

بررسی پارامترهای پاشش و رفتار سایشی پوشش WC-Co حاصل از پاشش حرارتی HVOF

مهدی جلالی عزیزپور و سید عادل آلبوشوکه

گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

(دریافت مقاله : ۹۳/۱۰/۰۸ - پذیرش مقاله : ۹۴/۰۲/۱۶)

چکیده

در این مطالعه سعی شده است رفتار سایشی پوشش های کاربرد تنگستن - کبالت حاصل از پاشش حرارتی HVOF مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به تأثیر تجزیه و اکسیداسیون فاز WC بر سختی و رفتار سایشی، تأثیر پارامترهای فرآیند به عنوان پارامترهای مستقل و دمای ذرات به عنوان پارامتر وابسته بر تجزیه فاز WC مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از چهار عامل فاصله پاشش، نسبت اکسیژن به سوخت، نرخ تغذیه پودر و سرعت حرکت تفنگ به عنوان ورودی استفاده شد. از سیستم اسپری واچ جهت اندازه گیری دمای ذرات استفاده شد. از روش تاگوچی به منظور طراحی، اجرای آزمایشات و بهینه سازی استفاده شد. نتایج تحلیل اثر میانگین نشان می دهد که تغییرات فازی در فرآیند پاشش HVOF با دمای ذرات رابطه مستقیم داشته و بدین ترتیب کمترین میزان تجزیه فاز WC در کمترین دمای پاشش اتفاق می افتد. مقاومت سایشی پوشش در کمترین دما (کمترین تجزیه فاز WC) و بیشترین دما (بیشترین تجزیه WC و بیشترین سرعت ذرات) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که با تجزیه فاز WC میزان سختی و مقاومت سایشی افزایش می یابد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی، آنالیز نقطه ای، پراش پرتو ایکس، میکروسختی سنجی و آزمون سایش بهره لازم حاصل گردید.

واژه‌های کلیدی: سایش، پودر WC-Co، تجزیه، دمای ذره، HVOF

The Wear Behavior of HVOF Thermally Sprayed WC-Co Coatings

M. Jalali Azizpour and S. A. Alboushouke

Department of Mechanics, College of engineering, Ahvaz branch, Islamic Azad University

(Received 29 December 2014, accepted 6 May 2015)

Abstract

In this paper, the wear behavior of high velocity oxy fuel thermally sprayed WC-12Co coatings has been studied. The effect of the main process parameters of HVOF thermal spraying (independent parameters) on the temperature of particles and phase degradation (dependent parameters) of WC-12Co coatings on the wear behavior was studied. Four more effective parameters such as spray distance, oxygen to fuel ratio, powder feed rate and gun travel speed were selected as inputs. Taguchi approach was used for design of experiments. Spray Watch diagnostic system, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction were used for this purpose. The pin on disc method was used to evaluate the wear behavior of coatings. The statistical results showed that the temperature of particles has the most influence on the phase degradation as well as wear behavior. Therefore the more particle temperature the more degradation of WC and finally the more wear resistance.

Keywords: Wear, WC-Co powder, Degradation, Particle temperature, HVOF.

E-mail of corresponding author: mjalali@iauahvaz.ac.ir

مقدمه

با توجه به افزایش نرخ تولید و کارایی تجهیزات، اهمیت پدیده‌هایی نظیر سایش و خوردگی اجزای مختلف ماشین‌آلات و سازه‌ها نیز افزایش قابل توجهی یافته است. این موضوع باعث توسعه روش‌های پوشش‌دهی سطوح شده است تا بدین ترتیب مقاومت قطعات به سایش و خوردگی افزایش یابد. همچنین با این روش‌ها می‌توان بسیاری از قطعات فرسوده را بازسازی نمود و از هزینه تأمین قطعات نو به میزان قابل توجهی کاست. امروزه دامنه وسیعی از عملیات سطحی و پوشش‌دهی مورد استفاده قرار می‌گیرند که هر کدام دارای مزایا و محدودیت‌هایی هستند. کاربرد ابتدایی در زمینه HVOF توسط موسسه مهندسی تیلور^۱ و کمپانی مهندسی براون^۲ انجام شده است [۱]. توسعه سریع این روش و انتشار وسیع تجهیزات HVOF منجر به این شده است که بسیاری از شرکت‌های پوشش‌دهی تلاش کنند پوشش‌های با کیفیت بالایی از این روش بدست آورند. در حال حاضر این روش برای پاشش فلزات، سرمته‌ها و بسیاری از کاربردها در صنایع هوایی که قبلاً از الکترولیت‌های کروم استفاده می‌کردند، استاندارد شده است. مزایای کاربرد پوشش‌های پاشش حرارتی با سرعت بالا برای جایگزینی کروم سخت امروزه کاملاً پذیرفته شده است [۲].

در پاشش حرارتی HVOF، ذرات در عین حال که سرعت بالایی دارند در مسیر خود حرارت کمتری را در مقایسه با سایر روشهای پاشش حرارتی تجربه می‌کنند. این امر باعث می‌شود که درصد تجزیه WC در مسیر پاشش کمتر شود. با این وجود به علت وجود اکسیژن و دمای بالای فرآیند نمی‌توان از اکسید شدن WC جلوگیری به عمل آورد. کاربرد تنگستن به فازهای WC₂، فاز بی‌شکل نانو ساختار Co-W-C و یا کاربیدهای

پیچیده Co₃W₃C، Co₂W₄C، Co₆W₆C و Co₃W₉C₄

تبدیل می‌شود [۱ و ۲].

ولین مطالعه پارامتری فرآیند HVOF در سال ۱۹۹۶ توسط ویلر^۳ و همکاران [۳] انجام شد. تلاش آنها برای بهینه‌سازی ترکیب فازها و ریزساختار ناموفق ماند. تغییرات در خروجی‌های اندازه‌گیری شده بسیار کم بود و امکان بهینه‌سازی پارامترها با استفاده از این داده‌ها وجود نداشت.

به منظور بهینه‌سازی پاشش پلاسمایی گوساما^۴ و همکاران [۴] از شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند. در این مطالعه اشاره شده است که به منظور کنترل فرآیند، باید مستقل بودن پارامترهای فرآیند، ارتباط بین فاکتورها و تأثیرات هر فاکتور به تنهایی بر خواص مکانیکی، مشخصات و عمر سرویس مشخص شود. نتایج مطالعه آنها نشان داد که سطح تخلخل با افزایش جریان قوس، نرخ هیدروژن و کاهش نرخ تغذیه پودر کاهش می‌یابد.

جین^۵ و همکاران [۵] یک کنترل کننده منطقی فازی را در بهینه‌سازی زبری سطح پوشش‌های مقاوم حرارتی اعمالی به روش پاشش پلاسمایی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان می‌داد که سه پارامتر ولتاژ، سرعت حرکت نازل و نرخ گاز حامل بیشترین تأثیر را بر زبری سطح (حدود ۷۰ درصد) دارد.

پیکاس^۶ و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۹ تأثیر نسبت اکسیژن به سوخت را بر پارامترهای ذره در حین پاشش پودر WC-Co مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که مخلوط نفت سفید - اکسیژن منجر به سرعت بالاتر و دمای پایین‌تر ذرات در مقایسه با مخلوط هیدروژن - اکسیژن می‌شود. علاوه بر آن، نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد که ریز سختی پوشش با افزایش دمای

³ - H.L.de Villier

⁴ - S.Guessasma

⁵ - M.Der Jean

⁶ - J.A.Picas

¹ - Taylor, NH, USA

² - Brawn, West Lebanon, NH, USA

قبلی است. بدین لحاظ می توان اهداف کلی از این پژوهش را به ترتیب زیر برشمرد:

۱. استفاده از روش طراحی آزمایشات تاگوچی جهت یافتن ارتباط دمای ذرات در حین برخورد و ارتباط آنها با تجزیه فاز WC و اکسیداسیون پوشش WC-12Co.

۲. یافتن شرایط بهینه پاشش حرارتی HVOF از نظر دمای ذرات و تجزیه فاز WC و انجام مطالعات مربوط به رفتار سایشی در کمترین دما و تجزیه فاز WC و بیشترین دما و تجزیه فاز WC.

علاوه بر مقاومت سایشی به عنوان یک اهمیت اساسی می توان به انتخاب پارامترهای پاشش با توجه به شرایط کارکرد اشاره نمود. تجزیه فاز WC به فاز سختتر W_2C که چقرمگی کمتری نیز دارد اگرچه باعث افزایش مقاومت سایشی می شود ولی در مواردی که نیاز به چقرمگی شکست بالاتری است می توان با انتخاب پارامترهای مناسب جهت تجزیه کمتر فاز WC در دمای پایین به پوششی با چقرمگی مورد نظر دست یافت.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از روش طراحی آزمایشات با آرایه متعامد تاگوچی با خروجی دمای برخورد ذرات و تجزیه فازی پوشش استفاده شد.

جهت اندازه گیری دمای ذرات از سیستم spray watch بهره لازم حاصل شد. در این سیستم از دوربین CCD^۲ به منظور تعقیب ذره در حین پرواز استفاده می شود. کافی است ذره در حدود ۱۰-۵ میکروثانیه در معرض دید دوربین قرار گیرد. در طول این زمان، ذرات بسته به سرعت خود، فاصله ۰/۵ تا ۱/۵ میلیمتری را طی می کنند نمایشگر spray watch شامل قسمت های اندازه گیری و نمایش سرعت، دما و شار ذرات در مسیر پاشش است [۹].

ذره افزایش می یابد و این امر به دلیل ایجاد فاز سخت تر W_2C است.

زوراسکی و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۳ ریزساختار و خواص تریبولوژیکی پوشش نانو اندازه (۵۰-۵۰۰nm) سرمت WC-12Co حاصل از HVOF با سوخت جت را مورد بررسی قرار دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که تجزیه WC به W_2C و فازهای آمورف کمتر از پوشش WC-12Co متداول است. آنها همچنین ساختار متراکم تری را بدست آوردند.

پیکاس و همکاران [۸] نشان دادند که در صورت استفاده از سوخت جت و اکسیژن سرعت ذره بسیار بالاتر و دمای ذرات بسیار پایین تر از زمانی است که از سوخت هیدروژن و اکسیژن استفاده می شود. افزایش نرخ اکسیژن تأثیرگذاری مستقیمی بر واکنش های احتراق دارد ولی در تحقیق آنها افزایش بیش از اندازه اکسیژن باعث کاهش دمای ذرات شد. در هر دو سوخت با افزایش دما و دمای ذرات درصد تخلخل و زبری سطح پوشش کاهش یافت.

روبرت ود^۱ [۱] تریبولوژی پوشش های پاشش حرارتی WC-Co را مورد مطالعه قرار داد. مقاومت سایشی خراشان و خوردگی این پوشش ها مورد مطالعه قرار گرفت. در مطالعه ایشان مقاومت سایشی خراشان قابل مقایسه با سرمت زینتر شده با ترکیب شیمیایی مشابه بدست آمد. نتایج مرور مطالعات پیشین نشان می دهد که در زمینه مطالعه تأثیر پارامترهای فرآیند و دمای ذرات بر رفتار سایشی مطالعه موثری صورت نگرفته است. با توجه به مطالعات پیشین، هدف از این مطالعه بررسی توام پارامترهای موثر پاشش حرارتی و دمای ذرات بر تغییرات فازی و رفتار سایشی پوشش است. حصول شرایط بهینه پوشش برای بهترین رفتار سایشی با در نظر گرفتن تجزیه فاز WC هدف اصلی این تحقیق با توجه به بررسی های

² - charge coupled device

¹ R. J. K wood

در جدول ۳ پارامترهای مورد بررسی و سطوح آنها درج شده است. از گاز نیتروژن به عنوان گاز حامل استفاده شد. نرخ گاز مایع (سوخت) نیز در طول فرآیند، ثابت در نظر گرفته شد (10 ± 70 لیتر بر دقیقه).

در طراحی آزمایشات دو فاکتور سه سطحی و دو فاکتور دو سطحی، تاگوچی استفاده از آرایه استاندارد L9 را پیشنهاد می‌کند (جدول ۴). برای هر موقعیت آزمایش، چهار نمونه ورق فولاد AISI1045 به ضخامت ۴ میلی‌متر پوشش داده شد (۱۶ لایه‌ای).

جدول ۳. ترتیب فاکتورها و سطوح.

فاکتور	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
A	فاصله پاشش (mm)	۱۷۰	۲۰۰
B	نسبت اکسیژن به سوخت	۲/۵	۳/۵
C	نرخ تغذیه (g/min)	۳۸	۵۸
D	سرعت تفنگ (m/s)	۱	۱/۲

شرایط بهینه با بررسی اثر میانگین (تحلیل عاملی) و نسبت سیگنال به نویز و با در نظر گرفتن مشخصه کیفیت هر چه کمتر بهتر (SB^1) بدست آمد. درصد مشارکت نسبی هر فاکتور بر خروجی با تحلیل واریانس^۳ بدست آمد. از نرم افزار Qualitek4 بدین منظور استفاده شد. جهت بررسی آنالیز فازی در پودر و پوشش از پراش سنج پرتو X نوع ۱۱۰۷۹۵۳۵ با جریان ۴۰ mA و ۴۰ kV ولتاژ با طول موج ۱/۵۴ آنگستروم و تشعشع Cu-K α با سطح تابش ۱۰ mm² استفاده شد. به منظور بررسی سطح مقطع پوشش از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM و مطالعات EDS استفاده شد. میکروسکوپ الکترونی روبشی از نوع VEGA/TESCAN-LMU2300 مورد استفاده قرار گرفت. از روش پین و دیسک مطابق

از پودر کاربید تنگستن- کبالت WC-12Co محصول شرکت اچ سی اشتارک^۱ با اندازه ذرات بین $45+15\mu\text{m}$ استفاده شد. ترکیب شیمیایی پودر مورد استفاده در جدول ۱ درج شده است. از سیستم پاشش حرارتی گازی HIPOJET با سوخت گاز مایع جهت پوشش دهی استفاده شد. ترکیب گاز مورد استفاده در جدول ۲ درج شده است. چهار فاکتور نسبت سوخت به اکسیژن (در سه سطح)، فاصله پاشش (در سه سطح)، نرخ تغذیه پودر (در دو سطح) و سرعت حرکت مشعل (در دو سطح) در طراحی آزمایشات استفاده شد. گروههای مورد بررسی شامل دمای ذرات در برخورد به زیرلایه، تجزیه فاز WC و رفتار سایشی در شرایط بهینه در نظر گرفته شد. تأثیر پارامترهای فرآیند به عنوان پارامترهای اولیه و تأثیر دمای ذرات به عنوان پارامتر ثانویه وابسته به دما بر تجزیه فاز WC و رفتار سایشی مورد بررسی قرار گرفت. در گروه اول تأثیر پارامترهای پاشش در سطوح مختلف مستقل از هم بر دمای ذرات مورد بررسی قرار گرفت. در گروه دوم تأثیر توأم پارامترهای پاشش و دما بر تجزیه پوشش و در نهایت مقاومت سایشی در شرایط بهینه مورد توجه قرار گرفت.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی پودر مورد استفاده

عنصر	Co	C(t)	C(free)	Fe	W
مقدار	۱۱/۸۳	۵/۳۹	<۰/۰۲	<۰/۰۱	Balance

جدول ۲. ترکیب شیمیایی گاز مایع.

گاز	درصد وزنی (%)
اتان	۰-۹
پروپان	۲۸/۴۰
بوتان (ایزو)	۳۰/۲۰
بوتان (N)	۴۰/۵۰

^۱ - H.C.Starck

^۲ - The smaller the better

^۳ - ANOVA

جدول ۴. آرایه استاندارد تاگوچی L9

Test No.	A	B	C	D
E1	۱	۱	۱	۱
E2	۱	۲	۲	۲
E3	۱	۳	۱	۱
E4	۲	۱	۲	۱
E5	۲	۲	۱	۱
E6	۲	۳	۱	۲
E7	۳	۱	۱	۲
E8	۳	۲	۱	۱
E9	۳	۳	۲	۱

بررسی دمای ذره WC-12Co در فرآیند HVOF

دمای ذرات می‌تواند خصوصیات مکانیکی، متالورژیکی و تریبولوژیکی را تحت تأثیر قرار دهد. تنش‌های حرارتی در حین سرد شدن ذره (تنش‌های کوئچ) و در حین سرد شدن پوشش تا دمای محیط می‌تواند طبیعت تنش، رفتار خستگی، استحکام پیوند، چقرمگی شکست و مقاومت سایشی را تحت تأثیر قرار دهد. در شکل ۳ نمودار دمای ذرات برای یکی از موقعیت‌های آزمایش نشان داده شده است. ذرات با دمای بالای ۳۰۰۰ درجه سانتیگراد و نزدیک به ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد نیز در مسیر پرواز وجود دارند. دمای ذرات در سیستم HVOF مورد استفاده (HIPOJET) به طور متوسط ۲۵۰-۵۰۰ درجه بیش از دمای ذوب کبالت به دست آمد. با توجه به خاصیت زینتر پذیری سرمت WC-Co در زیر دمای ذوب کبالت در پاشش HVOF تنظیم دمای ذرات حتی الامکان نزدیک به دمای ذوب کبالت نتایج بهتری به خصوص در مورد تنش‌های حرارتی و تغییرات فازی ایجاد می‌نماید. بدین جهت مشخصه هر چه کمتر، بهتر در تحلیل اثر میانگین در نظر گرفته شد. در جدول ۵ آرایه مورد نظر و میانگین دمای ذرات برای ۵۰ تکرار آورده شده است.

استاندارد ASTM G99-05 به منظور بررسی رفتار سایشی بهره گرفته شد. از SiC به عنوان سطح ساینده، تنش اعمالی ۱۰۰ KPa و سرعت خطی ۱۰ m/min برای نمونه آزمون سایش با ابعاد ۴۰۰ mm² در نظر گرفته شد. کاهش وزن برای مسافت‌های مختلف و حداکثر تا ۳۰۰۰ متر اندازه‌گیری شد. به عنوان یک محدودیت اساسی در طراحی آزمایشات، انتخاب سطح پارامتر نسبت اکسیژن به سوخت جهت ایجاد تفاوت معنی دار در خروجی همواره حایز اهمیت است. به دلیل محدودیت دستگاه پاشش و ملاحظات فنی پوشش نمی‌توان این نسبت را در اندازه بالا مورد استفاده قرار داد. از محدودیت‌های این تحقیق می‌توان به نبود سیستم پایش ذرات spraywatch به منظور اندازه‌گیری ذرات در کشور اشاره نمود.

نتایج و بحث

بررسی فازی و مورفولوژی پودر

در شکل ۱ تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ذرات کاربرد تنگستن-کبالت پودر مورد استفاده نشان داده شده است. ذرات کروی WC-12Co با اندازه ۱۵-۴۵ میکرون متشکل از ذرات WC در زمینه کبالت هستند. این پودر با فرآیند آگلومره - زینتر ذرات کاربرد تنگستن در زمینه فلزی کبالت تولید شده است. در مقایسه با ذرات با هندسه غیرکروی، ذرات با مورفولوژی کروی دارای سطح تماس کمتری با زیرلایه در لحظه برخورد هستند و از این بابت تمرکز تنش در سطح تماس کمتر باعث تغییر شکل پلاستیک بیشتری در ذره می‌شود. این امر در فرآیند HVOF منجر به ایجاد تنش فشاری در ذره WC-Co و زیرلایه ناشی از اثر پینینگ^۱ می‌شود [۱۰]. شکل ۲ الگوی پراش پرتو X پودر مورد استفاده نشان داده شده است. نتایج پراش سنجی، بیانگر وجود کبالت، کاربرد تنگستن و کربن در ترکیب پودر است. همچنان که مشاهده می‌شود پیک غالب مربوط به WC است.

^۱ - Peening

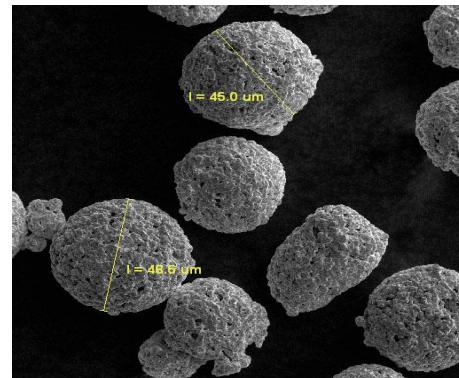
$$MSD = (Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 + \dots + Y_{50}^2) / 50 \quad (1)$$

$$SNR = -10 \log MSD \quad (2)$$

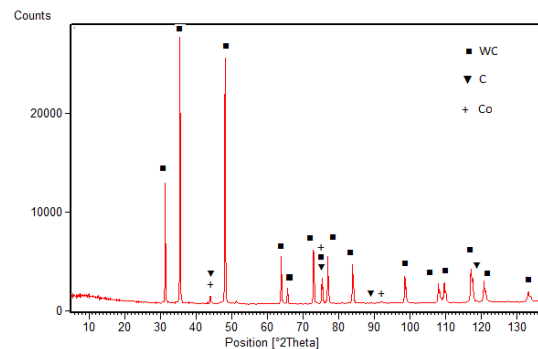
جدول ۵. آرایه استاندارد تاگوچی L9 برای دمای ذرات (°C)

Test No.	A	B	C	D	Mean	MSD (E+3)
E1	۱	۱	۱	۱	۱۹۵۲/۹	۳۸۱۴
E2	۱	۲	۲	۲	۲۰۵۴/۴۹	۴۲۳۴
E3	۱	۳	۱	۱	۲۰۵۵/۴۲	۴۲۳۰
E4	۲	۱	۲	۱	۱۸۵۷/۵۶	۳۴۵۳
E5	۲	۲	۱	۱	۱۸۷۹/۹۷	۳۵۶۳
E6	۲	۳	۱	۲	۱۹۸۲/۳۳	۳۹۲۶
E7	۳	۱	۱	۲	۱۷۴۹/۱۸	۳۰۶۵
E8	۳	۲	۱	۱	۱۸۵۴/۹۲	۳۴۴۲
E9	۳	۳	۲	۱	۱۹۲۹/۲۲	۳۷۱۵
E10	۱	۲	۱	۱	۲۰۰۲/۲۴	۴۰۲۴

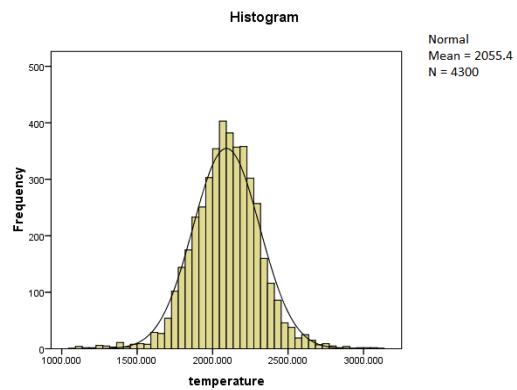
در شکل ۴ نیز تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر دمای ذرات در فرآیند HVOF نشان داده شده است. نتایج آزمون نشان می‌دهد که نرخ تغذیه پودر و سرعت حرکت تفنگ بر دمای ذرات تأثیر چندانی ندارد. با افزایش فاصله پاشش دمای ذرات کمتر می‌شود. این در حالی است که افزایش نسبت اکسیژن به سوخت باعث افزایش دمای ذرات می‌شود. با افزایش نسبت O/F دمای ذرات همواره افزایش می‌یابد. با این وجود شدت افزایش دما از سطح ۲ به سطح ۳ کمتر از سطح ۱ به سطح ۲ است. به عبارت دیگر در این آزمایش با وجود افزایش دمای شعله، نرخ افزایش دما با افزایش نسبت O/F کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد این امر ناشی از تشکیل گاز CO₂ و گاهی O₂ در کنار محصولات احتراق در دمای بالا (بالاترین O/F در این آزمایش) باشد. انرژی آزاد شده در اثر تولید گاز CO بسیار کمتر از انرژی حاصل از واکنش محصولات احتراق است. بدین ترتیب گاز CO نه تنها کمکی به افزایش دمای شعله نمی‌کند بلکه با افزایش چگالی شعله باعث کاهش سرعت شعله و در نهایت کاهش سرعت ذرات در مسیر پرواز می‌شود [۱۲].



شکل ۱. تصویر SEM از مورفولوژی پودر WC-12Co.



شکل ۲. الگوی پراش پرتو X پودر مورد استفاده.



شکل ۳. نمودار توزیع نرمال دمای بیش از ۴۰۰۰ دره در بیشترین دما.

به منظور محاسبه میانگین مربع انحرافات (MSD) برای مشخصه‌های کیفیت انتخاب شده و نسبت سیگنال به نویز از روابط ۱ و ۲ استفاده شد. جهت تحلیل نسبت سیگنال به نویز از ۵۰ تکرار در اندازه گیری دمای ذرات در برخورد به زیر لایه استفاده شد [۱۱].

۸- انجماد

۹- تغییرات فازی، واکنش های انحلال حالت جامد،

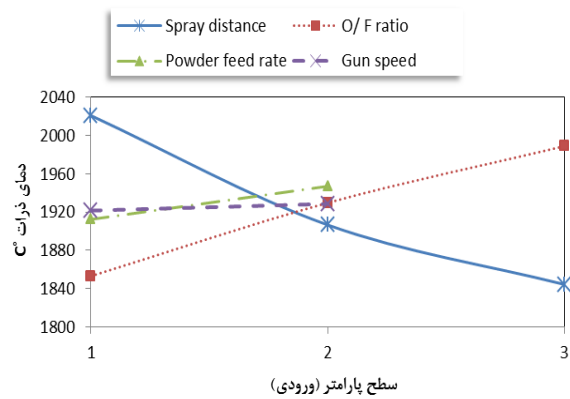
رسوب تنگستن و فازهای آمورف $Co_xW_yC_z$

در سیستم WC-Co واکنش اصلی در واقع دکربوره شدن فاز WC است. تمایل کربن برای واکنش با اکسیژن بسیار بیشتر از کبالت و تنگستن است و بدین لحاظ اهمیت بیشتری در مقوله اکسیداسیون پوشش دارد. تجزیه و اکسیداسیون فاز WC عمدتاً تحت مکانیزم زیر صورت می گیرد:



کربن آزاد شده در اثر تجزیه کاربید تنگستن (واکنش ۳) می تواند در بستر کبالت مذاب حل شود و بخش قابل توجهی از آن در اثر پدیده نفوذ به سطح ذره رسیده و در آنجا با اکسیژن ترکیب شده و تشکیل CO یا CO_2 دهد. نتیجه این فعل و انفعالات خروج کربن از ترکیب پوشش است. تنگستن اتمی و W_2C می توانند در زمینه کبالت حل شوند و یا اینکه در مرز دانه های کاربید تنگستن رسوب کنند. ایجاد نوارهای باریک روشن در سطح ذرات WC توسط گویلمانی^۱ مشاهده و گزارش شده است. فاز W_2C در مقایسه با WC دارای سختی بالاتری است ولی چقرمگی کمتری دارد.

ب- اکسید شدن WC با اکسیژن و محصولات احتراق (CO_2 و بخار H_2O): این واکنش ها بیشتر در دانه های سطح WC صورت می گیرد. در مورد این نوع اکسیداسیون نسبت سطح به حجم دانه WC بسیار حائز اهمیت است. ذرات کوچکتر و دانه های ریزتر دارای نسبت سطح به حجم بالاتری هستند و در معرض اکسیداسیون بیشتری قرار دارند. اکسید شدن WC بیشتر با اکسیژن و محصولات احتراق (CO_2 و بخار H_2O) اتفاق می افتد.



شکل ۴. اثر میانگین پارامترهای فرآیند بر دمای ذرات.

آنالیز تجزیه پودر

در حین پوشش دهی فاز WC در اثر گرمای محفظه احتراق و همچنین در مسیر پاشش از لحظه خروج از تفنگ پاشش تا برخورد به زیرلایه یا لایه قبلی پوشش و همچنین بعد از فرآیند پاشش در حین سرد شدن پوشش به فازهای دیگری تجزیه می شود [۳ و ۹ و ۱۲]. میزان تجزیه کاربید تنگستن به میزان انرژی حرارتی پودر بستگی دارد. با این حال در فرآیند HVOF در مقایسه با سایر فرآیندهای پاشش نظیر پاشش پلاسمایی دمای ذرات آنچنان بالا نیست که باعث تجزیه قابل توجه کاربید تنگستن شود. سرعت بالای ذرات نیز باعث می شود که ذرات، زمان کمتری را در مسیر پاشش سپری کنند و بدین ترتیب درصد تجزیه کاربید تنگستن در مقایسه با پاشش پلاسمایی اتمسفری کمتر می شود. به طور کلی تجزیه فاز WC شامل مراحل زیر است [۹]:

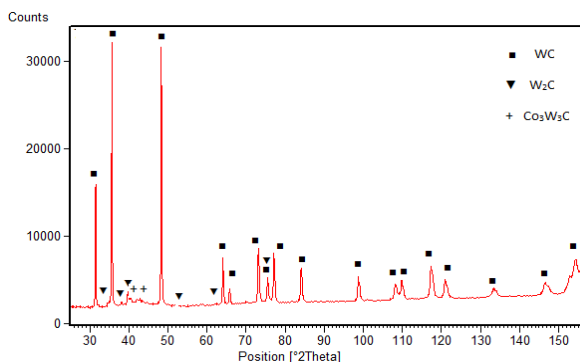
- ۱- گرم شدن پودر
- ۲- دکربوره شدن در حالت جامد با اکسید شدن WC
- ۳- ذوب شدن کبالت و انحلال ذرات کوچک WC و گوشه های تیز ذرات WC بزرگ در آن
- ۴- تشکیل W_2C و $Co_xW_yC_z$
- ۵- نفوذ کربن به سطح ذره
- ۶- اکسید شدن سطحی و داخلی کربن
- ۷- تشکیل حباب های CO و آزاد شدن یا محبوس ماندن آن ها

¹ - Guilemay

که در شکل ۵ نشان داده شده است علاوه بر WC در ترکیب پوشش، فازهای دیگری نظیر W_2C و Co_3W_3C و سایر فازهای اکسیدی حضور دارند. از نشان دادن تمامی فازهای اکسیدی در الگوی پراش پرتو X اجتناب شده است.

جدول ۶. آرایه استاندارد تاگوچی L9

Test No.	A	B	C	D	میکروسختی نوب	شدت نسبی پیک ۳۹/۷۷
E1	۱	۱	۱	۱	$140.8 \pm 68/95$	۶/۰۶
E2	۱	۲	۲	۲	$1189/1 \pm 44/3$	۷/۰۵
E3	۱	۳	۱	۱	$1115/5 \pm 74/1$	۹/۹۳
E4	۲	۱	۲	۱	$1097/8 \pm 41/5$	۴/۸۱
E5	۲	۲	۱	۱	$1460/35 \pm 117$	۶/۷۶
E6	۲	۳	۱	۲	$1297/3 \pm 71/5$	۸/۰۷
E7	۳	۱	۱	۲	$834/85 \pm 80/2$	۴/۴۱
E8	۳	۲	۱	۱	$1319 \pm 41/8$	۵/۵
E9	۳	۳	۲	۱	$1257/9 \pm 79/8$	۸/۳۵
E10	۱	۲	۱	۱	$1225 \pm 70/3$	۶/۸



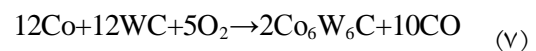
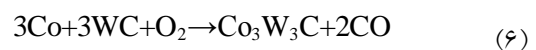
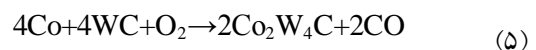
شکل ۵. الگوی پراش پرتو X پوشش.

بهینه سازی و تحلیل اثر میانگین

از شدت نسبی پیک W_2C در $20 \sim 39/57$ به عنوان خروجی استفاده شد. در تمامی نمونه‌های آزمایش، شدت نسبی این پیک مربوط به W_2C و چند فاز اکسیدی دیگر نظیر Co_3W_3C و $CoWO_4, W_5O_{14}, C_6WO_6(W(CO)_6)$ است. بدین لحاظ شدت نسبی پیک $20 \sim 39/57$ به منظور بررسی تجزیه فاز کاربرد تنگستن انتخاب شد. در جدول ۶ شدت نسبی پیک فازهای ناشی از تجزیه WC در $20 \sim 39/57$ به عنوان خروجی آزمایش نشان داده شده

ج- اکسیداسیون جامد- جامد نیز می‌تواند بین کاربرد تنگستن و اکسید کبالت و اکسید تنگستن صورت پذیرد. کاهش فاز CoO به Co توسط کربن موجود در WC در مسیر پرواز اتفاق می‌افتد. فاز CoO در بالاتر از نقطه ذوب خود ($1810^\circ C$) در فاز آمورف حل می‌شود. فاز WO_3 از یک طرف در دماهای بالاتر از $700^\circ C$ بسیار فرار است و از طرف دیگر توسط کربن به تنگستن اتمی احیا می‌شود.

د- تشکیل فازهای WC-C-Co: با توجه به اینکه ذرات کاربرد تنگستن در فاز زمینه کبالت پخش شده‌اند در حین پاشش و همچنین در حین سرد شدن پوشش واکنش‌های زیر می‌تواند به تجزیه فاز کاربرد WC کمک کند. مقداری از کربن باقیمانده و تنگستن (W) حاضر در فاز زمینه باعث ایجاد فازهای نانو بلوری و بی شکل با اندازه دانه کمتر از ۸ نانومتر می‌شود (معادلات ۴-۷).



در فرآیند HVOF نیز در صورت استفاده از پارامترهای بهینه می‌توان از دگرپوره شدن WC به طور قابل توجهی کاست. به طور کلی می‌توان اکسیداسیون نسبتاً پایین در فرآیند HVOF را به دو دلیل زیر مربوط نمود [۱۲، ۱]:

الف- محدود بودن واکنش WC با فاز زمینه به نفوذ

ب- زمان تماس کمتر ذرات با اکسیژن در فرآیند HVOF به منظور بررسی تأثیر پارامترهای پاشش حرارتی HVOF بر اکسیداسیون و تجزیه فاز WC نمونه‌های آزمایش تحت پراش سنجی پرتو X قرار گرفتند. بدین منظور نمونه‌ها در تمامی ۹ حالت آرایه استاندارد در طراحی آزمایشات مورد ارزیابی قرار گرفتند (جدول ۶). همانطور

آزمایش E7) زمان حضور ذرات در مسیر پاشش (زمان پرواز) تنها ۰/۶ms است.

برای فاصله پاشش ۱۷۰mm و سرعت ۴۴۷/۸m/s (نمونه آزمایش E10) زمان پرواز ۰/۴ ms است. بیشترین اختلاف در زمان پرواز تنها ۰/۲ms است و بعید به نظر می‌رسد که اکسیژن محیط باعث اکسیداسیون و دکربوره شدن پوشش شود. شاید بتوان دلیل اصلی کاهش تجزیه WC در فواصل پاشش بالاتر را در کاهش دمای ذرات در فواصل پاشش بالاتر جستجو کرد. در بیشترین فاصله پاشش (۲۵۰mm) دمای ذرات در حین برخورد در کمترین مقدار خود است. از آنجا که پدیده نفوذ به شدت وابسته به دما است، بدین ترتیب خروج کربن از زمینه و نفوذ به سمت سطح ذره به شدت محدود شده و کربن فرصت خروج از ترکیب و تشکیل اکسیدهای سطحی را پیدا نمی‌کند. از طرف دیگر از آنجا که بخشی از تجزیه کاربید تنگستن در مرحله سرد شدن پوشش اتفاق می‌افتد (بعد از اتمام پوشش دهی) به نظر می‌رسد که دمای پایین تر ذرات در فواصل پاشش بالاتر بتواند تجزیه WC را در حین سرد شدن تحت تأثیر قرار دهد.

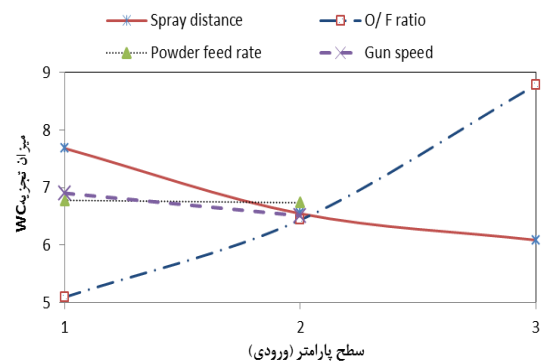
در نمودار شکل ۸ اثر میانگین نسبت اکسیژن به سوخت بر دمای ذرات و تجزیه فاز WC نشان داده شده است. نتایج تحلیل اثر میانگین نشان می‌دهد که با افزایش نسبت اکسیژن به سوخت از ۲/۵ تا ۴/۳ در این تحقیق، تجزیه و اکسیداسیون کاربید تنگستن همواره بیشتر می‌شود.

افزایش تجزیه WC با افزایش نسبت اکسیژن به سوخت بسیار شدیدتر است. افزایش اکسیژن باعث افزایش دمای گاز در شعله می‌شود. با نزدیکتر شدن به نسبت استوکیومتری دمای شعله نیز بیشتر می‌شود. این افزایش دما به میزان خلوص اکسیژن نیز بستگی دارد. با توجه به سرعت بالای فرآیند احتراق، آهنگ انتقال حرارت کندتر از سرعت واکنش است، لذا از لحاظ ترمودینامیکی فرآیند را بدون هدر رفت انرژی و بی دررو در نظر گرفت.

است. از مشخصه کیفیت هرچه کمتر بهتر^۱ به منظور بررسی اثر میانگین استفاده شد.

نتایج تحلیل اثر میانگین پارامترهای پاشش حرارتی (ورودی‌ها) بر تجزیه فاز WC در نمودار شکل ۶ در سطوح مختلف نشان داده شده است. با توجه به سطوح انتخاب شده در طراحی آزمایشات این تحقیق، دمای ذرات با افزایش نسبت اکسیژن به سوخت افزایش می‌یابد. این بدین معنی است که شاید در بالاترین O/F انتخاب شده نیز اکسیژن اضافی در شعله وجود ندارد و شعله همواره غنی از سوخت است. به نظر می‌رسد افزایش میزان تجزیه فاز WC نیز در این شرایط می‌تواند به همین دلیل باشد. با افزایش فاصله پاشش نیز میزان تجزیه پوشش کاهش می‌یابد.

نمودار شکل ۷ تغییرات توأم دمای ذرات در حین برخورد و میزان تجزیه WC (شدت نسبی پیک فازهای W₂C و Co₃W₃C و سایر فازهای اکسیدی) را در سه سطح فاصله



شکل ۶. اثر میانگین پارامترهای فرآیند بر دمای ذرات.

پاشش (اثر میانگین فاصله پاشش) نشان می‌دهد. دمای ذرات از تحقیقات قبلی به دست آمده است [۱۳]. با افزایش فاصله پاشش تجزیه کاربید تنگستن کاهش پیدا می‌کند. در فواصل پاشش بالاتر با وجود افزایش زمان حضور ذره در فاصله پاشش، ذره با سرعت مافوق صوت زمان کافی را برای تجزیه یا اکسیداسیون ندارد. برای فاصله پاشش ۲۵۰ mm و سرعت ۴۱۸/۷۶m/s (نمونه

^۱- Scherrer

آنالیز واریانس و بازه اطمینان

در جدول ۷ نتایج آنالیز واریانس تأثیر پارامترهای پاشش حرارتی HVOF بر میزان تجزیه فاز کاربید تنگستن (WC) درج شده است. نتایج آنالیز واریانس نشان می‌دهد که فاصله پاشش کمتر از ۱۴ درصد بر اکسیداسیون تأثیر دارد و همانطور که ذکر شد این امر می‌تواند به علت سرعت بالای ذرات و زمان کم حضور ذرات در مسیر پاشش باشد.

جدول ۷. آنالیز واریانس ارزیابی تجزیه فاز WC.

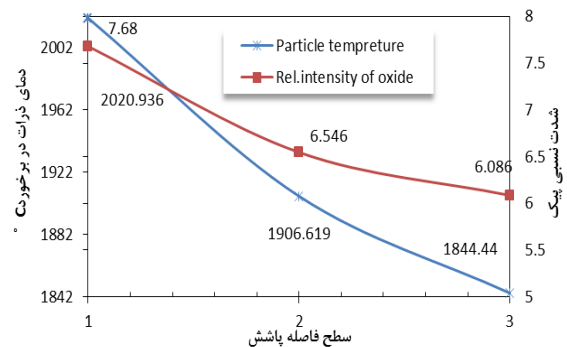
عامل	F	V	F	P (%)
A	۲	۲/۰۱۷	۸	۱۳/۶۹۵
B	۲	۴۶۳/۱۰	۴۱	۷۹/۲۲۵
C	(۱)	ادغام	۴۵۷	-
D	(۱)	ادغام	-	-
خطا	۴	۰/۳۰۴	-	۷/۰۸
جم				۱۰۰
ع				

نسبت اکسیژن به سوخت با درصد مشارکت نزدیک به ۸۰ درصد بیشترین تأثیر را بر میزان تجزیه فاز کاربید تنگستن (WC) دارد. این امر مؤید نتایج مطالعات انجام شده قبلی است. سهم مشارکت نرخ تغذیه پودر و سرعت حرکت تفنگ پاشش قابل صرف نظر کردن است. سهم عامل خطا نیز پس از ادغام دو عامل با تأثیرگذاری پائین کمتر از ۷ درصد بدست آمد. در مورد ایجاد تنگستن اتمی در اثر تجزیه فاز کاربید تنگستن نیز روند به همین ترتیب است.

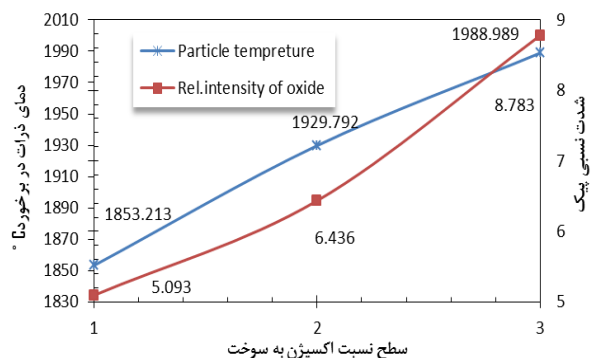
جدول ۸. نتایج صحت نتایج ارزیابی تجزیه فاز WC.

سطح	پیش بینی	آزمایش
	A3B1C1D2	A3B1C1D2
پاسخ	۴/۱۱	۴/۴۱
بازه اطمینان	۳/۲۹-۴/۹۴	
$n_1=1, n_2=2, V_e=0.2522, N_e=1.29$		

در مورد تجزیه فاز کاربید تنگستن نیز براساس پارامترهای تحلیل واریانس و میانگین می‌توان انتظار داشت بازه



شکل ۷. تأثیر فاصله پاشش بر دمای ذرات و تجزیه فاز WC.

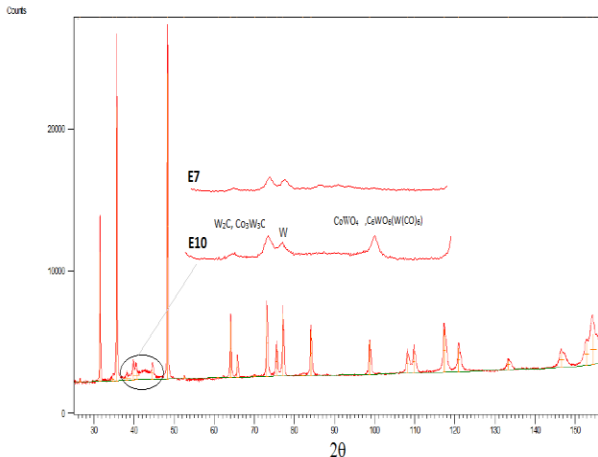


شکل ۸. تأثیر نسبت O/F بر دمای ذرات و تجزیه فاز WC.

در این شرایط به دمای شعله، دمای شعله بی دررو اطلاق می‌شود. با اکسیژن خالص می‌توان به بیشترین دمای شعله بی دررو دست یافت. البته اثر افزایش میزان اکسیژن به سوخت بر دما و اکسیداسیون حد بهینه‌ایی دارد به این دلیل که در صورتی که اکسیژن از حد مشخصی بیشتر شود فقط باعث خنک شدن شعله می‌شود و اثر معکوس بر میزان دما و اکسیداسیون خواهد داشت که در این تحقیق با توجه به سطوح انتخاب شده این مورد مشاهده نشده است.

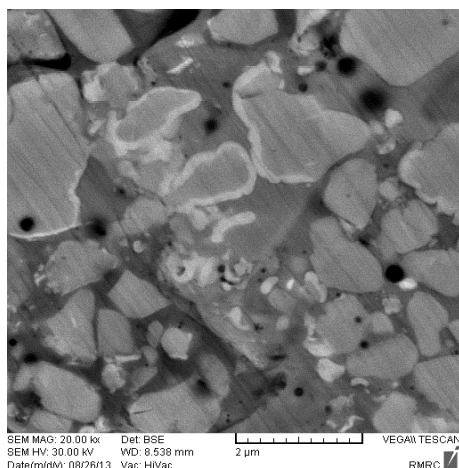
تحلیل اثر میانگین پارامترهای مورد بررسی نشان می‌دهد که حالت A3/B1/C1/D1 برای رسیدن به کمترین میزان تجزیه فاز WC بهینه است. این شرایط آزمایشی معادل شرایط آزمایش شماره E7 است و نیاز به انجام پوشش‌دهی جهت بررسی آزمون تأیید شرایط بهینه نیست. مقایسه نتایج بهینه سازی دما و میزان اکسیداسیون نشان می‌دهد که شرایط بهینه دما (حداقل دما) و بهینه تجزیه (حداقل تجزیه) برهم منطبق است.

آزمون E7 برابر ۲/۵ است. به نظر می رسد علت پدیدار شدن پیک اکسید تنگستن و کبالت در آزمون E10 به همین دلیل باشد.



شکل ۹. الگوی پراش پرتو X در کمترین و بیشترین دمای ذرات.

در شکل ۱۰ تصویر SEM کاربرد تنگستن اکسید شده در (WC+W₂C) نشان داده شده است. فاز W₂C در محیط ذرات WC (مرز کاربرد تنگستن با فاز زمینه) به علت جرم اتمی بالاتر با رنگ روشن تر از WC نمایان است. ایجاد نوارهای روشن در سطح ذرات WC توسط گویلمانی نیز گزارش شده است [۱۴ و ۱۵].



شکل ۱۰. تصویر SEM پوشش WC-12Co در بزرگنمایی ۲۰۰۰۰.

بررسی رفتار سایشی و میکروسختی

اطمینان با احتمال ۹۵ درصد در بازه ۲-۴/۹۴ ۳/۹ قرار دارد (جدول ۸).

با افزایش نسبت اکسیژن به سوخت و با نزدیک شدن به نسبت استوکیومتری انتظار می رود [۹ و ۱۲]:

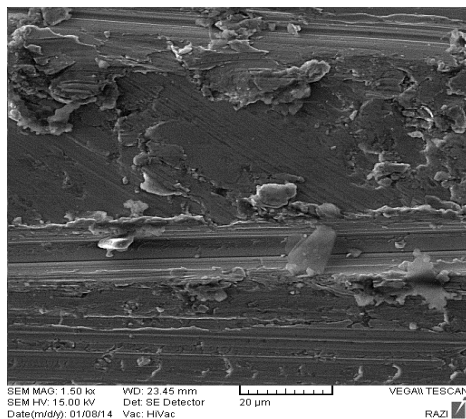
- دمای گاز و به تبع آن دمای ذرات پودر افزایش یابد.
- حوضچه های کبالت و ساختار لایه ای خاکستری پدیدار شود.
- نوک دانه های زاویه دار WC در فاز زمینه حل شود
- ذرات کوچکتر WC در فاز زمینه حل شود و بدین ترتیب تعداد دانه های کاربرد تنگستن کمتر شود
- ساختار موجی فاز Co₃W₃C افزایش یابد.
- تنگستن اتمی و W₂C در مرز دانه های کاربرد تنگستن رسوب کنند (کاربرد تنگستن اکسید شده به صورت WC+W₂C کروی است).
- تسریع پدیده نفوذ کربن به سطح ذره و خروج آن از ترکیب پوشش به شکل CO و CO₂.
- انحلال تنگستن به شکل سایه های سفید در حوضچه های مذاب و در مرز دانه های WC.
- تشکیل اکسیدهای CoO و WO₃.

همانطور که در الگوی پراش پرتو X دو موقعیت بهینه سرعت و دمای ذرات (شکل ۹) مشاهده می شود در شرایط حداکثر سرعت ذرات (آزمایش E10)، پیک مربوط به فازهای تجزیه شده (پیک ۳۹/۵۷) و تنگستن جدا شده در اثر تجزیه فاز WC بلندتر است. این در حالی است که پیک مربوط به فازهای اکسیدی (۴۴/۶۹°) در شرایط نسبی فازهای تجزیه شده مربوط به پیک ۳۹/۵۷ و ۴۰/۵۱ کاسته شده است. در آزمایش شماره ۷ شدت نسبی فازهای تجزیه شده برابر ۴/۴۱ است. شدت نسبی فازهای تجزیه شده در آزمایش شماره ۱۰ برابر ۷/۹ درصد است. همانطور که پیش از این نیز بیان شد کبالت و تنگستن فقط با اکسیژن اکسید می شوند و محصولات احتراق (CO₂ و H₂O) نمی توانند باعث اکسید شدن کبالت و تنگستن شوند. نسبت O/F در آزمون E10 برابر ۳/۵ و در

بررسی تطابق مناسبی با نتایج جی باللی و همکاران دارد [۱۶]. نتایج تحقیقات آنها نشان می دهد علاوه بر اکسیداسیون دانه های WC، انرژی فصل مشترک WC و بایندر به همراه مدول الاستیسیته می تواند بر رفتار سایشی و چقرمگی پوشش تاثیرگذار باشد.

فازهای اکسیدی و تجزیه WC اگر چه باعث بالا رفتن سختی و مقاومت به سایش پوشش می شود ولی در شرایطی که نیاز به تحمل بار بالایی توسط پوشش است چقرمگی پوشش اهمیت پیدا می کند فاز W_2C اگر چه یک فاز بسیار سخت به حساب می آید ولی چقرمگی آن کمتر از فاز WC است [۳].

در شکل ۱۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش در پوشش E7 در بزرگنمایی های ۲۰۰ تا ۳۰۰۰ برابر نشان داده شده است. در بزرگنمایی ۲۰۰ و ۵۰۰ برابر میکروخرشهای دیسک سخت SiC بر روی پوشش WC-12Co نشانگر مکانیزم سایش خراشان نسبتاً شدید است.

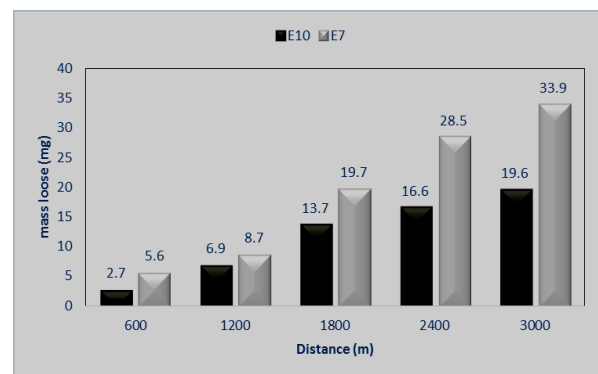


شکل ۱۲. تصویر SEM از سطح سایش پوشش E7

در شکل ۱۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی سطح سایش در پوشش سخت تر E10 نشان داده شده است. تصاویر میکروسکوپی الکترونی نشانگر میکرو خراش های با عمق کمتر است. به نظر می رسد که این پوشش با مقادیر بالاتر فاز W_2C دارای مقاومت به سایش خراشان بیشتری است.

برای تمامی موقعیت های آزمایشی میکرو سختی سنجی نوپ پوشش مطابق استاندارد ASTM E384-10 با نیروی ۰/۲ Kg.f انجام شد. از میانگین ۷ اثر بدین منظور استفاده شد.

رفتار سایشی پوشش WC-12Co حاصل از فرآیند پاشش حرارتی HVOF در شرایط بهینه دمایی (کمترین دما) و تجزیه فاز WC مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ایجاد یک مقایسه مناسب، پوشش در شرایط بیشترین سرعت ذرات (E10) نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون سایش در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

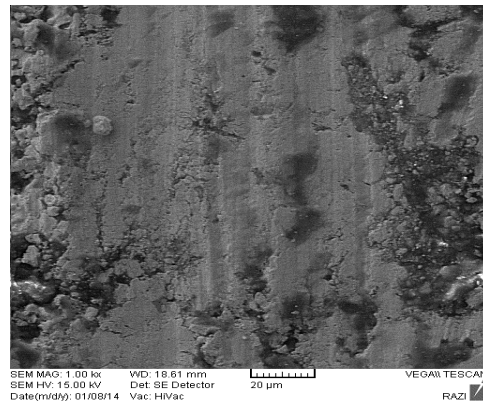


شکل ۱۱. رفتار سایشی دو پوشش کمترین و بیشترین دمای ذرات E10 و E7

پوشش E10 که در شرایط کمترین دمای پاشش ذرات به دست آمده است از ۶۰۰ تا ۳۰۰۰ متر حرکت دیسک بر روی پوشش، رفتار سایشی بهتری از خود نشان می دهد. پس از ۳۰۰۰ متر حرکت نسبی دیسک SiC بر روی پوشش، میزان کاهش وزن برای پوشش E10 برابر ۱۹/۶ mg و برای پوشش E7 برابر ۳۳/۹ mg بدست آمد. به نظر می رسد علت این امر تجزیه فاز WC به فاز W_2C باشد. فاز کاربیدتنگستن (WC) دارای سختی حداکثر HV ۲۴۰۰ و فاز W_2C دارای سختی HV ۳۰۰۰ است. میانگین سختی پوشش E10 معادل ۱۲۲۵ و برای پوشش E7 معادل ۸۳۵ ویکرز به دست آمد. این در حالی است که در پوشش E7 شدت نسبی پیک فاز تجزیه شده W_2C ۴/۴۱ و برای پوشش E10 برابر ۶/۸ است. نتایج این

مراجع

1. J. Robert, K. Wood, "Tribology of Thermal Sprayed WC-Co coatings", Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 28, 2010, 82-97.
2. A. Agüero, F. Camón, *HVOF-Deposited WCCoCr as Replacement for Hard Cr in Landing Gear Actuators*, J. Therm. Spray Technol. 20(6) (2011) 1292-1309.
3. H. L. Villiers de, P. W. Richter, J. M. Benson, and P. M. Young, *Parameter Study of HP/HVOF Deposited WC-Co Coatings*, Journal of Thermal Spray Technology, 7(1) (1998) 97-107.
4. S. Guessasma, C. Coddet, *Neural computation applied to APS spray process: Porosity analysis*, Surface and Coatings Technology, 197(2005) 85-92.
5. M. D. Jean, B. T. Lin, J. H. Chou, *Design of a fuzzy logic approach based on genetic algorithms for robust plasma-sprayed zirconia depositions*, Acta Materialia, 55 (2007) 1985-1997.
6. J. A. Picas, Y. Xiong, M. Punset, L. Ajdelsztajn, A. Forn and J. M. Schoenung, *Microstructure and wear resistance of WC-Co by three consolidation processing techniques*, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 27 (2009) 344-349.
7. W. Żórawski, *The microstructure and tribological properties of liquid-fuel HVOF sprayed nanostructured WC-12Co coatings*, Surface and Coatings Technology, 220(2013) 276-281.
8. J. A. Picas, M. Punset, M. T. Baile, E. Martín, A. Forn, *Effect of oxygen/fuel ratio on the in-flight particle parameters and properties of HVOF WC-CoCr coatings*, Surface and Coatings Technology, Volume 205(2011) 364-368.
9. L. Pawlowski, *The science and engineering of thermal spray coatings*, Second edition. John Wiley, England, 2008.
10. C. Lyphout, P. Nyle'n, A. Manescu, and T. Pirling, *Residual Stresses Distribution through Thick HVOF Sprayed Inconel 718 Coatings*, Journal of Thermal Spray Technology, 17(2008) 915-923.



شکل ۱۳. تصویر SEM از سطح سایشی پوشش E10

نتیجه گیری

تأثیر پارامترهای پاشش حرارتی HVOF بر تجزیه و اکسیداسیون فاز WC و رفتار سایشی پوشش WC-12Co مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل گردید:

- نتایج آنالیز واریانس نشان می دهد که فاصله پاشش کمتر از ۱۴ درصد بر اکسیداسیون تأثیر دارد و همانطور که ذکر شد این امر می تواند به علت سرعت بالای ذرات و زمان کم حضور ذرات در مسیر پاشش باشد. نسبت اکسیژن به سوخت با درصد مشارکت نزدیک به ۸۰ درصد بیشترین تأثیر را بر میزان تجزیه فاز کاربرد تنگستن (WC) دارد. این امر مؤید نتایج مطالعات انجام شده قبلی است. سهم مشارکت نرخ تغذیه پودر و سرعت حرکت تفنگ پاشش قابل صرف نظر کردن است. سهم عامل خطا نیز پس از ادغام دو عامل با تأثیرگذاری پائین کمتر از ۷ درصد بدست آمد.
- افزایش تجزیه WC با افزایش نسبت اکسیژن به سوخت بسیار شدیدتر است. افزایش اکسیژن باعث افزایش دمای گاز در شعله می شود.
- اگرچه در مورد پوشش در شرایط بیشترین دما و بیشترین اکسیداسیون، مقاومت سایشی بهتری به دست آمده است، با این حال لزوم بررسی چقرمگی شکست در این شرایط اجتناب ناپذیر است.

11. Design of Experiment Using Taguchi Approach, Ranjit. K. Roy, 2001, Wiley press.
12. K. Karpiola, "High Temperature Oxidation of Metals, Alloys and Cermet Powders in HVOF Thermal Spraying", Doctoral thesis, Helsinki University of Technology, 2004.
13. S. Nourouzi, M. Jalali Azizpour and H. R. Salimijazi, *Parametric Study of Residual Stresses in HVOF Thermally Sprayed WC-12Co Coatings*, Materials and Manufacturing Processes, 29(2014) 1117-1125.
14. A. Karimi, *Hydro abrasive Wear Behaviour of High Velocity Oxyfuel Thermally Sprayed WC-M Coating*, Surf.Coat. Technol, 62(1993)493-498.
15. J. M. Guilemay, J. Nutting, and J. M. De Paco, *Characterization of Three WC12Co Powders and the Coatings Obtained by High Velocity Oxy fuel Spraying*, Proc, Fourth European Conf. Adv. Materials process, Assoc, Italian dimetallurgica, (1996) 395-398.
16. G. Bolelli, L. M. Berger, *Tribology of HVOF and HVOF sprayed WC-10Co4Cr hardmetal coatings: A comparative assessment*, Surface and Coatings Technology, 265 (2015)125-144.