

بررسی و مطالعه میزان چسبندگی پوشش فولاد زنگ‌نزن L ۳۱۶ ایجاد شده بر روی فولاد ۱/۱۲۴۸ به دو روش پاشش شعله‌ای و الکترواسپارک (ESD)

مصطفی خدیوی^۱، علی شفیعی^۲، رضا ابراهیمی^۳، مجتبی خلقی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد

۴- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان

Khadivi@iaun.ac.ir

چکیده

در این پژوهش میزان استحکام چسبندگی پوشش‌های فولاد زنگ‌نزن L ۳۱۶ ایجاد شده به روش‌های پاشش شعله‌ای و الکترواسپارک (ESD) بر روی سطح فولاد ۱/۱۲۴۸ مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. پس از پوشش دادن نمونه‌های متعدد توسط دو روش یاد شده برای اندازه‌گیری استحکام چسبندگی از آزمون استحکام چسبندگی به شماره استاندارد ASTM C 633-01 و آزمون خمش به شماره استاندارد ASTM B 489-85 استفاده گردید. همچنین به منظور ارزیابی تغییرات ایجاد شده در پوشش‌های پاشش شعله‌ای و الکترواسپارک از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده گردید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استحکام چسبندگی پوشش‌های ایجاد شده توسط روش الکترواسپارک بسیار بالاتر از استحکام چسبندگی پوشش‌های پاشش شعله‌ای است. بالا بودن استحکام چسبندگی پوشش‌های الکترواسپارک به علت ذوب و یکپارچه شدن پوشش به زیر لایه، نفوذ عناصر آلیاژی بین زیر لایه- پوشش و ایجاد ساختاری بدون جدایش در فصل مشترک است. در حالی که در پوشش‌های حاصل از پاشش شعله‌ای عواملی نظیر ذرات ذوب جزئی شده، فازهای اکسیدی و تخلخل، باعث کاهش استحکام چسبندگی پوشش شده است.

واژه‌های کلیدی:

پاشش شعله‌ای، الکترواسپارک (ESD)، استحکام چسبندگی پوشش.

۱- مقدمه

پوشش یا استحکام چسبندگی می‌نامند [۲]. کنده شدن یا خرد شدن پوشش از سطح زیر لایه در حین استفاده، یکی از اساسی‌ترین عیوب و مشکلات پوشش‌ها به‌شمار می‌رود. این امر می‌تواند منجر به ایجاد ضرر و زیان‌های اقتصادی گردد. به‌طور

چسبندگی یکی از مهم‌ترین مشخصات برای تعیین کیفیت پوشش به‌شمار می‌رود [۱]. میزان توانایی پوشش برای باقی ماندن روی زیر لایه، تحت شرایط کاری خواسته شده را چسبندگی

زیادی انرژی در بر دارد که باعث کند شدن ذرات از سطح آند (الکتروود) و برخورد شدید به سطح کاتد (زمینه) می‌گردد. بدین ترتیب پوشش بر سطح فلز ایجاد می‌گردد [۷].

به‌طور کلی تحقیقات و مطالعات متعددی در زمینه بررسی چسبندگی پوشش‌های پاشش حرارتی انجام شده‌است. تعدادی از محققین نقش ناهمواری سطح قطعات پایه بر میزان استحکام چسبندگی پوشش پاشش حرارتی را بررسی نموده‌اند. نتایج آنها نشان می‌دهد که افزایش ناهمواری سطوح موجب افزایش استحکام چسبندگی می‌گردد [۸ و ۹]. همچنین محققین دیگری اثر استفاده از لایه پیوندی بر میزان استحکام چسبندگی پوشش پاشش حرارتی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که کارگیری لایه میانی باعث تطابق بیشتر بین پوشش و زیر لایه شده و چسبندگی پوشش به‌زیر لایه را نیز افزایش می‌دهد [۱۰]. از آنجایی که چسبندگی یکی از مهم‌ترین پارامترها برای تعیین کیفیت پوشش‌ها به‌شمار می‌رود و همچنین در صورتی که قطعه پوشش داده شده در هنگام استفاده نیاز به استحکام چسبندگی بالا داشته باشد، طبیعتاً بایستی از روشی برای پوشش‌دهی استفاده شود که بتواند استحکام چسبندگی لازم را تأمین نماید. لذا در این پژوهش، مطالعه و مقایسه میزان استحکام چسبندگی یک نوع پوشش ایجاد شده (فولاد زنگ‌زن L ۳۱۶) توسط دو روش مختلف پوشش‌دهی (روش‌های پاشش شعله‌ای و الکترواسپارک) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق به‌منظور اعمال پوشش پاشش شعله‌ای از پودر فولاد زنگ‌زن L ۳۱۶ و برای اعمال پوشش الکترواسپارک از الکتروود فولاد زنگ‌زن L ۳۱۶ استفاده گردید. در جدول (۱)، ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌زن L ۳۱۶ آورده شده‌است. سپس با استفاده از فرآیندهای پاشش شعله‌ای و الکترواسپارک (ESD) پوشش‌هایی بر روی زیر لایه‌هایی از جنس فولاد ۱/۱۲۴۸ تهیه گردید. نمونه‌های پاشش شعله‌ای قبل از پاشش

کلی استحکام چسبندگی پوشش به‌زیر لایه وابسته به مکانیزم‌های متالورژیکی، مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی است [۲]. نیروهای اتصال اتمی دارای استحکام پیوند گوناگونی می‌باشند. نیروهای اتصال بین اتمی از نوع واندروالس دارای کمترین میزان استحکام پیوند می‌باشند. بعد از آن پیوندهای اتصال هیدروژنی، فلزی و یونی قرار گرفته، در حالی که بالاترین میزان استحکام پیوند، مربوط به پیوند کووالانسی می‌باشد.

استحکام چسبندگی پوشش‌ها بستگی به پارامترهای متعددی از جمله روش پوشش‌دهی، جنس پوشش، جنس زیر لایه، شرایط اعمال پوشش و ... دارد. تعدادی از روش‌های پوشش‌دهی متداول عبارتند از: پاشش حرارتی، جوشکاری سطحی، آبکاری و جرم‌گذاری با مواد اپوکسی. هر کدام از روش‌های یاد شده دارای استحکام چسبندگی خاصی می‌باشند. در فرآیندهای پاشش حرارتی ابتدا ماده مصرفی پوشش به‌تفنگ پاشش تغذیه می‌شود، سپس با صرف انرژی به‌صورت ذرات مذاب یا نیمه مذاب درآمده و سپس با سرعت در محدوده بین ۳۰-۴۰۰ m/s به‌زیر لایه برخورد می‌کنند. این ذرات در اثر برخورد پهن شده و با سرعتی در حد کسری از تائیه منجمد می‌شوند. در نتیجه تماس نزدیکی بین ذرات و سطح زیر لایه برقرار می‌شود [۳].

نوع پیوند ایجاد شده به‌عوامل متعددی نظیر دما، انرژی جنبشی ذرات، جنس پوشش، جنس زیر لایه، میزان زبری سطح و ... بستگی دارد [۵-۳]. پوشش ایجاد شده ویژگی‌های سطح را بهبود می‌بخشد ولی بر خواص و ساختار قطعه تأثیر چندانی نمی‌گذارد.

الکترواسپارک (ESD) یک فرآیند میکرو جوشکاری است، که مواد روی سطح فلزات توسط جرقه الکتریکی رسوب داده می‌شوند [۶]. در این روش لایه پوششی، مخلوطی از الکتروود مصرفی، زیر لایه و عناصر موجود اتمسفر فرآیند می‌باشد. برای انجام عملیات لایه‌گذاری با ESD، بایستی تخلیه الکتریکی اتفاق افتد به‌عبارتی دی‌الکتریک (گاز) میان دو الکتروود بایستی، به‌یون‌های مثبت و الکترون‌ها، تجزیه شود تا بتواند جریان الکتریکی را از خود عبور دهد. این تخلیه به‌همراه خود مقدر

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن L ۳۱۶ استفاده شده برای پوشش و اندازه دانه آن.

اندازه دانه	N	Ni	Mo	Cr	P	Mn	Si	C
۲۰-۴۵ μm	<۰/۱۱	۱۰-۱۳	۲-۲/۵	۱۶/۵-۱۸/۵	۰/۰۴۵	۲	۱	<۰/۰۳۰

جدول (۲): پارامترهای پاششی جهت اعمال پوشش فولاد زنگ‌نزن L ۳۱۶.

فاصله پاشش	فشار اکسیژن	فشار استیلن	اکسیژن / استیلن
۱۶-۲۰ cm	۲ atm	۱ atm	۱/۳

جدول (۳)، میزان استحکام چسبندگی پوشش‌های پاشش شعله‌ای و الکترواسپارک را نشان می‌دهد. همانگونه که نتایج به دست آمده نشان می‌دهد استحکام چسبندگی پوشش ایجاد شده توسط روش الکترواسپارک بسیار بالاتر از استحکام چسبندگی پوشش‌های پاشش شعله‌ای است. در تمام پوشش‌های الکترواسپارک جدایش در اتصال چسب رخ داده است. به عبارت دیگر استحکام چسبندگی پوشش به زیر لایه بیشتر از حد استحکام کششی چسب است. این در حالی است که استحکام چسب برابر ۵۰ MPa می‌باشد. اما در تمام پوشش‌های پاشش شعله‌ای مورد آزمایش، گسیختگی در فصل مشترک پوشش زیر لایه صورت گرفت. در نتیجه می‌توان گفت که تخریب در این پوشش‌ها ناشی از ضعیف بودن باند اتصال و میزان چسبندگی می‌باشد. شکل (۳)، سطح مقطع جدایش پوشش پاشش شعله‌ای و الکترواسپارک را در آزمون استحکام چسبندگی نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، در روش پاشش شعله‌ای شکست از داخل پوشش اتفاق افتاده و سطح شکست به صورت ورقه‌ای است. نتیجه آزمون چسبندگی حاصل از پاشش شعله‌ای، استحکام گسیختگی در محدوده ۲۴ MPa تا ۲۰ را نشان می‌دهد. بالا بودن میزان چسبندگی پوشش حاصل از الکترواسپارک به علت ذوب، یکپارچه شدن و نفوذ عناصر آلیاژی پوشش به زیر لایه در فصل مشترک است.

جهت ایجاد زبری مناسب در سطح زیر لایه، ماسه پاشی و سطح آن با استن شسته شد. پارامترهای پاششی در جدول (۲) آورده شده است. جهت بررسی استحکام چسبندگی از آزمون استحکام چسبندگی به شماره استاندارد ASTM C 633-01 [۱۱] و آزمون خمش به شماره استاندارد ASTM B 489-85 [۱۲] استفاده گردید. برای تعیین استحکام چسبندگی پوشش از چسب اپوکسی تک‌جزیی برای چسباندن نمونه‌های پوششی به نمونه‌های خام استفاده شد (مطابق شکل ۱). برای اینکه چسب اپوکسی بتواند استحکام لازم را داشته باشد نمونه‌های تهیه شده در دمای ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار داده شدند. سپس با استفاده از دستگاه کشش با سرعت ۱ mm/min تحت نیروی کششی قرار گرفتند. در آزمون خمش، تسمه باریکی از ماده پوشش داده شده، حول یک ماندرل خم می‌شود (مطابق شکل ۲). به گونه‌ای که دو لبه آن به موازات ماندرل درآید. همچنین به منظور ارزیابی تغییرات ایجاد شده در پوشش‌های پاشش شعله‌ای و الکترواسپارک از دستگاه‌های پراش پرتو ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده گردید.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- استحکام چسبندگی پوشش

جدول (۳): نتایج تست چسبندگی.

ملاحظات	استحکام چسبندگی	نمونه	روش پوشش دهی
-	۱۹/۴ MPa	۱	پاشش شعله‌ای
-	۲۳/۱ MPa	۲	
-	۲۲/۷ MPa	۳	
-	۲۴/۴ MPa	۴	
-	۲۲/۵ MPa	۵	
جدایش در اتصال چسب	> ۵۰ MPa	۱	ESD
جدایش در اتصال چسب	> ۵۰ MPa	۲	
جدایش در اتصال چسب	> ۵۰ MPa	۳	
جدایش در اتصال چسب	> ۵۰ MPa	۴	
جدایش در اتصال چسب	> ۵۰ MPa	۵	

جدول (۴): نتایج تست خمش.

درصد ازدیاد طول	ملاحظات	ضخامت نمونه با پوشش (میلی متر)	ضخامت ماندرل (میلی متر)	روش پوشش دهی
۶/۵۴	ترکی مشاهده نشد	۲/۱	۳۰	ESD
۵۱/۹	ترکی مشاهده نشد	۲/۱	۲۰	
۱۷/۳۵	ترکی مشاهده نشد	۲/۱	۱۰	
۲۵/۹۲	ترکی مشاهده نشد	۲/۱	۶	
-	در ماندرل با ضخامت ۳۰ میلی متر دچار ترک خوردگی شد	۲/۴	۳۰	پاشش شعله‌ای

دچار ترک خوردگی در پوشش گردید. شکل (۴)، ترک‌های ایجاد شده در تست خمش در نمونه‌های پاشش شعله‌ای را نشان می‌دهد. لذا می‌توان گفت که انعطاف‌پذیری پوشش الکترواسپارک (ESD) بسیار بالاتر از پوشش‌های پاشش شعله‌ای است.

۳-۲- ساختار و آنالیز پوشش‌ها

از مقایسه تصاویر میکروسکوپی شکل (۵)، حاصل از مقطع پوشش‌ها دیده شد که در پوشش‌های ایجاد شده توسط پاشش شعله‌ای، ساختار، تقریباً شکل لایه‌ای به خود گرفته است.

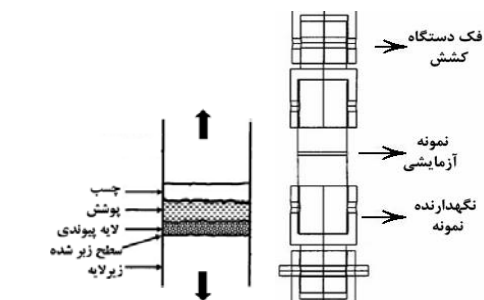
نتایج تست خمش در جدول (۴)، آمده است. خمش در ابتدا با ماندرل به ضخامت ۳۰ میلی‌متر باعث ترک خوردن هیچ یک از نمونه‌های پوشش دهی شده توسط روش ESD نگردید. سپس خمش با ماندرل‌های با ضخامت کمتر، بر روی نمونه‌های ESD انجام گرفت و مشاهده شد که نمونه‌های فوق دچار شکست نشدند. مطابق استاندارد ASTM B 489-85 می‌توان نتیجه گرفت پوشش حاصل از ESD دارای انعطاف‌پذیری عالی می‌باشد. در صورتی که نمونه‌های پوشش دهی شده توسط روش پاشش شعله‌ای در همان ماندرل اولیه (ماندرل به ضخامت ۳۰ میلی‌متر)

کامل ذرات پوشش به یکدیگر شده و در نتیجه ایجاد تخلخل در فصل مشترک و لایه پوشش می‌باشد (شکل ۶). این موضوع در مورد طبیعت پوشش‌های اسپری حرارتی ایجاد شده بر روی سطح مطابقت کامل دارد [۱۳]. از طرفی پاشیده شدن و پخش شدن ذرات مذاب در اثر سرعت زیاد ذرات اتفاق می‌افتد. بنابراین ذرات مذاب کاملاً پهن شده و قسمت‌هایی از آنها به اطراف پرتاب می‌شود. این ذرات باعث ایجاد ناهم‌واری در سطح شده و اتصال‌های ضعیفی با زیر لایه ایجاد می‌نمایند.

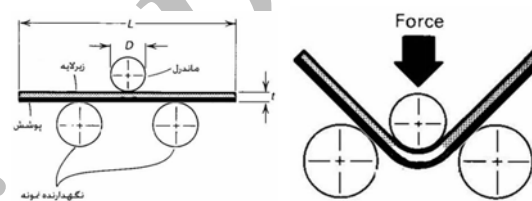
همچنین در حین فرآیند پاشش، در ریزساختار لایه لایه‌ای ایجاد شده در آن، زنجیره‌ای از اکسیدها به موازات سطح جهت‌گیری نموده‌اند. پدیده اکسیداسیون منجر به تشکیل فصل مشترک لایه‌ای در پوشش می‌گردد (مناطق سیاه رنگ فازهای اکسیدی هستند). این پدیده گویای این مطلب است که فازهای اکسیدی در پوشش، مناطقی هستند که استحکام ضعیف‌تری با ذرات مجاور خود خواهند داشت. علاوه بر این فازهای اکسیدی طبیعت تردی دارند و در مقابل نیروهای کششی مقاومت ناچیزی از خود نشان می‌دهند. اکسیداسیون حین پاشش توسط محققین دیگر هم گزارش شده است [۱۴]. اما در پوشش‌های ایجاد شده توسط ESD، ساختاری بدون جدایش در فصل مشترک تشکیل شده است. همانطور که در شکل (۵)، نشان داده شده است فصل مشترک پوشش - زیر لایه عاری از هر گونه تخلخل و فازهای اکسیدی می‌باشد که ناشی از نفوذ متقابل عناصر آلیاژی بین زیر لایه و پوشش است.

شکل (۷ و ۸)، نتایج حاصل از آزمایش آنالیز پراش پرتو ایکس لایه پوششی را برای پوشش‌های پاشش شعله‌ای و ESD را نشان می‌دهد. همانطور که از الگوهای پراش مشخص است، رفتار

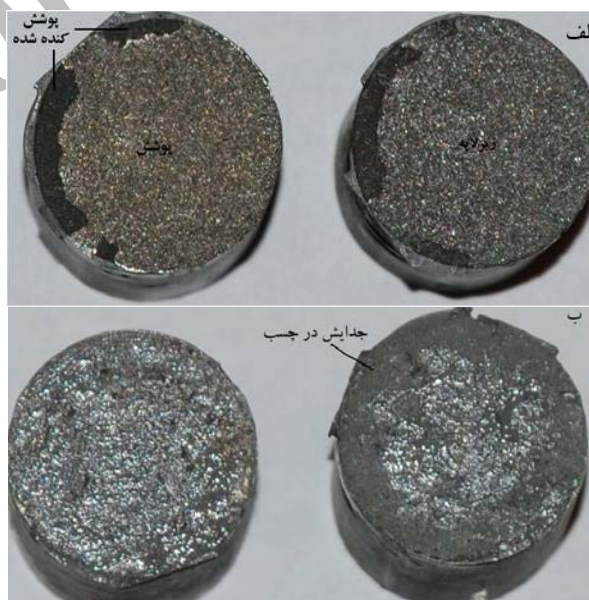
پراش پوشش پاشش شعله‌ای و پوشش الکترواسپارک به دلیل استفاده از شرایط و پارامترهای مختلف در حین فرآیند پوشش‌دهی، مشابه یکدیگر نیستند. تفاوت کلی در رفتار پراش را می‌توان در الگوهای پراش ماده پوشش‌دهی با پوشش‌های شکل گرفته، ملاحظه نمود.



شکل (۱): نحوه اتصال دو قطعه استوانه‌ای در آزمون چسبندگی طبق استاندارد ASTM C633-01 [۱۱].

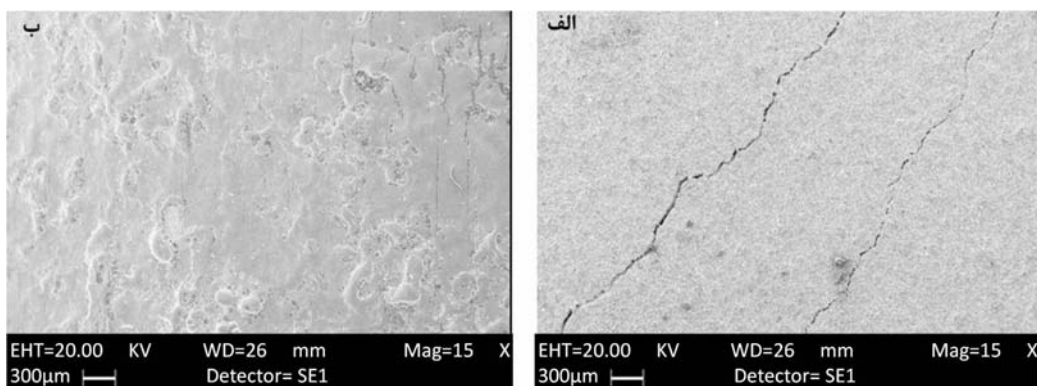


شکل (۲): نحوه انجام آزمون خمش طبق استاندارد ASTM B 489-85 [۱۲].

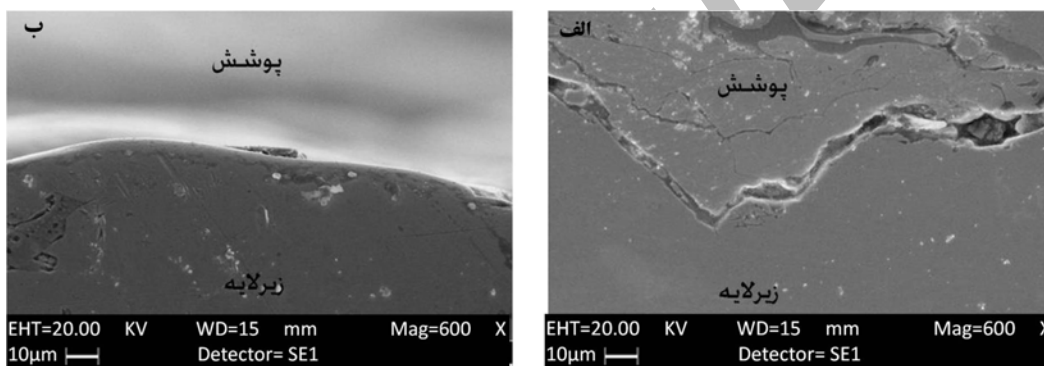


شکل (۳): سطح مقطع شکست در آزمون استحکام چسبندگی، الف) پاشش شعله‌ای و ب) ESD.

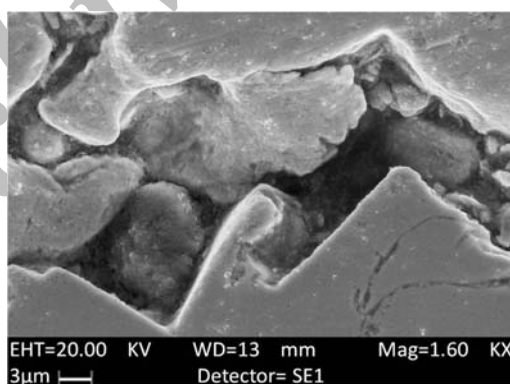
مشاهده ساختار فصل مشترک توسط میکروسکوپ الکترونی نشان‌دهنده وجود تخلخل و عدم چسبندگی کامل پوشش به زیر لایه می‌باشد. این موضوع می‌تواند ناشی از ذوب نشدن کامل ذرات بزرگ در حین رسیدن به زیر لایه که باعث عدم اتصال



شکل (۴): تصویر میکروسکوپی (SEM) از ترک خوردن پوشش در تست خمش، الف) پاشش شعله‌ای و ب) ESD.



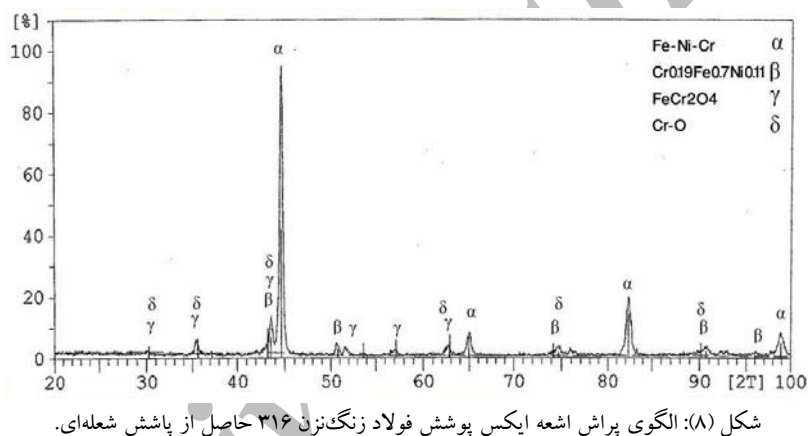
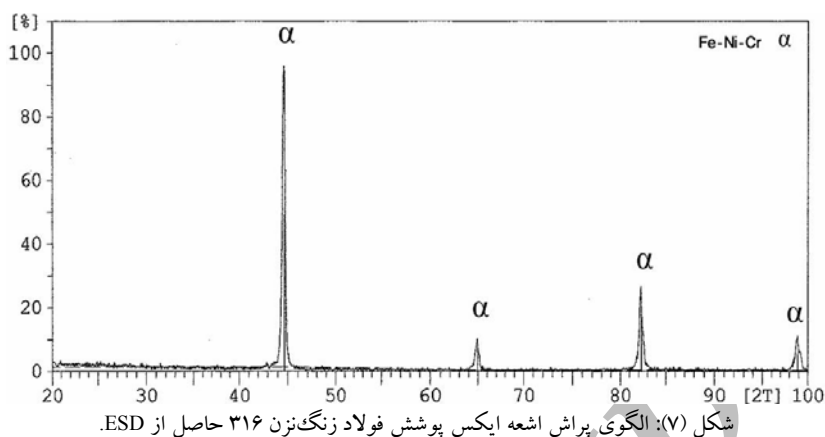
شکل (۵): تصویر میکروسکوپی (SEM) از فصل مشترک پوشش- زیر لایه، الف) پاشش شعله‌ای و ب) ESD.



شکل (۶): تصویر میکروسکوپی (SEM) از فصل مشترک پوشش- زیر لایه پاشش شعله‌ای، عدم چسبندگی کامل پوشش به زیر لایه ناشی از ذوب نشدن کامل ذرات بزرگ.

الگوی پراش اشعه ایکس از پوشش ESD فقط تشکیل فاز بین فلزی Fe-Ni-Cr را نشان می‌دهد. با توجه به این نکته که پراش اشعه ایکس از پوشش پاشش شعله‌ای علاوه بر ایجاد فاز بین فلزی Fe-Ni-Cr، ایجاد فازهای اکسیدی را نیز نشان می‌دهد.

همانطور که مشخص است الگوی پراش مربوط به پوشش پاشش شعله‌ای، بیانگر وجود فازهای اکسیدی در ساختار این پوشش هاست. در حالی که در الگوی پراش مربوط به پوشش الکترواسپارک (ESD)، چنین پدیده‌ای مشاهده نمی‌شود.



نتیجه می‌توان گفت که پوشش پاشش شعله‌ای ایجاد شده از استحکام چسبندگی پایینی برخوردار است.

۴- نتیجه‌گیری

۱- مکانیزم چسبندگی پوشش به‌زیر لایه در روش ESD از طریق متالورژیکی - شیمیایی و در روش پاشش شعله‌ای از طریق قفل شدن مکانیکی است.

۲- آزمون‌های چسبندگی نشان می‌دهد که استحکام چسبندگی پوشش ایجاد شده توسط روش الکترواسپارک بسیار بالاتر از استحکام چسبندگی پوشش‌های پاشش شعله‌ای است.

۳- مطالعه فصل مشترک دو پوشش مختلف توسط SEM نشان می‌دهد که بالا بودن استحکام چسبندگی پوشش‌های الکترواسپارک به علت ذوب و یکپارچه شدن پوشش به‌زیر لایه

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حرارت ناشی از واکنش تشکیل ترکیب بین فلزی در حین رسوب‌دهی توسط الکترواسپارک، منجر به نفوذ ذرات به‌داخل زیر لایه شده و با تشکیل ساختاری بدون جدایش در فصل مشترک و ایجاد ترکیب بین فلزی، می‌تواند به‌عنوان مکانیزم متالورژیکی - شیمیایی باعث افزایش استحکام چسبندگی پوشش به‌زیر لایه گردد. اما گرمای حاصل از پاشش شعله‌ای از سوختن اکسیژن و استیلن ایجاد می‌گردد. پودر به‌همراه اکسیژن و استیلن به‌داخل شعله تغذیه می‌شود. از این‌رو شرایط مساعدی جهت اکسید شدن ذرات پودر در حین فرآیند پاشش شعله‌ای فراهم می‌گردد. در نتیجه امکان تشکیل ترکیب بین فلزی در پوشش، کاهش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود پیوند بین پوشش و زیر لایه تنها از طریق قفل شدن مکانیکی میسر گردد. در

- [4] R. W. Smith and R. Knight, "Thermal Spraying", JOM, Vol. 48, pp. 16-19, 1996.
- [5] L. Pawlowski, The Science and Engineering of Thermal Spray Coating, John Wiley & Sons, pp. 12-92, 1995.
- [6] L. James and J. Reynolds, "Electro-spark Deposition", Advanced Materials & Processes, pp. 35-37, March 2003.
- [7] P. Z. Wang, G. S. Pan, Y. Zhou and H. S. Shao, "Accelerated Electrospark Deposition and the Wear Behavior of Coatings", Journal of Materials Engineering and Performance, pp. 780-784, 1997.
- [8] Y. Y. Wanga, C. J. Li and A. Ohmori, "Influence of Substrate Roughness on the Bonding Mechanisms of High Velocity Oxy-fuel Sprayed Coatings", Thin Solid Films, pp. 141-147, 2005.
- [9] S. Amada and T. Hirose, "Influence of Grit Blasting Pre-treatment on the Adhesion Strength of Plasma Sprayed Coatings: Fractal Analysis of Roughness", Surface & Coatings Technology, pp. 132-137, 1998.
- [10] G. Lallemand -Tallaron, "Study of the Microstructure and Adhesion of Spinelles Coatings Formed by Plasma Spraying", Ph. D Thesis, EC Lyon, France, 1996.
- [11] ASTM C633-01., "Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coating", American Society for Testing and Materials Standards, Philadelphia, 2001.
- [12] ASTM B 489-85., "Standard Practice for Bend Test for Ductility of Electrodeposited and Autocatalytically Deposited Metal Coatings on Metals", American Society for Testing and Materials Standards, Philadelphia, 2001.
- [13] S. Grainger and J. Bluent, Engineer Coating - design and Application, 2nd Edition, Arington Publishing, pp. 137-152, 1998.
- [14] J. H. Kim, M. C. Kim and C. G. Park, "Evaluation of Functionally Graded Thermal Barrier Coatings Fabricated by Detonation Gun Spray Technique", Surface and Coating Technology, Vol. 168, pp. 275-280, 2003.

در فصل مشترک، نفوذ متقابل عناصر آلیاژی بین زیر لایه و پوشش، تغییر ترکیب شیمیایی در فصل مشترک با پوشش و ایجاد ساختاری بدون جدایش در فصل مشترک است.

۴- در پوشش حاصل از پاشش شعله‌ای به علت تشکیل فازهای اکسیدی در فصل مشترک، وجود تخلخل، ضعیف بودن استحکام ذرات جوش خورده و ایجاد ذرات ذوب جزئی شده باعث کاهش استحکام چسبندگی پوشش شده است.

۵- آزمون خمش نیز نشان می‌دهد که انعطاف‌پذیری پوشش ایجاد شده توسط روش الکترواسپارک بسیار بالاتر از پوشش‌های پاشش شعله‌ای است.

۵- تشکر و قدردانی

در پایان از شرکت سخت‌افزا به خاطر فراهم کردن امکانات آزمایشگاهی و حمایت‌های مالی در جهت انجام این پروژه، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶- مراجع

- [1] A. Hjørhede and A. Nylund, Adhesion Testing of Thermally Sprayed and Laser Deposited Coatings, Surface & Coatings Technology, pp. 208-218, 2004.
- [2] S. D. Brown, B. A. Chapman and G. P. Wirtz, "Fracture Kinetics and the Mechanical Measurement of Adherence", Proceedings of National Thermal Spray Conference, Ohio, USA, 1998.
- [3] J. H. Clare and D. E. Crawmer, "Thermal Spray Coatings", Metals Handbook, Vol. 15, 9th. ed., ASM, 1982.