

بررسی عددی و تجربی چقرمگی شکست و مقاومت به سایش سطوح پوشش داده شده به روش پاشش حرارتی

چکیده

چقرمگی شکست به عنوان یک متغیر مهم در طراحی های مهندسی از اهمیت و جایگاه ویژه ای برخوردار است. بدین منظور برای طراحی، تعمیر و نگهداری قطعاتی که در محیط های تحت سایش، خوردگی، اکسیداسیون و حرارت قرار می گیرند، به منظور افزایش چقرمگی و مقاومت آن ها در برابر عوامل ذکر شده از پوشش های مقاوم سطحی به روش پاشش حرارتی استفاده می شود. به منظور تعیین چقرمگی قطعات پوشش داده شده و بسته به نوع بارگذاری و ماده، از روش های مختلفی استفاده می شود. در این پژوهش از استاندارد ASTM برای تعیین ابعاد و اندازه قطعات آزمایش تجربی و محاسبه K_{IC} به عنوان متغیر چقرمگی استفاده شده است. سپس با استفاده از نرم افزارهای اجزای محدود به شبیه سازی و تحلیل چقرمگی شکست قطعه پوشش داده شده پرداخته شده است و در انتها دو روش تجربی و اجزای محدود مقایسه گردیده است. همچنین انتخاب نوع پوشش و روش پوشش دهی مناسب با توجه به محیط کارکرد قطعه (خوردگی، سایش، اکسیداسیون) به منظور افزایش چقرمگی قطعات از دیگر اهداف این پژوهش است.

کلمات کلیدی

استاندارد ASTM، روش پاشش حرارتی، چقرمگی شکست، حل اجزای محدود، سایش، خوردگی

Experimental and numerical investigation of fracture toughness and abrasion resistance of thermal spray coated surfaces

Abstract

Fracture toughness is one of the most important factors in engineering designs. Hence, for designing, repair and maintenance of devices in abrasive, corrosive and oxidative environments, thermal spray method is used for coating the surfaces of devices. For determining the toughness of coated parts, and depending on the loading condition and material properties, different methods are used in industries. In the present study, ASTM standard is applied for determining the test samples conditions and also K_{IC} as the toughness parameter is investigated. Thermal spray test is used for coating the surfaces where the effect of different factors in spraying is considered. Latter, finite element analysis using the relevant software is utilized for simulating and analyzing the fracture toughness of coated samples. Finally, the results of empirical tests and finite element method are compared and the effects of coating methods and coating parameters are investigated in details for the first time.

Keywords

ASTM standard, Thermal spray method, Fracture toughness, Finite element solution, Abrasion, Corrosion.

مقدمه

مسائلی نظیر سایش و خوردگی از عوامل تأثیرگذار بر روی تولید مداوم می‌باشد و می‌تواند در برخی شرایط کاری باعث کاهش کیفیت محصولات صنعتی و یا باعث ایجاد و رشد ترک یا شکست در قطعات شود. به عبارت دیگر با توجه به پیشینه صنعت نفت و گاز، راهبردی بودن اکثر قطعات صنعت نفت و گاز، همچنین قدیمی بودن فناوری اکثر قطعات و با توجه به محدودیت تامین قطعات، باید به دنبال روش‌های جدیدی برای افزایش عمر و مقاومت قطعات به‌غیراز مرحله ساخت و طراحی بود. در صنایع، از خطوط لوله برای انتقال محصولات به دلیل هزینه پایین، امن بودن و تسریع در فرآیند انتقال استفاده می‌شود. اتصالات بکار رفته در خطوط لوله با توجه به نوع کارایی انواع مختلفی دارند، که یکی از اتصالات مهم در فرآیندهای انتقال، شیرآلات هستند. در محیط‌های دارای خوردگی، سایش، حرارت و اکسیداسیون اتصالات ممکن است کارایی مناسبی نسبت به اهداف تعیین شده نداشته باشند یا در محیط‌های پرفشار دچار شکست یا ترک گردند. و خطرات جبران‌ناپذیری به بار آورند [۱]. با توجه به موارد ذکر شده، در نظر گرفتن چقرمگی شکست (Fracture toughness) به عنوان عامل مهمی در کارایی قطعات می‌باشد. از آنجایی‌که معمولاً قطعات با استحکام بالا مقدار چقرمگی شکست پایینی دارند. با استفاده از پوشش‌های مناسب می‌توان به مواد با استحکام و چقرمگی بالایی دست‌یافت [۲-۳].

پژوهشگران مختلفی به بررسی انواع روش‌های پوشش دهی و همچنین متغیرهای موثر در این امر پرداختند. در این پژوهش‌ها تحلیل و بررسی ترک خوردگی‌ها و میزان چسبندگی پوشش‌های فلزات به تحلیل چقرمگی شکست مورد بررسی قرار گرفت [۴-۶]. خوش‌نژاد به بررسی و تعیین خواص مکانیکی پوشش‌های مقاوم حرارتی پلاسما اسپری، تحت بارگذاری‌های حرارتی به روش تست فرورونده بر روی بستر از جنس سوپر آلیاژ GTD111 پرداخت [۷]. مقدار تخلخل نمونه‌ها با استفاده از نفوذ آب بدست آمد. مقدار سختی و مدول الاستیک لایه‌های پوشش را با استفاده از

آزمون نانوفروروندگی محاسبه و همچنین مقدار سختی لایه‌های پوشش با استفاده از روش میکروسختی سنجی بدست آمد. مقایسه نتایج نشان داد که مقادیر تعیین شده همپوشانی خوبی با مقادیر تجربی دارد.

شریفی مدلسازی برخورد ذرات مذاب به لایه را مورد بررسی قرار داد [۸]. بدین منظور پوشش تحت تأثیر شکل، میزان پخش شدن ذره و یا قطره برخورد یافته می‌تواند از پیوستگی و انجام مناسب‌تر برخوردار باشد و کمتر تخلخل داشته باشد. از نشان دادن این پوشش‌ها بر روی قطعات مکانیکی در راستای تقویت خصوصیات سایش و خوردگی این قطعات استفاده می‌شود. در این پژوهش مدل سازی قطره برخورد یافته به یک سطح صلب با سرعت بالا در لحظه برخورد (یک متر بر ثانیه) در نرم افزار Ls-Dyna و در حالت برخورد عمودی با زیر لایه مدل انجام شده است. و بعد از اطمینان از صحت نتایج با توجه به مقایسه آن با نتایج مرجع، مدلسازی تعمیم داده شده است. همچنین به محاسبه ضرایبی همچون پهن شدگی، ارتفاع حداکثر قطره، فشار گذاری داخلی قطره با استفاده از تغییر در میزان ضرایب اصطکاک زیر لایه، سرعت قطره و زاویه برخورد پرداخته شد.

منصوری به ارزیابی دقت روش‌های مختلف اندازه گیری چقرمگی شکست سنگ در شرایط کشش و برش با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و مدل سازی عددی پرداخت [۹]. این پایان نامه تلاشی برای مقایسه‌ای بین روش تعیین چقرمگی مود کششی و سه روش تعیین چقرمگی شکست مود برشی سنگ‌ها بر اساس میزان حساسیت نتایج آن‌ها به تغییر اندازه نمونه‌ها و تغییر طول ترک در نمونه‌هاست. در ابتدا نمونه ترک‌دار لازم، بلور مصنوعی با مصالح گچ ساخته شد. سپس نتایج بدست آمده از روش‌های مختلف به طور جدا تجزیه و تحلیل کردند. میزان حساسیت نتایج به تغییر اندازه طول ترک مشخص شد. و سپس با نرم افزار Abaqus نحوه توزیع تنش و جابه جایی‌ها در نمونه‌های دیسکی ترک‌دار و نیم دیسکی ترک‌دار بررسی شد. رفتار شکست نمونه‌های آزمایشگاهی با نتایج مدل سازی عددی مقایسه و نتایج مطابقت بسیار خوبی نشان دادند. بر اساس نتایج این پژوهش

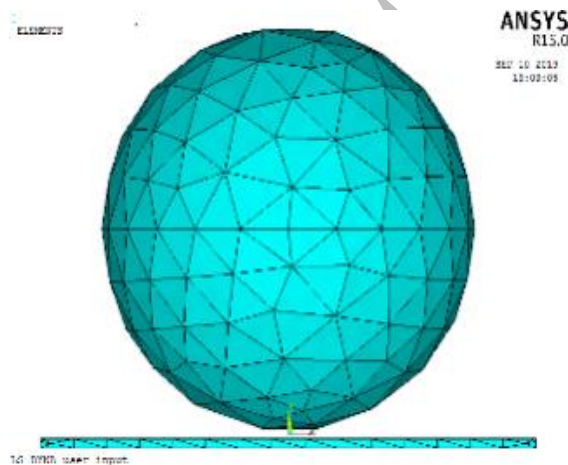
سازی قطعه و پوشش از قسمت Create-Volumes-Block-By Dimension ابعاد مورد نظر وارد و برای رسم گلوله از قسمت Create-Volumes-Sphere-Solid استفاده شده است. همچنین جهت ایجاد شبکه پرتابه و پوشش دادن گوشه‌های کروی آن از قالب tetrahedral و برای ایجاد شبکه سطح پایه و پوشش اعمال شده بر روی آن از قالب Quadrilateral استفاده شده است. همچنین جهت تعریف تماس بین گوی و سطح از

Surface to surface-Automatic LS DYNA options-Contact-Define Contact

و جهت تعریف تماس بین سطح پایه و پوشش مسیر

LS DYNA options-Contact-Define Contact-Surface to surface-TSTS

استفاده شده است. همچنین برای اینکه در آزمایش برخورد مقدار جابجایی به صورت واقعی نمایش داده شود، قطعه از چهار طرف مقید گردیده است. سپس سرعت پرتابه و زمان حل اعمال و نتایج بدست آمده است.



شکل ۱: مدل سازی انجام شده در نرم افزار انسیس

آزمایش تجربی

۱- مواد و تجهیزات

در این پژوهش از فولاد ضدزنگ ۳۰۴ استفاده شده است.

۲- آماده سازی نمونه‌ها

روش نمونه‌های دیسک برزلی با ترک مرکزی شون که یکی از روش‌های استاندارد پیشنهادی انجمن بین المللی مکانیک سنگ می‌باشد. هم در حالت کشش و هم در حالت برش مناسب‌ترین روش بوده است.

هاشمی و همکارانش به تعیین تجربی و عددی چقرمگی شکست با استفاده از اطلاعات آزمایش ضربه شاری در فولاد لوله‌های انتقال گاز با گرید APIX65 پرداختند [۱۰]. در این پژوهش از یک روش نیمه-تجربی جهت محاسبه چقرمگی شکست لوله‌های فولادی (با قطر خارجی ۱۲۱۹ میلی متر و ضخامت دیواره ۱۴/۳ میلی متر) با توجه به اطلاعات موجود در آزمایش ضربه شاری استفاده شد. از نتایج حاصله مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط چقرمگی شکست برای فولاد مورد آزمایش بدست آمد. همچنین از حل المان محدود نمونه آزمایش C(T) با استفاده از تئوری اصلاح شده گرسون جهت محاسبه میزان گشودگی نوک ترک (در حالت بحرانی) با سه ضخامت مختلف نمونه انجام گردید. که نشان دهنده مطابقت مناسب مقادیر بدست آمده برای این فولاد در دمای محیط است.

آشنای قاسمی و همکارانش به بررسی تجربی اثر دما روی پاسخ ضربه‌ای سرعت پایین صفحات آلومینیوم شیاردار تعمیر شده توسط وصله‌های کامپوزیتی چند لایه دارای لایه فلزی پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد دما تاثیر بسیار بر روی رفتار ضربه‌ای و استحکام ضربه‌ای وصله‌ها و نمونه تعمیر شده دارد به‌طوری‌که باعث کاهش ۲۰ درصدی مقاومت به ضربه در دماهای بالاتر و پایین‌تر محیط می‌شود. [۱۱]

شبیه سازی آزمایش ضربه (حل عددی)

به منظور شبیه سازی برخورد در نرم افزار اجزای محدود انسیس ماژول‌های structural و Ls Dyna فعال گردیده است. سپس با توجه به سه بعدی بودن قطعه از گروه LS-DYNA Explicit المان 3D Solid 164 انتخاب شده است. در ادامه، با توجه به اینکه قطعه پایه و پرتابه هر دو از جنس فولاد و دارای خواص یکسان هستند اما ماده پوشش دارای خواص متفاوت است، باید در انتخاب مواد دو نوع ماده انتخاب گردد که در زمان ایجاد شبکه با انتخاب نوع ماده برای هر کدام خواص ماده انتخابی اعمال گردد. به منظور شبیه



شکل ۳: نمونه‌های آماده شده جهت فرایند پوشش دهی
سپس قبل از عملیات پوشش دهی و به منظور ایجاد قفل‌شدگی مکانیکی لازم بین ذرات پاشش شده و سطح پایه، بر روی سطح نمونه‌ها باید به‌اندازه کافی زبری سطح R_a مناسب ایجاد گردد و سطح نمونه‌های مونتاژ شده را جهت فرآیند پوشش دهی متالورژیکی آماده کرد. تا فرآیندهایی نظیر نفوذ، جوش خوردگی سطوح و چسبندگی مناسب ایجاد گردند و ذرات پوشش داده‌شده درون پستی و بلندی‌های ایجاد شده قرار گیرند. در نتیجه چسبندگی مناسب ایجاد نمایند. [۱۲] برای این هدف، از دستگاه بلاست دستی استفاده شده است. یک نازل پاشش درون دستگاه وجود دارد که فشار هوای فشرده را روی ۵ تا ۶ بار قرار داده و ذرات اکسید آلومینیوم با دانه‌بندی ۲۴-۲۰ میکرون از درون نازل بر روی سطح قطعه پاشش می‌شوند. سپس سطح آماده‌سازی شده و قبل از انجام پاشش با استفاده از نازل کمپرسور هوا برای ایجاد سطح قطعه عاری از هرگونه گردوخاک باشد تمیزکاری صورت می‌گیرد



شکل ۴: دستگاه سند بلاست

به منظور انجام فرایند پاشش حرارتی و تعیین خواص مکانیکی مورد نظر، نمونه‌ها طبق استاندارد در ابعاد $۲/۵ \times ۴۸ \times ۱۴۶$ میلی متر با درصد افزایش $۹۲/۳\%$ با استفاده از دستگاه برش لیزری از ورق $۲/۵$ میلی متر تهیه شدند.



الف: نمونه‌های آزمایش



ب: برش نمونه‌های آزمایش

شکل ۲: نمونه‌های آماده شده

به جهت اینکه در عملیات پوشش دهی نمونه‌ها ثابت نگه‌داشته شوند، به فاصله ۲۴ mm در عرض نمونه و $۲/۵ \text{ mm}$ از لبه، سوراخ‌هایی ایجاد شد تا نمونه‌ها در هنگام عملیات پوشش دهی بر روی سطح به‌وسیله پرچ به میز کار ثابت گردند. در این عملیات از دستگاه فرز fp4mk.f ساخت ماشین‌سازی تبریز مستقر در آزمایشگاه مرجع دانشگاه ولی عصر رفسنجان استفاده شد.

همچنین به‌منظور کنترل فرآیند پاشش برای ثابت نگه داشتن نمونه‌ها، از پروفیل فولادی با مقطع مربع جهت پیچ کردن نمونه‌ها در محل‌های سوراخ شده استفاده شده است. بعلاوه، به‌منظور جلوگیری از افزایش مصرف پودر مخصوص پوشش دهی، نمونه‌ها در فاصله بسیاری نزدیکی از هم قرار داده شدند.

۳-فرایند پاشش

بدین منظور ابتدا برای تنظیم زاویه پوشش از یک ابزار اندازه گیری زاویه استفاده گردید. سپس از تنظیم کننده شعله پرتاب گر که طول آن ۳۶ سانتی متر است و همراه با برل دستگاه که با توجه نوع پودر متفاوت است (در این پژوهش از برل با طول ۸ سانتی متر) استفاده شده است. فاصله پرتاب گر تا قطعه متناسب با شرایط مدنظر تنظیم گردید. سپس با کد نویسی سرعت پرتاب گر و تنظیمات مربوط به پاشش و تعداد پاس های پاشش تنظیم و یک مرحله به صورت دستی نحوه پاشش بررسی شد. با تنظیم بر روی حالت خودکار درب اتاقک بسته شد و ابتدا شیر اکسیژن ورودی و ازت را باز و پودر درون دستگاه پاشش پودر (Feed Powder) ریخته شد. قبل از شروع فرآیند پاشش، تفنگ پاشش را پاک سازی و با زدن دکمه تزریق پودر و شروع فرآیند پاشش به صورت خودکار انجام می شود. تمامی شرایط نظیر نسبت سوخت، آب ورودی و خروجی به تفنگ پاشش و غیره را در لحظه می توان مشاهده و ثبت نمود. همچنین اگر دمای قطعه کار در پاس اول بیشتر از ۱۲۰ درجه سلسیوس باشد باعث ایجاد تخلخل زیاد می گردد و باید فرآیند پاشش قطع گردد. بعد از هر مرحله پاشش بلافاصله با استفاده از ترمومتر دستی دمای قطعه اندازه گیری شده و بعد از سرد شدن با استفاده از کولیس ضخامت پوشش اندازه گیری می شود. توجه شود که دمای قطعه در هنگام خنک کاری نباید کمتر از ۵۰ درجه سلسیوس شود. زیرا مقدار مصرف پودر را برای پاس های بعدی افزایش می دهد و ممکن است تخلخل ایجاد شود. میزان تخلخل مجاز متناسب با استاندارد مورد استفاده نباید بیشتر شود.

۴-نحوه و انتخاب شرایط پاشش

در این پژوهش با توجه به قابلیت دستگاه ها و تجارب عملی کاربر آزمایشگاه، شرایط آزمایش انتخاب و چهار شرط به عنوان شرایط بررسی همزمان انتخاب گردید. سپس به منظور بررسی فاصله پاشش و تأثیر زاویه پاشش به صورت منفرد بر روی میزان چقرمگی، با در نظر گرفتن شرایط یکسان و در دو زاویه مختلف و دو فاصله مختلف پاشش انجام شد [۱۳].

جدول ۱: خصوصیات پاشش

شماره آزمایش	فاصله پاشش	زاویه (درجه)	پاشش سرعت پرتاب گر
۱	۳۵	۳۰	۱/۵
۲	۳۰	۰	۱/۵
۳	۴۰	۴۰	۱/۳
۴	۲۰	۱۵	۱
۵	۲۰	۳۰	۲
۶	۳۵	۳۰	۲
۷	۲۰	۴۰	۲
۸	۲۰	۱۰	۲

در تمامی مراحل فشار هوا ۵ bar و فشار اکسیژن ۶/۸ bar در نظر گرفته شد.

ابتدا با توجه به محدودیت اندازه نمونه ها و محفظه میکروسکوپ، نمونه ها توسط دستگاه وایر کات (Wire cut) برش داده شده اند [۱۳]. به منظور آماده سازی، روش های صیقلی و حکاکی متالوگرافی برای مواد هادی الکتریسیته کافی هستند. مواد غیرهادی معمولا با لایه نازکی از کربن، طلا یا آلیاژهای طلا پوشش داده می شوند. در نمونه هایی که دارای پوشش هستند با توجه به نوع فرآیند پاشش حرارتی، تخلخل ایجاد شده در نمونه ها متفاوت است. اساسا در فرایندهای پاشش حرارتی میزان تخلخل نسبت به سایر روش های پوشش دهی بالاست. به همین دلیل در هنگام بررسی چقرمگی شکست با توجه به اینکه شکل حاصل از میکروسختی جهت بدست آوردن متغیر چقرمگی مهم است ممکن است در اثر برخورد میکرو سختی در اطراف تخلخل ها شکل مناسبی مشاهده نگردد. لذا بدین منظور ابتدا نمونه ها در آزمایشگاه متالورژی رازی با استفاده از پوشش طلا آماده سازی شده است.

جدول ۲: عناصر تشکیل دهنده پودر استلایت ۶

عنصر	Cr	W	Ni	Mn	Si	Fe	C	Mo	Co
درصد وزنی Bal	۲۹۴/۵		۳	۱	۱/۵	۳	۱/۲	۱/۵	

نتایج

بعد از آماده سازی نمونه ها و ثابت نمودن آن ها به وسیله گیره بر روی میز درون محفظه آکوستیک، فرآیند پاشش انجام شد. با توجه به مقدار حرارت و رنگ قطعه در هنگام پاشش برای جلوگیری از خمش نمونه ها در اثر حرارت زیاد جذب شده توسط نمونه ها و با توجه به شرایط مختلف در نظر گرفته شده برای آزمایش ها، نتایج مربوط به پاشش در جداول ۲ تا ۷ ارائه شده است.

جدول ۳: نتایج مربوط به شرایط آزمایش شماره ۱

تعداد پاس	دمای پاس (درجه ضخامت با افزودن هر سلسیوس)	پاس (میکرون)
۲-۱	۱۰۰	۲۵
۳	۱۶۰	۴۷
۴	۱۵۸	۶۰
۶-۵	۱۴۰	۱۳۰-۱۰۰

در آزمایش شمار ۱ با توجه به شرایط آزمایش نمونه ها در هر مرحله از حرکت ربات که از قسمت بالای قطعه شروع به حرکت و تا انتهای قطعه رسیده و به اندازه ۴ میلی متر پایین تر رفته و دوباره در جهت عکس عملیات پاشش را انجام داده به طور متوسط در هر مرحله ۳۲/۵ میکرون را در ۶ مرحله حرکت ربات که پاس کاری نامیده می شود را لایه نشانی کرده است. با توجه به نتایج تجربی کار با دستگاه پاشش حرارتی (HVOF)، در هر پاس کاری باید حدود ۲۵ میکرون پاشش شود که پس از انجام ۶ مرحله باید حدود ۱۵۰ میکرون پاشش شده باشد. دلیل این اختلاف با توجه به اینکه در ۴ پاس کاری اول به طور متوسط بین ۱۵ میکرون لایه نشانی انجام شده است. به دلیل دمای بالای قطعه و تخلخل ذاتی نمونه های پوشش در پاس کاری ۶-۵ در حدود ۷۰ میکرون لایه نشانی



شکل ۵: پوشش دهی نمونه ها با طلا

در این پژوهش از پودر با نام تجاری استلایت ۶ به عنوان یکی از آلیاژهای پایه کبالت تحت شرایط سرعت بالا به عنوان پوشش استفاده شد. پودرهای استلایت ۶ به دلیل وجود موادی همچون کروم و کبالت مقاومت به خوردگی و سایش بالایی دارند. این پودرها با توجه به نحوه استفاده در اندازه های مختلفی در بازار عرضه می شوند که محققان و صنعتگران با توجه به محیط کارکرد قطعه و شرایطی که از تحلیل ها و محاسبات مهندسی برای سازه ها و قطعات به دست می آورند، برای ایجاد خواص دلخواه از آن ها استفاده می نمایند. برخی از ویژگی های این پودر در جدول ۱ ارائه شده است. اندازه پودر در تعیین روش پوشش دهی مؤثر است. به همین منظور برای انجام فرآیند از روش اسپری سوخت و اکسیژن با سرعت زیاد HVOF که یکی از پیشرفته ترین روش های پاشش می باشد، استفاده شده است. در این روش پودر با اندازه متغیر بین ۲۰ میکرون تا ۵۳ میکرون را با سرعت ۱۲۰۰ متر بر ثانیه بر روی سطح پاشش می شود که در فرایند پاشش، ترکیب دانه بندی ریز و درشت باعث چسبندگی بهتر در این پوشش خواهد شد. پودرهای با اندازه بزرگ تر به دلیل آسیب رساندن به تفنگ دستگاه پاشش و اینکه ذرات در حین فرایند پاشش ممکن است به ۷۵٪ نقطه ذوب خود نرسند و به دلیل عدم ذوب مناسب ذرات، پوشش مناسبی به دست نیاید به تنهایی استفاده نمی شوند. که در این پژوهش از پودر با کد تولید ۴۲۰۰۶ و مقدار سختی HRC ۴۶-۴۰ با دانه بندی ۲۰ تا ۵۳ میکرون استفاده گردید.

می‌شود؛ که نشان‌دهنده‌ی این است، که با افزایش دمای قطعه مقدار لایه نشانی افزایش یافته، اما ساختارهای متخلخل ایجاد می‌نماید.

جدول ۴: نتایج مربوط به شرایط آزمایش ۲

تعداد پاس	دمای پاس (سلسیوس)	پاس (درجه ضخامت با افزودن پاس (میکرون)
۲-۱	۱۷۰	۶۵-۶۰
۴-۳	۱۷۳	۱۳۰-۹۰

به دلیل زاویه عمود پاشش بر سطح نمونه‌ها و فاصله پاشش کمتر نسبت به آزمایش شماره ۱ در ۴ پاس کاری به صورت دو مرحله هم‌زمان مقدار پاشش مشابه حالت آزمایش شماره ۱ است. که نتیجه می‌شود هر چه زاویه پاشش به حالت عمود نزدیک‌تر باشد مقدار لایه نشانی افزایش می‌یابد. و به دلیل نزدیک‌تر شدن فاصله پاشش دمای نمونه نسبت به آزمایش شماره ۱ افزایش پیدا کرده است.

جدول ۵: نتایج مربوط به شرایط آزمایش ۳

پاس پوشش	دمای پاس (سلسیوس)	پاس (درجه ضخامت با افزودن هر پاس (میکرون)
۳-۲-۱	۱۸۰	۱۱۵-۱۱۰

در آزمایش شماره ۳ به دلیل افزایش زاویه پاشش باید مقدار پاشش در پاس‌های کاری بیشتر انجام شود. اما به دلیل افزایش فاصله پاشش، دمای قطعه امکان ایجاد سه مرحله پاشش به صورت هم‌زمان را ایجاد می‌کند، که در این سه مرحله مقدار پاشش در محدوده دو آزمایش شماره ۱ و ۲ است. که نشان‌دهنده تأثیر سرعت پرتاب گر بر فرآیندهای پاشش حرارتی است. با توجه به این نکته که هزینه کار کردن با دستگاه‌های پاشش حرارتی به نوع سوخت، قیمت بالای دستگاه، نیروی انسانی، هدر رفت پودر و ... بستگی دارد، زمان انجام پاشش حرارت در این آزمایش از سایر روش‌ها کمتر است.

جدول ۶: نتایج مربوط به شرایط آزمایش ۴

تعداد پاس	دمای پاس (سلسیوس)	پاس (درجه ضخامت با افزودن هر پاس (میکرون)
۱	۱۳۰	۴۰
۳-۲	۲۲۰	۱۰۰-۹۰

در آزمایش شماره ۴ به دلیل فاصله بسیار کم پاشش نسبت به سایر روش‌ها در اولین پاس‌کاری دمای نمونه به بالاترین حد خود رسیده و امکان استفاده از پاس‌های بعدی به دلیل تغییر شکل دادن ورق نبود. به همین دلیل بعد از سرد شدن تا محدوده دمای ۴۰ درجه سلسیوس، دوباره فرآیند پاشش انجام‌شده و به همین دلیل دمای نمونه بعد از اتمام پاس ۳ به حدود ۲۲۰ درجه سلسیوس رسیده است. این حالت از نمونه آزمایش شماره ۳ که هر ۳ پاس به صورت هم‌زمان انجام‌شده نیز بیشتر است.

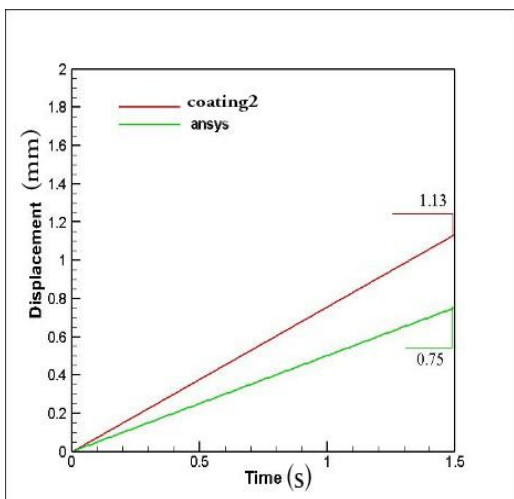
جدول ۷: نتایج مربوط به شرایط آزمایش ۵-۶

تعداد پاس	دمای پاس	ضخامت پوشش
زاویه ۱	۲۴۳	۵۲
زاویه ۲	۳۰۰	۷۳

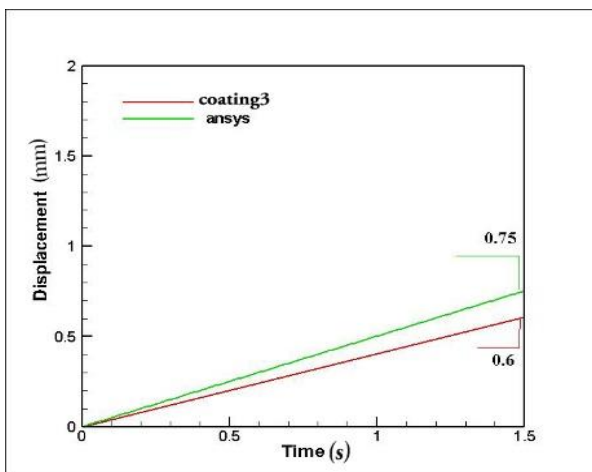
این آزمایش در شرایط کاملاً یکسان و با دو زاویه متفاوت انجام شده است و نشان‌دهنده این است که با اعمال ۳ پاس بر روی هر کدام از نمونه‌ها به دلیل زاویه کمتر در نمونه آزمایش با زاویه شماره ۲ مقدار دما بسیار بیشتر از نمونه شماره ۱ است.

جدول ۸: نتایج مربوط به شرایط آزمایش ۷-۸

فواصل مختلف تعداد پاس	دمای پاس	ضخامت پوشش
فاصله ۱	۲۰۰	۶۵
فاصله ۲	۲۷۸/۵	۱۰۰



شکل ۷: آزمایش ضربه نمونه ۲، فاصله پاشش ۳۵cm، زاویه پاشش صفر درجه، سرعت تفنگ پاشش ۱/۵

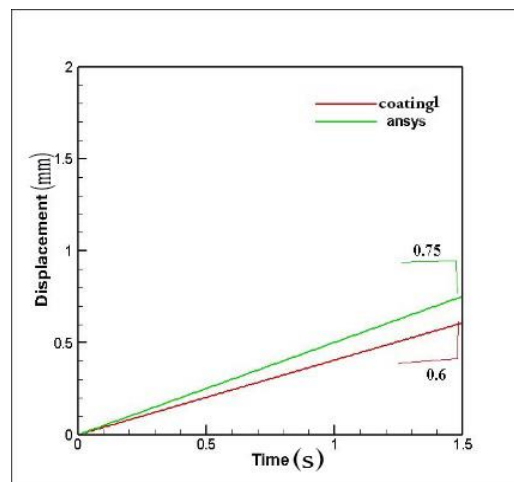


شکل ۸: آزمایش ضربه نمونه ۳، فاصله پاشش ۴۰cm، زاویه پاشش ۴۰ درجه، سرعت تفنگ پاشش ۱/۳

این آزمایش در شرایط کاملاً یکسان با دو فاصله متفاوت با اعمال ۳ پاس کاری انجام شد. که نشان دهنده افزایش دما در نمونه آزمایش با فاصله کمتر است. همچنین مقدار لایه نشانی نیز با کمتر شدن فاصله افزایش یافته است. اما به دلیل افزایش دما، سطوح متخلخل تری نسبت به نمونه شماره ۱ ایجاد می‌نماید. که در محیط‌های خورنده مواد درون حفره‌ها قرار گرفته و کارایی قطعه و میزان عمر پوشش را کاهش می‌دهد.

آزمایش ضربه در ارتفاع ۱متر

از دستگاه تست سقوط وزنه موجود در آزمایشگاه مواد مرکب دانشگاه ولی عصر رفسنجان برای انجام این آزمایش استفاده گردید. عملکرد این دستگاه بر پایه دو حسگر جابجایی و نیروسنج تماسی است. که حسگر نیروسنج تماسی از جنس پیزو الکتریک و امکان تحمل ضربه تا ۱۲۰۰ کیلو نیوتن را دارد. همچنین سنسور جابجایی نیز قابلیت ذخیره ۸۰۰ داده را در حین انجام تست دارد. که با توجه به نوع فیکسچرهای دستگاه می‌توان از قطعات در ابعاد ۱۰*۱۰ تا ۲۵*۲۵ با شرایط مرزی چهار طرف گیردار استفاده نمود.



شکل ۶: آزمایش ضربه نمونه ۱، فاصله پاشش ۳۵cm، زاویه پاشش ۳۰، سرعت تفنگ پاشش ۱/۵

مقدار سختی میانگین به عنوان سختی پوشش به دست آمده است.

جدول ۸: نتایج آزمایش سختی در بررسی شرایط پاشش به صورت هم زمان

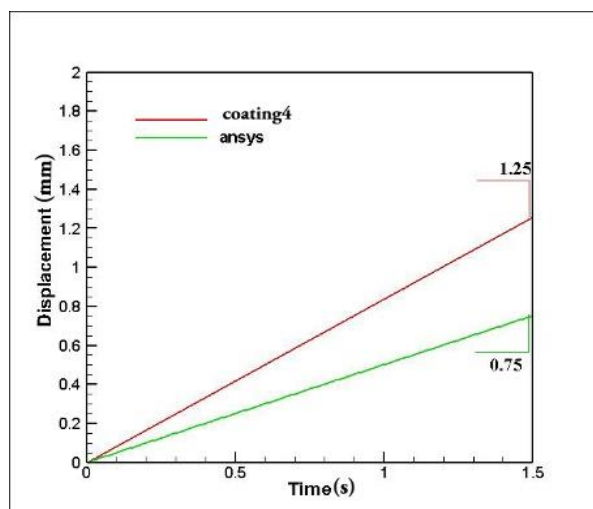
شماره آزمایش	عدد سختی در نقاط سختی اندازه گیری شده (HV) میانگین	۷۱۰	۷۰۸	۷۱۲	۷۱۰
آزمایش ۱					
آزمایش ۲	۶۹۰	۷۰۳	۷۱۱	۷۰۱	
آزمایش ۳	۸۵۶	۸۱۶	۸۰۷	۸۲۶	
آزمایش ۴	۸۰۸	۸۵۹	۷۸۰	۷۸۲	

نتایج آزمایش سختی بر روی پوشش ها نشان می دهد، که نمونه با شرایط پاشش شماره ۳ بیشتر مقدار سختی و نمونه با شرایط پاشش شماره ۲ کمترین مقدار سختی را دارد. که نشان دهنده این است با افزایش مقدار زاویه پاشش و فاصله پاشش و کاهش سرعت تفنگ پاشش، نمونه های با سختی بیشتر می توان به دست آورد. همچنین با مقایسه آزمایش با شرایط پاشش ۱ و ۴ نتیجه می شود که، سرعت تفنگ انفجاری مهم ترین عامل افزایش سختی است.

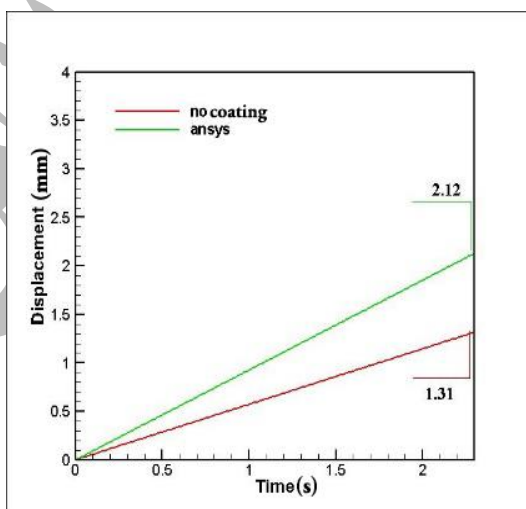
جدول ۹: نتایج سختی برای نمونه با شرایط یکسان و فواصل مختلف

نام آزمایش	عدد سختی در نقاط سختی اندازه گیری شده (HV) میانگین	۸۰۳	۸۲۵	۸۰۷	۷۷۸
فاصله پاشش ۳۵ cm					
فاصله پاشش ۲۵ cm	۶۷۳	۷۰۵	۶۹۵	۶۹۱	

از نتایج بالا نتیجه می شود در شرایط یکسان با افزایش فاصله پاشش مقدار سختی پوشش افزایش یافته است از آنجایی که در فرآیندهای پاشش حرارتی دمای جذب شده



شکل ۹: آزمایش ضربه نمونه ۴، فاصله پاشش ۲۰، زاویه پاشش ۱۵ درجه، سرعت تفنگ پاشش ۱ cm

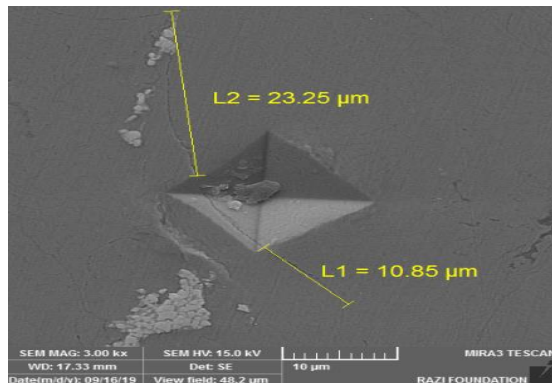


شکل ۱۰: آزمایش نمونه بدون پوشش ۱

آزمایش سختی

آزمایش سختی سنجی به منظور بررسی سختی پوشش های اعمال شده در شرایط دمایی ۲۵ درجه سلسیوس و رطوبت ۴۱٪ انجام شد. به منظور استخراج دقیق مقدار سختی مطابق با استاندارد بر روی هر نمونه در ۳ نقطه با فاصله ذکر شده در استاندارد مقادیر سختی به دست آمده سپس برای هر نمونه

جهت بدست آوردن متغیر طول ترک (C) از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده و همچنین جهت مشخص نمودن مقدار دقیق طول ترک از نرم افزار دیجی مایزر بر پایه پردازش تصویر استفاده گردیده است.



شکل ۱۱: ترک های سطحی نمونه ها

یکی از علل عدم کارایی مناسب پوشش ها وجود تخلخل در نمونه است. همان طور که در شکل ۱۱ مشخص است میزان تخلخل نمونه بسیار زیاد است از طرف دیگر ذوب ناقص ذرات نیز باعث ایجاد پوشش های متخلخل می گردد و این تخلخل ها در هنگام فعالیت قطعات محل قرارگیری مواد خورنده هستند و باعث کاهش عمر قطعات می گردند.

جدول ۱۱: چقرمگی شکست

شماره	L	A	C	E	H	K_c
آزمایش						
۱	۵/۴۷۲	۸/۵۸	۱۴/۰۵	۲۱۳	۷۱۰	۱۶۳
۲	۵/۶۶	۸/۱۵	۱۳/۸۱	۲۱۳	۷۰۱	۱۶۸
۳	۵/۳۰۵	۵/۷۲	۱۱/۰۲	۲۱۳	۸۲۶	۲۱۷
۴	۴/۸۸۱	۷/۷۷	۱۲/۶۵	۲۱۳	۷۸۲	۱۸۱

توسط سطح زیر لایه در میزان تخلخل و سختی سطح بسیار مؤثر است. هر چه فاصله پاشش کمتر باشد میزان دمای جذب شده توسط قطعه افزایش می یابد. در نتیجه مقدار سختی کمتری نسبت به حالت با فاصله بیشتر دارد.

جدول ۱۰: نتایج پاشش در زاویه های متفاوت

نام آزمایش	عدد سختی در نقاط سختی اندازه گیری شده (HV)	میانگین
زاویه پاشش ۴۰ درجه	۸۴۰	۸۱۹
زاویه پاشش ۱۰ درجه	۷۶۴	۷۶۴

از مقایسه نتایج پاشش در زاویه های متفاوت نتیجه می شود، با افزایش زاویه پاشش مقدار سختی پوشش نیز افزایش می یابد. هر چه زاویه پاشش بیشتر باشد ضخامت پوشش اعمال شده کمتر می شود و لایه نشانی در پاس های کاری بیشتر انجام می شود.

نتایج چقرمگی شکست

با استفاده از نتایج میکرو سختی و در اختیار داشتن طول ترک، با کمک رابطه زیر مقادیر چقرمگی شکست برای نمونه ها تعیین می شود [۱۴].

$$K_c = 0.016 \left[\frac{E}{H} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{P}{C^{\frac{3}{2}}} \right] \quad \text{رابطه (۱)}$$

L	مقدار طول ترک از انتهای نقطه اثر
A	مرکز فرورونده تا انتهای نقطه اثر
C	فاصله مرکز فرورونده تا انتهای ترک
E	مدول الاستیسته پوشش
H	سختی پوشش

توجه به افزایش مراحل پاشش بیشترین مقدار است و مقدار چقرمگی شکست ۲۱۷ در این حالت به دست آمده است.

جدول ۱۲: تاثیر فاصله پاشش بر چقرمگی شکست

فاصله پاشش	L	A	C	E	H	K _c
۳۵	۷/۲۳۴	۱۳/۱۳۹۵/۹۰۵	۲۱۳	۸۰۳	۱۶۹	
۲۵	۴/۶۳۹	۵/۳۳۷	۹/۹۷۶	۲۱۳	۶۹۱	۱۸۲

جدول ۱۳: تاثیر زاویه پاشش بر چقرمگی شکست

زاویه پاشش	L	A	C	E	H	K _c
۴۰	۷/۸۳	۶/۹۳۱	۱۴/۷۶۱	۲۱۳	۸۲۹	۱۳۹
۱۰	۱۰/۱۳۳	۹/۵۲۷	۱۹/۶۶	۲۱۳	۷۵۲	۹۸

نتیجه گیری

در این پژوهش بررسی عوامل مختلف بر کیفیت پوشش سطح در روش پاشش حرارتی و تاثیر آنها بر مقدار چقرمگی سطح بررسی شد. در پایان نتایج زیر قابل بیان است:

۱- نتایج آزمایش ضربه نشان می دهد با توجه به اینکه از این پوشش ها در برابر عواملی همچون خوردگی، سایش استفاده شده است، برای قطعاتی که در محیط های تحت ضربه قرار دارند و نیاز به پوشش دهی دارند توجه به نوع پوشش و شرایط پوشش دهی می تواند مقاومت به ضربه های بهینه و در نتیجه افزایش عمر پوشش را به همراه داشته باشد.

۲- نتیجه می شود با افزایش زاویه پاشش مقدار چقرمگی شکست ۴۲٪ افزایش می یابد.

۳- با افزایش فاصله پاشش مقدار چقرمگی شکست ۸٪ کاهش می یابد.

۴- در حالت بیشترین مقدار فاصله ۴۰ سانتی متر و زاویه پاشش ۴۰ درجه میزان مصرف پودر و زمان کار با دستگاه با

واژه نامه	
Fracture toughness	چقرمگی شکست
Finite element	اجزای محدود
Valves	شیر آلات
Coating adhesion	چسبندگی پوشش
Plasma spray	اسپری پلاسما
Penetration test	تست فرو رونده
Youngs moduls	مدول الاستیک
Charpy impact test	آزمون ضربه شاریپی
Blast machine	دستگاه بلاست
Feed powder	دستگاه پاشش پودر
Thermometer	ترمومتر
Wire cut	دستگاه وایر کات
Acoustic enclosure	محفظه آکوستیک
Fixture	فیکسچر
High velocity oxy-fuel spraying HVOF	اسپری سوخت و اکسیژن با سرعت زیاد

References

- [1] "Drilling Industry Magazine," No 12 and 13, p. 164, 2017.
- [2] Saini, H. D. Kumar and V.N. Shukla, "Hot Corrosion behaviour of Nanostructured Cermet based Coatings Deposited by Different Thermal Spray Techniques: A Review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 4, no. 2, 2017.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221478531730055X>
- [3] J.A. Joyce, D. Wells, B. Stoltz, L. Shelton, P. Jacobs and R.E. Link, "Evaluating the Fracture Toughness of Layered Pressure Vessel Steels," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 207, 2018.
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013794418309810>
- [4] F. Fanicchia, X. Maeder, J. Ast, A.A. Taylor, Y. Guo, M.N. Polyakov, J. Michler and D.A. Axinte "Residual stress and adhesion of thermal spray coatings: Microscopic view by solidification and crystallisation analysis in the epitaxial CoNiCrAlY single splat," *Materials & Design*, vol. 153, 2018.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264127518303101>
- [5] P. Lin, J. Guan, H. Peng and J. Shi, "Horizontal cracking and crack repair analysis of a super high arch dam based on fracture toughness," *Engineering Failure Analysis*, vol. 97, 2019.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630717301577>
- [6] H.F. Li, Q.Q. Duan, P. Zhang, X.H. Zhou, B. Wang and Z.F. Zhang "The quantitative relationship between fracture toughness and impact toughness in high-strength steels," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 211, 2019.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013794419300116>
- [7] E. PourSaidi and M. KhoshNejhad, "Investigation and determination of changes in mechanical properties of plasma spray heat-resistant coatings under thermal loading using the indentation test method," M.Sc. Thesis, Zanjan University, Iran, 2017.
<https://elmnet.ir/doc/11158756-1181>
- [8] M.E. Alami, S. Feli and Gh. Sarifi, "Modeling the impact of molten particles on the substrate," M.Sc. Thesis, Razi University, Iran, 2012.
<https://elmnet.ir/doc/10518592-14213>
- [9] S. Mansouri, S. Mirzaei, M. Shariati and N. Ziari, "Evaluation of the accuracy of different methods for measuring rock fracture toughness in tension and shear conditions using laboratory studies and numerical modeling," M.Sc. Thesis, Shahrood University, Iran, 2013.
<https://shahroodut.ac.ir/fa/thesis/thesis.php?thid=TN226>
- [10] S.H. Hashemi, M. KimiaBakhsh and M. Rezai Yekta, "Experimental and numerical determination of fracture toughness using Charpy impact test data in API X65 grade gas transmission pipe steel," ISME 2011.
https://mej.aut.ac.ir/article_316.html
- [11] F. Ashna Ghasemi, F. Ali Gholi Zade and A. Poor Kamali, "Experimental Investigation of the Effect of Temperature on the Low Velocity Impact Response of Grooved Aluminum Plates Repaired by Metal Laminated Composite Adhesives (FML)," *Modares Mechanical Engineering Journal*, vol. 14, no. 9, 2014.
<https://www.sid.ir/paper/177778/fa>
- [12] R. Ahadi, H. Harati Zadeh and M. Mohammadi, "Investigation of mechanical properties and abrasion resistance of titanium-based ceramic nanocoatings," M.Sc. Thesis, Shahrood University, Iran, 2019.
<https://shahroodut.ac.ir/fa/thesis/thesis.php?thid=QC483>

[13] S. Matthews, and L.M. Berger, "Inter-diffusion between thermally sprayed Cr₃C₂-NiCr coatings and an Alloy 625 substrate during long-term exposure at 500 °C, 700 °C and 900 °C," *Journal of Alloys and Compounds*, vol 770. 2019.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838818330718>

[14] S. Nouroozi, R. Moharrami, H.R. Salimi and M. Jalali, " , " M.Sc. Thesis, Nooshirvani Babol Univesrity, Iran, 2013.

<https://elmnet.ir/doc/10639348-83198>

مجله دانش