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

رباب ثالث'، سلمان نوروزی

۱-کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد مهندسی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل (robab_sls@yahoo.com) ۲-دانشیار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل (s_nourouzi@nit.ac.ir))

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

<u>R. Saless¹</u>, S. nourouzi²

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

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

چکیدہ

تنش های پسماند، خاصیت جدایی ناپذیر پوششهای پاشش حرارتی مانند پوشش های کاربید تنگستن کبالت، بسته به حالت-شان می توانند برای عملکرد و عمر قطعه زیانبار یا مفید باشند. در پژوهش حاضر، هدف بررسی تنشهای پسماند در راستای ضخامت پوشش پاشش حرارتی WC-12C0 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، ۳۲۰ و ۳۰۰ میکرومتر بررسی شدند. تنش پسماند در عمق ۵۰ میکرومتر کششی و در سطح آزاد پوشش و در راستای ضخامت پوشش در عمقهای ۵۰، ۱۵۰، ۳۵۰ که با نزدیک شدن به فصل مشترک بعد از ۵۰ میکرومتر بزرگی تنش افزایش می یابد که علت آن غالب بودن تنش پینینگ و تنش عدم تطابق حرارتی بر تنشهای کوئنچ است. متوسط تنش پسماند در اعمق ۵۰ میکرومتر برای ها ۱۵۷ می این که علت آن غالب بودن تنش پینینگ و تنش عدم تطابق حرارتی بر که با نزدیک شدن به فصل مشترک بعد از ۵۰ میکرومتر بزرگی تنش افزایش می یابد که علت آن غالب بودن تنش پینینگ و تنش عدم تطابق حرارتی بر تنشهای کوئنچ است. متوسط تنش پسماند در امتداد ضخامت برابر MPa (۱۷۹۰ و فشاری به دست آمد که برای کارکرد قطعه مفید است.

Abstract

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

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

(کد: ۹۱۱۰٦۲)

مقدمه

استفاده روزافزون از پوششهای پاشش حرارتی، به ویژه برای مقاومت در محیط دما بالا، نیازمند اطمینان به دوام پوشے اسے که شامل مقاومت در برابر ترک، جدایی اتصال پوشش و زیرلایه و پوسته پوسته شدن میباشد. تنشهای پسماند نقش مهمی در دوام پوشـشها بازی میکنند. تنشهای پسـماند در این پوششها ممکن است کششی یا فشاری باشــند. تنشهای پسماند کششی به طور معمول امکان رخداد ترک و جدایلی 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 تعمدا ایجاد کرد. پیشبینی تنشهای پسماند ستختر از تنشهای است که حین کار اعمال میشوند. پس تعیین تنشهای پسماند با استفاده از روشهایی مطمئن در فرآیندهای پاشش حرارتی هدف مهمی است چرا که وجود سطوح تنش پسماند در پوششها و علامت آنها اثر قابل توجهی بر عملکرد پوشش دارد (Greving, Rybicki, Shadley, Xiong, 1994; Totemeier & Wright, .2006)

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

در این پروژه کاربید تنگستن کبالت (WC-12Co) به روش HVOF بر روی زیرلایه فولاد CK45 پوشش داده شد. پوشش –های کاربید تنگستن کبالت پاشش حرارتی در گستره وسیعی از کاربردها برای مقاومت در برابر شـرایط شدید سایشی اسـتفاده می – شوند زیرا ذرات سـخت کاربید تنگسـتن موجود در این پوشـشها منجر به سختی بالای پوشش و بنابراین مقاومت سایشی بالای آن می شود، در حالـی که بایندر فلـزی کبالت تأمین کننـده چقرمگی مورد نیاز پوشـش است. به منظور بررسـی تنشهای پسماند در این پوشش

از پراش پرتو X و روش ψSin² استفاده می شود. در این تحقیق، از _α X تابش از منبع مس اشعه X برای اندازه گیری ها استفاده می شود. اندازه گیری های تنش پسیماند توسط ارزیابی تغییرات در فاصله b صفحات کریستالوگرافی (۰۳۰) مربوط به فاز غالب CF و 01۲۳ (۱۱۲) (۱۱۲) مربوط به پیک ۹۸/۷°=۲۵ که مربوط به فاز غالب WC است انجام می گیرد. سپس با محاسبه کرنش و استفاده از روش ψSin² نموداری برای داده ها رسم می شود و پس از آن با به دست آوردن شیب نمودار ψSin²-کرنش و داشتن مدول الاستیسیته تنش محاسبه می شود. برای بررسی تنش در راستای ضخامت تنش های پسماند در سطح آزاد پوشش و در عمق های ۵۰، ۱۰۰، ۲۳۰ و ۲۰۰ میکرون محاسبه و سپس با توجه به منشأهای اصلی برای تنش های پسماند در این سیستم تحلیل می شوند.

مواد و روش تحقیق

در ایس پژوهش نمونه فولادی AISI1045 پس از آمادهسازی برای پوشش دهمی با استفاده از فرآیند HVOF پوشش داده شد. در این فرآیند از تجهیز پاشـش حرارتی METJET III سـاخت شرکت متالیزیشن استفاده شد و نفت سفید (سوخت جت) با نرخ جریان /انا اناز به ۲۰۰ min متالیزیشن استفاده شد و نفت سفید (سوخت جت) با نرخ جریان اکسیژن / اند م ۲۰۰ min ۲۰۰ به عنوان سوخت به کار برده شد. نرخ جریان اکسیژن / شد و از روانکار روغن استفاده شد. از پودر آگلومره-زینتر کاربید تنگستن کبالت (WC-12C0) با قطر متوسـط ذرات ۲۷/۶ میکرومتر با نام تجاری (MOKA 80.71.1) با تطر متوسـط ذرات ۲۷/۶ مورد استفاده توسط دستگاه کوانتومتری آنالیز شد. از دستگاه با نام تجاری (MOKA 80.71.1) استفاده شد. ترکیب شیمیایی پودر با نام تجاری (MOKA 80.71.1) با تطر متوسـط ذرات ۷/۶ مورد استفاده توسط دستگاه کوانتومتری آنالیز شد. از دستگاه با نام تجاری (نالیز فازی پودر استفاده شد. الگوی پراش اشـعه ۲ برای برای آنالیز فازی پودر استفاده شد. الگوی پراش اشـعه ۲ برای روبشـی تصاویر SEM و آشکارساز Secondary Electron تصاویر روبشـی ای ودر استفاده گرفته شد.

آمادهسازی نمونهی زیرلایه شامل ماشینکاری، سندبلاست و تمیزکاری است. نمونه آزمون پس از ماشینکاری با ذرات کاربید سیلیسیم با مش ۱۲ میکرومتر، سندبلاست شد. سپس در استون خالص به روش اولتراسونیک شستشو داده شده و پس از تمیزکاری با آب مقطر جهت انجام فرآیند پوشش دهی خشک شد. نمونه ها پس از پوشش دهی با دستگاه وایرکات به ابعاد ۲۰ ۳۲×۲۰×٤ بریده شدند. سپس نمونه ها دو دسته شدند. دسته اول به منظور آماده سازی برای متالوگرافی، تهیه تصاویر SEM، سختی سنجی و اندازه گیری مدول الاستیک و دسته دوم به منظور برداشت از ضخامت پوشش و متالوگرافی برای مطالعه تنش با استفاده از پراش اشعه X.

جهت آماده سازی نمونه ها پس از سنگزنی پرداخت از سنباده الماسه شهماره ٤٠٠ تا ٨٠٠ با كد تجارى ٥٤٠٣٤٧٥ و ٠٤٠٣٤٧٦ برای سنبادهزنی استفاده شد و سبس پولیش با خمیر الماسه ۳ و۷ میکرون انجام شــد. 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 ۲۰۰، ۲۰۰ و ۸۰۰ و بعد با خمیر الماسه ۷ میکرون پولیش شدند. سری دوم نمونه ها به منظور ارزیابی تنش در راستای ضخامت پوشش برای رسیدن به عمقهای مورد نظر در پوشیش 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 پوليش، ضخامت نهايي مورد نظر به دست مي آمد. لذا بعد از سنگزنی به منظور از بین بردن لایه متأثر از سنگزنی در سطح پوشش از سنباده الماسه شماره ۲۰۰ 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 یایه آبی با روغن حلشونده BCS-100 استفاده شد.

اندازه گیری مدول الاستیسیته شامل دو مرحله میشود:

الف به دست آوردن سختی پوشش: میکرو سختی سنجی ویکرز طبق استاندارد ۹۵-۵۵ E384 با نیروی ۸/۲ انجام شد. زمان اثرگذاری ۱۵ ثانیه انتخاب شد. میکرو سختی سنجی نوپ نیز طبق استاندارد ۹۵-۵۶ ATT A با نیروی ۸/۱ انجام شد. در اندازه گیری سختی پوشش، به علت حساسیت سختی نوپ به قطر اصلی، قطر بزرگتر فرورونده باید موازی فصل مشترک باشد (2000). برای هر کدام از روش ها 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 اندازه گیری اثر استفاده شد. سپس مدول الاستیسته پوشش با استفاده از بازگشت الاستیک اثر نوپ و با استفاده از معادله (۱) و با داشتن عدد سختی نوپ پوشش بدست

$$E = \frac{\alpha H K}{(b/a) - (b/\dot{a})} \tag{1}$$

مى آيد (HK عدد ميكروسختى و Eمدول الاستيسيته است).

که α عدد ثابت و برابر ه ۲/۶، HK عدد ســختی نوپ، نسبت قطر فرعــی به اصلی فرورونــده نوپ (b/a=1/7.11) و ′b//a نســبت قطر

فرعی به اصلی اثر است. عدد میکرو سختی (Η) میتواند از سختی سنجی نوپ و یا ویکرز بدست آید. با این وجود 'b'a' از اثر نوپ اندازهگیری می شود (Wang et al., 2010). جهت بررسی آنالیز فازی در پودر و پوشش و همچنین اندازهگیری تنش پسماند در سطح و امتداد ضخامت از پراش سنج پرتو X نوع ۱۱۰۷۹۰۳ با جریان Cu-Kα ولتاژ ۷۸ ٤۰، طول موج ۱/۵ آنگستروم، تشعشع cu-Kα و سطح تابش² ۲۰ استفاده شد. از سیستم X'pert و نرمافزار PANALYTICAL برای آنالیز فازی استفاده شد.

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

اندازهگیری تنش پسماند در سطح آزاد پوشش بدون عملیات
آمادهسازی.

- اندازهگیری تنش پسـماند 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_a-Cu بسته به نوع مواد مورد استفاده به چند ده میکرومتر محدود می شود، اندازه گیری تنش یسماند یوشش در عمقها پس از سنگزنی، سنبادهکاری با سنباده الماسه و پولیش با خمیر الماســه انجام شــد. در اندازهگیری تجربی تنش پسماند با اســــتفاده از پراش اشـــعه X، کرنش باید در چندیـــن زاویه ψ از یک سری صفحات کریستالوگرافی همخانواده اندازه گرفته شود. شیب خط مستقیم نمودار $[ln(\frac{d_{\varphi\psi}}{d_0})]$ در مقابل $\sin^2\psi$ تعیین می شود. تنش يسماند با استفاده از شُعيب خط و ثوابت الاستيك اشعه X ماده محاسبه می شود. لذا در اندازهگیری های این پژوهش، یک پراش سنج اشعه X به کار گرفته شد که به طور ویژهای برای اندازهگیری تنش پسماند طراحی شده بود. این پراش-سنج دو آشکارساز خطی برای پوشــش دادن زوایای 0 < \ و 0 > \ دارد. لذا در اندازهگیری تنش پسماند، زاویه پراش و فاصله صفحات اتمی در زوایای ψ به ترتیبی انتخاب شد که مقادیر Sin² از صفر تا ۸/۸ افزایش یابد. آزمون در زاویای $0 < \psi$ و $0 > \psi$ انجام شد. از بازتاب (۰۳۰) مربوط به پیک ۱۳۳/٤۸°=۲۵ و بازتاب (۱۱۲) مربوط به پیک ۹۸/۷°=۲۵ که مربوط به فاز غالب WC است بدین منظور استفاده شد. آزمایش پراشسنجی پرتو X بر حدود یک سانتیمتر مربع از وسط سطح نمونه صورت گرفت. با توجه به معادله (۲) برای عمق نفوذ پرتو X، برای زاویه پراش ۲۳۳/٤۸° ۲۰ درصد از پرتوهای تابیده شــده از ضخامت ۲/٥٤ میکرومتر پراش میشــود یعنی عمق نفوذ آن ۲/٥٤ میکرومتر خواهد بود و مابقی عبور میکنند. بیش از ۹۰٪



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

W	Fe	(C(t	Со	عنصر
Balance	٠/٢	۵/۰-۵/۸	11/۵–1۳/۵	مقدار(درصد)

از پرتو تابیده شده به سطح پوشش نیز از ضخامت ۵ میکرومتر پراش می شود. برای زاویه پراش ۹۸/۷۰=۲۵، ۷۲ درصد از پرتوهای تابیده شده از ضخامت ۲ میکرومتری پراش می شود و مابقی عبور میکنند. بیش از ۹۰٪ از پرتو تابیده شده به سطح پوشش نیز از ضخامت ۱/۱ میکرومتری پراش می شود.

$$t = -\frac{\sin\theta \ln(1-G_t)}{2\mu} \tag{Y}$$

از پراش اشعه X، _{«ه} در زوایای مختلف گفته شده به دست آمد اندازهگیری شده در w=0 به جای d_o میتوان استفاده کرد. و با تقریب خوبی از _{«ه} در 0=ψ به جای d_o استفاده شد: – – آمادهســازی مکانیکی با سنباده الماسه و سپس پول

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \ln \frac{d_{\phi\psi}}{d_0} \tag{(Y)}$$

سیپس با استفاده از فواصل مختلف _{۹۹} به دست آمده از پراش کرنش در زوایای مختلف به دست آورده شد و با استفاده از این دادهها و مقادیر ۵ir² نمودار تغییرات کرنش نسبت به Sin² 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 (٤) تنش به دست آمد.

$$\sigma_{\varphi} = \frac{1}{\frac{1}{2}S_2} = \frac{1}{1+\nu} \tag{(\xi)}$$

$$\nu = ... \tau_{\Delta}$$
 . E = $\tau \cdot r \pm \tau \cdot (GPa)$

با توجه به اینکه عمق نفوذ اشـعه X در سرمت کاربید تنگستن-کبالـت کمتر از ٥ میکرومتر اسـت، فـرض حالـت دو محوری با

دقتخوبی قابل قبول است. از طرف دیگر، عملیات سطحی نظیر سندبلاست و نیز خود فرآیند پاشش که به صورت لایهنشانی است باعث ایجاد حالت تنش دو محوری متقارن در سطح می شود. در حالت تنش صفحهای 20¹σ=، می توان از تنش بر شلی در صفحه مالت تنش صفحهای 10²σ=، می توان از تنش بر شلی در صفحه ماند در مقهای بالا با پرتو X نیاز به لایهبرداری توسط سنگ زنی خواهد بود. بنابراین کافی است تک تنش م52⁰=01= اندازه گیری شود.

- كرنـش از رابطه (e=ln(d_{ow}/d₀) به دســـت مى آيــد. معمولاً از d انداندگى مىشدە د. س= 0 دە جاي d مىشان استفادە كىد

- آمادهسازی مکانیکی با سنباده الماسه و سپس پولیش باعث حذف لایههای متأثر از سنگزنی می شود بنابراین تنشهای ناشی از سنگزنی مدنظر قرار نمی گیرند.

- تنش پسماند از معادله (٤) و با قرار دادن شیب نمودار γ-Sin²ψ
در این معادله به دست می آید (He, 2009).

نتايج و بحث

– مورفولوژی و آنالیز فازی پودر

ترکیب شیمیایی پودر مورد استفاده توسط دستگاه کوانتومتری آنالیز شد (جدول ۱).

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

در شـــکل 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



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

(الف) بـا بزرگنمایـی ۵۰۰×، (ب) با بزرگنمایـی ۲۰۰۰× و (ج) با بزرگنمایی ٤٠٠٠× آورده شـده است. شکل کروی ذرات در هر سه بزرگنمایی به خوبی مشـخص است. در فرآیند HVOF این ذرات کروی دارای انرژی جنبشـی لازم برای برخورد و چسبندگی کافی به زیرلایه هسـتند. مطالعات انجام شده روی پوشش شامل آنالیز فازی با اسـتفاده از پـراش پرتو X و میکروگرافی آن با اسـتفاده از تصاویـر SEM بـود؛ همچنین به منظور تعیین تنش پسـماند در پوشـش میکرو سختیسنجی انجام و مدول الاستیک پوشش تعیین شـد. سـپس به روش پراش پرتو X و استفاده از روش ψ²Sin تنش به در چهار عمق در راستای ضخامت پوشش و در سطح آزاد پوشش به دست آمد.

– آنالیز فازی پوشش

در شکل ۲-ب نتایج آزمون پراش پرتو X پوشش اعمالی نشان داده شده است. همانگونه که در شکل دیده می شود علاوه بر فاز WC فازهای 2₂W و C₃W₃C 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 200-20 WC-12C0 تفریه 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 نتیجهی ایکسیداسیون و واکنش W با فاز فلزی Co تشکیل می شوند. در اینجا فاز جدید 2₂W و کاربید پیچیدهی Co₃W₃C به وجود آمده است. در طی پاشش HVOF پودر 200–20 برای گرم شدن و شتاب یافتن باید در معرض یک جت شعله با دمای بالا قرار گیرد. علاوه بر این در هر صورت وجود دارد.

–میکروگرافی پوشش

ککل ٤ شامل تصاویر SEM در حالت الکترون برگشتی (-Back scatter Electron) است. شکل ۵ نیز یوشش را در بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر نشان میدهد. فاز روشن کاربید تنگستن و فاز تیره کبالت است. در این تصاویر ساختار فشرده کاربید تنگستن در زمینه کبالت دیدہ میشود. کاملاً مشخص است که بایندر فلزی کبالت ذرات WC را در خود گرفته است. این نشان میدهد که کبالت رفتار ترکنندگی خوب و حلالیت مطلوب برای کاربید تنگستن دارد و به همین دلیل پرمصرفترین بایندر فلزی استفاده شده در سرمتهای پایه کاربید تنگستن است. در نقاطی از پوشش تخلخل مشاهده میشود. نقاط كاملاً سياه نشـاندهنده تخلخل هسـتند. ذرات WC ذرات سخت ســرامیکی هســتند که در زمینه فلزی کبالت قرار گرفتهاند. این امر باعث پیوستگی خوب پوشش، تخلخل کم آن و چسبندگی عالی آنها به زیرلایه و خواص مکانیکی خوب مانند سیختی بالای این یوشش می شود. شکل ٤-الف، یک نمای کلی از سطح مقطع یو شش-زیر لایه را بعد از آمادهسازی متالوگرافی نشان میدهد. پوشش پاشش حرارتی HVOF WC-12Co نسبتاً متراکم بدون ترکهایی نزدیک سطح ظاهر می شود. ویژگی مورفولوژی معرف پوشش پاشش حرارتی حضور ریزساختار لایهای مرکب از لایههای فوقالعاده فشـرده در جهت موازی با سطح است که قابل مشاهده نیستند. اما، در بزرگنمایی های بالاتر (شکل ٤-ب) وجود مرزهای لایه ها، 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 سلطحی اندازهگیری شده کمتر از ۱ درصد گزارش شده است.

همان طور که در شــکل ^٥ دیده میشــود فلــز کبالت در نقش یـک بایندر شــکلپذیر با پیوند خــوب با دانههای کاربید تنگســتن میباشد که ذرات ســخت کاربید تنگستن موجود در این پوششها



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



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

منجر به سـختی بالای پوشـش و بنابراین مقاومت سایشی بالای آن میشـود، در حالی که بایندر فلـزی کبالت تأمین کننده چقرمگی مورد نیاز پوشـش است. تخلخل سـطحی که ناشی از تمایل ذرات کاربید تنگستن برای رفتن به مرکز آگلومر است از ویژگیهای بارز فرآیندهای پاشش حرارتی است.

-میکرو سختیسنجی و اندازهگیری مدول الاستیک پوشش

یکی از پارامترهای مؤثر در ارزیابی دقیق تنش پسماند به روش پراش پرتو X، مدول الاستیسیته پوشش است. به دلیل تخلخل ذاتی پوششهای حاصل از فرآیندهای پاشش حرارتی و پارامترهای انتخابی فرآیند، مدول الاستیسیته پوششش OC0-12C با مدول الاستیسیته شکل حجمی (بالک) آن متفاوت است. بدین لحاظ لزوم اندازهگیری صحیح و دقیق مدول الاستیسیته پوشش بسیار حائز اهمیت است. مدول الاستیسیته پوشش در پراش پرتو X به منظور محاسبه تنش با استفاده از شیب نمودار Sin² مورد استفاده قرار میگیرد. با داشتن شیب نمودار و مدول الاستیسیته، تنش از معادله



شکل ۵- سطح پوشش در بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر

(٤) به دست میآید.

ASTM E384- میکرو سختی سنجی ویکرز طبق استاندارد -Kg.f ۰/۳ و زمان اثرگذاری ۱۵ ثانیه انجام شد.



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

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

ميكرو سختى ســنجى نوب يوشش مطابق استاندارد E384-10 ASTM با نیروی Kg.f٠/۲ انجام شد. متوسط میکرو سختی نوپ برای ۱۰ اثر با زمان اثرگذاری ۱۵ ثانیه بدست آمد. با اثر شیب منحنی ۶in²w استفاده شد. گذاری 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 الاستیسیته یوشش قطر بزرگتر فرورونده باید عمود بر فصل مشترک در نظر گرفته شود، در صورتی که برای اندازهگیری عدد سـختی نوپ قطر بزرگتر فرورونده بايد موازى با فصل مشــترک يوشــش-زيرلايه باشد. سيس مدول الاستيسته يوشش با استفاده از بازگشت الاستيک اثر نوپ و با استفاده از معادله (۱) و با داشتن عدد سختی نوپ پوشش بدست مى آيد. نتايج مربوط به محاسبه مدول الاستيك در جدول ۲ آمده است.

– بررسی تنش یسماند در یوشش

در نمودار شکل ٦ نتایج اندازهگیری کرنش نسبت به Sin²W سطح آزاد پوشش WC-12Co نشان داده شده است. نمودار ε-Sin²ψ برای زوایای $0 < \psi$ و $0 > \psi$ نشان دهنده همیوشانی این دو نمودار است. از آنجایی که هیچ تفاوت فاحشی بین مقادیر موقعیت براگ برای $0 < \psi = 0$ و $0 > \psi$ مشاهده نشده، این نتیجه گرفته شد که مؤلفههای تنش برشی ناچیز هستند. این نشان میدهد که یک توزیع همگن تنش–کرنش در منطقه پرتو دیده وجود دارد که استفاده از

تحلیل Sin²ψ را توجیه میکند. از میانگین کرنشهای به دست آمده در زوایای 0< ۷ و 0> ۷ جهت به دست آوردن تنش یســماند از

سپس شیب نمودار در سطح آزاد پوشش به دست آمد که برابر با ۲۲٤ ۰۰۰/۰۰ بود. با قرار دادن مقدار شیب نمودار در معادله (٤)، تنش پسماند برابر ۲۲ MPa ۲۱ – به دست آمد. مقدار منفی تنش نشاندهنده فشاری بودن تنش در سطح آزاد پوشش است.

معادله خط و محاسبه تنش برای سطح آزاد یوشش:

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 < ψ $0 = 0 > \psi < 0$ و $0 > \psi < 0$ میکرومتر نشت نام داده شده است. با فیت کردن نمودار خطی و به دست آوردن معادله و در نتیجه شیب نمودار و با استفاده از معادله (٤) تنش یسهاند برابر با MPa ٥٩/٨±٨/٥ 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 ٥٠ میکرومتر:

y = 0.000351 x + 0.00014 $\sigma = \frac{mE}{1+\nu} = 59.8 \pm 10.5$



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

y = -0.001172 x + 0.000469 $\sigma = \frac{mE}{1 + \nu} = -199.7 \pm 24.5$

شــکل ۹ مربوط به عمق ۲۳۰ میکرون است. تنش به دست آمده در این فاصله از سـطح آزاد پوشش ۲۵/۵±۸۳/۵۰ – MPa است. هماننـد عمق ۱۵۰ میکرون این تنش هم منفی و فشـاری اسـت اما بزرگی آن بیشــتر از تنش در عمــق ۱۵۰ میکرومتر بوده و میتوان نمودار تغییـرات کرنش با Sin²ψ در عمــق ۱۵۰ میکرومتر در شکل ۸ نشان داده شده است.

در شــکل ۸ دیده میشــود که شــیب نمودار مجدداً منفی شده اسـت. با به دسـت آوردن تنش مطابق آنچه گفته شــد می بینیم که تنش این بار منفی و مقدار آن ۲٤/۵ – MPa اســت. مشاهده می شود که تنش فشاری شده و بزرگی آن نیز افزایش یافته است. معادله خط و محاسبه تنش برای عمق ۱۰۰ میکرومتر:



("	اء خاخا	171	Allows	تنشرهام	~.l": _ W	10.10	

متوسط تنش پسماند در امتداد ضخامت	عمق ۳۰۰ µm	عمق ۵۳۰ µm	μm ۱۵۰ عمق μ	عمق ۵۰ um	سطح آزاد پوشش	مکان
-1&¥/1	-***/v9±**/t	-424/20=42/2	-199/A±YF/6	29/A±1+/A	- 31/11/±11	تنش پسماند (MPa)

گفت فشارىتر است.

معادله خط و محاسبه تنش برای عمق ۲۳۰ میکرومتر:

$$v = -0.001664 x + 0.000666$$

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

نمودار شــکل ۱۰ هــم که تغییرات کرنش بــا γSin² را در عمق ۳۰۰ میکرومتر را نشان میدهد. همانند نمودارهای ۸ و ۹ شیب این خط نیز منفی بوده و تنش فشاری برابر با ۲۳/۲ MPa±۲۳/۷۸– به دست آمد.

معادله خط و محاسبه تنش برای عمق ۳۰۰ میکرومتر:

$$\sigma = -0.0019 \text{ x} + 0.0008$$

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

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

نتایــج تنشهای پســماند در راســتای ضخامــت در جدول ۳ آورده شــد. متوسط تنش پسماند در امتداد ضخامت پوشش معادل ۱۰۷/۱ MPa - به دســت 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 می شود و به دمایی می رسد که زیرلایه در طی فرآیند رسوبگذاری رسیده است. این تنشها به این علت به وجود می آیند که ذرات مذاب به سمت زیرلایه رانده شده به سطح برخورد کرده و به سرعت از دمای بالا کوئنچ می شوند اما انقباض آنها توسط زیرلایه مهار می شود، که معمولاً تا دمای پایین تر ادامه دارد. این پدیده منجر به تشکیل تنشهای پسماند کششی در پوشش می شود. تنش های کوئنچ کششی بوده و مقدار شان در راستای عمق رسوب تقریباً ثابت است.

تنشهای عدم تطابق حرارتی ناشی از تفاوت در ضرایب انبساط حرارتی بین پوشش(Δ) و زیرلایه (۵) است، که منجر به تنشهای پسـماند ایجاد شـده از عدم تطابق انقباض دمایی طی سـرد شدن از دمای فرآیند (دمای میانگینی که سیسـتم پوشـش-زیرلایه پس از رسـوبگذاری به آن میرسند) به دمای محیط، موسوم به سرد شدن ثانویه اسـت. چون در اینجا ضریب انبساط حرارتی زیرلایه (⁻⁻)⁻⁻ × //۲ –/۱۱) بالاتر از ضریب انبسـاط حرارتی پوشش عـدم تطابق حرارتی گاهی اوقات ممکن اسـت در مقدار بزرگتر از تنش کوئنچینگ باشـد. در پاشـش MVOF تنشهـای پینینگ قابل توجهی میتوانند در نتیجه سـرعت بالای ذرات نیمه مذاب رخ دهند.



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

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 سر اسر ضخامت پوشش ثابت باقی میمانند پس حالت تنش در هر عمق بسته به تغییر تنشهای عدم تطابق حرارتی و پینینگ و نسبت آنها به تنش کوئنچ است.

در شکل ۱۱ تصویری شماتیک از توزیع تنش پسماند در راستای ضخامت پوشش آورده شده است. با مقایسه تنشهای به دست آمده در امتداد ضخامت دیده می شود که با افزایش عمق به طرف فصل مشترک پوشش -زیرلایه تنش فشاری نیز از سطح آزاد به سمت زیرلایه بیشتر می شود. در عمقهای بیشتر از ٥٠ میکرومتر تنش کششی کاهش یافته و تنش پسماند فشاری بالاتری به سمت فصل مشترک به دست آمد.

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

 با زیرلایه یا مواد رسوب داده شده قبلی ایجاد میشوند و القاکننده تنشهای پسماند فشاری هستند. با نزدیک شدن به فصل مشترک تنش پینینگ افزایش مییابد زیرا با هر بار رسوبگذاری لایه جدید، برخورد ذرات تشکیل دهنده هر لایه به لایه های 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 ایس دو مؤلفه فشاری و غلبه آن بر مؤلفه کششی تنش که همان پوشش کو کنچ است، در این عمق تنش فشاری به دست آمده است. در بودن تنش، بزرگی تنش بیشیتر شده است. که همانگونه که گفته مکن است سبب یک تغییر شد بیشتر شدن دو تنش فشاری پینینگ و عدم تطابق حرارتی و نیز بودن تنش، بزرگی تنش بیشیتر شده است. که همانگونه که گفته مکن است سبب یک تغییر شد بیشتر شدن دو تنش فشاری پینینگ و عدم تطابق حرارتی و نیز شمهای فشاری موضعی شدن به زیرلایه تنش پسماند فشاریتر شود.

می توان گفت که تنشهای پسماند فشاری که شامل تنشهای یینینگ و تنشهای عدم تطابق حرارتی میباشند از فصل مشترک پوشش– زیرلایه به سمت سطح پوشش کاهش مییابند، از طرف دیگر تنش کوئنچ که کششے است در سراسر ضخامت پوشش تقریباً ثابت است اثر تجمعی این تنشها منجر به تنشهای فشاری در عمقهای مختلف پوشیش می شود که با دور شدن از فصل مشترک و نزدیک شدن به سطح پوشش و در سطح آزاد پوشش بزرگی این تنش پسماند فشاری کاهش می یابد؛ اما در اینجا یک نقض دیده می شود که آن تنش پسماند در عمق ٥٠ میکرومتر است. این تنش کششی و برابر MPa ه/۸±۱۰/۵ به دست آمد. برای توجیه این تنش میتوان به حضور تخلخلها اشــاره کرد. در هر تک عبور مشعل پاشش در نتیجهی برخورد ذرات بیشتر تماس بهتر بین اسپلتها و پوشش-زيرلايه ايجاد مى-شود كه همين امر استحكام اتصال را نيز افزايش میدهد و به ایجاد یک ریزساختار یکنواخت تر لایه ای 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 شــدن از فصل مشــترک و با روند کاهشــی دمـا از فصل مشترک به سمت سطح پوشش تخلخل هایی با مورفولوژی نامنظم

پســماند فشاری شود که در زیر بیشتر توضیح داده خواهد شد. به نظر میرســد در عمق ۱۰۰ 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

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

از جدول ۳ دیده می شـود که متوسط تنش پسـماند در امتداد ضخامت برابر ۱۸۷۵ – و فشـاری به دست آمد. پروفیل تنش پسـماند برای این پوشـش با تنشهای پسـماند کششی بیشتر در پوشـش نزدیک به سـطح و با تنشهای فشاری بیشـتر نزدیک به فصل مشترک مشخص شده که با نتایج سانتانا و همکاران (Santana فصل مشترک مشخص شده که با نتایج سانتانا و همکاران (et al.,2008 WC-12Co به ضخامتهای ۲۰۰ و ۳۵۰ میکرومتر به ترتیب برابر OV_-12Co 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 ترک های تشکیل یافته دارند و عمر خستگی ووشش را افزایش میدهند. همانگونه که لیائو و همکاران (Liao, Nor-ووشش را افزایش میدهند. همانگونه که لیائو و همکاران (mand & Codde, 2000 به سایش نامطلوب هستند و تنش پسماند فشاری در پوشش باعث به بود عملکرد پوشش در مقابل سایش میشود.

به نظر می رسد تنش های پینینگ اثر گذار ترین عامل بر تنش پسماند کل در این پوشش میباشد پس با تغییر در پارامترهای پاشـش به گونهای که تنـش پینینگ افزایش یابد، با رعایت سـایر عوامل مثبت بر پوشــش، میتوان مؤلفه تنش فشاری را در پوشش افزایش داد. یینا و همکاران (Pina, Dias & Lebrun, 2003) نیز نشان دادنــد که در فرآیندهایی که در آنها ذرات در تفنگ پاشــش به طور کامل ذوب شده هستند، مثل فرآیند APS، تنشهای کوئنچ تنشهای غالب هستند. ذرات به محض برخورد گسترش می-یابند، اما انقباض طي خنک شدن و انجماد توسط مواد لايهي زيرين تحميل می شـود و تنشهای کششی در درون هر ذرهی پاشش یافته تولید می شـوند. از طرف دیگر، تنشهـای پینینگ کـه در آنها ذرات تا حدودي ذوب شده با سرعت بالا به زيرلايه برخورد ميكنند، مانند پاشش در HVOF، تنش غالب می توانند باشند. سطح هدف تغییر شکل پلاستیکی مییابد، که سطح قابل توجهی از تنشهای فشاری را ایجاد میکند. در پوشاشهای پاشاش یافته به روش HVOF تنشهای پینینگ می توانند به مقادیر مهمی برساند بنابراین حالت تنش يسماند مىتواند توسط يارامترهاى ياشـش كنترل شوند. با

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

نتيجهگيرى

منابع و مراجع

۱. تنش در عمق ۵۰ میکرومتر کششی اما در سطح آزاد پوشش و در عمقهای ۱۵۰، ۲۳۰ و ۳۰۰ میکرومتر فشاری به دست آمد.

۲. تنشهای پسماند در راستای ضخامت با نزدیک شدن به فصل مشترک بزرگیشان بیشتر می شود که به دلیل افزایش تنشهای فشاری پینینگ و عدم تطابق حرارتی و غلبه آنها بر اثر تنش کششی کوئنچ است. بیشترین تنش فشاری نزدیک به فصل مشترک دیده می شود زیرا تنشهای 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.

٤. در پوششش علاوه بر فاز WC فازهای W₂C و Co₃W و Co₃W نیز وجود دارند که در نتیجهی اکسیداسیون، دکربوره شدن کاربید تنگستن و واکنش تنگستن با کبالت است؛ در حالی که در پوشش فقط فازهای WC، کربن و کبالت وجود داشت.

Bruno, G., Fanara, C., Guglielmetti, F., & Malard, B. (2006). Characterization and residual stress analysis of wear resistant Mo thermal spraycoated steel gear wheels. Surface & Coatings Technology, 200, 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, 3(4), 379-388.

3- He, B.B. (2009). Two-dimensional X-Ray diffraction. John Wiley & Sons Publication, 249-329.

4- Liao, H., Normand, B., & Codde, C. (2000). Influence of coating microstructure on the abrasive wear resistance of WC/Co cermet coatings. Surface and Coatings Technology, 124, 235-242.

5- Pina, J., Dias, A., & Lebrun, J.L. (2003). Study by X-ray diffraction and mechanical analysis of the residual stress generation during thermal spraying. Materials Science and Engineering, A347, 21-31.

6- Santana, Y.Y., Renault, P.O., Sebastiani, M., La Barbera, J.G., Lesage, J., Bemporad, E., Le Bourhis, E., Puchi-Cabrera, E.S., & Staia, M.H. (2008). Characterization and residual stresses of WC–Co thermally sprayed coatings. Surface & Coatings Technology, 202, 4560–4565.

7- Totemeier, T.C., & Wright, J.K. (2006). Residual stress determination in thermally sprayed coatings—a comparison of curvature models and X-ray techniques. Surface & Coatings Technology, 200, 3955-3962.

8- Wang, T., Zhao, Sh., Hua, W., Li, J., Gong, J., & Sun, Chao, (2010). Estimation of residual stress and its effects on the mechanical properties of detonation gun sprayed WC–Co coatings. Materials Science and Engineering, 527, 454-461.

9- Withers, P.J., & Bhadeshia, H.K.D.H. (2001). Residual stress part 1: measurement techniques. Materials Science and Technology, 17, 355-365.