بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی مکانیک

رساله دکتری مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید

موضوع:

ارزیابی تأثیر پارامترهای مؤثر فرآیند پاشش حرارتی HVOF بر تنش پسماند واستحکام پیوند پوشش WC-12Co

استاد راهنما:

دکتر سلمان نوروزی

استادان مشاور:

دکتر حمیدرضا سلیمی‌جزی

دکتر رسول محرمی

دانشجو:

مهدی جلالی عزیزپور

۱۳۹۲

فرم صورت‌جلسه دفاع

دانشگاه صنعتی بابل

فرم صورتجلسه دفاع از رساله دانشجویان دکتری تخصصی

نام دانشجو: مهدی جلالی عزیزپور **شماره دانشجوئی :** ۸۸۵۱۳۰۰۱۲ **رشته تحصیلی :** مکانیک – ساخت و تولید

عنوان رساله:

ارزیابی تأثیر پارامترهای مؤثر فرآیند پاشش حرارتی HVOF بر تنش پسماند واستحکام پیوند پوشش WC-12Co

Evaluation The Effect of High Velocity Oxy Fuel Thermal Spraying on Residual stress and Bonding of WC-12Co Coatings

روز دفاع: ۱۳۹۲/۰۶/۳۰

با عنایت به جمع بندی نظرات داوران(مندرج در فرم ارزشیابی رساله)، وتوجه به سایر موارد، رساله نامبرده با نمره نهائی ۱۹/۵ (نوزده و پنج) و درجه:

- قبول
  - ☑ درجه عالی (۱۸/۵۱ تا ۲۰)
  - ☐ درجه بسیار خوب (۱۷/۰۱ تا ۱۸/۵)
  - ☐ درجه خوب (۱۵/۵۱ تا ۱۷)
  - ☐ درجه قابل قبول (۱۴ تا ۱۵/۵)
- غیر قابل قبول
  - ☐ (کمتر از ۱۴)

اعلام می گردد.

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل دانشکده مهندسی مکانیک

اسامی هیات داوران:

ردیف	نام ونام خانوادگی	دانشگاه محل خدمت	مرتبه علمی	سمت در رساله	محل امضاء
۱	دکتر سلمان نوروزی	صنعتی نوشیروانی بابل	دانشیار	استاد راهنما	
۲	دکتر حمیدرضا سلیمی جزی	صنعتی اصفهان	استاد یار	استاد مشاور	
۳	دکتر رسول محرمی	دانشگاه زنجان	استاد یار	استاد مشاور	
۴	دکتر مسعود امامی	دانشگاه تهران	استاد	داور خارجی	
۵	دکتر محسن شاکری	صنعتی نوشیروانی بابل	استاد	داور داخلی	
۶	دکتر سیدجمال حسینی پور	صنعتی نوشیروانی بابل	دانشیار	داور داخلی	

نماینده کمیته تحصیلات تکمیلی: دکتر محمد هادی پاشائی امضاء

بسمه تعالی

تأیید صحت و اصالت نتایج

اینجانب **مهدی جلالی عزیزپور** به شماره دانشجویی **۸۸۵۱۳۰۰۱۲** دانشجوی رشته **مکانیک گرایش ساخت و تولید** مقطع تحصیلی **دکتری** تأیید می‌نمایم که کلیه نتایج رساله تحت عنوان **"ارزیابی تأثیر پارامترهای مؤثر فرآیند پاشش حرارتی HVOF بر تنش پسماند و استحکام چسبندگی پوشش WC-12Co "** به استاد راهنمائی **جناب آقای دکتر سلمان نوروزی** حاصل کار اینجانب و بدون هر گونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه، مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هر گونه اعتراض در خصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن مسئولیت هر گونه پاسخگوئی به اشخاص، اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذیصلاح (اعم از اداری و قضائی) به عهده اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

مهدی جلالی عزیزپور

امضاءو تاریخ

تقدیم به :

همسر مهربان و

فرزندانم

عسل و علیرضا

سپاسگذاری و قدردانی

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکراندرش مزید نعمت. هر نفسی که فرو می‌رود ممد حیات است و چون بر می‌آید مفرح ذات. پس در هر نفسی دو نعمت موجود است و بر هر نعمت شکری واجب.

از دست و زبان که برآید که از عهده شکرش به در آید.

باران رحمت بی حسابش همه را رسیده و خوان نعمت بی دریغش همه جا کشیده، فراش باد صبا را گفته تا فرش زمردین بگسترد و دایه ابر بهاری را فرموده تا بنات نبات در مهد زمین بپرورد و درختان را به خلعت نوروزی قبای سبز ورق در بر گرفته و اطفال شاخ را به قدوم موسم ربیع کلاه شکوفه بر سر نهاده، عصاره نالی به قدرت او شهد فایق شده و تخم خرمایی به تربیتش نخل باسق گشته.

ابر و باد و مه و خورشید و فلک در کارند تاتو نانی به کف آری و به غفلت نخوری

همه از بهر تو سر گشته و فرمانبردار شرط انصاف نباشد که تو فرمان نبری

شکر و سپاس خداوندگاری که توان آموختنم بخشید. امید آنکه بتوانم خالصانه در راه او گام بردارم. بر روح پدر بزرگوار و برادر ارجمندم درود می‌فرستم و بر دستان پرمهر مادرم بوسه میزنم. از زحمات همسر صبور و دو فرزندم که کمتر وقت رسیدگی به آنها را در این چند سال داشتم و لحظه لحظه مشکلات مرا درک کردند کمال تشکر را دارم.

از استاد گرانقدر جناب آقای دکتر نوروزی که در تمامی مراحل این تحقیق، نظرات ارزشمند ایشان راهگشای مشکلات و موانع بوده اند صمیمانه تشکر می‌کنم. از جناب آقای دکتر سلیمی‌جزی و دکتر رسول محرمی به خاطر مشاوره‌های ارزنده و بی‌دریغشان سپاسگزارم. از استادان ارجمند دکتر امامی، دکتر شاکری و دکتر حسینی پور که زحمت داوری رساله را بر عهده گرفتند کمال امتنان را دارم. از استادان محترم جناب آقای دکتر بخشی و جناب آقای دکتر ربیعی که در این چند سال از محضرشان کمال استفاده را بردم کمال تشکر را دارم.

چکیده

تنش پسماند از خصوصیات ذاتی پوشش حاصل از فرآیند های پاشش حرارتی است. گسیختگی در اجزای پوشش داده شده عمدتاً ناشی از عدم چسبندگی و پیوستگی پوشش و یا جوانه زنی و رشد ترک‌های ناشی از خستگی است. با در نظر گرفتن تأثیر مثبت تنش پسماند فشاری بر رفتار خستگی و چسبندگی، لزوم انجام مطالعات تجربی در مورد نقش عوامل مؤثر بر تنش پسماند پوشش‌های حاصل از پاشش حرارتی HVOF ضروری به نظر می رسد. مطالعات انجام شده در مورد تنش پسماند در پوشش‌های حاصل از فرآیند HVOF نشان می‌دهد که به دلیل سختی فوق العاده بالای این پوشش امکان انجام بررسی تجربی مطمئن در امتداد ضخامت وجود نداشته است. از آنجا که در فرآیند HVOF انرژی جنبشی و دمای ذرات در لحظه برخورد به عنوان عامل اصلی تعیین کننده حالت تنش پوشش است لذا بررسی خصوصیات ذره در لحظه برخورد بسیار حائز اهمیت است. هدف اصلی این تحقیق، مطالعه و ارزیابی تأثیر پارامترهای فرآیند HVOF بر پارامترهای ذره، تنش پسماند و استحکام پیوند پوشش است.

به منظور طراحی و هدایت آزمایشات از روش تاگوچی با آرایه L9 استفاده شد. چهار عامل فاصله پاشش، نسبت اکسیژن به سوخت، نرخ تغذیه پودر و سرعت حرکت تفنگ در نظر گرفته شد. دو سیستم HVOF با سوخت نفت سفید و سوخت گازی بدین منظور به کار رفت. به منظور ارزیابی سرعت و دمای ذرات در فرآیند HVOF از سیستم Spraywatch استفاده شد. از ماشینکاری با تخلیه الکتریکی به منظور ایجاد سوراخ و کرنش سنجی و اندازه گیری تنش پسماند مطابق استاندارد ASTM E837 استفاده شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی به منظور بررسی مورفولوژی پودر و ریزساختار پوشش، از پراش پرتو ایکس به منظور بررسی فازهای پودر و میزان تجزیه کاربیدتنگستن در پوشش و اندازه گیری تنش پسماند استفاده شد. نتایج مطالعه حاضر بیانگر قابلیت روش غیرتماسی سوراخکاری با تخلیه الکتریکی در ارزیابی تنش پسماند در پوشش WC-Co است. از اثرگذاری ویکرز به منظور بررسی چقرمگی شکست استفاده شد.

تنش پسماند موجود در پوشش WC-۱۲Co اعمال شده به روش HVOF با سوخت جت به صورت غیر یکنواخت و به جز در عمقی از پوشش که نزدیک به سطح است عمدتاً از نوع فشاری است. همچنین در سیستم HVOF با سوخت نفت سفید، تنش فشاری در پوشش بیشتر از زمانی است که از سوخت گازی استفاده می شود. نتایج بررسی های آماری نیز نشان می‌دهد که فاصله پاشش و نسبت اکسیژن به سوخت بیشترین تأثیر را بر سرعت و دمای ذرات و به تبع آن تنش پسماند و ایجاد فازهای اکسیدی دارد. در سیستم HVOF مورد استفاده، پوشش E5 با شرایط فاصله پاشش ۲۰۰mm، نسبت اکسیژن به سوخت ۳/۵ ، نرخ تغذیه پودر ۳۸ g/min و سرعت حرکت تفنگ ۱ m/s می‌تواند بهترین خواص مکانیکی را در پوشش ایجاد نماید. در این شرایط میانگین درصد تخلخل نیز ۰/۸ درصد است. در این شرایط چقرمگی شکست و متوسط تنش پسماند به ترتیب ۲/٤٤ $MPam^{1/2}$ و ٤۳MPa- به دست آمد.

فهرست مطالب

فرم صورت‌جلسه دفاع ..... أ

تأیید صحت و اصالت نتایج ..... ب

سپاسگذاری و قدردانی ..... ت

تقدیم به ..... ث

چکیده ..... ج

فهرست مطالب ..... ح

فهرست شکل‌ها ..... ر

فهرست جداول ..... ص

فهرست علامت‌ها و اختصارها ..... ط

فصل اول

کلیات فرآیند پاشش حرارتی ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ فرآیندهای پاشش حرارتی ۲

۱-۲-۱ پاشش شعله‌ای ۳

۱-۲-۲ پاشش قوسی ٤

۱-۲-۵ پاشش با تفنگ انفجاری ٦

۱-۲-٦ پاشش شعله‌ای با سرعت بالا (HVOF) ۷

۱-۳ مراحل شکل‌گیری پوشش ۱۳

۱-٤ روش‌های تجربی اندازه‌گیری سرعت ذرات پاشش ۱۵

۱-٦ پوشش‌های سرمت کاربید تنگستن ۱۷

۱-۷ مراحل آماده سازی زیر لایه و اعمال پوشش ۲۱

۱-۸ خواص پوشش‌های ایجاد شده به روش پاشش حرارتی ۲۲

۱-۸-۱ سختی و مقاومت به سایش ۲۲
۱-۸-۲ استحکام خستگی ۲۳
۱-۸-۳ استحکام پیوستگی و چسبندگی به زیرلایه ۲٤
۱-۸-٤ تنش پسماند ۲٤
۱-۹ روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند ۲۷
۱-۹-۱ روش پراش پرتوx ۲۸
۱-۹-۲ روش تفرق نوترونی ۳۲
۱-۹-۳ روش انحناء ۳۲
۱-۹-٤ روش برداشت لایه ۳۳
۱-۹-۵ روش ایجاد سوراخ (استاندارد ASTM E837) ۳۳
۱-۱۰ چقرمگی شکست ۳۵

فصل دوم

پیشینه پژوهش (مطالعات مروری) ۳۸
۲-۱ مقدمه ۳۹
۲-۲ مطالعات انجام شده در مورد استحکام چسبندگی ۳۹
۲-۳ پژوهش های انجام شده بر تنش پسماند پوشش ها ٤۲
۲-۵ مطالعات انجام شده در مورد پارامترهای فرآیند و بهینه سازی ٤۹

فصل سوم

روش تحقیق ۵۳
۳-۲ مرحله امکان سنجی انجام آزمایشات (HVOF با سوخت جت) ۵٤
۳-۲-۱ اندازه‌گیری مدول الاستیسیته با میکروسختی سنجی و اثرگذاری با فرورونده نوپ ۵۷

۳-۲-۲ اندازه‌گیری تنش پسماند به روش انحنای پوشش و زیرلایه ۵۸
۳-۲-۳ اندازه گیری تنش پسماند به روش سوراخکاری با تخلیه الکتریکی ۵۸
۳-۲-٤ ارزیابی پوشش با پراش پرتو X ۵۹
۳-۲-۵ آزمون چسبندگی ٦۰
۳-۳ مرحله اصلی انجام آزمایشات (HVOF گازی) ٦۱
۳-۳-۱ بهینه سازی خصوصیات مکانیکی و متالورژیکی ٦٤
۳-۳-۲ ارزیابی تنش در شرایط بهینه سرعت و دما با سوراخکاری تخلیه الکتریکی ٦۷
۳-۳-۳ پراش‌سنجی پرتو X ٦۸
۳-۲-٤ ارزیابی چقرمگی شکست پوشش ٦۹
۳-۲-۵ بررسی ریزساختار ٦۹

فصل چهارم

نتایج و بحث ۷۱

٤-۱ مقدمه ۷۲
٤-۲ بررسی پوشش WC-12Co حاصل از HVOF با سوخت جت ۷۳
٤-۲-۱ آنالیز پودر و پوشش و زیرلایه ۷۳
٤-۲-۲ اندازه گیری مدول الاستیسیته ۷۷
٤-۲-۳ اندازه گیری تنش پسماند ۷۸
٤-۲-٤ مقایسه نتایج روش XRD و سوراخکاری تخلیه الکتریکی در سطح ۸۷
٤-۲-۵ مقایسه نتایج روش انحنا، XRD و سوراخکاری تخلیه الکتریکی در امتداد ضخامت ۸۸
٤-۳ بررسی پوشش WC-12Co حاصل از HVOF با سوخت گازی ۹۰
٤-۳-۱ طراحی آزمایشات ۹۰
٤-۳-۲ سرعت ذره WC-12Co در فرآیند HVOF ۹۰
٤-۳-۳ بررسی دمای ذره WC-12Co در فرآیند HVOF ۹۵
٤-۳-٤ تأثیر پارامترهای پوشش‌دهی بر تجزیه و اکسیداسیون کاربید تنگستن ۱۰۰

٤-٣-٥ اندازه گیری مدول الاستیسیته ١١٤
٤-٣-٦ اندازه گیری تنش پسماند به روش پراش پرتو ایکس ١١٧
٤-٣-٧ اندازه گیری تنش پسماند به روش پراش پرتو X در شرایط بهینه سرعت برخورد ذرات ١٢٢
٤-٣-٨ اندازه گیری تنش پسماند به روش پراش پرتو X در شرایط بهینه دمای برخورد ذرات ١٢٣
٤-٣-٩ اندازه گیری تنش پسماند به روش پراش پرتو X در پوشش E5 ..... ١٢٤
٤-٣-١١ ارزیابی چقرمگی شکست پوشش کاربید تنگستن کبالت ١٢٩
٤-٣-١٢ بررسی تخلخل به روش آنالیز تصویر ١٣٢

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات ١٣٨

٥-١ نتیجه گیری ١٣٩
٥-٢ پیشنهادات ١٤٢

مراجع ١٤٣

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱: مشعل پاشش شعله‌ای سیمی [۳] ۵

شکل ۱-۲ : تفنگ پاشش شعله‌ای قوسی [۳] ۵

شکل ۱-۳ : تفنگ پاشش پلاسمائی اتمسفری[۳] ٦

شکل ۱-٤ : پاشش با تفنگ انفجاری [۳] ۷

شکل ۱-۵ : مشعل پاشش حرارتی HVOF [۳] ۸

شکل ۱-٦ : اجزا و تجهیزات پاشش حرارتی HVOF [۳] ۸

شکل ۱-۷ : اصول طراحی چند سیستم پرکاربرد HVOF ۱۲

شکل ۱-۸ : شماتیک مکانیزم لایه نشانی در پاشش حرارتی[۲] ۱۳

شکل ۱-۹ : فرآیند سندبلاست در ایجاد موقعیت‌های مناسب قفل مکانیکی و افزایش سطح تماس[۲] ۱۳

شکل ۱-۱۰ : دو مدل ریز ساختاری ممکن در شکل گیری لایه بعد از انجماد (الف) ستونی، (ب) هم محور (دیوار آجری) [۵]. ۱٤

شکل ۱-۱۱ : نمایشگر سیستم spray watch در نمایش سرعت، دما و شار ذرات [۹]. ۱۷

شکل ۱-۱۲: الف- دیاگرام فازی WC و ب- مقطع دیاگرام سه تائی WC-Co در ۱٤۰۰°C ج- دیاگرام فازی سه تائی [۱۰]. ۲۰

شکل ۱-۱۳ : مکانیزم تولید ذرات آگلومره-زینتر کاربید تنگستن- کبالت [۱٤] ۲۰

شکل ۱-۱٤ : روش های آب بندی حفرات سطح پوشش بعد از پاشش حرارتی [۳] ۲۲

شکل ۱-۱۵ : مقاومت نسبی به سایش در کروم سخت و پوشش حاصل از پاشش حرارتی[۱٦]. ۲۲

شکل ۱-۱٦ : مقایسه سختی انواع پوشش های سرمت ایجاد شده با روشهای مختلف فرآیندهای پاشش حرارتی[۵]. ۲۳

شکل ۱-۱۷ : مکانیزم تشکیل اسپلت: الف) دمای ذره بالاتر از دمای ذوب و سرعت ذره پائین ب)دمای ذره پائین تر از دمای ذوب ۲۷

شکل ۱-۱۸ : تنش‌های ایجاد شده در پوشش در اثر فرآیندهای ترمومکانیکی پاشش ۲۷

شکل ۱-۱۹ : اندازه‌گیری کرنش به روش پراش پرتو X [۲۳] ۳۰

شکل ۱-۲۰ : کرنش سنج سه تائی rosette [۲٤] ۳۳

شکل ۱-۲۱ : تنش‌های پسماند و کرنش آزاد شده در یک سوراخ [۲٤]. ۳٤

شکل ۱-۲۲: مدل ترک پالمکویست (الف)، مدل ترک شعاعی (ب) ۳٦

شکل ۱-۲۳ : اندازه‌گیری چقرمگی با اثرگذاری ویکرز در پوشش و فصل مشترک ۳۷

شکل ۲-۱ : تنش پسماند در کاربید تنگستن- کبالت (تحلیل حرارتی) ٤۳

شکل ۲-۲ : جفت نیرو و جفت گشتاور در زیرلایه پوشش داده شده[۵۵]. ٤٤

شکل ۳-۱ : فلوچارت مراحل انجام آزمایشات در مرحله امکان‌سنجی (فرآیند HVOF با سوخت جت) ۵۵

شکل ۳-۲ : توزیع اندازه ذرات WC-12Co ۵٦

شکل ۳-۳ : اندازه گیری انحناء به وسیله دستگاه اندازه گیری مختصات ۵۸

شکل ۳-٤ : نحوه قرارگیری کرنش سنج های روست ۵۹

شکل ۳-۵ : مجموعه فیکسچر آزمون چسبندگی ٦٠
شکل ۳-٦ : فلوچارت مراحل انجام آزمون چسبندگی پوشش ٦١
شکل ۳-۷ : توزیع اندازه ذرات مورد استفاده در مرحله دوم ٦٢
شکل ۳-۸: فلوچارت مراحل انجام آزمایشات در HVOF گازی ٦٣
شکل ۳-۹ : نمایشگر سیستم SprayWatch در اندازه گیری سرعت، دما و شار ذرات اصابت کننده به زیرلایه ٦٤
شکل ۳-۱۰ : دیاگرام عملیات حرارتی آنیل کامل ٦٧
شکل ۳-۱۱ : تصویر آزمایش اندازه گیری تنش با استفاده از کرنش سنج روست و روش EDM ٦٧
شکل ۳-۱۲ : تصویر نمونه های آزمایش تنش پسماند بعد از سوراخکاری ٦٨
شکل ۳-۱۳ : دیاگرام مراحل انجام آزمایش تنش پسماند به روش پراش پرتو X ٧٠
شکل ٤-۱ : تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ذرات پودر در بزرگنمائی الف ٥٠٠×، ب ٢٠٠٠× و ج ٤٠٠٠× ٧٤
شکل ٤-۲ :تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پوشش WC-12Co در دو بزرگنمائی ٣٠٠٠ ×و ٧٠٠٠ × ٧٥
شکل ٤-۳: الگوی پراش پرتو X پودر ٧٦
شکل ٤-٤: الگوی پراش پرتو x پوشش WC-12Co ٧٦
شکل ٤-٥: توپرگرافی سطح پوشش WC-12Coدر بزرگنمائی ١٠٠٠٠ برابر ٧٧
شکل ٤-٦ : مقادیر کرنش آزاد شده(اندازه گیری شده با سه کرنش سنج) ٨٠
شکل ٤-۷ : تغییرات تنش پسماند در امتداد ضخامت پوشش ٨٠
شکل ٤-۸ : کرنش‌های اندازه‌گیری شده در نمونه آنیل شده ٨٢
شکل ٤-۹: تنش پسماند صفحه‌ای در نمونه آنیل شده ٨٢
شکل ٤-۱۰ :تصویر استریوسکوپ سوراخ ایجاد شده در نمونه آنیل شده ٨٢
شکل ٤-۱۱ : تصویر میکروسکوپی الکترونی از پوشش لایه‌برداری شده به روش الکتروشیمیائی ٨٣
شکل ٤-۱۲ :نمودار تغییرات کرنش با $Sin^2\psi$ در دو حالت $0<\psi$ و $\psi<0$ در سطح آزاد پوشش ٨٥
شکل ٤-۱۳ :نمودار تغییرات کرنش با $Sin^2\psi$ در دو حالت $0<\psi$ و $\psi<0$ در ضخامت ٥٠ میکرون ٨٥
شکل ٤-١٤ : نمودار تغییرات کرنش با $Sin^2\psi$ در دو حالت $0<\psi$ و $\psi<0$ در ضخامت ١٥٠ میکرون ٨٦
شکل ٤-١٥: نمودار تغییرات کرنش با $Sin^2\psi$ در دو حالت $0<\psi$ و $\psi<0$ در ضخامت ٢٣٠ میکرون ٨٦
شکل ٤-١٦ : نمودار تغییرات کرنش با $Sin^2\psi$ در دو حالت $0<\psi$ و $\psi<0$ در ضخامت ٣٠٠ میکرون ٨٧
شکل ٤-۱۷ :تغییرات تنش پسماند از سطح آزاد پوشش به سمت زیرلایه ٨٧
شکل ٤-۱۸ :کرنش‌های اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج روست در سطح پوشش ٨٨
شکل ٤-۱۹ :تنش پسماند در عمق ٤/٨ میکرونی پوشش ٨٨
شکل ٤-۲۰: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ذرات متخلخل پودر WC-12Co ٩١
شکل ٤-۲۱: سرعت مانیتور شده بیش از ٣٢٠٠ ذره ٩١
شکل ٤-۲۲ : توزیع سرعت ذرات در مسیر پرواز ٩٢

شکل ٤-٢٣ : اثر میانگین پارامترهای پاشش بر سرعت ذره در لحظه برخورد به زیرلایه ٩٣
شکل ٤-٢٤: دمای مانیتور شده بیش از ٤٠٠٠ ذره..... ٩٦
شکل ٤-٢٥: نمودار توزیع نرمال دمای مانیتور شده بیش از ٤٠٠٠ ذره در بیشترین دما (E3)..... ٩٧
شکل ٤-٢٦ :اثر میانگین پارامترهای پاشش بر دمای ذرات در سطوح مختلف..... ٩٨
شکل ٤-٢٧ :الگوی پراش پرتو X پودر WC-12Co..... ١٠٠
شکل ٤-٢٨ :الگوی پراش پرتو X پوشش WC-12Co در آزمایشات E1 –E10..... ١٠٤
٤-٢٩ :الگوی پراش پرتو X پوشش WC-12Co (فاز غالب WC و سایر فازها)..... ١٠٥
شکل ٤-٣٠ : اثر میانگین پارامترهای پاشش بر تجزیه فاز WC..... ١٠٨
شکل ٤-٣١ :تغییرات دما و شدت نسبی تجزیه WC در سه سطح فاصله پاشش..... ١٠٩
شکل ٤-٣٢ : تأثیر نسبت اکسیژن به سوخت بر دما و تجزیه WC در سه سطح..... ١٠٩
شکل ٤-٣٣ : تغییرات دما و شدت نسبی تجزیه WC در دو سطح نرخ تغذیه پودر..... ١١٠
شکل ٤-٣٤ : تغییرات دما و شدت نسبی تجزیه WC در دو سطح سرعت حرکت تفنگ..... ١١٠
شکل ٤-٣٥ : الف–الگوی پراش پرتو X ب- میکروگرافی میکروسکوپ الکترونی پوشش WC-12Co در آزمایش E10..... ١١٢
شکل ٤-٣٦ :الف–الگوی پراش پرتو X ب وج- میکروگرافی میکروسکوپ الکترونی روبشی پوشش WC-12Co..... ١١٣
شکل ٤-٣٧ : تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پوشش در بزرگنمائی الف) ١٠٠٠٠×ب)٢٠٠٠٠ ×..... ١١٤
شکل ٤-٣٨ : الف) آنالیز منطقه نشان داده شده با A ب) آنالیز منطقه نشان داده شده با B ج) آنالیز منطقه نشان داده شده با C..... ١١٥
شکل ٤-٣٩ :تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر میکروسختی سنجی نوپ روی پوشش در بزرگنمائی ٢٠٠×..... ١١٥
شکل ٤-٤٠ : نمودار $\boldsymbol{\epsilon - sin2\psi}$ برای آزمایش E1 تا E3..... ١١٨
شکل ٤-٤١ : نمودار $\epsilon - sin2\psi$ برای آزمایش E4 تا E6..... ١١٨
شکل ٤-٤٢ : نمودار $\epsilon - sin2\psi$ برای آزمایش E7 تا E9..... ١١٩
شکل ٤-٤٣ : اثر میانگین پارامترهای مستقل پاشش بر تنش پسماند سطح..... ١٢٠
شکل ٤-٤٤ : اثر میانگین فاصله پاشش (پارامتر مستقل) و دمای ذرات (پارامتر وابسته) بر تنش پسماند سطح..... ١٢١
شکل ٤-٤٥: اثر میانگین نسبت اکسیژن به سوخت (پارامتر مستقل) و دمای ذرات (پارامتر وابسته) بر تنش پسماند سطح..... ١٢١
شکل ٤-٤٦: نمودار $\boldsymbol{\epsilon - sin2\psi}$ در امتداد پوشش آزمون E10 تا ضخامت ٣٠٠ میکرومتر..... ١٢٣
شکل ٤-٤٧ : نمودار $\boldsymbol{\epsilon - sin2\psi}$ در پوشش آزمون E7 ضخامت ٣٠٠ میکرومتر..... ١٢٤
شکل ٤-٤٨: تنش پسماند در امتداد ضخامت دو پوشش E7 و E10..... ١٢٤
شکل ٤-٤٩: نمودار $\epsilon - sin2\psi$ در ضخامت های مختلف پوشش پس از سنگ زنی..... ١٢٥
شکل ٤-٥٠: تنش پسماند در امتداد ضخامت پوشش پس از سنگ زنی..... ١٢٥
شکل ٤-٥١: کرنش های اندازه گیری شده سطح در امتدا ضخامت پوشش E10 با کرنش سنج روست..... ١٢٦
شکل ٤-٥٢: تنش پسماند در امتداد ضخامت پوشش E10..... ١٢٧
شکل ٤-٥٣: کرنش های اندازه گیری شده سطح هر لایه پوشش E7 با کرنش سنج روست..... ١٢٨

شکل ٤-٥٤: تنش پسماند در امتداد ضخامت پوشش E7 ..... ١٢٨
شکل ٤-٥٥: کرنش های اندازه گیری شده سطح هر لایه پوشش E5 با کرنش سنج روست ١٢٩
شکل ٤-٥٦: تنش پسماند در امتداد ضخامت پوشش E5 ..... ١٢٩
شکل ٤-٥٧: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی اثر ویکرز در پوشش و فصل مشترک ١٣٠
شکل ٤-٥٨: ترک ایجاد شده توسط فرورونده ویکرز در نمونه پوشش E10 ..... ١٣١
شکل ٤-٥٩: ترک ایجاد شده توسط فرورونده ویکرز در نمونه پوشش E7 ..... ١٣١
شکل ٤-٦٠: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی ١٣٣
شکل ٤-٦١: توپوگرافی SEM تخلخل پوشش در لایه های زیر سطح آزاد (فاصله پاشش ١٧٠mm(سطح١)) ١٣٤
شکل ٤-٦٢: میکروگراف SEM پوشش WC-12Co در فاصله پاشش ١٧٠mm(سطح١) ١٣٥
شکل ٤-٦٣: توپوگرافی SEM تخلخل پوشش در لایه های زیر سطح آزاد (فاصله پاشش ٢٠٠mm(سطح٢)) ١٣٥
شکل ٤-٦٤: میکروگراف SEM پوشش WC-12Co در فاصله پاشش ٢٠٠mm(سطح٢) ١٣٦
شکل ٤-٦٥: توپوگرافی SEM تخلخل پوشش در لایه های زیر سطح آزاد (فاصله پاشش ٢٥٠mm(سطح٣)) ١٣٦
شکل ٤-٦٦: میکروگراف SEM پوشش WC-12Co در فاصله پاشش ٢٥٠mm(سطح٣) در بزرگنمائی ٤٠٠٠ × ١٣٧

فهرست جداول

جدول ۱-۱: مقایسه پارامترهای فرآیند در چهار روش متداول پاشش حرارتی[۲و۵] ۱۲

جدول ۱-۲: برخی معادلات پرکاربرد و مربوط به چقرمگی شکست از طریق آزمایش ویکرز ۳۷

جدول ۳-۱: ترکیب شیمیائی پودر مورد استفاده ۵۶

جدول ۳-۲: خواص ترموفیزیکی پودر مورد استفاده [۵۰ و۸۱] ۵۶

جدول ۳-۳: شرایط پاشش حرارتی مورد استفاده ۵۷

جدول ۳-٤: پارامترهای فرآیند EDM ۵۹

جدول ۳-۵: شرایط پاشش حرارتی مورد استفاده ۶۰

جدول ۳-۶: ترکیب شیمیائی پودر مورد استفاده ۶۲

جدول ۳-۷: ترکیب شیمیائی گاز مایع ٦٤

جدول ۳-۸: ترتیب فاکتورها و سطوح ۶۵

جدول ۳-۹: آرایه استاندارد تاگوچی L9 ۶۵

جدول ٤-۱: خواص مکانیکی زیرلایه فولادی از نوع AISI 1045 ۷۳

جدول ٤-۲: نتایج پراش سنجی پوشش برای محاسبه اندازه دانه با رابطه شرر ۷۷

جدول ٤-۳: پارامترهای مورد استفاده در رابطه انحناء ۷۸

جدول ٤-٤: پارامترهای مورد استفاده در محاسبه ثوابت کالیبراسیون ۷۹

جدول ٤-۵: مقایسه نتایج اندازه‌گیری تنش در سطح پوشش (MPa) ۸۸

جدول ٤-۶: مقایسه نتایج این مطالعه و سایر مطالعات ۸۹

جدول ٤-۷: آرایه استاندارد تاگوچی L9 برای سرعت ذرات (m/s) ۹۲

جدول ٤-۸: اثر عمده (فاکتوریلی) پارامترهای پاشش HVOF بر سرعت ذرات ۹٤

جدول ٤-۹: آنالیز واریانس نتایج سرعت ذرات ۹۵

جدول ٤-۱۰: آنالیز واریانس نتایج سرعت ذرات ۹۵

جدول ٤-۱۱: آرایه استاندارد تاگوچی L9 برای دمای ذرات (°C) ۹۷

جدول ٤-۱۲: اثر عمده پارامترهای پاشش HVOF بردمای ذرات ۹۸

جدول ٤-۱۳: آنالیز واریانس نتایج دمای ذرات ۹۹

جدول ٤-۱٤: آنالیز واریانس نتایج دمای ذرات ۱۰۰

جدول ٤-۱۵: فازهای حاضر در پوشش WC-12Co حاصل از فرآیند HVOF ۱۰۵

جدول ٤-۱۶: لیست پیک‌های جستجو شده براساس سه عنصر Co، W، C، O ۱۰۶

جدول ٤-۱۷: آرایه استاندارد تاگوچی L9 ۱۰۶

جدول ٤-۱۸: اثر عمده پارامترهای پاشش HVOF بردمای ذرات ۱۰۷

جدول ٤-۱۹: آنالیز واریانس ارزیابی تجزیه فاز WC ۱۱۱

جدول ٤-۲۰: آنالیز واریانس ارزیابی تجزیه فاز WC ۱۱۱

جدول ٤-٢١: نتایج میکرو سختی نوپ نمونه های آرایه استاندارد تاگوچی L9 ..... ١١٦
جدول ٤-٢٢: مقایسه نتایج اندازه گیری سختی و مدول الاستیسیته ١١٧
جدول ٤-٢٣: نتایج اندازه گیری تنش پسماند سطح برای ٩ موقعیت آزمایشی ١٢٠
جدول ٤-٢٤: آنالیز واریانس نتایج آزمون تنش پسماند در سطح ١٢٢
جدول ٤-٢٥: نتایج اندازه گیری چقرمگی شکست در پوشش E7 و E10 ..... ١٣١

فهرست علامت‌ها و اختصارها

نسبت سیگنال نویز	SNR	ضریب انبساط حرارتی زیرلایه	α_s
میانگین مربعات انحرافات	MSD	ضریب انبساط حرارتی پوشش	α_c
ضریب جذب خطی اشعه x	μ	دمای ذره	T_p
درصد اشعه پراش یافته	G_t	دمای اتاق	T_r
عمق نفوذ اشعه x	t	دمای پوشش	T_c
انحنا	K	مدول الاستیک پوشش	E_c
نسبت پواسون زیر لایه	ν_s	مدول الاستیک زیرلایه	E_s
تنش کوئنچ	σ_q	ضخامت پوشش	t_c
تنش پسماند در روش انحنا	σ_r	ضخامت زیرلایه	t_s
قطر متوسط دایره کرنش سنجی	D	طول موج	λ
قطر سوراخ	D_0	فاصله صفحات اتمی	D
کرنش‌های اندازه‌گیری شده با کرنش‌سنج روست	$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	زاویه براگ	θ
ضرایب کالیبراسیون	$\bar{A}\,, \bar{B}$	زاویه چرخش نمونه	ψ
تنش‌های صفحه‌ای	$\sigma_{min}\,, \sigma_{max}$	زاویه بین σ_1 و جهت تنش پسماند	ϕ
ضرایب بدون بعد در کرنش‌سنجی مدت	$\bar{a}\,, \bar{b}$	فاصله صفحات اتمی در جهت $\phi\psi$	$d_{\phi\psi}$
میکروسختی نوپ	HK	فاصله صفحات اتمی در $\psi = 0$	$d_{\phi 0}$
سختی	H	فاصله صفحات اتمی در حالت بدون تنش	d_0
چقرمگی شکست	K_{IC}	تنش اصلی در جهت ۱	σ_1
طول ترک از وسط اثر	c	تنش اصلی در جهت ۲	σ_2
بار سختی‌سنج	P	تنش پسماند در جهت ϕ	σ_ϕ
ضریب تصحیح روش انحنا	δ	نسبت پواسون	υ
تنش مؤثر	$\bar{\sigma}$	کرنش حقیقی در جهت $\phi\psi$	$\varepsilon_{\phi\psi}$
عرض در نصف ارتفاع یک	β	ضریب زاویه نمودار $d - sin^2\psi$	m'
اندازه دانه	$L\,(2\theta)$	ضریب زاویه نمودار $\varepsilon - sin^2\psi$	M

فصل اول

کلیات فرآیند پاشش حرارتی

۱-۱ مقدمه

اکثر قطعات مورد استفاده در صنایع با تکنولوژی جدید نیاز به ویژگی‌های حجمی مشخص و مجموعه‌ای از خواص سطحی متفاوت دارند. خواص حجمی نظیر استحکام کششی، چقرمگی و مقاومت به ضربه اغلب مربوط به استحکام قطعه می‌باشند در حالی که خواص سطحی مورد نیاز شامل مقاومت به خوردگی، مقاومت به سایش، اصطکاک و سختی سطح هستند. به ندرت دیده شده که مجموعه خواص حجمی و سطحی مورد نیاز را بتوان با انتخاب یک ماده تأمین کرد. به عبارت دیگر موادی که به صورت پوشش روی یک زیر لایه، اعمال می‌شود باعث می‌شود که مجموعه سیستم زیر لایه و پوشش دارای خواصی گردد که ذاتاً به صورت توأم در پوشش و زیر لایه قابل دستیابی نباشد. بدین لحاظ استفاده از عملیات سطحی برای حصول به این ویژگی‌های بعضاً متضاد، غیر قابل اجتناب خواهد بود. با توجه به افزایش نرخ تولید و کارآیی تجهیزات، پدیده‌هایی مانند سایش و خوردگی اجزاء 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 را افزایش دهند. 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 محدودیت‌هائی هستند. تمامی فرآیندهای پوشش‌دهی به دو دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

الف- فرآیندهائی که در آن‌ها انتقال مواد مستلزم انتقال اتم و نشستن آن روی سطح ماده پایه (زیرلایه) می‌باشد. مهم‌ترین این روش‌ها عبارتند از رسوب فیزیکی بخار[۱]، رسوب شیمیائی بخار [۲] و رسوب الکتریکی[۳]

ب- فرآیندهائی که در آن‌ها انتقال مواد به شکل قطرات کوچکی از ماده پوشش می‌باشد. مانند روش‌های پاشش حرارتی[٤]

۱-۲ فرآیندهای پاشش حرارتی

اولین بار پاشش حرارتی توسط ماکس اولریچ اسکوپ[٥] در زوریخ ابداع شد. در سال ۱۹۱۲ او اولین بار پاشش فلزات را به صورت سیم ارائه نمود و توسعه پاشش حرارتی آغاز شد. این فرآیندها در حالت کلی با عنوان فلزپاشی[٦] هم شناخته می‌شوند [۱].

جهت ایجاد پوشش با استفاده از فرآیندهای پاشش حرارتی به دو نوع انرژی حرارتی و جنبشی نیاز است. انرژی حرارتی جهت گداختن و ذوب ذرات مورد نیاز است و انرژی جنبشی که از سرعت حرکت ذرات

[1] Physical Vapor Deposition (PVD)
[2]- Chemical Vapor Deposition (CVD)
[3]- Electrodeposition
[4] Thermal spray
[5]- Max Ulrich Schoop
[6] Metallization