

جایگزینی پوشش کروم سخت با پوشش Cr₃C₂-NiCr پاشش حرارتی HVOF جهت بهبود مقاومت به سایش قالب های بزرگ صنعتی

مهدی صالحی

ایمان سلیمی نژاد و محسن صفوی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله : ۹۳/۰۸/۲۵ - پذیرش مقاله : ۹۳/۰۹/۱۶)

چکیده

قالب های بزرگ صنعتی به دلیل ابعادشان مورد پوشش دهی به روش های معمول PVD و CVD قرار نمی گیرند و از روش سنتی آبکاری کروم سخت به منظور افزایش مقاومت به سایش و طول عمر این قالب ها استفاده می شود. امروزه این روش به دلیل آلودگی های محیطی و محدودیت های استفاده از ترکیبات سرطان زای Cr(VI) در حال جایگزینی با روش های کم خطرتر و پربازده تر است. هدف از این پژوهش جایگزینی این روش با روش پاشش حرارتی جهت افزایش طول عمر قالب ها است. در راستای این جایگزینی، ماده ای مناسب سرعت کاربرد کروم - نیکل کروم (75Cr₃C₂-25NiCr) و فرآیند مناسب، پاشش حرارتی به روش HVOF انتخاب شد. همچنین با استفاده از روش تحلیل S/N و انتخاب چهار پارامتر نرخ جریان کروسین (KFR)، نرخ تغذیه (FR)، فاصله پاشش (SD) و زبری سطح زیرلایه (SSR)، فرآیند پاشش حرارتی مورد بهینه سازی قرار گرفت. برای مقایسه مقاومت به سایش این پوشش ها از دستگاه سایش پین و دیسک استفاده شد. نتایج نشان دهنده کاهش قابل ملاحظه نرخ سایش در نمونه های پاشش حرارتی شده، بود. همچنین نتایج حاکی از بهبود قابل قبول نرخ سایش با استفاده از بهینه سازی پارامترها بود. در نهایت انتظار می رود عمر قالب ها به میزان زیادی افزایش پیدا کند.

واژه های کلیدی: قالب، کروم سخت، پاشش حرارتی HVOF، بهینه سازی، سایش.

Replacement of Hard Chromium Coating with thermally Sprayed HVOF Cr₃C₂-NiCr Coating to Improve Wear Resistance of Heavy Industrial Dies

I. Saliminezhad and M. Safavi

Research Department of Ceramic Engineering, Materials and Energy Research Center

M. Salehi

Materials Engineering Department, Isfahan University of Technology

(Received 16 November 2014, accepted 7 December 2014)

Abstract

Usual techniques such as PVD and CVD are not used for coating heavy industrial dies due to their size, and to increase their wear resistance and lifetime, conventional Hard chromium plating is used. The substitution of this technique with safer and more efficient ways has been recently studied and performed due to environmental pollution and restrictions for using Cr(VI) compounds, which are known to be carcinogenic. The aim of this research is to increase the life time of Dies by replacing Hard chromium with Thermal Spraying process. In order to this replacement, HVOF Thermal Spraying and 75Cr₃C₂-25NiCr cermet were selected as coating process and material respectively. Also, the Thermal Spray process was optimized by using The S/N ratio analysis approach and selecting four Kerosene Flow Rate (KFR), Feed Rate (FR), Spray Distance (SD) and Substrate Surface Roughness (SSR) parameters. Pin and Disc wear tester was used to compare wear rate of these coatings. The results showed significant decrease of wear rate on the thermally sprayed samples. The results Also showed a desirable improvement of wear rate by optimizing parameters. Eventually, it is expected that the life time of dies should increase a lot.

Keywords: die, hard chromium, HVOF Thermal Spraying, optimization, wear.

E-mail of corresponding author: imansalimi2012.is@gmail.com

مقدمه

قالب‌های بزرگ صنعتی بیشتر در صنایع خودرو و به منظور تولید بدنه اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدت زیادی از زمان شروع فعالیت جدی در زمینه ساخت قالب های بزرگ صنعتی (قالب‌های قطعات بدنه خودرو و کشتی) در ایران نمی‌گذرد. این گونه ابزار به ندرت تحت فرآیندهای مناسب مقاوم‌سازی سطحی و بازسازی قرار می‌گیرند. این قالب‌ها به دلیل ابعاد بزرگشان نمی‌توانند مورد عملیات پوشش‌دهی معمول که برای قالب‌های کوچک از روش ^۱PVD و ^۲CVD استفاده می‌شود، قرار گیرند. امروزه پژوهش‌های ویژه‌ای بر روی مقاوم‌سازی این قالب‌ها انجام می‌شود [۴ - ۱]. در حال حاضر در کشور ایران برای مقاوم‌سازی سطح قالب‌های بزرگ صنعتی از فرآیند کروم‌سختی استفاده می‌شود. پیشینه این فرآیند بسیار طولانی و سن فرآیند بیش از ۱۵۰ سال است. این فرآیند برای اولین بار در سال ۱۸۵۶ توسط دکتر گوتر^۳ با جزییات علمی انتشار یافت [۵]. در سال‌های اخیر در مورد جایگزینی فرآیند کروم سخت به دلیل آلودگی محیطی، مشکلات ذخیره‌سازی و ممنوعیت‌های استفاده از ترکیبات Cr(VI)، که سرطان‌زا هستند، مطالعاتی انجام گرفته است [۶]. یون‌های کروم که در فرآیند الکترولیت کاهش می‌یابند به صورت Cr⁶⁺ هستند. این یون‌ها به شدت خطرناک و سرطان‌زا هستند. میزان در معرض قرار گرفتن مجاز (PEL^۴) اپراتور در برابر Cr⁶⁺ امروزه نسبتاً پایین است و استانداردهای جدید در آمریکا و اروپا روز به روز شدیدتر و جدی‌تر می‌شوند، به نحوی که استانداردهای جدید میزان PEL را از ۰/۸mgm^۳ در سال ۱۹۹۶ به ۰/۰۰۰۵ mgm^۳ در سال ۲۰۰۴ کاهش می‌دهند [۷]. در سال‌های اخیر و در بسیاری از موارد، به نظر می‌رسد که پوشش‌های "پاشش حرارتی" از جمله

کاربید تنگستن و کاربید کروم، به‌خصوص در جایی که مقاومت به سایش خوبی مورد نیاز است، جایگزین مناسبی هستند [۸-۶]. همچنین با استفاده از ترکیب فرآیندهای پاشش حرارتی و ماشینکاری، ابعاد از دست رفته به قطعه باز می‌گردد. در این فرآیند هیچ نیازی به استفاده از پوشش‌های تبدیلی، پیوندی و رویین وجود ندارد که موجب کاهش زمان تولید و هزینه تعمیرات و نگهداری می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان بارها قطعات آسیب دیده را ترمیم و پوشش نمود، مگر اینکه طول عمر قطعه به پایان رسیده باشد [۸]. "پاشش حرارتی" یک اصطلاح عمومی برای گروهی از فرآیندهای پوشش‌دهی که برای اعمال پوشش‌های فلزی و غیرفلزی استفاده می‌شوند، است [۹]. این فرآیندها ابزار مناسبی برای ایجاد سطوح مقاوم به سایش و خوردگی هستند [۱۰]. فرآیندهای پاشش حرارتی در صنایع مختلفی از جمله صنعت هوا فضا، صنایع خودرو، صنایع سرامیک، صنایع شیمیایی، پوشش‌های تزئینی، صنایع فولاد، صنعت ماشین‌سازی و غیره کاربرد دارند [۱۱ و ۱۲].

هدف اصلی این پژوهش جایگزینی پوشش کروم سخت با پوشش پاشش حرارتی HVOF به منظور ارتقای طول عمر قالب‌های بزرگ صنعتی است. همچنین تلاش می‌شود تا با بررسی تاثیر پارامترهای این فرآیند بر روی خصوصیات پوشش و بهینه‌سازی آن پارامترها به بهترین کیفیت ممکن و سهولت هرچه بیشتر در اجرای فرآیند دست یافت.

مواد و روش‌ها

تعداد نه نمونه مستطیلی شکل به ابعاد ۷×۱۰×۲۰ mm^۳ از جنس چدن خاکستری با کد صنعتی GM246 که در تهیه بدنه قالب‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، تهیه شدند. درصد عناصر حاضر در نمونه‌ها توسط آزمون کوانتومتری به شرح جدول ۱ به دست آمده است. به منظور آماده‌سازی سطح نمونه‌ها قبل از پاشش‌دهی، ابتدا

^۱ Physical Vapor Deposition

^۲ Chemical Vapor Deposition

^۳ Geuther

^۴ Permissible exposure limit

سنباده‌زنی مانت شدند. نمونه‌ها از سنباده ۸۰ تا ۴۰۰۰ سنباده‌زنی و سپس با پودر اکسید آلومینیوم پولیش شدند. برای انجام تست میکروسختی از دستگاه میکروسختی سنج Leitz T21 ساخت آلمان استفاده شد. برای هر نمونه فرورونده ویکرز با بار ۳۰۰ گرم و برای پنج مرتبه اعمال شد.

برای تست استحکام چسبندگی از روش نقطه اثر فرورفتگی مرز مشترک^۲ استفاده شد. در این روش فرورونده می‌تواند به صورت عمود بر خود پوشش، یا بر روی زیرلایه نزدیک پوشش و یا مستقیماً بر روی مرز مشترک بین زیرلایه و پوشش، اعمال شود. روش آخر یعنی اعمال فرورونده به مرز مشترک بین پوشش و زیرلایه در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل a شعاع ترک به وسیله میکروسکوپ نوری اندازه‌گیری می‌شود. همچنین بار اعمال شده به سطح توسط فرورونده ویکرز را P نمایش می‌دهد. در این تست، از طریق تعیین چقرمگی ظاهری بین دو وجه^۳ (مرز بین پوشش و زیرلایه)، استحکام چسبندگی ارزیابی می‌شود [۱۴ و ۱۳]. مراحل انجام این تست به صورت زیر است [۱۵]:

۱. ایجاد یک مقطع عرضی پولیش شده از نمونه، به منظور انجام تست فرورونده‌ی ویکرز با اعمال بارهای متفاوت، که این فرورونده باید به دقت منطبق با مرز بین پوشش و زیرلایه باشد.

۲. برای هر تست فرورفتگی، اندازه‌گیری نصف قطر تورفتگی (d/2) و طول ترک (a) هر دو روی مرز مشترک.

۳. رسم نمودار این نقاط بصورت تابعی از بار اعمالی در مقیاس لگاریتمی (همانند شکل ۳)؛ ارتباط d/2 و P خطی است و سختی ظاهری نامیده می‌شود.

نمونه‌ها به مدت دو الی سه دقیقه در حلال استون شستشو داده شدند. در مرحله بعد سه نمونه ماشینکاری و شش نمونه ماسه‌پاشی شدند. ماشینکاری نمونه‌ها با دستگاه فرز تحت سرعت دورانی ۲۸۰rpm و سرعت پیشروی ۵۰mm/min ماسه‌پاشی نمونه‌ها تحت جدول ۲ انجام شد. زبری سطح (R_a) نمونه‌های ماشینکاری شده ۷,۲۸۴ میکرون و زبری سطح نمونه‌های ماسه‌پاشی شده ۱۳,۴۵۸ میکرون، توسط دستگاه زبری سنج Mitutoyo SJ-210 ساخت ژاپن، اندازه‌گیری شدند. در نهایت، با استفاده از خود تفنگ پاشش (بدون اسپری ماده) سطح نمونه‌ها به مدت تقریبی یک دقیقه حرارت داده شدند.

پوشش‌دهی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه HVOF موجود در شرکت پودر افشان انجام شد. این دستگاه با نام تجاری MET JET III و ساخت شرکت متالیزیشن^۱ از سیستم‌های نسل سوم است. این سیستم‌ها از سوخت مایع که معمولاً کروسین است استفاده می‌کنند. مقادیر پارامترهای فاصله پاشش (SD)، نرخ تغذیه (FR)، دبی کروسین (KFR) و زبری سطح زیرلایه (SSR) به صورت متغیر و با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی مطابق جدول ۳ انتخاب شدند. شرایط بهینه با استفاده از روش آنالیز S/N انجام شد. همچنین گاز حامل N₂ با دبی ۴ l/min و دبی اکسیژن ۸۳۰ ml/min انتخاب شد. پودر انتخاب شده، سرمت Cr₃C₂-NiCr با اندازه دانه ۲۰-۴۵ μm، ساخت شرکت GTV آلمان و با ترکیب ۷۵ درصد سرامیک کاربید کروم و ۲۵ درصد آلیاژ نیکل-کروم (۸۰ درصد نیکل ۲۰ درصد کروم) است. شکل ۱ مورفولوژی این پودر را نشان می‌دهد. برای ایجاد پوشش کروم سخت نیز از مقادیر بهینه مورد استفاده در صنعت استفاده شد.

برای بررسی میکروسختی و استحکام چسبندگی از نمونه‌های پوشش داده شده مقاطع عرضی تهیه شد. برای جلوگیری از جدا شدن پوشش از زیرلایه و همچنین سنباده‌زنی مناسب لبه‌ها، نمونه‌های متالوگرافی قبل از

² Interface indentation

³ Apparent interfacial toughness

¹ Metallization

جدول ۱. عناصر و درصد حضور آنها در نمونه چدن خاکستری.

نام ماده	Fe	C	Mn	P	S	Si	Cu	Ni	Mg	Sn
چدن خاکستری	باقیمانده	۳,۱۷ ±۰,۰۷۲۵	۱,۷۹ ±۰,۱۵۳	۰,۰۷۸۷ ±۰,۰۱۲۷	۰,۰۴۳۳ ±۰,۰۰۱۶	۱,۴۰ ±۰,۰۳۲۴	۰,۰۱۳۶	<۰,۰۲	۰,۰۰۸۴ ±۰,۰۰۱۱	<۰,۰۲

جدول ۲. پارامترهای ماسه پاشی سطح نمونه ها قبل از فرآیند پاشش حرارتی.

نوع ماسه	اندازه مش ماسه	فاصله نمونه از نازل (cm)	فشار گاز (bar)	زاویه (درجه)
SiC	۲۴	۱۵	۸	۷

جدول ۳. جدول طراحی آزمایش به روش تاگوچی؛ مقادیر پارامترها و نحوه تغییر آنها در هر آزمایش.

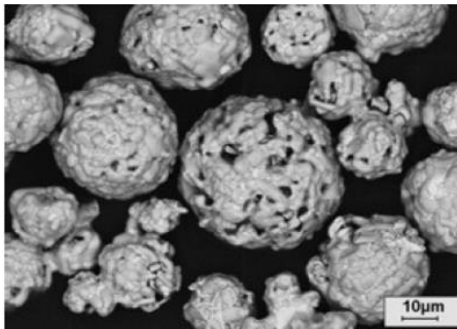
شماره آزمایش	زیرایه (SSR)	نرخ تغذیه g/min(FR)	فاصله پاشش cm(SD)	دبی کروسین (KFR) mL/min	کد پوشش
۱	ماسه پاشی	۳۰	۲۵	۲۵۰	S ₁
۲	ماسه پاشی	۴۰	۳۰	۲۶۵	S ₂
۳	ماسه پاشی	۵۰	۳۵	۲۸۰	S ₃
۴	ماشینکاری	۳۰	۳۰	۲۸۰	S ₄
۵	ماشینکاری	۴۰	۳۵	۲۵۰	S ₅
۶	ماشینکاری	۵۰	۲۵	۲۶۵	S ₆
۷	ماسه پاشی	۳۰	۳۵	۲۶۵	S ₇
۸	ماسه پاشی	۴۰	۲۵	۲۸۰	S ₈
۹	ماسه پاشی	۵۰	۳۰	۲۵۰	S ₉
۱۰	ماشینکاری	۳۰	۲۵	۲۸۰	S _{opt}

ظاهری ماده کامپوزیتی استفاده شده به عنوان پوشش است. این هدف نیازمند آگاهی از خواص مکانیکی، استحکام و الاستیسیته ماده کامپوزیتی در مرز است. این خواص را می توان با ریشه دوم مدول الاستیسیته (E) به سختی و یک مرکز (H) در مرز مشترک، با در نظر گرفتن مشخصه های هندسی میانگین مجموعه زیرلایه و پوشش بیان کرد [۱۳]: که در رابطه (۱) زیروندهای i , s و c به ترتیب بیانگر مرز مشترک، زیرلایه و پوشش هستند.

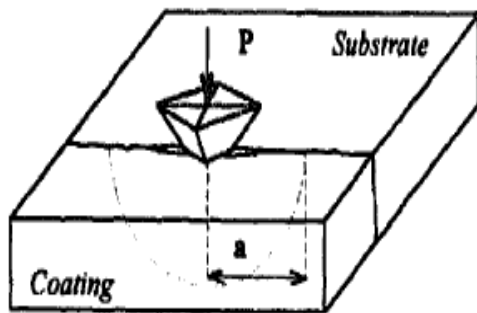
۴. تعیین مختصات نقطه بحرانی که در شکل ۳ بصورت (P_c, a_c) مشخص است. زیر این نقطه هیچ گونه ترکی در حین فرو رفتن فرو رونده در مرز مشترک مشاهده نمی شود و از این نقطه برای به دست آوردن چقرمگی ظاهری استفاده می شود.

با اعمال فرورونده به مرز، یک ناحیه ی تغییر شکل پلاستیک با توجه به خواص موضعی پوشش و زیرلایه ایجاد می شود. سرانجام در صورتی که اثر بار اعمالی از چقرمگی ظاهری این ماده ی کامپوزیتی در مرز بیش تر شود، ترک موضعی رخ می دهد. هدف از تست نقطه ی اثر فرورفتگی مرز مشترک، دستیابی به یک مقدار کمی برای چقرمگی

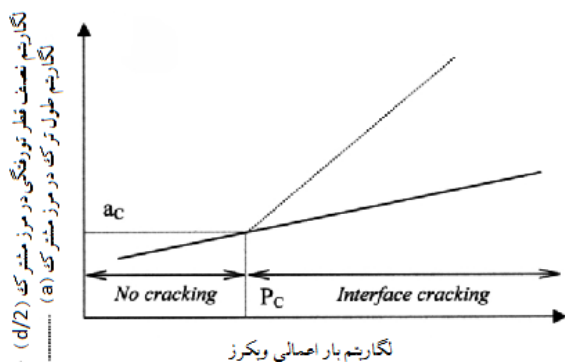
نوری مورد استفاده در این پژوهش، ساخت شرکت نیکون ژاپن مدل EPIPHOT 300 است.



شکل ۱. تصویر SEM پودر کاربید کروم/نیکل - کروم استفاده شده در این پژوهش (ارایه شده توسط شرکت GTV).



شکل ۲. اصول تست نقطه ی اثر فرورفتگی مرز مشترک، P بار اعمالی توسط فرورنده، a شعاع ترک [۱۳].



شکل ۳. شماتیک نتیجه تست نقطه اثر فرورفتگی مرز مشترک، P_c بار بحرانی و a_c طول ترک بحرانی [۱۵].

$$(E/H)_i^{\frac{1}{2}} = \frac{(E/H)_s^{\frac{1}{2}}}{1 + (H_s/H_c)^{\frac{1}{2}}} + \frac{(E/H)_c^{\frac{1}{2}}}{1 + (H_c/H_s)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

با ترکیب مناسب پارامترهای بحرانی ترک، P_c و a_c، با خواص مکانیکی مرز پوشش و زیرلایه می توان عبارت زیر را برای بیان چقرمگی شکست ظاهری مرز مشترک، K_{ca}، بیان نمود [۱۳]:

$$k_{ca} = 0.015 \frac{P_c}{a_c^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{E}{H} \right)_i^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

در ادامه، برای سهولت در نامگذاری K_{ca} از واژه چقرمگی شکست به جای چقرمگی شکست ظاهری مرز مشترک استفاده می شود. همچنین در پژوهش حاضر از رابطه کمی فوق برای محاسبه چقرمگی شکست معادل با چسبندگی پوشش استفاده می شود. به دلیل سختی و استحکام بالای پوشش و اتصال قوی آن به زیرلایه، اعمال فرورونده ویکرز در محدوده سنجش میکروسختی با عدم ایجاد و رشد ترک در پوشش همراه بود. لذا اعمال بار توسط فرورونده ویکرز در محدوده ماکرو و با استفاده از دستگاه سختی سنجی WOLPERT D-6700 ساخت کشور آلمان انجام شد. به منظور فراهم نمودن شرایط یکسان در انجام آزمایش، ضخامت پوشش در تمامی نمونه ها یکسان و آماده سازی تمام نمونه ها شامل برش با دستگاه ایرکات، مانت، سنباده و پولیش زنی با روند مشابه ای انجام گرفته است. برای هر نمونه فرورونده ویکرز تحت بارهای ۵، ۱۰ و ۲۰ کیلوگرم در مرز مشترک پوشش و زیرلایه اعمال شد. شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ نوری یک نمونه پاشش حرارتی شده را پس از اعمال فرورونده با بار ۱۰ کیلوگرم نشان می دهد. مطابق شکل، a طول ترک و d قطر فرورونده است که با دقت بالایی توسط نرم افزار TS View محاسبه شده است. همچنین مقادیر E و H برای پوشش و زیرلایه در جدول ۴ آمده است. میکروسکوپ

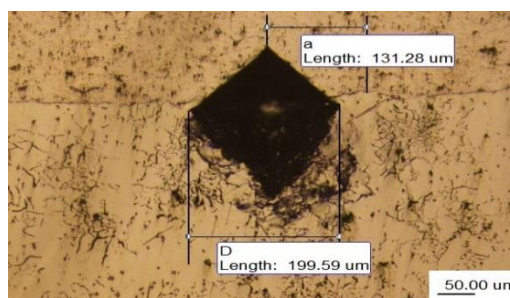
بدون استفاده از روان کننده انجام شد. مسافت طی شده توسط پین بر روی سطوح نمونه‌ها ۱۰۰۰ متر، بار اعمال شده توسط پین به سطوح ۶۰ نیوتن، سرعت حرکت پین ۴ سانتیمتر در ثانیه و شعاع حرکت پین ۸ سانتیمتر برای هر سه نمونه در نظر گرفته شد. زبری نمونه‌های تحت سایش (R_a) برای نمونه کروم سخت شده ۰/۳۶۸ میکرون و برای نمونه‌های پاشش حرارتی شده ۰/۳۰۵ میکرون اندازه‌گیری شد. کاهش وزن نمونه‌ها پس از تست نیز توسط ترازوی بسیار دقیق Gibertini E42S-B ساخت ایتالیا با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. سایش می‌تواند با استفاده از دستگاه‌های تست سایش تعریف شود. نتایج تست، یک "سایش خطی" که به صورت عمق مسیر سایش سطح در تماس تعریف می‌شود و یا یک "سایش حجمی" که برابر است با حجم ضربدر مسافت طی شده تقسیم بر بار اعمال شده، است. در این پژوهش از سایش حجمی برای تعیین و مقایسه نرخ سایش استفاده می‌شود. با توجه به مطالب فوق، نرخ سایش طبق رابطه‌ی (۳) تعیین می‌شود:

$$W = \frac{V}{SF} = \frac{M}{SF\rho} \quad (3)$$

W نرخ سایش با واحد mm³/Nm، V حجم از دست رفته با واحد mm³، S کل مسافت طی شده با واحد m، F بار اعمال شده با واحد N، M جرم از دست رفته با واحد gf و ρ چگالی با واحد gr/mm³ است.

نتایج و بحث

به منظور به دست آوردن شرایط بهینه پاشش، تست‌های میکروسختی و چقرمگی شکست استفاده شد. نتایج تست میکروسختی برای نه نمونه پاشش شده در شکل ۶ آورده شده است. معیار سنجش، سختی متوسط است. طبق پژوهشی که وانگ^۲ و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۲ انجام



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ نوری یک نمونه پاشش حرارتی شده پس از اعمال فرورونده ویکرز با بار ۱۰ Kg و محاسبه طول ترک و شعاع فرورونده با دقت بالا توسط نرم افزار TS View.

جدول ۴. مقادیر مدول الاستیسیته و سختی پوشش و زیرلایه

مدول الاستیسیته		پوشش Cr ₃ C ₂ -NiCr زیرلایه چدن خاکستری
سختی (GPa)	* (GPa)	
H _c =۹,۰۴	E _c =۱۲۵	[۱۴] و [۱۵]*
H _s =۲,۱۴	E _s =۱۰۵	

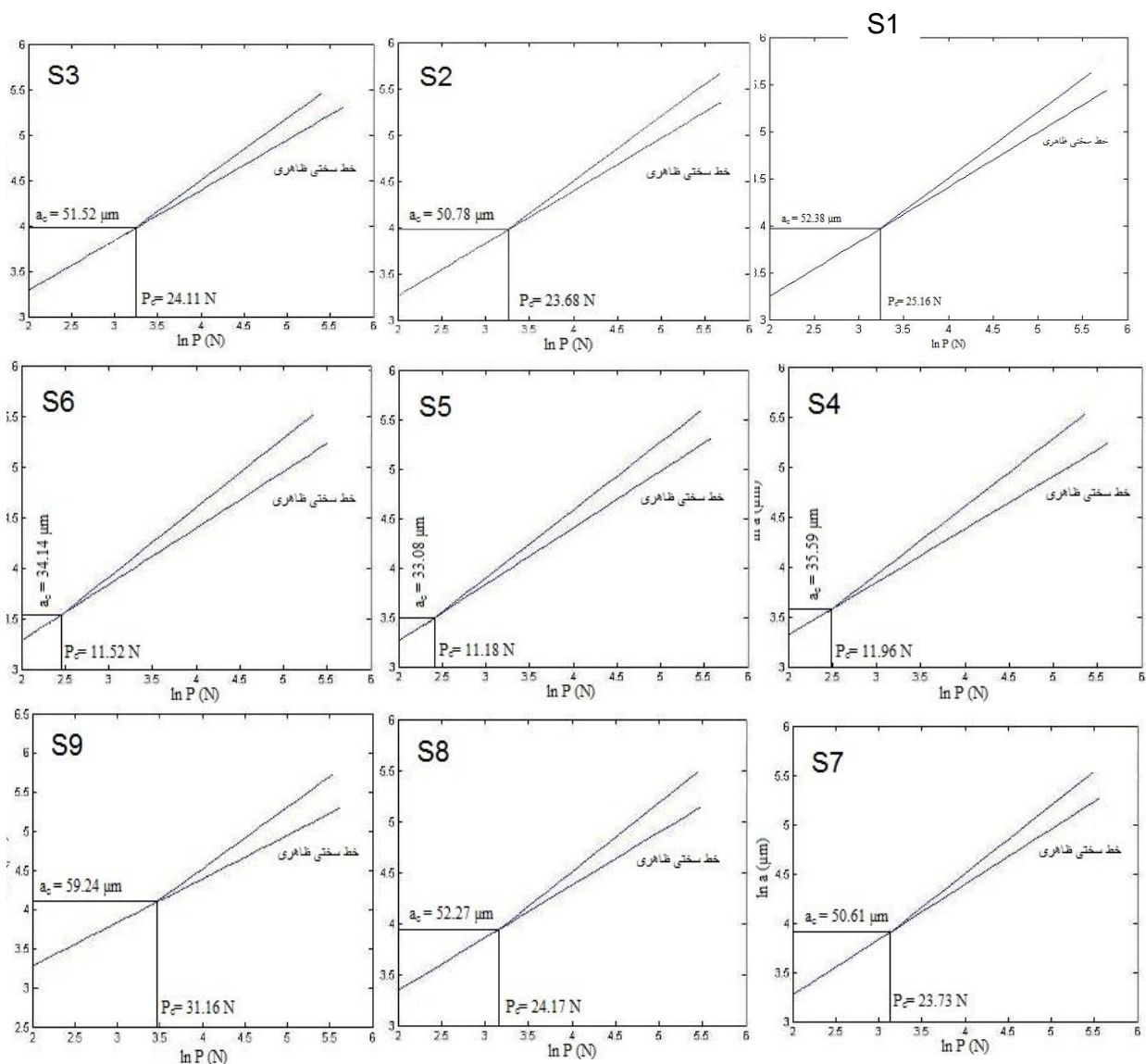
برای تست سایش سه نمونه چدن خاکستری پوشش داده شده و کروم سخت شده به ابعاد ۵۰×۲۵×۴ mm³ آماده شدند. یک نمونه کروم سخت شده (HCP)، یک نمونه با پوشش کاربید کروم با کمترین میزان سختی (S9) و نمونه آخر با پوشش کاربید کروم که تحت شرایط بهینه (S_{opt}) مورد پاشش قرار گرفته بود. برای تست سایش از دستگاه پین و دیسک^۱ ساخته شده در دانشکده مواد دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده شده است. سطوح نمونه‌ها توسط پینی از جنس فولاد بلبرینگ ASTM A 295 52100 با سختی ۶۰ راکول سی تحت سایش قرار گرفتند. قبل از انجام تست‌ها سطوح نمونه‌ها سنگ زنی و پولیش شد تا زبری سطح سه نمونه به زیر یک میکرون برسد. تست‌ها در دمای محیط (۲۵ درجه سانتیگراد)، رطوبت ۳۵ درصد و

² Wang

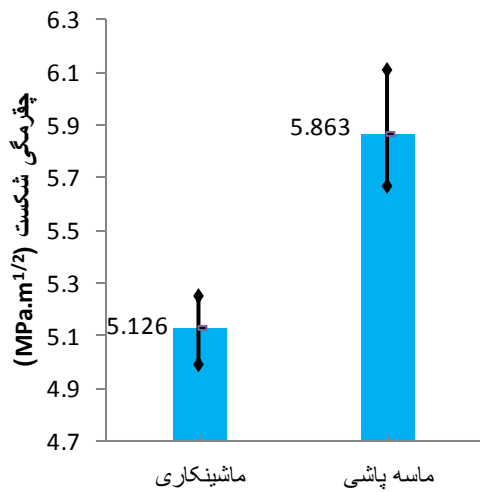
¹ Pin and Disc

چقرمگی شکست، بررسی میزان تاثیر پارامتر SSR بر چقرمگی شکست به منظور حذف مرحله هزینه‌بر ماسه پاشی است. مطابق شکل ۷ دلیل افزایش چقرمگی شکست و در نتیجه استحکام چسبندگی پوشش با استفاده از ماسه‌پاشی را می‌توان در افزایش زبری سطح زیرلایه توسط ماسه‌پاشی دانست. زبری سطح زیرلایه در حالت ماشینکاری شده در حدود ۷ میکرون و در حالت ماسه پاشی شده در حدود ۱۳ میکرون اندازه‌گیری شده است.

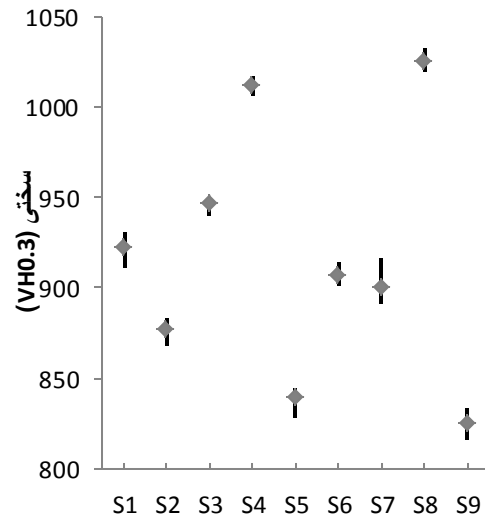
دادند، نرخ سایش پوشش با سختی پوشش رابطه عکس دارد. بدین ترتیب که با افزایش سختی پوشش، نرخ سایش آن کاهش می‌یابد. همچنین تحقیقات سایر محققین و نتایج تست های آن‌ها صحت این امر را تأیید می‌کنند [۲۰-۱۷]. بنابراین هدف از انجام تست سختی به دست آوردن شرایط بهینه جهت حداقل نمودن نرخ سایش می‌باشد. به منظور به دست آوردن چقرمگی شکست، نمودارهای لگاریتمی نمونه‌ها رسم (شکل ۵) و با استفاده از آن‌ها مقادیر چقرمگی شکست برای هر نمونه به دست آمد که در جدول ۵ ارایه شده است. هدف اصلی از محاسبه



شکل ۵. نمودارهای لگاریتمی نمونه های پاشش حرارتی شده جهت محاسبه چقرمگی شکست.



شکل ۷. تاثیر زبری سطح زیرلایه برچقرمگی شکست.



شکل ۶. سختی ویکرز نمونه‌ها.

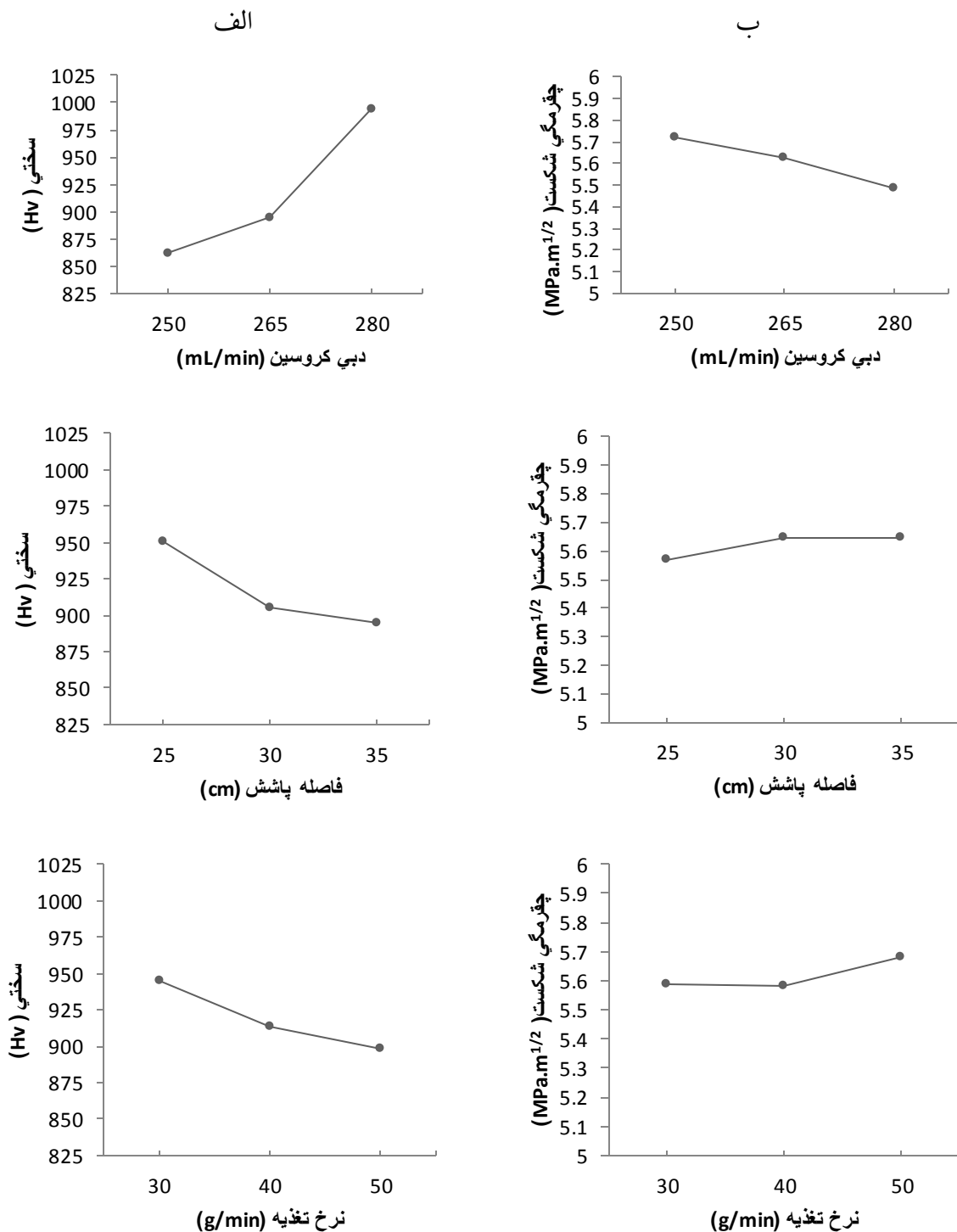
جدول ۵. نتایج تست نقطه اثر فرورفتگی مرز مشترک برای نمونه‌ها.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
H _s (GPa)	۹,۰۴	۸,۶۰	۹,۲۹	۹,۹۳	۸,۲۳	۸,۹۰	۸,۸۳	۱۰,۰۵	۸,۰۹
P _c (N)	۲۵,۱۶	۲۳,۶۸	۲۴,۱۱	۱۱,۹۶	۱۱,۱۸	۱۱,۵۲	۲۳,۷۳	۲۴,۱۷	۳۱,۱۶
a _c (μm)	۵۲,۳۸	۵۰,۷۸	۵۱,۵۲	۳۵,۵۹	۳۳,۰۸	۳۴,۱۴	۵۰,۶۱	۵۲,۲۷	۵۹,۲۴
(E/H) _i ^{1/2}	۵,۹۲۸	۵,۹۴۲	۵,۹۲۳	۵,۹۰۹	۵,۹۵۵	۵,۹۳۳	۵,۹۳۵	۵,۹۰۶	۵,۹۶۰
K _{Ica} (MPa.m ^{1/2})	۵,۹۰۱	۵,۸۳۳	۵,۷۹۱	۴,۹۹۱	۵,۲۴۸	۵,۱۳۸	۵,۸۶۸	۵,۶۶۷	۶,۱۰۹

در این پژوهش برای پاشش حرارتی نمونه‌ها، میزان چقرمگی شکست در حالتی که زیرلایه ماشینکاری شده است در حد قابل قبولی قرار دارد و با وجود این که ماسه پاشی قطعا در بهبود چقرمگی شکست و چسبندگی پوشش به زیرلایه تاثیر بسزایی دارد، و با در نظر گرفتن این مطلب که پوشش در قالب‌ها همواره تحت فشار و نه کشش قرار می‌گیرد، می‌توان از عملیات ماسه پاشی به منظور صرفه جویی در زمان و هزینه، صرف نظر کرد.

شکل ۸ تاثیر پارامترهای KFR، SD و FR را بر سختی و چقرمگی شکست پوشش نمونه‌ها نشان می‌دهد. طبق تحقیقات مشخص شده است که پوشش به واسطه قطراتی

با افزایش ناهمواری‌های سطح، امکان قفل شدن هر چه بیشتر پوشش بر زیرلایه فراهم می‌گردد. لازم به ذکر است که چقرمگی شکست این پوشش بر زیرلایه چدن خاکستری توسط چیکوت و همکاران [۱۳]، ۴/۸MPa.m^{1/2} گزارش شده است که این عدد کمتر از مقدار چقرمگی شکست نمونه‌ها در حالت ماشینکاری شده در این پژوهش است. دلیل این امر را می‌توان در درصد بسیار پایین‌تر (۷٪) نیکل کروم در سرمت کاربید کروم - نیکل کروم و زبری پایین (تقریبا مشابه با زبری در حالت ماشینکاری) نمونه‌های مورد استفاده‌ی چیکوت، مشاهده کرد. با این تفاسیر، می‌توان چنین بیان کرد که تحت شرایط پیشنهادی



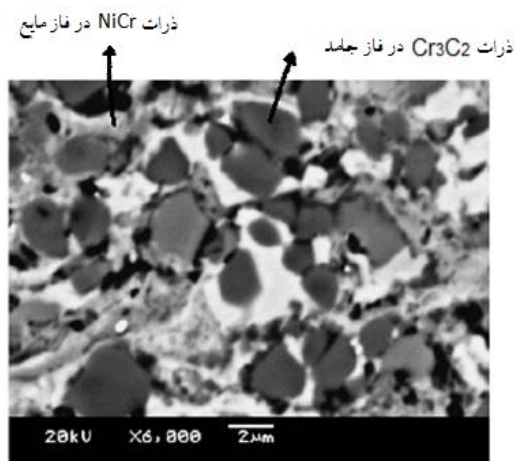
شکل ۸. تاثیر پارامترهای KFR، SD و FR (به ترتیب از بالا به پایین) بر: الف-سختی، ب- چقرمگی شکست پوشش نمونه‌ها.

اواسط دهه ۹۰ میلادی تصور عمومی بر این بود که سرعت و دمای ذرات در حال پاشش باید بر روی استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه تاثیرگذار باشند، اما

با دوفاز مایع- جامد، که ذرات کاربید کروم به صورت فاز جامد در زمینه ذرات مایع نیکل کروم به یکدیگر متصل شده‌اند (شکل ۹)، بر روی زیرلایه تشکیل می‌شود. تا

کروسین و در نتیجه افزایش دمای ذرات، فاز جامد قطرات پاشش کمتر شده و یا به حالت خمیری در می آید. در مورد پارامتر SD نیز مطابق شکل ۸ با افزایش فاصله، سرعت و دمای ذرات در حال پاشش در هنگام برخورد کاهش یافته و باعث کاهش سختی پوشش و افزایش چقرمگی شکست می شود. با توجه به اینکه تغییر فاصله تفنگ پاشش از سطح زیرلایه منجر به تغییر سختی و در نتیجه تغییر مقاومت به سایش پوشش خواهد شد، باید همواره فاصله تفنگ و سطح زیرلایه ثابت باشد، یعنی تفنگ پاشش باید مطابق با پروفیل سطح زیرلایه حرکت کند.

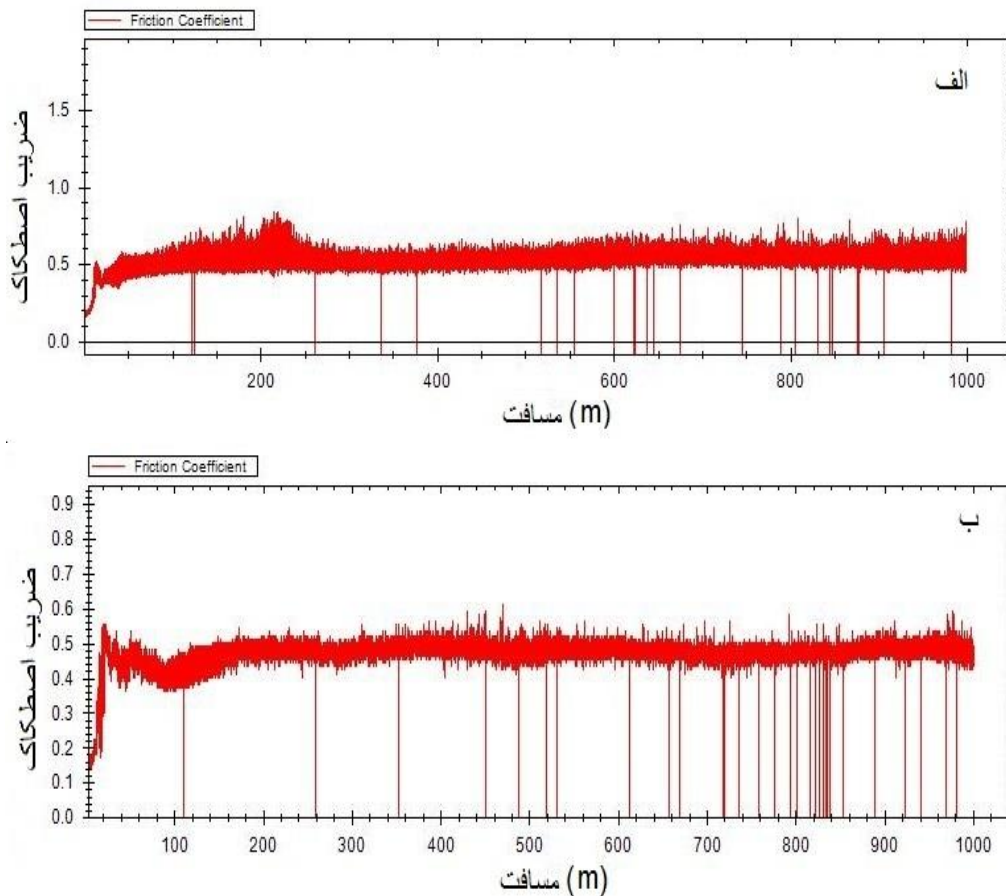
مطابق شکل ۸ با افزایش نرخ تغذیه پودر، مدت زمانی که پودر در داخل لوله تفنگ قرار دارد کاهش یافته و این امر موجب کاهش دمای قطره پاشش شده می شود. به این دلیل، سختی پوشش کاهش و چقرمگی شکست آن افزایش می یابد.



شکل ۹. تصویر میکروسکوپ الکترونی از جزئیات پوشش HVOF کاربرد کروم نیکل کروم.

شکل ۱۰ نمودار ضرایب اصطکاک نمونه های تحت سایش HCP و S_{opt} را نشان می دهد که مقدار میانگین ضرایب به ترتیب ۰/۵۳ و ۰/۴۷ است.

تحقیقات بعدی نشان داد که استحکام چسبندگی پوشش های HVOF به میزان زیادی به حالت مذاب ذرات بستگی دارد. هنگامی که یک قطره پاشیده شده به یک سطح جامد برخورد می کند، فشار دینامیک بالای برخورد قطره به سطح زیرلایه باعث تماس هرچه نزدیک تر ذرات تشکیل دهنده آن با سطح زیرلایه و در نتیجه بهبود استحکام پیوند می شود. ذرات فاز جامد موجود در قطره به واسطه پخش شدگی کمتری که دارند، نسبت به ذرات فاز مایع موجود در قطره، در ایجاد فشار دینامیک موثرتر هستند. علاوه بر این، ذرات فاز جامد موجود در قطره به طور موثری پخش شدگی قطره بر روی سطح را محدود می کنند، که به این معناست که وجود این ذرات در قطرات دو فازی مایع-جامد پاشیده شده، ویسکوزیته این قطرات را افزایش می دهد. در نتیجه، فشار دینامیکی در سطح محدودتری بین قطره و سطح زیر آن اعمال خواهد شد. به واسطه دلایل مذکور، فاصله ذرات پوشش و سطح زیرلایه کمتر شده و منجر به افزایش استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه خواهد شد [۲۱]. بنابراین با توجه به تفاسیر ارائه شده هر چقدر ذرات فاز جامد بیشتر باشند استحکام چسبندگی پوشش بیشتر می شود. مطابق شکل ۸، دبی کروسین بیشترین تاثیر را بر روی سختی پوشش دارد. طبق تحقیقات انجام گرفته افزایش دبی کروسین موجب افزایش فشار و دمای محفظه احتراق و به طور کل توان تفنگ پاشش می گردد که این امر سبب افزایش سرعت و دمای ذرات در حال پاشش می شود [۱۶ و ۱۸]. با افزایش سرعت ذرات در حال پاشش، انرژی برخورد ذرات با سطح زیرلایه بیشتر شده و باعث ایجاد لایه متراکم تر و سخت تر می شود [۱۶]. با افزایش دمای ذرات در حال پاشش، احتمال تجزیه شدن کاربرد زیاد می شود، همچنین افزایش دما باعث افزایش اکسیداسیون می گردد [۲۲] و اکسید کروم، سختی بیشتری نسبت به کاربرد کروم دارد. در مورد تاثیر این پارامتر بر چقرمگی شکست نیز می توان رفتار نمودار را اینگونه توجیه کرد که با افزایش دبی



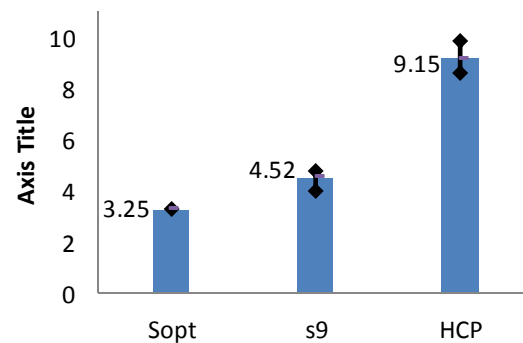
شکل ۱۰. نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده برای دو نمونه - الف) HCP، ب) S_{opt}

این امر به بهبود نرخ سایش نمونه پاشش حرارتی شده نسبت به نمونه کروم سخت شده کمک می کند. برای مقایسه بهتر نرخ سایش نمونه‌ها، از نمودار ستونی استفاده شده است. شکل ۱۱ نرخ سایش نمونه‌ها را نشان می دهد. با توجه به شکل، نرخ سایش نمونه‌ای که کروم سخت شده بیش از دو برابر نرخ سایش نمونه پوشش داده شده در شرایط بهینه است. این بدین معنی است که فرآیند پاشش حرارتی HVOF کاربید کروم- نیکل کروم باعث بهبود قابل ملاحظه نرخ سایش نمونه‌ای که تحت فرآیند کروم سخت قرار گرفته، شده است. در حال حاضر عمر قالب‌های بزرگ صنعتی موجود در کارخانه ایران خودرو معادل حداکثر تا دو میلیون قطعه است. با توجه به اینکه با استفاده از فولاد تنگستن دار که سایش قالب‌ها را به میزان ۵۰-۶۰ درصد بهبود می بخشد، عمر قالب‌ها از یک الی دو میلیون قطعه به پنج الی شش میلیون قطعه افزایش می یابد [۲]، انتظار می رود طبق نتایج به دست آمده از این پژوهش، با جایگزینی روش فعلی مورد استفاده برای مقاوم سازی سطح قالب‌های صنعتی (روش کروم سختی) با روش پیشنهاد شده در این پژوهش (پاشش حرارتی به روش HVOF)، عمر کارکرد قالب‌ها افزایش قابل توجهی یابد. همچنین نمودار شکل ۱۱ کاهش نرخ سایش نمونه پاشش حرارتی شده S_{opt} را نسبت به نمونه پاشش حرارتی شده S9 نشان می دهد که تاثیر بهینه سازی پارامترها بر مقاومت به سایش پوشش به وضوح قابل مشاهده است. دلیل این امر افزایش سختی پوشش تحت شرایط بهینه است.

این امر به بهبود نرخ سایش نمونه پاشش حرارتی شده نسبت به نمونه کروم سخت شده کمک می کند. برای مقایسه بهتر نرخ سایش نمونه‌ها، از نمودار ستونی استفاده شده است. شکل ۱۱ نرخ سایش نمونه‌ها را نشان می دهد. با توجه به شکل، نرخ سایش نمونه‌ای که کروم سخت شده بیش از دو برابر نرخ سایش نمونه پوشش داده شده در شرایط بهینه است. این بدین معنی است که فرآیند پاشش حرارتی HVOF کاربید کروم- نیکل کروم باعث بهبود قابل ملاحظه نرخ سایش نمونه‌ای که تحت فرآیند کروم سخت قرار گرفته، شده است. در حال حاضر عمر قالب‌های بزرگ صنعتی موجود در کارخانه ایران خودرو معادل حداکثر تا دو میلیون قطعه است. با توجه به اینکه با استفاده از فولاد تنگستن دار که سایش قالب‌ها را به میزان

نمونه‌ای که تحت فرآیند کروم سخت قرار گرفته، شده است.

- با جایگزینی آبکاری کروم سخت با پاشش حرارتی به روش HVOF، انتظار می‌رود که عمر کارکرد قالب‌ها به طرز قابل توجهی افزایش یابد.
- بهینه‌سازی شرایط پاشش باعث بهبود قابل قبولی در نرخ سایش می‌شود.



شکل ۱۱. مقایسه نرخ سایش نمونه‌ها.

مراجع

1. X. Zhi and H. Zhengdong, *Wear-resistant and anticorrosion stamping die*, CN 202357495, Aug 1, 2012.
2. X. Weichang, *Forming stamping mold with wear-resistant coating*, CN 103084572, May 8, 2013.
3. T. Lin, D. Jinliang, X. Shan, L. Gang, and X. Su, *Wear-resistant stamping die*, CN 203409092 U, Jan 29, 2014.
4. CH. Qing, *Automobile punching part die of high abrasion-resistant coating*, CN 203370952 u, Jan 1, 2014.
5. J. K. Dennis and T. E. Such, *Nickel and chromium plating*, 3rd ed. England: Woodhead Publishing Ltd, 1993.
6. J. M Guilemany, N. Espallargas, P. H. Suegama, and A. V. Benedetti, *Comparative study of Cr₃C₂-NiCr coatings obtained by HVOF and hard chromium coatings*, Corrosion Science, 48(2006) 2998-3013.
7. T. Sahraoui, N-E Fenineche, Gh. Montavon, and Ch. Coddet, *Alternative to chromium: characteristics and wear behavior of HVOF coatings for gas turbine shafts repair (heavy-duty)*, Materials Processing Technology, 152(2004) 43-55.
8. *Hard Chrome Coatings: Advanced Technology for Waste Elimination*, Northwestern University, Final 1996.
9. R. Davis, *handbook of thermal spray technology*. ASM International, 2004
10. *Thermal Spraying: practice, theory and application.*: American Welding Society, 1985.
11. L. Pawlowski, *The Science And Engineering of Thermal Spray Coatings*, 2nd ed.: John Wiley & sons, 2008.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش تلاش شد تا با به کارگیری همزمان علم مواد و مهندسی مکانیک، گامی عملی در راستای برطرف ساختن یکی از نیازهای صنعت خودروسازی کشور انجام پذیرد. چکیده نتایج حاصل از پژوهش در زیر ارایه شده است:

- پارامترهای موثر در سختی پوشش به ترتیب عبارتند از: نرخ جریان کروسین (KFR)، فاصله پاشش (SD)، نرخ تغذیه (FR) و زیری سطح زیرلایه (SSR). پارامترهای موثر در چقرمگی شکست نیز به ترتیب عبارتند از: زیری سطح زیرلایه (SSR)، نرخ جریان کروسین (KFR)، نرخ تغذیه (FR) و فاصله پاشش (SD).
- شرایط بهینه برای حصول پوشش با بیشترین عمر کارکرد عبارت است از: نرخ جریان کروسین: ۲۸۰ mL/min، نرخ تغذیه: ۳۰ gr/min، فاصله پاشش: ۲۵ cm و زیرلایه ماشینکاری شده
- با توجه به چقرمگی شکست قابل قبول پوشش در حالتی که زیرلایه ماشینکاری شده، می‌توان از عملیات ماسه‌پاشی به منظور صرفه‌جویی در زمان و هزینه، صرف نظر کرد.
- فرآیند پاشش حرارتی HVOF کاربرد کروم-نیکل کروم باعث بهبود قابل ملاحظه نرخ سایش

22. J. A. Picas, A. Forn, and G. Matthaus, *HVOF coatings as an alternative to hard chrome for pistons and valves*, wear, 261(2006)477-484.
12. B. Rointan, *Handbook of Hard Coatings Deposition Technologies, Properties and Applications*. Los Angeles: Noyes Publications, 2001.
13. D. Chicot, P. Demarecaux, and J. Lesage, *Apparent interface toughness of substrate and coating couples from indentation tests*, Thin Solid Films, 283(1996)151-157.
14. J. Lesage, M. H. Staia, D. Chicot, C. Godoy, and P.E.V De Miranda, *Effect of thermal treatments on adhesive properties of a NiCr thermal sprayed coating*, Thin solid Films, 377(2000) 681-686.
15. J. Lesage and D. Chicot, *Role of residual stresses on interface toughness of thermally sprayed coatings*, Thin Solid Films, 415(2002)143-150.
16. Q. Z. Wang, L. Li Chen, and G. Yang, *The parameters optimization and abrasion wear mechanism of liquid fuel HVOF sprayed bimodal WC-12Co coating*, Surface and Coating Technology, 206(2012)2233-2241.
17. W. Fang, *Processing optimization, surface properties and wear behavior of HVOF spraying WC-CrC-Ni coating*, J of Materials Processing Technology, 209 (2009)61-67.
18. J. A. Picas, M. Punset, M. T. Baile, E. Martin, and A. Forn, *Effect of oxygen/fuel ratio on the in-flight particle parameters and properties of HVOF WC-CoCr coatings*, Surf. & Coat. Technol, 205(2011)364-368.
19. W. C. Lih, *Effects of process parameters on molten particle speed and surface temperature and the properties of HVOF CrC/NiCr coatings*, Surf. & Coat Technol, 133-134(2000)54-60.
20. L. Zhao, M. Maurer, F. Fischer, R. Dicks, and E. Lagscheider, *Influence of spray parameters on the particle in-flight properties and the properties of HVOF coating of WC-CoCr*, wear, 257(2004)41-46.
21. Y. Y. Wang, C-J. Li, and A. Ohmari, *Examination of factors influencing the bond strength of high velocity oxy-fuel sprayed coatings*, Surface and Coatings Technology, 200(2006)2923-2928.