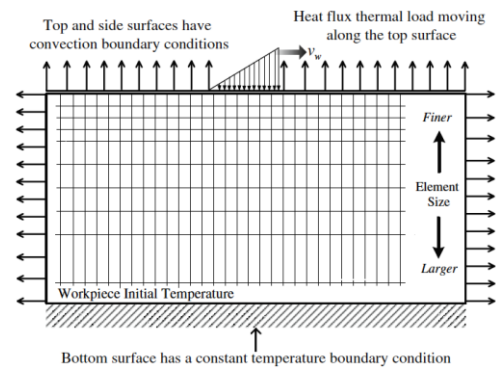
دیگر خروجی کاربردی در بخش تحلیل فرایند سنگزنی، تعیین توزیع دمای ناشی از فرایند سنگزنی در طول نمونه و همچنین در راستای ضخامت پوشش است. زیرا پوشش‌های مبنای کاربرد تنگستن ایجاد شده توسط فرایند پاشش حرارتی HVOF، دارای قابلیت تحمل دمایی تا مقدار ۴۷۰°C می‌باشند [۲۳، ۲۴]. در حقیقت این پوشش‌ها تا دمای ۴۷۰°C دارای خواص عملکردی بهینه بوده و در دماهای بالاتر امکان تجزیه کاربرد تنگستن و تضعیف خواص کاربردی از جمله مقاومت سایشی پوشش وجود دارد. بنابراین تعیین دمای اعمال شده به پوشش در حین فرایند سنگزنی حائز اهمیت می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج اندازه‌گیری توزیع تنش پسماند به روش تجربی نتایج اندازه‌گیری توزیع تنش پسماند توسط ترکیب تکنیک پراش اشعه ایکس (XRD) به روش $\sin^2\psi$ و

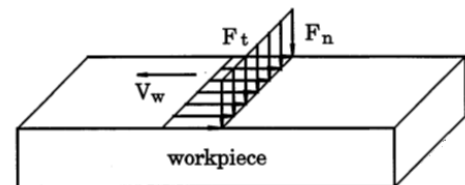
تحلیل، المان‌های کوچک‌تر فقط در لبه بالایی قطعه به کار گرفته می‌شود.

در این پژوهش از ابزارهای پیشرفته مدل‌سازی شامل حرکت منبع حرارتی استفاده شده است. مقدار فلاکس حرارتی، با توزیع مثلثی شکل، به صورت تابعی از مکان و زمان، توسط نوشتن زیربرنامه^۱ DFLUX در زبان برنامه‌نویسی فرترن^۲، بر سطح بالایی قطعه اعمال می‌شود. سپس خنک‌کاری نهایی قطعه با رسیدن به دمای محیط در شرایط همرفت سطوح با هوا و عدم وجود فلاکس حرارتی مدل‌سازی می‌گردد. نتایج تحلیل حرارتی شامل تاریخچه دمایی به تحلیل تنش وارد شده و با اعمال نیروهای سنگزنی متحرک با سرعت حرکت میز شامل نیروی عمودی و نیروی مماسی، مطابق شکل ۴، همچنین تنش‌های پسماند ناشی از فرایند پاشش حرارتی HVOF حاصل از مطالعه قبلی نویسنده و همکارانش [۱۷]، توزیع تنش‌های پسماند نهایی پس از فرایند سنگزنی تعیین می‌شود.



شکل ۳. شرایط مرزی و مش در مدل تحلیل حرارتی فرایند سنگ-

زنی



شکل ۴. اعمال نیروهای سنگزنی به مدل المان محدود

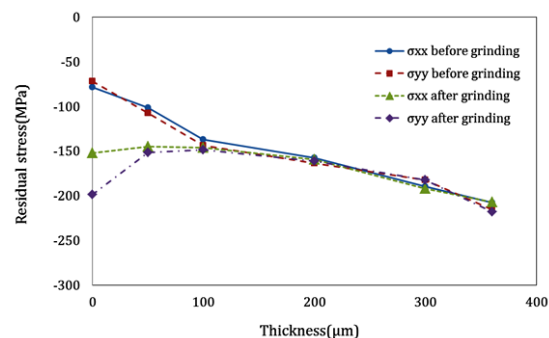
¹ Subroutine
² FORTRAN

با دور شدن از فصل مشترک و نزدیک شدن به سطح آزاد پوشش، بزرگی این تنش پسماند فشاری کاهش می‌یابد.

در مورد وضعیت توزیع تنش پسماند نمونه پس از سنگزنی، مطابق شکل ۵، مشاهده می‌شود که تنش پسماند در سطح پوشش پس از سنگزنی در جهت فشاری افزایش قابل توجهی داشته است. در پژوهش حاضر با توجه به جنس پوشش مورد سنگزنی و نیز عدم تغییر فاز در پوشش که در مقاله قبلی نویسندگان ارائه شده است [۱۴]، تنش پسماند ناشی از تغییر فاز وجود ندارد. همچنین تنش پسماند کششی ناشی از تغییر شکل پلاستیکی-حرارتی نیز با توجه به بکارگیری مناسب و مطلوب سیال خنک‌کننده در تمام آزمایش‌های سنگزنی، نمی‌تواند نقشی تعیین کننده داشته باشد. از طرفی دیگر با توجه به ایجاد تنش پسماند فشاری در پوشش پس از فرایند پاشش حرارتی HVOF (شکل ۵)، تنش پسماند کششی ناشی از تنش حرارتی اعمالی در حین سنگزنی، باید بر تنش موجود در جهت مخالف غلبه کرده و سپس با مقادیر بیش‌تر از آن، تنش پسماند کششی ناشی از حرارت بوجود بیاید. بنابراین می‌توان انتظار داشت که تغییر شکل پلاستیکی-مکانیکی در نتیجه تنش‌های نرمال هرتری و تنش‌های حرارتی کم‌تر از تنش تسلیم، در جهت‌گیری تنش پسماند پوشش پس از سنگزنی تعیین کننده بوده است و باعث افزایش تنش پسماند پوشش WC-10Co-4Cr پس از سنگزنی در جهت فشاری شده است.

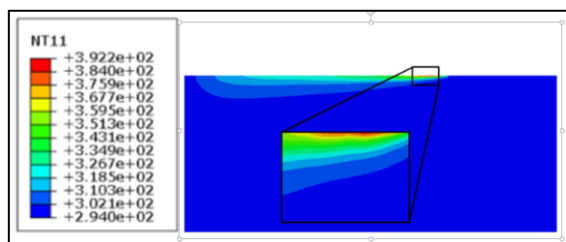
همچنین مشخص می‌شود که تنش پسماند پوشش پس از سنگزنی وابسته به جهت است. مقادیر تنش پسماند عمود بر جهت سنگزنی، σ_{\perp} ، بیش‌تر از مقادیر تنش پسماند در جهت سنگزنی، σ_{\parallel} ، است. وابسته به جهت بودن تنش را می‌توان به عمل برش دانه‌های ساییده نسبت داد. زیرا بخشی از ماده که عمود بر راستای برش است، به دلیل مکانیزم خیش، تغییر شکل پلاستیکی بیش‌تری نسبت به جهت موازی با برش دارد [۲۵]. با افزایش فاصله از

فرایند برداشت شیمایی پس از تصحیح برای نمونه‌های قبل و پس از فرایند سنگزنی در شکل ۵ نشان داده شده است.



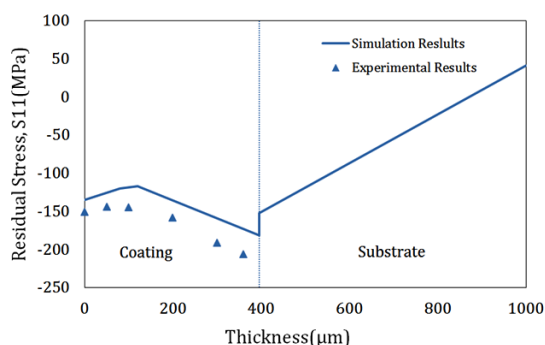
شکل ۵. مقایسه نتایج توزیع تنش پسماند قبل و پس از فرایند سنگزنی

نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که پس از فرایند 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. در لایه‌های نزدیک به سطح، رسوبات پوشش، تنش کوبشی کم‌تری را تجربه می‌نمایند و چون تنش کوبشی از نوع فشاری است، بنابراین اثر این عامل و مؤلفه فشاری تنش پسماند کل در این عمق کم‌تر است. در پژوهش حاضر با توجه به عدم ذوب ذرات کاربید تنگستن و سختی بالای آن‌ها و نیز سرعت بالای ذرات، توسعه تنش پسماند فشاری کوبش به زیرلایه قابل پیش‌بینی است. از طرف دیگر تنش عدم مطابقت حرارتی نزدیک به سطح پوشش کم‌تر است که کاهش این دو مؤلفه تنش، موجب کاهش مؤلفه فشاری تنش در سطح می‌شود. عامل دیگر کاهش تنش فشاری در سطح، حضور تخلخل‌هایی با مورفولوژی نامنظم در سطح آزاد است. بنابراین در مورد تنش‌های پسماند در راستای ضخامت در این پوشش می‌توان گفت که اثر تجمعی تنش‌های فشاری کوبشی، تنش‌های فشاری عدم مطابقت حرارتی و تنش‌های کششی کوئینچ، منجر به تنش‌های فشاری در عمق‌های مختلف پوشش می‌شود که



شکل ۶. توزیع دمایی ناشی از حرکت فلاکس حرارتی در فرایند سنگزنی

نتایج تنش حاصل از شبیه‌سازی و مقایسه این نتایج با تنش حاصل از اندازه‌گیری تجربی در راستای $\phi = 0^\circ$ در شکل ۷ نشان داده شده‌است.



شکل ۷. توزیع تنش S11 پس از فرایند سنگزنی در راستای خط مرکزی ضخامت پوشش و زیرلایه

شکل ۷ نشان می‌دهد که پس از سنگزنی در شبیه‌سازی نیز، مقدار عددی تنش پسماند فشاری سطحی افزایش یافته و با افزایش عمق نیز تنش پسماند فشاری افزایش می‌یابد، اما بیش‌ترین افزایش تنش پسماند در سطح بوده و با افزایش فاصله از سطح، مقدار افزایش تنش پسماند کاهش یافته، به‌گونه‌ای که از عمق $120 \mu\text{m}$ به بعد افزایش تنش مشهود نمی‌باشد. مقایسه‌ی نتایج تجربی و شبیه‌سازی تنش پسماند پس از سنگزنی در شکل ۷ نشان می‌دهد که نتایج عددی و اندازه‌گیری‌های تجربی پس از فرایند سنگزنی تطابق قابل قبولی با یکدیگر داشته و مدل به‌وجود آمده می‌تواند پیش‌بینی خوبی از توزیع تنش پسماند در فرایند سنگزنی داشته باشد، لذا این مدل قابل

سطح پوشش، و فاصله گرفتن از تغییر شکل‌های پلاستیکی سطح در اثر برهم‌کنش دانه‌های ساینده با پوشش، وابستگی تنش به جهت نیز از بین می‌رود و وضعیت تقریباً مشابهی برای تنش در هر جهت را می‌توان دید. با این وجود با زیاد شدن فاصله از سطح پوشش همچنان تنش پسماند فشاری بیش‌تر از نمونه‌ی سنگزنی نشده است. در واقع برهم‌کنش دانه‌های ساینده الماس و سطح پوشش و در نتیجه تغییر شکل پلاستیکی - مکانیکی نه تنها باعث افزایش تنش پسماند در سطح پوشش شده، بلکه در عمق پوشش نیز وضعیت تنش را تغییر داده و مقدار آن را افزایش داده است. مطابق نتایج شکل ۵، با افزایش فاصله از سطح پوشش، مقدار افزایش بزرگی تنش پسماند کم‌تر شده‌است. تنش پسماند فشاری پس از سنگزنی تا عمقی در حدود $100 \mu\text{m}$ افزایش داشته و در عمق بیش‌تر و همچنین در فصل اشتراک پوشش - زیرلایه افزایش قابل توجه‌ای در تنش پسماند فشاری مشاهده نمی‌گردد.

نتایج شبیه‌سازی تنش پسماند پوشش پس از فرایند سنگزنی

شکل ۶ کانتور دمایی سنگزنی در قطعه پوشش داده شده را نشان می‌دهد. جهت حرکت منبع حرارتی از سمت چپ به راست است. میدان دمایی به تدریج با حرکت منبع حرارتی در طول سطح آزاد قطعه حرکت می‌کند. مطابق این شکل، ماکزیمم دمای مشاهده شده در زیر منبع حرارتی 392K می‌باشد. این دما با توجه به دمای قابل تحمل توسط پوشش‌های مبنای کاربید تنگستن، موجب تغییرات ساختاری پوشش و در نتیجه خواص کاربردی آن نمی‌گردد. نتایج توزیع دما حاصل از شبیه‌سازی، نشان دهنده وجود گرادیان دمایی در جهت ضخامت نمونه است، اما عمق مؤثر بسیار کوچک می‌باشد.

۶- نتایج تنش پسماند ناشی از فرایند سنگزنی حاصل از شبیه‌سازی منطبق بر اندازه‌گیری تجربی است. شبیه‌سازی، تغییر تنش پسماند پوشش پس از فرایند سنگزنی را تا عمق $120 \mu\text{m}$ از سطح پوشش پیش‌بینی می‌کند.

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.
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. J. K. N. Murthy, D. S. Rao, B. Venkataraman, *Effect of grinding on the erosion behavior of a WC-Co-Cr coating deposited by HVOF and detonation gun spray processes*, Wear, 249(7) (2001) 592-600.
11. A. Maiti, N. Mukhopadhyay, R. Raman, *Improving the Wear Behavior of WC-CoCr-based HVOF Coating by Surface Grinding*, Journal of

استفاده در طراحی و ارزیابی تنش پسماند فرایند سنگزنی پوشش است.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با توجه به اهمیت تاثیر 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 پس از فرایند سنگزنی پرداخته شد. مهم‌ترین نتایج بدست آمده عبارتند از:

۱- پس از فرایند 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.

۲- مقدار تنش پسماند فشاری پوشش، پس از فرایند سنگزنی افزایش می‌یابد که ناشی از تاثیر بیش‌تر تغییر شکل پلاستیکی- مکانیکی در مقایسه با تغییر شکل پلاستیکی- حرارتی در این فرایند سنگزنی می‌باشد.

۳- تنش پسماند پوشش پس از سنگزنی وابسته به جهت است. مقادیر تنش پسماند عمود بر جهت سنگزنی، σ_{\perp} ، بیش‌تر از مقادیر تنش پسماند در جهت سنگزنی، σ_{\parallel} ، است.

۴- تنش پسماند فشاری پس از سنگزنی تا عمقی در حدود $100 \mu\text{m}$ افزایش داشته و در عمق بیش‌تر پوشش و همچنین در فصل مشترک پوشش-زیرلایه افزایش تنش پسماند فشاری مشاهده نمی‌گردد.

۵- در نمونه پس از سنگزنی، با افزایش فاصله از سطح پوشش، و فاصله گرفتن از تغییر شکل‌های پلاستیکی سطح در اثر برهم‌کنش دانه‌های ساینده با پوشش، وابستگی تنش به جهت از بین می‌رود.

coatings, Applied Surface Science, 273 (2013) 799-805.

25. I. D. Marinescu, M. P. Hitchiner, E. Uhlmann, W. B. Rowe, I. Inasaki, *Handbook of machining with grinding wheels*, CRC Press, 2006.

Materials Engineering and Performance, 18(8), (2009) 1060–1066.

12. X. Liu, B. Zhang, *Effects of grinding process on residual stresses in nanostructured ceramic coatings*, Journal of materials science, 37(15) (2002)3229-3239.

13. 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.

14. 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.

15. Q. Luo, A. H. Jones, *High-precision determination of residual stress of polycrystalline coatings using optimised XRD-sin 2ψ technique*, Surface and Coatings Technology, 205 (5) (2010)1403–1408.

16. G.S. Schajer, *Practical Residual Stress Measurement Methods*, John Wiley & Sons, 2013.

۱۷. م. ضوئی، م.ج. صادقی، م. صالحی، بررسی تجربی و شبیه‌سازی توزیع تنش پسماند در راستای ضخامت پوشش

WC-10Co-4Cr به روش HVOF، نشریه علوم و مهندسی سطح، ۳۴(۱۳۹۶) ۵۷–۷۰.

18. A. M. O. Mohamed, A. Warkentin, R. Bauer, *Variable heat flux in numerical simulation of grinding temperatures*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 63 (5-8) (2012) 549-554.

19. T. J. Chuang, S. Jahanmir, H. C. Tang, *Finite element simulation of straight plunge grinding for advanced ceramics*, Journal of the European Ceramic Society, 23(10) (2003) 1723-1733.

20. 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.

21. 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.

22. L. M. Berger, S. Saaro, T. Naumann, M. Wiener, V. Weihnacht, 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.

23. L. Pawlowski, *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*, John Wiley and Sons Ltd, 2008.

24. M. Xie, S. Zhang, M. Li, *Comparative investigation on HVOF sprayed carbide-based*