

بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر پاشش حرارتی بر سرعت ذره WC-Co در فرآیند HVOF

مهدی جلالی عزیزپور و سلمان نوروزی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل

حمید رضا سلیمی جزی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله : ۹۰/۱۱/۱۵ - پذیرش مقاله : ۹۰/۱۲/۱۰)

چکیده

در این مقاله تأثیر پارامترهای اساسی پاشش حرارتی HVOF بر سرعت ذرات پودر سرمت WC-12Co مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر فاصله پاشش، نسبت اکسیژن به سوخت، نرخ تغذیه پودر و سرعت حرکت تفنگ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بررسی آماری نشان می‌دهد که با کاهش فاصله پاشش و افزایش نرخ تغذیه پودر، سرعت ذره افزایش می‌یابد. این درحالی است که افزایش نسبت اکسیژن به سوخت همواره باعث افزایش سرعت ذره نمی‌شود و سرعت نسبی تفنگ نسبت به زیرلایه نیز بر سرعت ذره عملاً بی‌تأثیر است. نتایج تحلیل واریانس نشان می‌دهد که سهم مشارکت فاصله پاشش، نسبت اکسیژن به سوخت و نرخ تغذیه پودر بر سرعت ذره در حین برخورد به ترتیب ۵۰ درصد، ۲۹ درصد و ۱۵ درصد است. تأثیر فاصله پاشش بر دمای ذره و ضخامت قابل دستیابی مورد ارزیابی قرار گرفت. از سیستم پاشش حرارتی HVOF با گاز مایع و سیستم نوری پایش ذره Spray Watch، میکروسکوپی الکترونی، پراش پرتو X و ضخامت سنجی بهره لازم حاصل گردید.

واژه های کلیدی: پودر کاربرد تنگستن-کیالت، فاصله پاشش، پایش ذره، سرعت ذره، تاگوچی.

Evaluation the effect of process parameters on the velocity of HVOF thermally sprayed WC-Co particles

M. Jalali Azizpour and S. Nourouzi

Department of Mechanical Engineering, Babol University of Technology, Babol

H. R Salimijazi

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

(Received 3 February 2012, accepted 28 February 2012)

Abstract

The thermal spray parameters of WC-12%Co coatings deposited using HVOF System were investigate with the purpose of particle velocity optimization. The main purpose of this study was to determine whether the Taguchi approach could be used for optimization of the particle velocity. The peening stress, bonding of particles to substrate or previously coated layer and the deposition efficiency were directly related to the impact velocity. This, in turn, makes possible the select of the key thermal spraying parameters to have HVOF sprayed coatings with desired residual stress states and deposition efficiency together. The particle velocity in impact has been studied using spray watch system. In this study the values of particle with four replications for each trial and the mean effect were recorded for the 9 runs (L9 array). The Taguchi approach for experiments with replication prefers the use of signal to noise ratio (SNR). The quality characteristic was chosen to be bigger the better. Analysis of variance (ANOVA) was used to identify the most significant factors and the contribution portion of each factor.

Keywords: HVOF, Spraywatch, Impact velocity, WC-12Co Powder, Taguchi, ANOVA

E-mail of corresponding author: Mahdi.jalali.azizpour@gmail.com

مقدمه

در سالهای اخیر و با وضع محدودیت‌های قانونی در مورد دفع زباله‌های حاصل از حمام الکترولیتی در لایه نشانی به روش کرم سخت، استفاده از فرآیندهای پاشش حرارتی با سرعت بالا و سوخت اکسیژن در پوشش‌دهی لایه‌های سخت، مقاوم به سایش و خوردگی اهمیت قابل توجهی پیدا کرده است [۲]. استحکام پیوند، توزیع و طبیعت فشاری تنش‌های پسماند و همچنین رفتار خستگی در پوشش‌ها را می‌توان به عنوان ویژگی‌های بارز پوشش حاصل از فرآیند پاشش حرارتی HVOF برشمرد [۳]. خصوصیات مکانیکی، متالورژیکی و تریبولژیکی این پوشش‌ها به شدت تحت تأثیر پارامترهای مستقل (فاصله پاشش، نرخ سوخت، نرخ گاز اکسیژن، نرخ تغذیه پودر و...) و پارامترهای وابسته نظیر سرعت و دمای ذرات در حین برخورد است [۴]. سرعت بالای ذرات در فرآیند HVOF می‌تواند با ایجاد تنش‌های پسماند فشاری باعث بهبود خواص مکانیکی شود. نتایج تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که با وجود افزایش تنش پینینگ با افزایش سرعت ذرات، در سرعت‌های بالا ذرات چسبندگی موفق‌تری به زیرلایه یا لایه قبلی پوشش را نخواهند داشت. بدین لحاظ سرعت بهینه‌ای را برای سرعت ذرات باید در نظر گرفت [۵-۷]. با توجه به هزینه بالای تأمین پودر کاربید تنگستن-کبالت افزایش جزیبی در راندمان رسوب نیز می‌تواند صرفه جویی قابل توجهی به همراه داشته باشد [۸]. بدین لحاظ و با در نظر گرفتن فاکتورهای فنی و اقتصادی به نظر می‌رسد که انجام مطالعات مؤثر در زمینه شناسایی رفتار ذرات در مسیر پرواز می‌تواند توجیه مناسبی داشته باشد. در صورتی که فاکتورها در بازه وسیع‌تری تغییر داده شوند و از متغیر قرار دادن نوع پودر اجتناب شود به کار بردن روش تاگوچی می‌تواند به عنوان یک روش بهینه‌سازی کم هزینه در فرآیندهای پاشش حرارتی مطرح باشد [۴]. در این پژوهش سعی شده است تأثیر پارامترهای فرآیند پاشش حرارتی بر سرعت ذرات کاربید تنگستن-کبالت در حین برخورد به زیرلایه مورد توجه قرار گیرد. از سیستم نوری پایش ذره بدین منظور استفاده شد. تأثیر چهار پارامتر فاصله پاشش، نسبت اکسیژن به سوخت، نرخ تغذیه پودر و سرعت حرکت تفنگ با روش آماری تاگوچی مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور طراحی آزمایشات از آرایه استاندارد L9 استفاده شد.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از پودر کاربید تنگستن-کبالت (WC-12Co) محصول شرکت اچ سی اشتارک^۱ با اندازه ذرات $45+15\mu\text{m}$ استفاده شد. ترکیب شیمیایی پودر مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است. از سیستم نوری پایش ذره (اسپری واچ^۲) محصول اسیر^۳ فنلاند به منظور اندازه گیری سرعت ذرات استفاده شد. از سیستم پاشش حرارتی گازی هیپوجت^۴ با سوخت گاز LPG^۵ جهت پوشش دهی استفاده شد. در جدول (۲) فاکتورهای مورد بررسی در این آزمایش و سطوح آنها آورده شده است. از روش طراحی آزمایشات تاگوچی بدین منظور استفاده شد. در طراحی آزمایشات دو فاکتور سه سطحی و دو فاکتور دو سطحی، تاگوچی استفاده از آرایه استاندارد L9 را پیشنهاد می‌کند. پارامترهای ثابت مورد استفاده تحقیق در جدول (۳) آورده شده است. شرایط بهینه با بررسی اثر میانگین و همچنین تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N) و با در نظر گرفتن مشخصه کیفیت هرچه سرعت ذره بیشتر، بهتر بدست آمد. درصد مشارکت نسبی هر فاکتور بر خروجی با تحلیل واریانس^۶ بدست آمد. از پراش سنخ پرتو X نوع فیلیپس با تشعشع $K\alpha\text{-Cu}$ و میکروسکوپی الکترونی روبشی به منظور بررسی فازی و مورفولوژی پودر استفاده شد.

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

1. H.C.Starck

2. SprayWatch

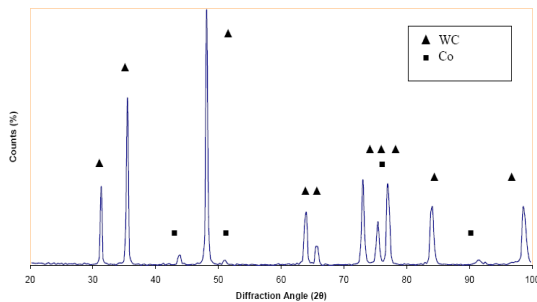
3. Osier

4. HIPOJET

5. Liquified Petroleum Gas

6. ANOVA

استفاده نشان داده شده است. نتایج پراش سنجی، بیانگر وجود کبالت و کاربید تنگستن در ترکیب پودر است. همچنان که مشاهده می شود بیک غالب مربوط به WC است.



شکل ۲. الگوی پراش پرتو X پودر WC-12Co

اندازه گیری سرعت ذرات

شکل ۳ نمایشگر اسپری وچ که شامل قابلیت اندازه گیری و نمایش سرعت، دما و شار ذرات در مسیر پاشش است را نشان می دهد. در این روش نوری، از دوربین CCD برای اندازه گیری خصوصیات 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 میلی متری را طی می کنند که معادل ۶۰-۲۰ پیکسل در جستجوگر CCD است. یک کد رایانه ای این امکان را فراهم می آورد که طول مسیر را اندازه گرفته و سرعت آنها محاسبه شود.



شکل ۳. نمایشگر سیستم spray watch

با توجه به توزیع اندازه ذرات (۱۵-۴۵ μm)، سرعت ذرات نیز متفاوت است. توزیع اندازه ذرات نشان می دهد که ۵۰ درصد ذرات دارای قطر ۳۴/۳ μm هستند. ذرات کوچکتر دارای

جدول ۲. ترتیب فاکتورها و سطوح

فاکتور	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	
A	فاصله پاشش (mm)	۱۷۰	۲۰۰	۲۵۰
B	نسبت اکسیژن به سوخت	۲/۵	۳/۵	۴/۳
C	نرخ تغذیه (g/min) پودر	۳۸	۵۸	-
D	سرعت تفنگ (m/s)	۱	۱/۲	

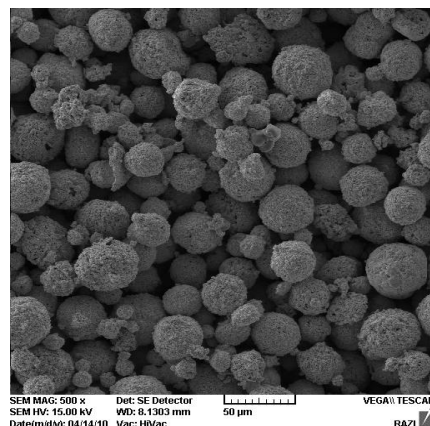
جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده در فرآیند

گاز حامل	نیترژن
نرخ گاز حامل	۲۵ scfh (۱۱/۷۸ L/min)
نرخ هوا	۵۰۰slpm
نرخ گاز مایع	۱۰±۷۰slpm

نتایج و بحث

بررسی فازی و مورفولوژی پودر

شکل ۱ مورفولوژی ذرات پودر WC-12Co را با استفاده از میکروسکوپی الکترونی روبشی نشان می دهد. ذرات پودر عموماً به شکل کلوخه های متخلخل کروی هستند. در حین پرواز، ذرات کاربید تنگستن به صورت فاز جامد در زمینه انعطاف پذیر کبالت هستند و در واقع ذرات در حین برخورد به صورت دو فازی جامد-مایع عمل می کنند. ذرات کروی دارای انرژی جنبشی بالاتری در لحظه برخورد به زیرلایه بوده و چسبندگی موفق تری در مقایسه با ذرات غیر کروی دارند [۹۰]. در شکل ۲ الگوی پراش پرتو X پودر مورد



شکل ۱. تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ذرات پودر

کاهش می‌یابد. در نمودار شکل (۶) تأثیر نسبت اکسیژن به سوخت بر سرعت ذره نشان داده شده است.

جدول ۴. آرایه استاندارد تاگوچی L9

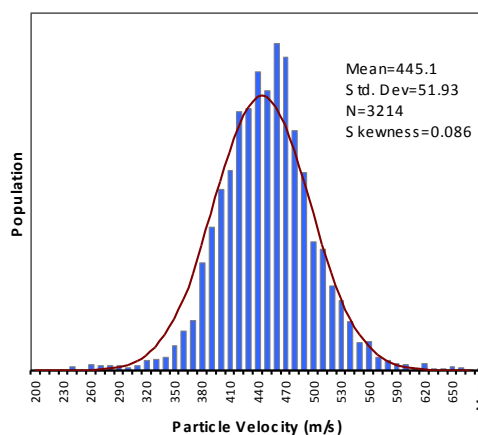
آزمایش	A	B	C	D	میانگین
۱	۱	۱	۱	۱	۴۳۶/۸۹
۲	۱	۲	۲	۲	۴۴۱/۵
۳	۱	۳	۱	۱	۴۴۹/۴۴
۴	۲	۱	۲	۱	۴۲۴/۵۷
۵	۲	۲	۱	۱	۴۴۳/۱۱
۶	۲	۳	۱	۲	۴۳۹/۲۴
۷	۳	۱	۱	۲	۴۱۸/۷۶
۸	۳	۲	۱	۱	۴۳۵/۳۶
۹	۳	۳	۲	۱	۴۲۰/۱

جدول ۵. آرایه استاندارد تاگوچی L9 (با تکرار)

	E1	E2	E3	E4	S/N
۱	۴۳۰/۴۶	۴۳۵/۰۳	۴۴۱/۰۷	۴۴۳/۷	۵۲/۸۱
۲	۴۳۶/۶	۴۳۹/۳۴	۴۴۴/۱	۴۴۷/۱۹	۵۲/۹۰
۳	۴۴۲/۸۹	۴۴۷/۵۶	۴۵۰/۸۱	۴۵۶/۴۳	۵۳/۰۵
۴	۴۰۳/۹۲	۴۱۳/۲۸	۴۳۰/۴۵	۴۳۹/۱۱	۵۲/۴۸
۵	۴۳۸/۱۵	۴۴۱/۰۳	۴۴۴/۴۵	۴۴۶/۶۶	۵۲/۹۱
۶	۴۳۱/۴۳	۴۳۴/۲۵	۴۴۱/۸۴	۴۴۶/۷	۵۲/۸۴
۷	۴۱۱/۵۴	۴۱۵/۸۳	۴۱۸/۷۷	۴۲۳/۹۳	۵۲/۴
۸	۴۳۰/۴۹	۴۳۳/۰۵	۴۳۸/۶۵	۴۴۲/۳۹	۵۲/۷۹
۹	۴۱۲/۶۶	۴۱۷/۲۹	۴۲۲/۸۸	۴۲۸/۵۶	۵۲/۴۷

با افزایش نسبت اکسیژن به سوخت (فاکتور B) تا ۳/۵ برابر، سرعت ذره افزایش می‌یابد ولی این روند صعودی نیست و با افزایش این نسبت، سرعت ذرات کاهش می‌یابد. افزایش نسبت اکسیژن به سوخت باعث افزایش دمای شعله و به تبع آن باعث افزایش دمای ذره می‌شود. در این شرایط، اکسید شدن ذره منجر به ایجاد فازهای دیگری نظیر W₂C می‌شود که سختی آن کمتر از WC است. بدین ترتیب چقرمگی پوشش نیز کاهش پیدا می‌کند [۶]. با توجه به اینکه دمای ذره در سیستم‌های گازی بالاتر از سیستم‌هایی است که از سوخت جت استفاده می‌کنند کنترل نسبت اکسیژن به سوخت بسیار حایز اهمیت است. در مورد فاکتور C با افزایش نرخ تغذیه

سرعت بالاتر و ذرات بزرگتر دارای سرعت کمتری در لحظه برخورد هستند. در نمودار شکل (۴) توزیع سرعت بیش از ۳۰۰۰ ذره مانیتور شده، در یکی از موقعیت‌های آزمایش نشان داده شده است. همانطور که مشخص است ذراتی با سرعت بیش از ۶۶۰ m/s و کمتر از ۲۳۰ m/s در شار ذرات برخوردکننده به سطح وجود دارد و این اختلاف بدلیل توزیع اندازه ذرات در پودرمورد استفاده است.



شکل ۴. توزیع سرعت ذرات در مسیر پرواز

طراحی آزمایشات و پوشش دهی

از روش فاکتوریل جزئی تاگوچی به منظور طراحی و تحلیل آزمایشات، جهت یافتن شرایط بهینه سرعت برخورد، ارزیابی سهم هر فاکتور بصورت مجزا و ارزیابی پاسخ بدست آمده در شرایط بهینه استفاده شد. در جدول ۴ و ۵ آرایه متعامد تاگوچی با آزمایشات مستقل از هم بر اساس سرعت میانگین و نسبت سیگنال به اغتشاش برای آزمایشات همراه با تکرار نشان داده شده است. خروجی آزمایش شامل سرعت متوسط ذرات بوده و با توجه به توزیع سرعت ذرات با تقریب خوبی می‌توان آن را برای ذرات با قطر ۳/۳ μm در نظر گرفت. تحلیل شرایط بهینه با استفاده از مقدار میانگین سرعت ذرات در شار ذرات اصابت کننده به سطح و تحلیل نسبت سیگنال به اغتشاش برای مشخصه هر چه بزرگتر بهتر نتایج مشابهی را آرایه می‌نماید. در نمودار شکل (۵) تأثیر فاصله پاشش (اثر میانگین فاکتور A در سه سطح) بر سرعت ذره نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با افزایش فاصله پاشش سرعت ذره همواره

جدول ۶. تأثیر میانگین نرخ تغذیه پودر بر سرعت ذرات

S/N	میانگین	۴	۳	۲	۱	بهینه
۵۳/۰۲	۴۴۷/۸	۴۴۵/۹۳	۴۴۴/۲۷	۴۴۹	۴۵۱/۷۳	

انجام شد تا بدین ترتیب تأثیر هر فاکتور بر خروجی به صورت مجزا بدست آید. دانستن سهم هر فاکتور به صورت مجزا کلید تصمیم‌گیری درباره ماهیت کنترلی است که باید در فرآیند HVOF برقرار باشد. مطالعه و تحلیل واریانس در تعیین اینکه کدامیک از فاکتورها نیاز به کنترل ندارد حایز اهمیت است. در جدول ۷ نتایج تحلیل واریانس نشان داده شده است. بیشترین تأثیر بر سرعت ذره را فاصله پاشش با بیش از ۵۰ درصد مشارکت دارد، نسبت اکسیژن به سوخت و نرخ تغذیه پودر به ترتیب تقریباً ۲۹ و ۱۵ درصد بر سرعت ذره تأثیر دارند و خطای تحلیل واریانس پس از ادغام فاکتور سرعت حرکت تفنگ (فاکتور D) کمتر از ۶ درصد است.

انتخاب فاصله پاشش مناسب با در نظر گرفتن سه فاکتور سرعت، دمای ذرات و بازده فرآیند صورت می‌گیرد. در فاصله پاشش کمتر از ۲۰۰ mm اگرچه سرعت ذرات بالاتر است ولی گرم شدن بیش از اندازه باعث ایجاد تنش‌های حرارتی مخرب در زیرلایه و لایه های قبلی پوشش می‌شود. از طرف دیگر سرعت بالای ذرات در فواصل کمتر پاشش می‌تواند به دلیل جدا شدن ذرات ضخامت قابل دستیابی را نیز تحت تأثیر قرار دهد.

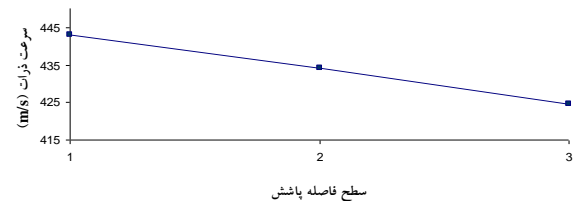
نمودار اثر میانگین فاصله پاشش به عنوان مهم ترین عامل تأثیرگذار بر ضخامت پوشش در شکل ۸ نشان داده شده است. با کاهش فاصله پاشش تا ۱۷۰ میلی متر ضخامت پوشش بطور مداوم کاهش می‌یابد. با افزایش فاصله پاشش به میزان بیشتر از ۲۵۰ mm ضخامت پوشش باز هم می‌تواند افزایش یابد. ولی به دلیل کاهش سرعت ذرات، این روند همواره صعودی نخواهد بود. به منظور دستیابی به فاصله پاشش بهینه، لزوم انجام آزمایشات تکمیلی ضروری به نظر می‌رسد.

در شکل ۹ اثر فاکتوریل (میانگین) فاصله پاشش بر دمای ذره WC-12Co نشان داده شده است. در بیشترین فاصله انتخاب شده نیز دمای ذره بیشتر از دمای ذوب کبالت است. بدین ترتیب امکان انتخاب فاصله بیشتر از ۲۵۰ mm از نظر دمای ذره امکان پذیر به نظر می‌رسد. زینت‌پذیری خوب سیستم

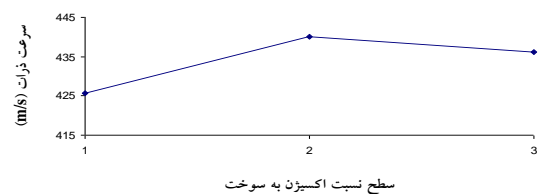
پودر بر سرعت ذره کاهش می‌یابد (نمودار شکل ۷). سرعت حرکت تفنگ نیز بر سرعت ذره تأثیر ندارد ولی می‌تواند بواسطه تأثیرگذاری بر گرم شدن پوشش و زیرلایه در حین فرآیند، تنش‌های حرارتی و استحکام پیوند را تحت تأثیر قرار دهد.

ارزیابی شرایط بهینه

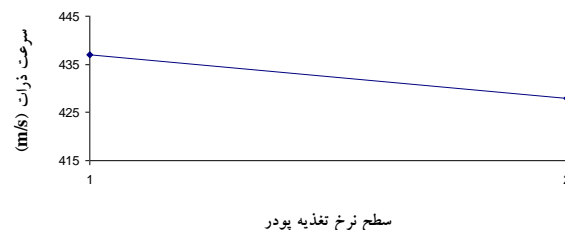
سرعت بهینه برخورد برابر ۴۵۱ متر بر ثانیه و برای موقعیت آزمایشی A1/B2/C1/D1 برآورد بدست آمد. با توجه به اینکه موقعیت آزمایش مذکور در آرایه استاندارد مورد استفاده وجود نداشت آزمون تأیید بدین منظور انجام شد. نتیجه آزمون تأیید در جدول ۶ آورده شده است. نتیجه آزمون نشان می‌دهد که سرعت ذره در شرایط بهینه برابر ۴۴۷/۸ m/s است که با دقت قابل قبول نزدیک به شرایط بهینه محاسبه شده از تحلیل آماری تاگوچی است.



شکل ۵. تأثیر میانگین فاصله پاشش بر سرعت ذرات



شکل ۶. تأثیر میانگین اکسیژن به سوخت بر سرعت ذرات



شکل ۷. تأثیر میانگین نرخ تغذیه پودر بر سرعت ذرات

آنالیز واریانس

در این مطالعه، تحلیل واریانس به منظور بررسی درصد مشارکت مؤثر هر فاکتور بر سرعت ذره در حین برخورد

استفاده جهت پوشش دهی سرامت کاربید تنگستن- کبالت بیشتر از ۲۵۰ mm باشد.

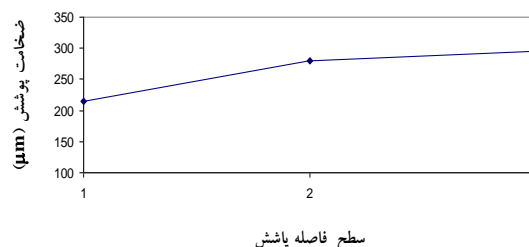
WC-Co در مقایسه با سایر سرامت های WC و زینتر شدن WC-Co در دماهای کمتر از دمای ذوب کبالت از ویژگی های بارز این سرامت است.

منابع

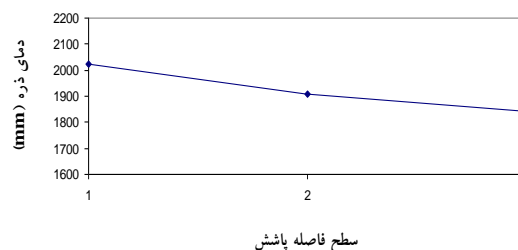
1. M. Heydarzadeh Sohi and F. Ghadami, *Comparative tribological study of air plasma sprayed WC-12%Co coating versus conventional hard chromium electrodeposit*, Tribology International, (2009).
2. M. Jalali Azizpour and S. Norouzi, *Potential of high velocity oxy fuel thermal spraying in turbine shaft repairing*, Journal of American Science, 7(10)(2011)69-73
3. Cabrera, M. H. Staia, *Fatigue behavior of a SAE 1045 steel coated with Colmonoy 88 alloy deposited by HVOF thermal spray*, Surface & Coatings Technology, 205(2010)1119-1126
4. H. L. de Villiers Lovelock, P. W. Richter, J. M. Benson and P. M. Young, *parameter study of HP/HVOF deposited WC-Co coatings*, Journal of Thermal Spray Technology, Volume 7(1) March 1998-97
5. P. Bansal, P. H. Shipway and S. B. Leen, *Residual stresses in high-velocity oxy-fuel thermally sprayed coatings – Modelling the effect of particle velocity and temperature during the spraying process*, Acta Materialia, 55(2007)5089-5101.
6. C. Lyphout, *Residual stresses distribution through thick HVOF sprayed inconel 718 coatings*, Journal of Thermal Spray Technology, 17(5-6)(2008)915.
7. M. Jalali Azizpour and S. Norouzi, *An axisymmetrical finite element model for prediction of the bonding behavior in HVOF thermal spraying coatings*, Journal of Applied science, 2012 (1-6)
8. S. Kamnis, S. Gua, T. J. Lu and C. Chen, *Numerical modeling the bonding mechanism of HVOF sprayed particles*, Computational Materials Science 46(2009)1038-1043
9. S. Kamnis and S. Gu, *Study of in-flight and impact dynamics of nonspherical particles from HVOF guns*, Journal of Thermal Spray Technology, 19(1-2)(2010)31.

جدول ۷. نتایج آنالیز واریانس

فاکتور	f	V	F	P (%)
A	۲	۲۵۰/۳۴	۱۴۰۸/۹	۵۰/۸۷
B	۳	۱۶۹/۹۳	۹۵۶/۳۴	۲۸/۸۲
C	۱	۱۶۲/۵۳	۴۵۷/۳۴	۱۴/۴۵
D	(۱)	ادغام	-	-
خطا	۳	۵/۶۳	-	۵/۸۶
جمع				۱۰۰



شکل ۸. تأثیر فاصله پاشش بر ضخامت پوشش



شکل ۹. تأثیر فاصله پاشش بر سرعت ذره

فاصله پاشش بیشترین تأثیر را بر سرعت ذرات در پوشش دهی سرعت کاربید تنگستن - کبالت دارد. بیشترین تأثیر بر سرعت ذره را فاصله پاشش با بیش از ۵۰ درصد مشارکت دارد.

۱- سرعت بهینه برخورد برابر ۴۵۱ متر بر ثانیه و برای موقعیت آزمایشی در فاصله پاشش ۱۷۰ mm و نسبت اکسیژن به سوخت ۳/۵ و نرخ تغذیه پودر ۳۸ g/min بدست آمد.

۲- با توجه به افزایش ضخامت پوشش با افزایش فاصله پاشش و با توجه به سرعت قابل قبول و دمای بالای ذرات در بیشترین فاصله انتخاب شده در این تحقیق، به نظر می رسد که فاصله پاشش در سیستم HVOF با سوخت گاز مایع مورد