

## بررسی تجربی و مدلسازی استحکام چسبندگی و پیوستگی پوشش WC-10Co-4Cr به روش HVOF پس از فرآیند سنگزنی

مائده السادات ضوئی، محمدحسین صادقی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

مهدی صالحی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله ۹۴/۱۱/۱۴- پذیرش مقاله: ۹۵/۰۵/۲۶)

### چکیده

امروزه کاربرد پوشش‌های سرامت به روش پاشش حرارتی با سوخت اکسیژن در سرعت بالا، HVOF، در صنایع مختلف، بسیار مورد توجه است. زبری سطح پوشش‌های کاربیدی پس از فرآیند پاشش حرارتی، بالاتر از مقادیر قابل قبول در شرایط کاربردی است، بنابراین به منظور دستیابی به زبری سطح مطلوب، سطح پوشش توسط فرآیند سنگزنی پرداخت می‌شود. در این مقاله، تأثیر تغییرات همزمان سه پارامتر اصلی فرآیند سنگزنی شامل سرعت برش، نرخ پیشروی و عمق برش بر استحکام چسبندگی و پیوستگی پوشش WC-10Co-4Cr به روش HVOF مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور، برای اولین بار از طراحی آزمایش به روش فاکتوریل کامل برای انجام فرآیند سنگزنی نمونه‌های آزمایشگاهی و از آنالیز واریانس برای تعیین پارامترهای مؤثر فرآیند سنگزنی استفاده شد. استحکام پوشش، توسط تعیین تافنس شکست به روش ایجاد نقطه اثر با فرورونده ویکرز تعیین گردید. نتایج نشان داد، استحکام چسبندگی و پیوستگی پوشش پس از فرآیند سنگزنی بهبود یافته و با افزایش عمق برش و نرخ پیشروی و کاهش سرعت برش، خواص چسبندگی و پیوستگی پوشش افزایش می‌یابند. همچنین ترتیب میزان تأثیر پارامترهای سنگزنی بر این خواص عبارتند از: عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت برش. در پایان رابطه بین پارامترهای سنگزنی و خواص چسبندگی و پیوستگی پوشش توسط رگرسیون مدلسازی شد. واژه‌های کلیدی: سنگزنی، HVOF، پوشش WC-10Co-4Cr، استحکام چسبندگی و پیوستگی، ANOVA

## Experimental Study and Modeling of the Adhesion and Cohesion Strength of HVOF Sprayed WC-10Co-4Cr Coatings After Grinding Process

Maedeh Sadat Zoei, Mohammad Hosein Sadeghi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University

Mehdi Salehi

Department of Material Engineering, Isfahan University of Technology

(Received 3 Feb 2016, accepted 16 Aug 2016)

### Abstract

Application of cermet coating deposited by High-Velocity Oxygen Fuel (HVOF) has received considerable attention in a variety of industries, nowadays. Since the surface roughness of carbide coatings is higher than the permissible limits under specific conditions, finishing the coated surface by grinding is essential in order to achieve the desired roughness. The present study investigates the effect of simultaneous changes in the grinding parameters including depth of cut, feedrate and cutting speed on the adhesion and cohesion strength of WC-10Co-4Cr coating by HVOF. A full factorial design of experiment was selected for experimental planning and the analysis of variance was employed to find the significant grinding parameters, for the first time. The adhesive and cohesive properties were measured using fracture toughness with Vickers' Indentation Test. The results showed that adhesion and cohesion strength of WC-10Co-4Cr coating increased after grinding process, and they increased with the increase of the depth of cut and feedrate and the decrease of the cutting speed. The most influencing parameters were the depth of cut, feedrate and cutting speed respectively. At the end of the current study, the relation between the grinding parameters and adhesive and cohesive properties has been modeled using regression analysis.

**Keywords:** Grinding, HVOF, WC-10Co-4Cr coating, Adhesion strength and Cohesion strength, ANOVA.

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

## مقدمه

پوشش‌های پاشش حرارتی به صورت گسترده در کاربردهای متنوعی، به منظور مقابله با فرآیندهای فرسایشی نظیر سایش و خوردگی به کار برده می‌شوند. در میان انواع پوشش‌های به کار رفته در بهبود سطح، پوشش‌های کاربیدی، به خصوص کاربید تنگستن و کاربیدهای کروم ترجیح داده می‌شوند [۱]. یکی از مهم‌ترین فرآیندهای ایجاد پوشش‌های کاربیدی، فرآیند پاشش حرارتی سرعت بالا با سوخت اکسیژن،<sup>۱</sup> HVOF است. در پوشش‌های کاربیدی حاصل از فرآیند HVOF، تجزیه فاز کاربیدی، به دلیل آنتالپی حرارتی پایین و مدت زمان درگیری کوتاه، حداقل است. علاوه بر این سرعت ذرات بالا در طی رسوب، مزایای مختلفی از جمله تخلخل کم، استحکام باند و سختی بالا را فراهم می‌سازد [۲، ۳]. یکی از پرکاربردترین پوشش‌های کاربیدی، پوشش WC-10Co-4Cr ایجاد شده به روش پاشش حرارتی HVOF است. ترکیب فاز سخت مونو کاربید تنگستن (WC) و کبالت (Co) به عنوان فاز اتصال فلزی داکتیل، تشکیل کامپوزیت سخت WC-Co را داده و در نتیجه به عنوان جایگزینی برای کروم‌کاری در کاربردهای سایش و خوردگی، به واسطه حفاظت محیط زیست مورد توجه است [۴]. با افزودن Cr به WC-Co، از تجزیه WC ممانعت شده و از شکل‌گیری تنگستن فلزی جلوگیری می‌شود. همچنین با بهبود چسبندگی ماتریس فلزی به دانه‌های WC، پوششی با مقاومت سایش بالاتر فراهم حاصل می‌شود [۵، ۶].

در بسیاری از شرایط کاربردی، زبری سطح در پوشش‌های کاربیدی پس از فرآیند پاشش حرارتی، بالاتر از مقادیر قابل قبول زبری است. بنابراین سطوح پوشش کاربیدی برای دستیابی به زبری سطح مطلوب و همچنین ابعاد دقیق، پرداخت می‌شود. در بیش‌تر موارد، فرآیند سنگ‌زنی به منظور عملیات پرداخت مواد پوششی سخت

به کار برده می‌شود [۷]. فرآیند سنگ‌زنی، خصوصیات و ویژگی‌های پوشش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو بررسی تأثیر فرآیند سنگ‌زنی بر خصوصیات نهایی پوشش امری ضروری و اجتناب ناپذیر است. یکی از مهم‌ترین خصوصیات پوشش، به عنوان معیاری از عملکرد بهینه آن، چسبندگی کل پوشش است. چسبندگی کل پوشش، از ترکیب استحکام چسبندگی<sup>۲</sup> (مرتبط با اتصال پوشش به زیرلایه) و استحکام پیوستگی<sup>۳</sup> (مرتبط با اتصال لایه‌های پوشش به یکدیگر) نتیجه می‌شود. در زمینه سنگ‌زنی پوشش‌های مبنای کاربید تنگستن- کبالت تحقیق‌های متفاوتی با اهداف مختلف انجام گرفته است. لیو<sup>۴</sup> و همکارانش [۸-۱۰]، تأثیر پارامترهای سنگ‌زنی را بر نیروهای سنگ‌زنی، پرداخت سطح، توپوگرافی و عیوب زیرسطحی پوشش n-WC/12Co به روش HVOF، مورد مطالعه قرار دادند. مایتی<sup>۵</sup> و همکارانش [۱۱]، سختی، تنش پسماند و سایش خوردگی پوشش سنگ‌زنی شده WC-CoCr<sup>۱</sup> مورد مطالعه قرار دادند. مورثی<sup>۶</sup> و همکارانش [۶]، تأثیر فرآیند سنگ‌زنی را بر رفتار سایشی پوشش WC-CoCr<sup>۱</sup> مورد بررسی قرار دادند. معصومی و همکارانش [۱۲، ۱۳]، تأثیر پارامترهای سنگ‌زنی شامل عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت برش را بر نیروهای برشی و نرمال سنگ‌زنی، سختی، استحکام چسبندگی و تنش پسماند پوشش سرمت WC-CoCr<sup>۱</sup> به روش HVOF مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، در هر بررسی آزمایشگاهی، با ثابت نگاه‌داشتن سایر پارامترهای اصلی، تنها تأثیر یک پارامتر از فرآیند سنگ‌زنی بر استحکام پوشش بررسی شده است. بنابراین تأثیر تغییرات همزمان سه پارامتر فرآیند سنگ‌زنی بر خواص چسبندگی و پیوستگی پوشش WC-10Co-4Cr (یا دیگر پوشش‌ها) تاکنون گزارش نشده است.

<sup>۲</sup>Adhesive strength

<sup>۳</sup>Cohesive strength

<sup>۴</sup>Liu

<sup>۵</sup>Maiti

<sup>۶</sup>Murthy

<sup>۱</sup>High Velocity Oxy Fuel

جدول ۱. پارامترهای فرآیند پاشش حرارتی HVOF

پارامتر	مقدار
دبی اکسیژن (mL/min)	۸۳۰
دبی سوخت (mL/min)	۲۷۰
دبی گاز حامل (L/min)	۵
فاصله پاشش (cm)	۳۴/۵
نرخ تغذیه پودر (g/min)	۵۵

### طراحی آزمایش

در پژوهش حاضر استفاده از طراحی آزمایش فاکتوریل کامل به منظور مطالعه تأثیر همزمان سه پارامتر مهم سنگزنی یعنی عمق برش ( $a_p$ )، نرخ پیشروی میز ( $v_w$ ) و سرعت برش ( $v_c$ )، بر استحکام چسبندگی و پیوستگی پوشش مورد نظر است. سطوح پارامترهای فرآیند سنگزنی با توجه به بررسی تحقیقات مرتبط با موضوع پژوهش [۶-۱۳]، انجام تعدادی محدود آزمایش به منظور بررسی اولیه تأثیر پارامترهای ورودی، و همچنین با در نظر گرفتن محدوده پارامترهای قابل تنظیم بر روی ماشین سنگ مورد نظر جهت انجام سنگزنی تخت، مطابق با جدول ۲ در نظر گرفته شده است. بنابراین با توجه به کاربرد سه سطح برای هر سه پارامتر فرآیند سنگزنی، در طراحی آزمایش فاکتوریل کامل، توسط نرم افزار Minitab 17، ۲۷ آزمایش برای انجام فرآیند سنگزنی نمونه‌های پوشش‌دهی شده، پیش‌بینی می‌شود.

جدول ۲. سطوح پارامترهای سنگزنی پوشش WC-10Co-4Cr.

پارامتر	سطوح		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
عمق برش ( $a_p$ )	۴	۱۰	۱۶
نرخ پیشروی ( $v_w$ )	۲۷۳	۴۱۳	۵۵۰
سرعت برش ( $v_c$ )	۲۵	۳۰	۳۵

هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر تغییرات همزمان پارامترهای اصلی فرآیند سنگزنی شامل سرعت برش، عمق برش و نرخ پیشروی بر چسبندگی نهایی پوشش سرمت WC-10Co-4Cr به روش HVOF، توسط طراحی آزمایش به روش فاکتوریل کامل است. سپس به منظور تخمین دقیق‌تر و بررسی معنادار بودن پارامترها و تعیین تأثیر متقابل پارامترها از آنالیز واریانس، ANOVA<sup>۱</sup> استفاده شده و در انتها برای نخستین بار، مدل‌های کمی بین خواص چسبندگی و پیوستگی پوشش بر حسب پارامترهای عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت برش توسط تحلیل رگرسیون ارائه می‌گردد.

### مواد و روش آزمایش‌ها

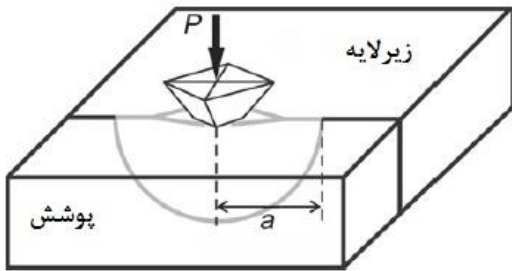
#### ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی

نمونه‌های آزمایشگاهی با ابعاد  $20 \times 20 \times 8$  mm<sup>3</sup> از جنس فولاد کم‌کربن AISI 1010 برای پوشش‌دهی آماده گردید. به منظور افزایش چسبندگی پوشش به زیرلایه، قبل از فرآیند پوشش‌دهی، سطح نمونه‌ها توسط ذرات SiC با اندازه مش ۲۴، ماسه‌پاشی شدند. پودر WC-10Co-4Cr (WOKA 3652) به عنوان پودر پوشش با اندازه ذرات ۱۵ تا ۴۵ میکرومتر و شکل کروی به کار گرفته شد.

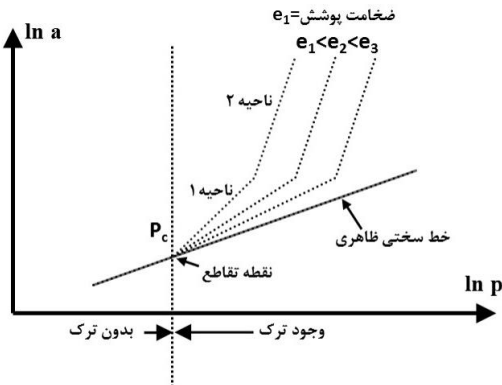
پوشش‌دهی با استفاده از دستگاه HVOF با نام تجاری METJET-III انجام گرفت. پارامترهای بهینه مورد استفاده در پاشش حرارتی HVOF پودر سرمت WC-10Co-4Cr، در جدول ۱ قابل مشاهده است. پوششی به ضخامت ۴۰۰ میکرومتر بر روی سطح  $20 \times 20$  mm<sup>2</sup> نمونه‌ها اعمال شد.

سنگزنی توسط ماشین سنگ تخت I.M.T.I، با محور افقی اسپیندل و دارای میز مغناطیس، همراه با سیال روان‌کار انجام شده است. سنگ مورد استفاده، سنگ الماس با باند رزین، اندازه دانه ۷۵ میکرومتر، گرید R و عدد تمرکز ۷۵ است.

<sup>1</sup> Analysis Of Variance



شکل ۱. نمایش شماتیک روش ایجاد نقطه اثر [۱۵].



شکل ۲. نمایش شماتیک طول ترک و بار آزمایش در مقیاس

لگاریتمی [۱۵].

در انتها از روابط ریاضی برای تعیین تافنس شکست ظاهری مرز و تافنس شکست پوشش، استفاده می‌شود. تافنس شکست ظاهری مرز،  $k_{ca}$ ، به عنوان معیار ارزیابی استحکام چسبندگی پوشش، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱۵]:

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

که  $P_c$ ، بار بحرانی،  $a_c$ ، طول ترک در امتداد قطر اثر در مرز پوشش و زیرلایه و  $\left( \frac{E}{H} \right)_I$  خواص مکانیکی مرز پوشش و زیرلایه است و برابر است با [۱۵]:

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

در رابطه فوق،  $H$  سختی ویکرز،  $E$  مدول الاستیک،  $C$ ،  $I$  و  $S$  به ترتیب نشان‌دهنده فصل اشتراک، پوشش و زیرلایه است. تافنس شکست پوشش،  $k_c$ ، به عنوان معیار ارزیابی استحکام پیوستگی پوشش، از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

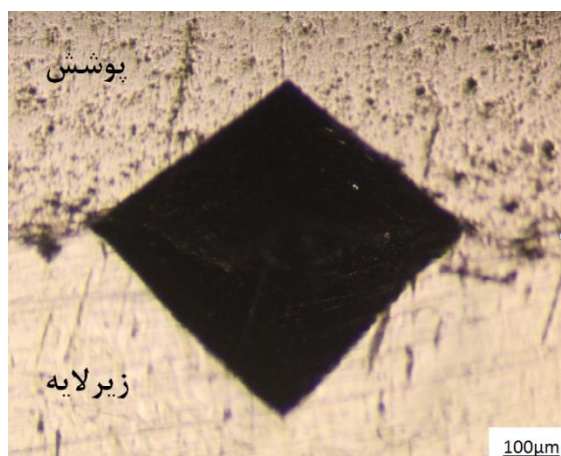
$$K_c = 0.016 \frac{P}{C^{3/2}} \left( \frac{E}{H} \right)^{1/2} \quad (3)$$

تعیین استحکام چسبندگی و پیوستگی پوشش توسط روش ایجاد نقطه اثر

در این بررسی از روش ایجاد نقطه اثر با فرورونده ویکرز، که در گروه روش‌های بر پایه تافنس شکست قرار دارد، برای اندازه‌گیری استحکام چسبندگی و استحکام پیوستگی استفاده شده است [۱۴].

در روش ایجاد نقطه اثر یا فرورفتگی که به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است، از طریق تعیین تافنس شکست ظاهری مرز<sup>۱</sup> (مرز بین پوشش و زیرلایه) و تافنس شکست پوشش<sup>۲</sup> (در داخل پوشش)، به ترتیب استحکام چسبندگی و استحکام پیوستگی ارزیابی می‌شود. در این روش، تست ویکرز بر روی مقطع عرضی پولیش شده پوشش انجام می‌شود. در امتداد قطر اثر، ترکی به صورت موضعی بواسطه نفوذ، با شکلی تقریباً نیم‌دایره‌ای بوجود می‌آید. برای هر تست فرورونده، مقدار طول ترک  $(a)$  و نصف قطر فرورونده  $(d/2)$  اندازه‌گیری می‌شوند. سپس این داده‌ها نسبت به بار اعمالی،  $P$ ، توسط خطوط مستقیم در مقیاس لگاریتمی، ترسیم می‌شوند. رابطه خطی بین  $P$  و  $d/2$  سختی ظاهری نامیده می‌شود. در انتها محل تلاقی خطوط مستقیم  $\ln P - \ln a$  و خط سختی ظاهری، نقطه بحرانی با مختصات بار بحرانی و طول ترک بحرانی  $(P_c, a_c)$  را نتیجه می‌دهد (شکل ۲). پایین‌تر از این نقطه، ترکی در مرز پوشش و زیرلایه ایجاد نشده است. این مختصات برای محاسبه تافنس شکست مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵-۱۶]. توضیحات بیش‌تر در مورد شکل ۲ در مرجع [۱۵] آورده شده است.

<sup>۱</sup> Apparent interfacial fracture toughness  
<sup>۲</sup> fracture toughness of coating



شکل ۳. تصویر میکروسکوپ نوری از ایجاد ترک در مرز پوشش-زیرلایه.

جدول ۴. ماتریس طراحی آزمایش فاکتوریل کامل به همراه نتایج.

شماره آزمایش	$v_c$	$v_w$	$a_p$	$K_{ca}$	$K_c$
۱	۲۵	۲۷۳	۴	۱۳/۶۶	۳/۴۹
۲	۲۵	۲۷۳	۱۰	۱۴/۳۵	۳/۶۸
۳	۲۵	۲۷۳	۱۶	۱۴/۷۸	۳/۸۰
۴	۲۵	۴۱۳	۴	۱۴/۲۸	۳/۶۶
۵	۲۵	۴۱۳	۱۰	۱۵/۱۴	۳/۹۰
۶	۲۵	۴۱۳	۱۶	۱۵/۶۴	۴/۰۴
۷	۲۵	۵۵۰	۴	۱۴/۸۰	۳/۸۱
۸	۲۵	۵۵۰	۱۰	۱۵/۷۵	۴/۰۷
۹	۲۵	۵۵۰	۱۶	۱۶/۲۴	۴/۲۱
۱۰	۳۰	۲۷۳	۴	۱۳/۴۴	۳/۴۳
۱۱	۳۰	۲۷۳	۱۰	۱۴/۰۵	۳/۶۰
۱۲	۳۰	۲۷۳	۱۶	۱۴/۴۲	۳/۷۱
۱۳	۳۰	۴۱۳	۴	۱۳/۹۹	۳/۵۸
۱۴	۳۰	۴۱۳	۱۰	۱۴/۷۸	۳/۸۰
۱۵	۳۰	۴۱۳	۱۶	۱۵/۲۵	۳/۹۳
۱۶	۳۰	۵۵۰	۴	۱۴/۲۱	۳/۷۷
۱۷	۳۰	۵۵۰	۱۰	۱۵/۲۲	۳/۸۷
۱۸	۳۰	۵۵۰	۱۶	۱۶/۳۷	۴/۱۱
۱۹	۳۵	۲۷۳	۴	۱۳/۲۸	۳/۳۸

که P بار اعمالی، و C طول ترک در امتداد قطر اثر داخل پوشش است. در این مطالعه، تعیین تافنس شکست ظاهری مرز و تافنس شکست پوشش توسط تست فرورونده ویکرز با استفاده از دستگاه سختی سنج Dia Teste مدل 2RC-S با بار متغیر بین ۳ تا ۴۰ کیلوگرم انجام شده است. برای هر نیرو، پنج مرتبه آزمایش تکرار شده و میانگین اثر لحاظ می‌گردد.

### نتایج و بحث

همان‌طور که اشاره شد، در کل ۲۷ آزمایش فرآیند سنگ‌زنی انجام گرفت و پس از انجام هر آزمایش، مقادیر تافنس شکست ظاهری مرز و تافنس شکست پوشش اندازه‌گیری شد. مقادیر عددی سختی (حاصل از تست میکروسختی ویکرز) و مدول الاستیک (حاصل از تست نانو فرورونده) برای اندازه‌گیری تافنس شکست ظاهری مرز و تافنس شکست پوشش در جدول ۳ نشان داده شده است. شکل ۳ نمونه‌ای از تصویر میکروسکوپ نوری نقطه اثر فرورونده ویکرز به مرز پوشش-زیرلایه و ایجاد ترک را نشان می‌دهد. در این شکل،  $2a$  طول ترک است. ماتریس طراحی آزمایش پارامترهای فرآیند سنگ‌زنی به روش فاکتوریل کامل به همراه مقادیر اندازه‌گیری شده تافنس شکست ظاهری مرز و تافنس شکست پوشش در جدول ۴ نشان داده شده است. مقادیر تافنس شکست و تافنس شکست ظاهری مرز، برای نتایج حاصل از نمونه‌های قبل از سنگ‌زنی و میانگین نتایج حاصل از نمونه‌های پس از سنگ‌زنی در شکل ۴ نشان داده شده است.

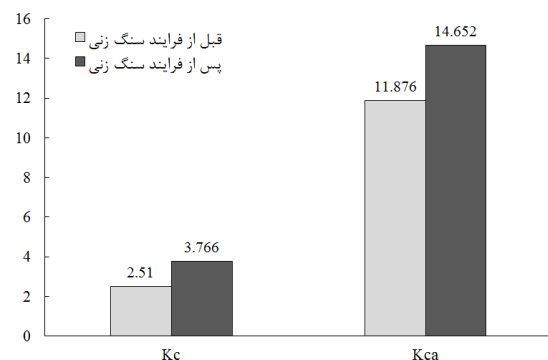
جدول ۳. مشخصات مکانیکی پوشش و زیرلایه.

ماده	H (GPa)	E (GPa)
WC-10Co-4Cr	۱۱/۲۸	۳۱۰
زیر لایه فولاد کم کربن AISI 1010	۱/۶۳۱	۲۱۰

خواص مکانیکی نظیر عمر خستگی و تافنس شکست پوشش‌ها با ایجاد تنش پسماند فشاری مشاهده شده است [۱۸]. تنش پسماند فشاری عاملی بازدارنده در رشد و توسعه‌ی ترک است، به نحوی که پوشش‌هایی با تنش پسماند فشاری مقاومت بیشتری در مقابل ایجاد ترک دارند [۱۹، ۲۰]. از طرفی دیگر با افزایش تنش پسماند فشاری فاصله بین اتمی پوشش WC-10Co-4Cr کاهش یافته و در نتیجه نیروی بیشتری برای گسیختگی پیوند اتمی، تشکیل و گسترش ترک نیاز است، لذا استحکام چسبندگی و پیوستگی پوشش افزایش می‌یابد [۲۱]. از طرفی دیگر، مطالعات پیشین در زمینه سنگ‌زنی پوشش حاصل از فرآیند پاشش حرارتی نشان داده است که فرآیند سنگ‌زنی موجب ایجاد و افزایش تنش پسماند فشاری می‌شود [۱۰، ۱۱، ۱۳]. در حقیقت فرآیند سنگ‌زنی موجب تغییر تنش پسماند کششی به تنش پسماند فشاری و یا افزایش مقدار اولیه تنش پسماند فشاری در پوشش شده است.

به‌منظور تخمین دقیق‌تر و بررسی معنادار بودن پارامترها، از آنالیز واریانس استفاده شد. نتایج آنالیز واریانس برای تافنس شکست ظاهری مرز و تافنس شکست پوشش به ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶، نشان داده شده است. مقادیر P با بزرگی کم‌تر از ۰/۰۵ (قابلیت اطمینان بالاتر از ۹۵٪) نشان‌دهنده معنی‌دار بودن فاکتورها هستند.

۳/۵۶	۱۳/۸۳	۱۰	۲۷۳	۳۵	۲۰
۳/۶۶	۱۴/۱۸	۱۶	۲۷۳	۳۵	۲۱
۳/۵۴	۱۳/۷۶	۴	۴۱۳	۳۵	۲۲
۳/۷۲	۱۴/۴۹	۱۰	۴۱۳	۳۵	۲۳
۳/۸۵	۱۴/۹۳	۱۶	۴۱۳	۳۵	۲۴
۳/۶۲	۱۴/۱۹	۴	۵۵۰	۳۵	۲۵
۳/۸۸	۱۵/۰۴	۱۰	۵۵۰	۳۵	۲۶
۴/۰۱	۱۵/۵۳	۱۶	۵۵۰	۳۵	۲۷



شکل ۴. مقایسه مقادیر Kc و Kca، قبل و پس از فرآیند سنگ‌زنی.

مطابق شکل ۴، با انجام فرآیند سنگ‌زنی، استحکام پیوستگی پوشش و استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه افزایش یافته است. افزایش استحکام چسبندگی و پیوستگی پوشش پس از سنگ‌زنی را می‌توان ناشی از تأثیر فرآیند سنگ‌زنی بر تنش پسماند دانست. بهبود

جدول ۵. آنالیز واریانس مدل تافنس شکست ظاهری مرز.

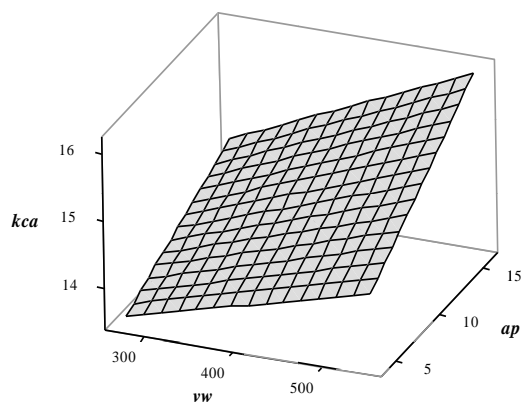
میزان اثر C (%)	مقدار P	مقدار F	میانگین مربعات (MS)	مجموع مربعات (SS)	درجه آزادی	عامل
۹/۴۸۵۲	۰/۰۰۰	۴۰/۰۹	۰/۸۱۴۵۶	۱/۶۲۹۱۲	۲	$v_c$
۴۱/۸۹۲۵	۰/۰۰۰	۱۷۷/۰۴	۳/۵۹۷۶۰	۷/۱۹۵۲۱	۲	$v_w$
۴۵/۱۰۱۲	۰/۰۰۰	۱۹۰/۶۰	۳/۸۷۳۱۶	۷/۷۴۶۳۲	۲	$a_p$
۰/۱۶۲۳	۰/۸۴۲	۰/۳۴	۰/۰۰۶۹۷	۰/۰۲۷۸۸	۴	$v_c \times v_w$
۰/۵۴۸۳	۰/۳۹۷	۱/۱۶	۰/۰۲۳۵۴	۰/۰۹۴۱۷	۴	$v_c \times a_p$

$v_w \times a_p$	۴	۰/۳۲۰۱۵	۰/۰۸۰۰۴	۳/۹۴	۰/۰۴۷	۱/۸۶۴۰
خطا	۸	۰/۱۶۲۵۶	۰/۰۲۰۳۲			
مجموع	۲۶	۱۷/۱۷۵۴۱				

جدول ۶. آنالیز واریانس مدل تافنس شکست پوشش.

عامل	درجه آزادی	مجموع مربعات (SS)	میانگین مربعات (MS)	مقدار F	مقدار P	میزان اثر C (%)
$v_c$	۲	۰/۱۱۶۶۵۲	۰/۰۵۸۳۲۶	۷۱/۳۴	۰/۰۰۰	۹/۹۴۷۷
$v_w$	۲	۰/۵۱۶۰۹۶	۰/۲۵۸۰۴۸	۳۱۵/۶۲	۰/۰۰۰	۴۴/۰۱۱۰
$a_p$	۲	۰/۵۱۹۲۳۰	۰/۲۵۹۶۱۵	۳۱۷/۵۴	۰/۰۰۰	۴۴/۲۷۸۳
$v_c \times v_w$	۴	۰/۰۰۳۷۰۴	۰/۰۰۰۹۲۶	۱/۱۳	۰/۴۰۶	۰/۳۱۵۹
$v_c \times a_p$	۴	۰/۰۰۴۱۰۴	۰/۰۰۱۰۲۶	۱/۲۵	۰/۳۶۲	۰/۳۵۰۰
$v_w \times a_p$	۴	۰/۰۰۶۳۲۶	۰/۰۰۱۵۸۱	۱/۹۳	۰/۱۹۸	۰/۵۳۹۵
خطا	۸	۰/۰۰۶۵۴۱	۰/۰۰۸۱۸			
مجموع	۲۶	۱/۱۷۲۶۵۲				

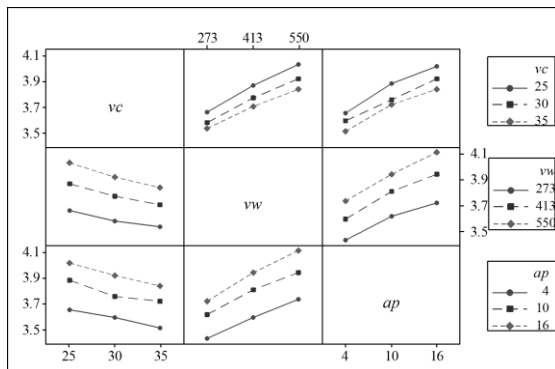
می‌شوند، افزایش یافته و تنش پسماند فشاری بیش‌تری به پوشش تحمیل می‌شود. در نهایت با افزایش تنش پسماند فشاری، تغییرات تافنس شکست ظاهری مرز افزایشی است.



شکل ۵. نمودار سطح پاسخ تافنس شکست ظاهری مرز در  $v_c=30$  m/s

در جدول‌های ۵ و ۶، مقادیر میزان اثر، C، میزان تأثیر هر یک از پارامترهای فرآیند سنگ‌زنی را بر خروجی نشان

نتایج آنالیز واریانس برای تافنس شکست ظاهری مرز، حاکی از معنی‌دار بودن تأثیر تمامی پارامترهای اصلی و همچنین تداخل نرخ پیشروی و عمق برش است. نتایج آنالیز واریانس برای تافنس شکست پوشش نشان می‌دهد که تنها تأثیر پارامترهای اصلی عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت برش معنی‌دار است. نمودار سطح پاسخ تداخل نرخ پیشروی و عمق برش در شکل ۵ نشان داده شده است. نکته قابل توجه در این شکل آن است که شیب تغییرات تافنس شکست ظاهری مرز در حد بالای نرخ پیشروی بالاتر بوده، به بیان دیگر میزان تأثیرگذاری عمق برش در مقادیر بالاتر نرخ پیشروی، بیش‌تر است. در نرخ پیشروی بالاتر، دانه‌های برش بیش‌تری از چرخ سنگ در براده‌برداری از حجم مشخصی از پوشش مشارکت دارند. بنابراین با افزایش نرخ پیشروی، در اثر برهم‌کنش بیش‌تر دانه‌های ساینده‌ی سنگ با پوشش، به علت افزایش تعداد دانه‌های فعال در برش، نیروی سنگ‌زنی اعمالی به قطعه‌کار افزایش می‌یابد. در نتیجه بارها و تنش‌های نرمال هرتزی که باعث کار گرم مکانیکی و تغییر شکل



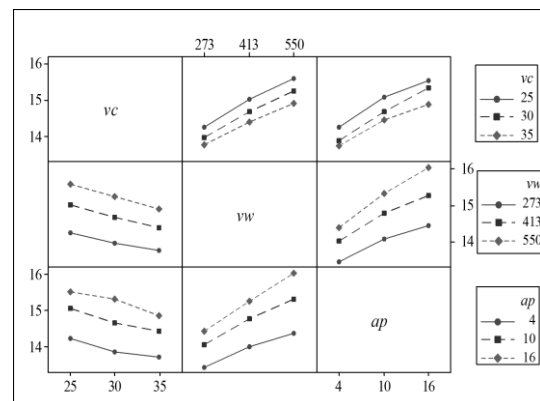
شکل ۷. نمودار تأثیر متقابل پارامترهای سنگ‌زنی بر تافنس شکست پوشش

مطابق نمودارهای شکل‌های ۷ و ۸، با افزایش عمق برش و نرخ پیشروی و کاهش سرعت برش، استحکام چسبندگی و استحکام پیوستگی پوشش WC-10Co-4Cr افزایش می‌یابد. دلیل این نتایج می‌تواند رابطه بین ضخامت براده تغییر شکل نیافته،  $h_m$ ، و پارامترهای فرآیند سنگ‌زنی باشد. پارامتر  $h_m$  معادل عمق نفوذ دانه ساینده چرخ سنگ در قطعه‌کار در حین فرآیند سنگ‌زنی است و طبق رابطه زیر تعیین می‌شود [۲۲]:

$$h_m = \left[ \frac{3}{c \tan \theta} \left( \frac{v_w}{v_c} \right) \left( \frac{a_p}{d_s} \right)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (4)$$

که  $C$ ،  $\theta$  و  $d_s$  به ترتیب برابر با تراکم دانه فعال، زاویه مقطع عرضی براده تغییر شکل نیافته و قطر معادل چرخ - سنگ‌زنی است. مطابق با رابطه ۴ با افزایش عمق برش و نرخ پیشروی یا با کاهش سرعت برش، ضخامت براده تغییر شکل نیافته و در نتیجه نیروی سنگ‌زنی افزایش می‌یابد [۲۲]. از طرفی دیگر، بارگذاری مکانیکی (نیروی سنگ‌زنی)، دلیل اصلی تغییر در تنش پسماند فشاری در پوشش‌ها است [۱۰]. بنابراین تنش پسماند فشاری با افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته، افزایش یافته و در نتیجه با افزایش تنش پسماند فشاری، استحکام چسبندگی و پیوستگی پوشش بهبود می‌یابد. این نتایج با افزایش تنش پسماند فشاری با افزایش عمق برش و نرخ

می‌دهد. بنابراین با توجه به مقادیر  $C$ ، مشخص می‌شود که عمق برش بیش‌ترین تأثیر را بر تافنس شکست ظاهری مرز و تافنس شکست پوشش داشته و پس از آن به ترتیب نرخ پیشروی و سرعت برش مؤثر هستند. علاوه بر این، میزان تأثیر عمق برش و نرخ پیشروی بسیار به هم نزدیک بوده و مقدار تأثیر سرعت برشی در مقایسه با میزان تأثیر عمق برش و نرخ پیشروی بسیار کم‌تر است. در فرآیند سنگ‌زنی، افزایش عمق برش چرخ سنگ، به صورت مستقیم، موجب افزایش عمق دانه برش در جهت ضخامت شده، در صورتی که تغییر نرخ پیشروی و سرعت برش بر برش دانه ساینده در جهت طولی (افقی) مؤثر بوده و تأثیر نسبتاً کمی بر عمق برش دانه ساینده دارد. روند تغییر تافنس شکست ظاهری مرز و تافنس شکست پوشش با تغییر پارامترهای سنگ‌زنی شامل عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت برش به ترتیب در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده‌است.



شکل ۸. نمودار تأثیر متقابل پارامترهای سنگ‌زنی بر تافنس شکست ظاهری مرز



مدل توسعه یافته، رابطه کمی برای تعیین تافنس شکست ظاهری مرز و تافنس شکست پوشش، به ترتیب برابر با معادله‌های ۵ و ۶ است:

$$K_{ca} = 14.292 - 0.06011v_c + 0.002614v_w + 0.0285a_p + 0.000194v_w a_p \quad (5)$$

$$K_c = 3.4618 - 0.016v_c + 0.00122 v_w + 0.02815 a_p \quad (6)$$

در این روابط مقادیر  $K_c$  و  $K_{ca}$  بر حسب  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  برای  $a_p$ ،  $v_w$  و  $v_c$  به ترتیب بر حسب  $\mu\text{m}$ ،  $\text{mm/s}$  و  $\text{m/s}$  هستند. شکل ۸ و ۹ توزیع نرمال مقادیر باقیمانده‌ها را به ترتیب برای تافنس شکست ظاهری مرز و تافنس شکست پوشش و در نتیجه صحت مدل‌های به دست آمده را نشان می‌دهند.

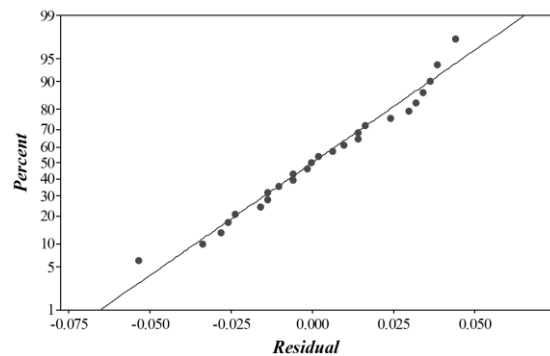
خروجی مهم این مطالعه تعیین رابطه کمی بین خواص چسبندگی و پیوستگی پوشش و پارامترهای فرآیند سنگزنی است که تاکنون گزارش نشده است. توسط این مدل‌ها، انتخاب پارامترهای بهینه فرآیند سنگزنی در شرایط دستیابی به استحکام چسبندگی و پیوستگی مورد نظر امکان پذیر است. علاوه بر این، در شرایط کاربردی خاص که پارامترهای فرآیند سنگزنی برای دستیابی به تابع هدفی دیگر (مانند زبری سطح مورد نظر) انتخاب می‌گردند، توسط مدل‌های مذکور امکان تعیین خواص چسبندگی و پیوستگی پوشش پس از فرآیند سنگزنی امکان پذیر است.

#### نتیجه گیری

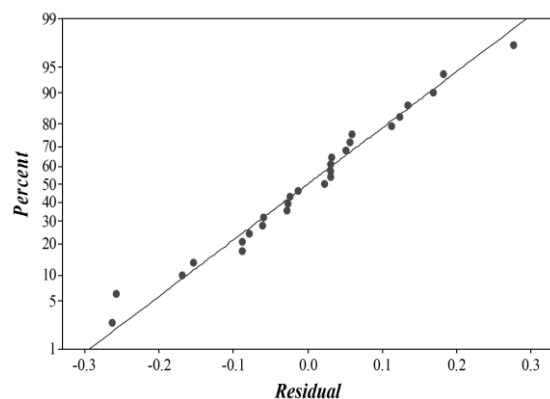
در این پژوهش تأثیر تغییرات هم‌زمان پارامترهای فرآیند سنگزنی پوشش WC-10Co-4Cr ایجاد شده به روش پاشش حرارتی HVOF بر زیرلایه فولاد کم کربن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور برای اولین بار، روش

پیشروی و کاهش سرعت برش در فرآیند سنگزنی پوشش‌ها، مطابقت دارد [۱۰، ۱۳]. همچنین نتایج شکل ۷ و ۸ نشان می‌دهد که روند تغییر استحکام چسبندگی و استحکام پیوستگی در برابر تغییر پارامترهای فرآیند سنگزنی مشابه یکدیگر است. در این نمودارها تأثیر بیش‌تر تغییرات پارامتر عمق برش و نرخ پیشروی نسبت به تغییر پارامتر سرعت برش بر استحکام چسبندگی و پیوستگی پوشش مشخص است.

در ابتدا یک مدل شامل تمامی متغیرهای اصلی و تداخل‌های دوتایی بسط داده شد و در ادامه فاکتورهای دارای اثرات بی‌معنی حذف گردید. در این بررسی، تحلیل رگرسیون برای تعیین مدلی بین تمامی متغیرهای اصلی و تداخل‌های دوتایی پارامترهای مؤثر فرآیند سنگزنی حاصل از تحلیل ANOVA و خروجی‌های اندازه‌گیری شده به کار گرفته شد. بر اساس



شکل ۸. توزیع نرمال باقیمانده‌ها در مدل تافنس شکست ظاهری مرز



شکل ۹. توزیع نرمال باقیمانده‌ها در مدل تافنس شکست ظاهری مرز

### مراجع

1. T.N. Rhys-Jones, *The use of thermally sprayed coatings for compressor and turbine applications in aero engines*, Surface and Coatings Technology, 42(1) (1990) 1-11.
2. S. Hong, Y.P. Wu, W.W. Gao, B. Wang, W.M. Guo, J.R. Lin, *Microstructural characterisation and microhardness distribution of HVOF sprayed WC-10Co-4Cr coating*, Surface Engineering, 30(1) (2014) 53-58.
3. M. Xie, S. Zhang, M. Li, *Comparative investigation on HVOF sprayed carbide-based coatings*, Applied Surface Science, 273(2013) 799-805.
4. K. Murugan, A. Ragupathy, V. Balasubramanian, K. Sridhar, *Optimizing HVOF spray process parameters to attain minimum porosity and maximum hardness in WC-10Co-4Cr coatings*, Surface and Coatings Technology, 247(2014) 90-102.
5. W. Luo, U. Selvadurai, W. Tillmann, *Effect of Residual Stress on the Wear Resistance of Thermal Spray Coatings*, Journal of Thermal Spray Technology, 25(1-2) (2016) 321-330.
6. J.K.N. Murthy, D.S. Rao, B. Venkataraman, *Effect of grinding on the erosion behavior of a WC-Co-Cr coating deposited by HVOF and detonation gun spray processes*. Wear, 249(7) (2001) 592-600.
7. *Thermal Spraying: Practice, Theory, and Application*; American Welding Society, 1985.
8. X. Liu, B. Zhang, Z. Deng, *Grinding of nanostructured ceramic coatings: surface observations and material removal mechanisms*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(15) (2002) 1665-1676.
9. X. Liu, B. Zhang, *Grinding of nanostructural ceramic coatings: damage evaluation*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43(2) (2003) 161-167.
10. X. Liu, B. Zhang, *Effects of grinding process on residual stresses in nanostructured ceramic coatings*. Journal of materials science, 37 (15) (2002) 3229-3239.
11. A.K.Maiti,; N.Mukhopadhyay,; R. Raman, *Improving the wear behavior of WC-CoCr-based HVOF coating by surface grinding*. Journal of Materials Engineering and Performance, 18(8) (2009) 1060-1066.

فاکتوریل کامل به عنوان روش طراحی آزمایش و تحلیل ANOVA برای تعیین بررسی معنادار بودن پارامترها و تعیین تأثیر متقابل پارامترها انتخاب شد. مهم‌ترین نتایج بدست آمده عبارتند از:

۱- استحکام پیوستگی پوشش و استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه پس از فرآیند سنگ‌زنی افزایش می‌یابد که ناشی از افزایش تنش پسماند فشاری پس از فرآیند سنگ‌زنی و در نتیجه ممانعت از شکل‌گیری و رشد ترک است.

۲- با افزایش عمق برش و نرخ پیشروی و کاهش سرعت برش، استحکام چسبندگی و استحکام پیوستگی پوشش افزایش می‌یابد.

۳- عمق برش، بیش‌ترین تأثیر بر استحکام نهایی پوشش را داشته و پس از آن نیز به ترتیب نرخ پیشروی و سرعت برش تأثیرگذار هستند. میزان تأثیر عمق برش و نرخ پیشروی بسیار به هم نزدیک بوده و مقدار تأثیر سرعت برشی در مقایسه با میزان تأثیر عمق برش و نرخ پیشروی بسیار کم‌تر است.

۴- استحکام چسبندگی پوشش به عمق برش، نرخ پیشروی، سرعت برش، و اثر تداخلی عمق برش و نرخ پیشروی وابسته است؛ اما استحکام پیوستگی پوشش تنها وابسته به تأثیر پارامترهای اصلی عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت برش است.

این مطالعه با تعیین مدل کمی بین پارامترهای فرآیند سنگ‌زنی و خواص چسبندگی و پیوستگی پوشش، در انتخاب پارامترهای سنگ‌زنی به‌منظور کنترل استحکام چسبندگی و پیوستگی پوشش و در نتیجه تنش‌های پسماند در حد مطلوب، کارآمد است.

*machining with grinding wheels*; CRC Press, 2006.

12. H. Masoumi, S.M. Safavi, M. Salehi, *Grinding force, specific energy and material removal mechanism in grinding of HVOF-sprayed WC-Co-Cr coating*. Materials and Manufacturing Processes, 29 (3) (2014) 321-330.
13. H. Masoumi, S.M. Safavi, M. Salehi, S.M. Nahvi, *Effect of grinding on the residual stress and adhesion strength of HVOF thermally sprayed WC-10Co-4Cr coating*. Materials and Manufacturing Processes, 29(9) (2014) 1139-1151.
14. Z. Chen, K. Zhou, X. Lu, Y.C. Lam, A *review on the mechanical methods for evaluating coating adhesion*. Acta Mechanica, 225(2) (2014) 431-452.
15. D. Chicot, P. Démarécaux, J. Lesage, *Apparent interface toughness of substrate and coating couples from indentation tests*. Thin Solid Films, 283(1) (1996) 151-157.
16. M.H. Staia, E. Ramos, A. Carrasquero, A. Roman, J. Lesage, D. Chicot, G. Mesmacque, *Effect of substrate roughness induced by grit blasting upon adhesion of WC-17% Co thermal sprayed coatings*. Thin Solid Films, 377(2000) 657-664.
17. Z. Mohammadi, A.A. Ziaei Moayyed, A.S.M. Mesgar, *Adhesive and cohesive properties by indentation method of plasma-sprayed hydroxyapatite coatings*. Applied Surface Science, 253(11) (2007) 4960-4965.
18. I.L. Báez, C.A.P. Salas, J.M. Saldaña, L.G.T. Martínez, *Effects of the modification of processing parameters on mechanical properties of HVOF Cr2C3-25NiCr coatings*. Journal of Thermal Spray Technology, 24(6) (2015) 938-946.
19. C. Lyphout, P. Nylén, A. Manescu, T. Pirling, *Residual stresses distribution through thick HVOF sprayed Inconel 718 coatings*. Journal of Thermal Spray Technology, 17(5-6) (2008) 915-923.
20. C. Lyphout, P. Nylen, L.G. Östergren, *Adhesion strength of HVOF sprayed IN718 coatings*. Journal of Thermal Spray Technology, 21(1) (2012) 86-95.
21. L.N.Zhu,; B.S.Xu,; H.D.Wang,; C.B. Wang, *Measurement of Residual Stresses Using Nanoindentation Method*. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 40(2) (2015) 77-89.
22. I.D. Marinescu, M.P. Hitchiner, E. Uhlmann, W.B. Rowe, I. Inasaki, *Handbook of*