

تأثیر عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی پوشش فولاد زنگ نزن ۳۱۶L ایجاد شده به روش پاشش شعله‌ای

مصطفی خدیوی*^۱، علی شفیعی^۲

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد، باشگاه پژوهشگران جوان، نجف آباد، اصفهان، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

* Khadivi@iaun.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۲/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۱۸)

چکیده

در این پژوهش، تأثیر عملیات حرارتی در دماهای مختلف بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی پوشش فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L، مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه‌های پوشش داده شده، در سه دمای ۸۰۰، ۹۵۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تحت عملیات حرارتی، قرار گرفتند. بررسی‌های ساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) بر روی نمونه‌های پوشش داده شده، قبل و بعد از انجام عملیات حرارتی، انجام گرفت. تأثیر فازهای تشکیل شده در پوشش پاشش شعله‌ای بر خواص مکانیکی پوشش، قبل و بعد از انجام عملیات حرارتی، توسط آزمون چسبندگی و آزمون ریزسختی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد، انجام عملیات حرارتی بر روی پوشش‌های ایجاد شده در دماهای ۸۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد باعث افزایش مقدار استحکام چسبندگی و ریزسختی پوشش می‌گردد. این مطلب نشان دهنده بهبود ریزساختار پوشش بعد از عملیات حرارتی در دماهای ۸۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش درصد فازهای بین‌فلزی و تشکیل پیوندهای متالورژیکی در پوشش می‌باشد. اما با افزایش دمای عملیات حرارتی به بیش‌تر از ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد، منجر به افت شدید خواص مکانیکی در پوشش می‌گردد. افت شدید خواص مکانیکی در ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد ناشی از رشد دانه‌ها می‌باشد.

واژه‌های کلیدی:

پاشش شعله‌ای، عملیات حرارتی و ریزساختار.

۱- مقدمه

جهت ماده پوشش به‌شمار می‌روند. خواص تشکیل شده در پوشش پاشش شعله‌ای بستگی شدیدی با ریزساختار بوجود آمده در حین فرایند اسپری حرارتی دارد. فازهای مختلفی از جمله فازهای اکسیدی، فازهای بین‌فلزی و ناخالصی‌ها در ساختار

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی به دلیل مقاومت عالی در برابر خوردگی و خواص مکانیکی مناسب در دمای بالا کاربرد گسترده‌ای در صنایع هسته‌ای، نفت، پتروشیمی و نیروگاهی دارا می‌باشد [۱]. لذا فولادهای زنگ‌نزن یکی از مهم‌ترین مواد

شعله‌ای قبل و بعد از انجام عملیات حرارتی، مورد ارزشیابی قرار گرفت. نمونه‌های پوشش پاشش شعله‌ای، در سه دمای ۸۰۰، ۹۵۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. سپس بررسی‌های ساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز پراش پرتو ایکس بر روی نمونه‌های پوششی، قبل و بعد از انجام عملیات حرارتی انجام گرفت. در نهایت تاثیر فازهای موجود در پوشش پاشش شعله‌ای قبل و بعد از انجام عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی پوشش پاشش شعله‌ای، توسط آزمون استحکام چسبندگی و آزمون ریزسختی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق به منظور اعمال پوشش پاشش شعله‌ای ابتدا زیرلایه‌هایی از جنس فولاد ST37 تهیه شد. همچنین از پودر فولاد زنگ نزن ۳۱۶ L جهت ماده پوششی استفاده گردید. در جدول شماره (۱) ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن ۳۱۶ L آورده شده است. قبل از اعمال پوشش‌ها، آماده سازی سطح نمونه‌ها انجام گرفت.

به منظور از بین بردن مناطق نوک تیز مانند لبه‌ها و گوشه‌ها که در هنگام برش بر روی سطح نمونه‌ها ایجاد شده‌اند. همچنین به منظور کنترل دقیق ابعاد نمونه‌ها، سطح نمونه‌ها ماشین‌کاری گردیدند. از سنباده زنی برای ایجاد سطحی یکنواخت، پاک سازی اکسیدها و سایر آلودگی‌های ممکن نیز استفاده گردید. هم‌چنین جهت ایجاد زبری مناسب، سطح زیرلایه، توسط ذرات آلومینا به ابعاد $250 \mu\text{m}$ تحت فشار هوای ۶ bar و زاویه حدود ۹۰ درجه تحت ماسه زنی قرار گرفت و سپس سطح آن با استن شسته شد. در نهایت با استفاده از فرآیند پاشش شعله‌ای، پوشش‌هایی بر روی زیرلایه از جنس فولاد ST37 تهیه گردید. پارامترهای پاششی استفاده شده در این پژوهش در جدول (۲) آورده شده است.

میکروسکوپی پوشش پاشش شعله‌ای تشکیل می‌گردند. ریزساختار شامل فازهای اکسیدی باعث کاهش خواص مکانیکی و ریزساختار شامل فازهای بین فلزی باعث افزایش خواص مکانیکی پوشش می‌شوند [۲]. لذا برای بهبود و بهینه سازی خواص پوشش‌های اسپری حرارتی معمولاً عملیات ثانویه پیشنهاد می‌گردد. این عملیات شامل یک یا ترکیبی از فرایندهای اصلاح سطحی توسط لیزر، عملیات حرارتی، سنگ زنی و یا پولیش کاری سطحی هستند [۳-۴]. بنابراین مطالعه و بررسی اثر عملیات حرارتی بر روی پوشش‌های پاشش شعله‌ای، برای رسیدن به پوشش‌هایی با ترکیبات بین فلزی، امری اجتناب ناپذیر است.

در فرآیندهای پاشش شعله‌ای ابتدا ماده مصرفی پوشش به تفنگ پاشش تغذیه می‌شود، سپس با صرف انرژی به صورت ذرات مذاب یا نیمه مذاب درآمده و سپس با سرعت در محدوده بین $400-300 \text{ m/s}$ به زیر لایه برخورد می‌کنند. این ذرات در اثر برخورد پهن شده و با سرعتی در حد کسری از ثانیه منجمد می‌شوند. در نتیجه تماس نزدیکی بین ذرات و سطح زیر لایه برقرار می‌شود [۵]. نوع پیوند ایجاد شده به عوامل متعددی نظیر دما، انرژی جنبشی ذرات، جنس پوشش، جنس زیر لایه، میزان زبری سطح و ... بستگی دارد [۶-۷]. پوشش ایجاد شده ویژگی‌های سطح را بهبود می‌بخشد ولی بر خواص و ساختار قطعه تأثیر چندانی نمی‌گذارد.

به‌طور کلی تحقیقات متعددی به مطالعه و شناخت ساختمان میکروسکوپی تشکیل شده و روش‌هایی جهت جلوگیری از تشکیل فازهای اکسیدی در پوشش پاشش شعله‌ای پرداخته شده است که نتایج آن‌ها نشان می‌دهد با انتخاب صحیح فاصله اسپری و کاهش ضخامت پوشش پاشش شعله‌ای، مقدار فازهای اکسیدی در پوشش کاهش یافته و بیشترین مقدار سختی حاصل می‌شود [۸]. در این پژوهش، اثر عملیات حرارتی بر روی تغییرات فازی، ساختاری و خواص مکانیکی پوشش‌های پاشش

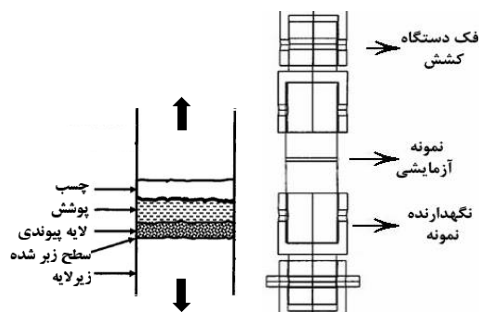
جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L استفاده شده برای پوشش و اندازه دانه آن. (درصد وزنی)

اندازه دانه	N	Ni	Mo	Cr	P	Mn	Si	C
۴۵-۲۵ μ m	۰/۱۱	۱۲	۲/۵	۱۷	۰/۰۴۵	۲	۱	۰/۰۳۰

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

فاصله پاشش	فشار اکسیژن	فشار استیلن	اکسیژن/استیلن
۱۰ - ۱۵cm	۲atm	۱atm	۱/۳

بررسی استحکام چسبندگی از آزمون استحکام چسبندگی به شماره استاندارد ASTM C 633-01 [۹] استفاده گردید. برای تعیین استحکام چسبندگی پوشش از چسب اپوکسی تک جزئی استفاده گردید (مطابق شکل (۱))، برای اینکه چسب اپوکسی بتواند استحکام لازم را داشته باشد نمونه‌های تهیه شده در دمای ۱۳۰ درجه سانتی گراد به مدت یک ساعت قرار داده شدند. سپس با استفاده از دستگاه کشش با سرعت ۱ mm/min تحت نیروی کششی قرار گرفتند.



شکل (۱): نحوه اتصال دو قطعه استوانه‌ای در آزمون چسبندگی طبق

استاندارد ASTM C633-01 [۹].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شناسایی فازها و ساختمان میکروسکوپی قبل از انجام

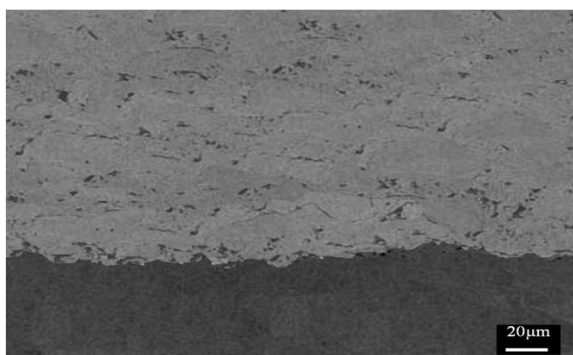
عملیات حرارتی

شکل (۲) نتایج حاصل از آزمایش آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD) لایه پوششی را برای پوشش‌های پاشش شعله‌ای قبل از انجام عملیات حرارتی را نشان می‌دهد.

به منظور تکمیل واکنش ایجاد ترکیبات بین فلزی در پوشش‌های پاشش شعله‌ای، پوشش‌ها در دماهای ۸۰۰، ۹۵۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد تحت عملیات حرارتی به مدت یک ساعت قرار گرفتند. نمونه‌ها در فویل فولادی قرار داده شد، تا از اکسید شدن پوشش جلوگیری شود.

به منظور شناسایی و ارزیابی فازهای تشکیل شده در پوشش پاشش شعله‌ای از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده گردید. آزمون پراش پرتو ایکس با دستگاه پراش پرتو ایکس زیمنس مدل D500 تحت ولتاژ ۴۰ KV و جریان ۲۰ mA صورت گرفت. در تمام آزمایش‌ها از اشعه ایکس Cu α با طول موج 1.54 \AA استفاده شد. شناسایی ساختمان میکروسکوپی پوشش پاشش شعله‌ای به توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) LEO 435 VP انجام شد. همچنین جهت بررسی خواص مکانیکی پوشش‌ها از آزمون ریزسختی استفاده گردید.

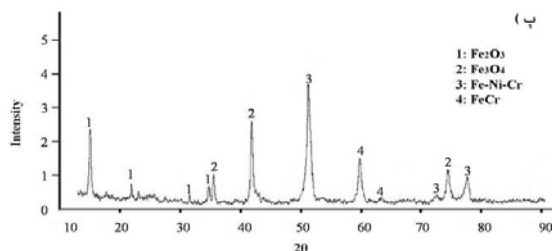
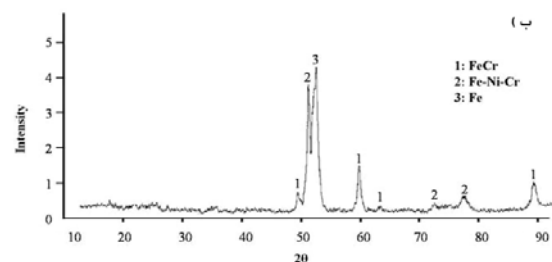
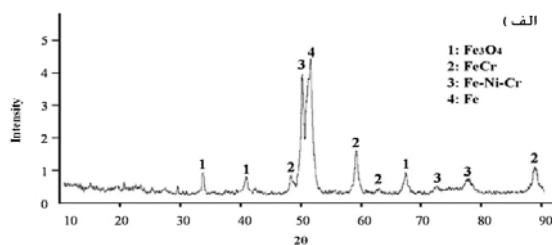
اندازه‌گیری ریزسختی بر روی پوشش‌ها با استفاده از یک دستگاه ریزسختی Leco مدل M-400 تحت بار ۱۸۳ گرم انجام شد. نمونه‌ها مشابه نمونه‌های مورد استفاده برای ارزیابی ریزساختار آماده سازی گردید و بر روی هر پوشش ده نقطه اثر فرو رونده بصورت اتفاقی ایجاد شد. به منظور کاهش هر گونه تاثیر فصل مشترک پوشش و زیرلایه بر نتایج ریزسختی، دقت شد تا فرو رونده در میانه سطح مقطع پوشش قرار گیرد. جهت



شکل (۳): تصویر میکروسکوپی SEM از فصل مشترک پوشش - زیر لایه قبل از عملیات حرارتی.

۳-۲- تاثیر عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی پوشش

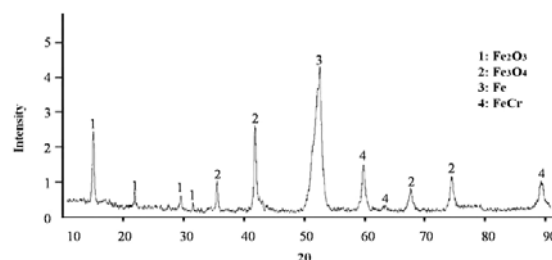
شکل (۴) - الف، ب و پ) نتایج حاصل از آزمایش آنالیز پراش پرتو ایکس لایه پوششی را برای پوشش‌های پاشش شعله‌ای بعد از انجام عملیات حرارتی در دماهای ۸۰۰، ۹۵۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی گراد را نشان می‌دهد.



شکل (۴): الگوی پراش اشعه ایکس پوشش فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶، الف) حاصل از پاشش شعله‌ای بعد از عملیات حرارتی در دمای ۸۰۰°C، ب) حاصل از پاشش شعله‌ای بعد از عملیات حرارتی در دمای ۹۵۰°C، پ) حاصل از پاشش شعله‌ای بعد از عملیات حرارتی در دمای ۱۱۵۰°C

همان‌طور که مشخص است در الگوی پراش اشعه ایکس، علاوه بر تشکیل فاز بین فلزی Fe-Cr و Fe تشکیل فازهای اکسیدی Fe_2O_3 و Fe_3O_4 را نیز نشان می‌دهد. علت تشکیل فازهای اکسیدی می‌تواند ناشی از گرمای حاصل از پاشش شعله‌ای که توسط سوختن اکسیژن و استیلن ایجاد می‌گردد، می‌باشد.

پودر به همراه اکسیژن و استیلن به داخل شعله تغذیه می‌شود. از این‌رو شرایط مساعدی جهت اکسید شدن ذرات پودر در حین فرآیند پاشش شعله‌ای فراهم می‌گردد. اکسیداسیون حین پاشش توسط محققین دیگر هم گزارش شده است [۱۰].

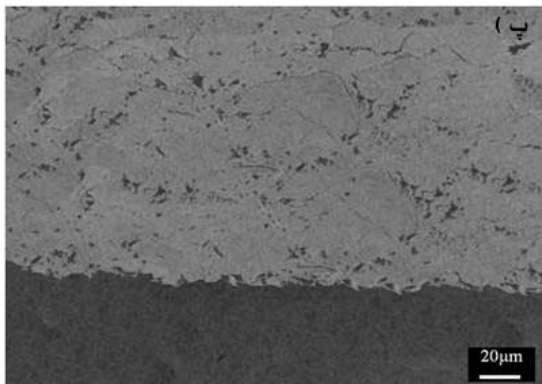
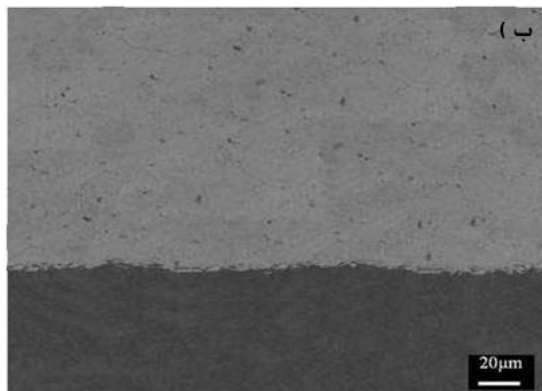
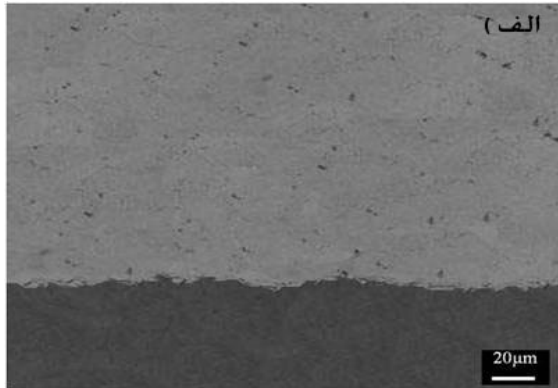


شکل (۲): الگوی پراش اشعه ایکس پوشش فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ حاصل از پاشش شعله‌ای قبل از عملیات حرارتی.

شکل (۳) ساختار میکروسکوپی پوشش پاشش شعله‌ای قبل از انجام عملیات حرارتی را نشان می‌دهد. مشاهده ریزساختار پوشش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان دهنده تشکیل یک ساختار لایه‌ای در پوشش است. همچنین با مشاهده ساختار نمونه‌های پوششی می‌توان مشاهده نمود که فصل مشترک پوشش دارای عیوب و تخلخل می‌باشند. وجود تخلخل در پوشش می‌تواند ناشی از ذوب نشدن کامل پودر پاششی در حین رسیدن به زیر لایه که باعث عدم اتصال کامل ذرات پوشش به یکدیگر شده و در نتیجه در فصل مشترک تخلخل ایجاد می‌گردد.

این مطلب در مورد طبیعت پوشش‌های اسپری حرارتی ایجاد شده با تحقیقات دیگران نیز مطابقت کامل دارد [۱۱].

دمایی ۸۰۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. و با افزایش دما بیش از این محدوده دمایی باعث افزایش فازهای اکسیدی و رشد دانه‌ها در پوشش، در نتیجه کاهش میزان ریزسختی در پوشش پاشش شعله‌ای، می‌گردد.



شکل (۵): تصویر میکروسکوپی SEM از فصل مشترک پوشش- زیرلایه:

الف) بعد از عملیات حرارتی در دمای ۸۰۰°C

ب) بعد از عملیات حرارتی در دمای ۹۵۰°C

پ) بعد از عملیات حرارتی در دمای ۱۱۵۰°C

همان‌طور که در الگوی پراش اشعه ایکس پوشش پاشش شعله‌ای مشخص است، کاهش در ایجاد فازهای اکسیدی Fe_2O_3 و Fe_3O_4 در دماهای ۸۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد و افزایش فازهای اکسیدی Fe_2O_3 و Fe_3O_4 را در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. این مطلب نشان می‌دهد که استحاله فازی در پوشش، در حین عملیات حرارتی در دمای ۸۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد رخ داده و منجر به تبدیل فازهای اکسیدی به فازهای بین‌فلزی و بهبود ساختمان میکروسکوپی پوشش پاشش شعله‌ای گردیده است.

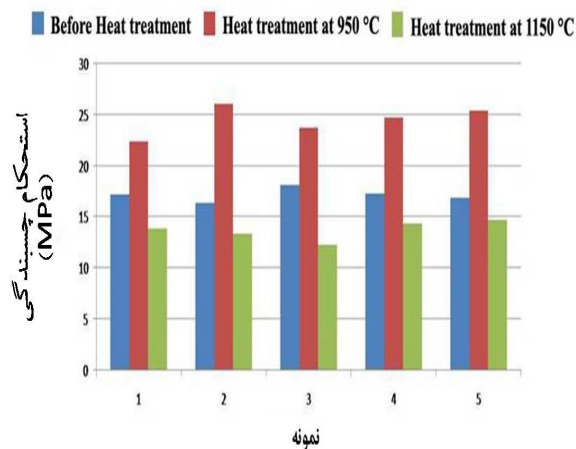
الگوی پراش پرتو ایکس لایه پوششی برای پوشش‌های پاشش شعله‌ای بعد از انجام عملیات حرارتی نشان‌دهنده ایجاد باند نفوذی در فصل مشترک پوشش- زیرلایه، می‌باشد. بنابراین با اعمال عملیات حرارتی اتصال پوشش ایجاد شده از مکانیزم مکانیکی به مکانیزم متالورژیکی تغییر می‌یابد [۱۱].

شکل (۵- الف و ب) ریزساختار پوشش پاشش شعله‌ای بعد از انجام عملیات حرارتی در دماهای ۸۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. مشاهده ریزساختار پوشش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان‌دهنده کاهش عیوب و تخلخل در پوشش است.

شکل (۵- پ)، ساختار میکروسکوپی پوشش پاشش شعله‌ای بعد از انجام عملیات حرارتی در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. این تصویر نشان‌دهنده افزایش عیوب و تخلخل در پوشش است. این موضوع توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است [۱۲]. در شکل (۶) نتایج آزمایش‌های ریزسختی و بکرز بر روی مقاطع پوشش‌های پاشش شعله‌ای تحت بار ۱۸۳ gf قبل و بعد از انجام عملیات حرارتی ارائه شده است. نتایج بیانگر آن است که میانگین سختی پوشش‌های پاشش شعله‌ای قبل از انجام عملیات حرارتی برابر با ۳۰۷ و بکرز، بعد از انجام عملیات حرارتی در دماهای ۸۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۳۹۵ و بکرز و بعد از انجام عملیات حرارتی در دماهای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۲۶۴ و بکرز است. این مطلب نشان‌دهنده این است که دمای بهینه جهت انجام عملیات حرارتی در محدوده

پاشش شعله‌ای بعد از عملیات حرارتی در دمای 950°C در محدوده ۲۳ MPa تا ۲۶ می‌باشد. بطور کلی گسیختگی در فصل مشترک پوشش - زیر لایه در آزمون چسبندگی برای تمامی پوشش‌های پاشش شعله‌ای قبل و بعد از انجام عملیات حرارتی، صورت گرفت، که تخریب در این پوشش‌ها ناشی از ضعیف بودن باند اتصال، وجود فازهای اکسیدی و تخلخل در پوشش می‌باشد.

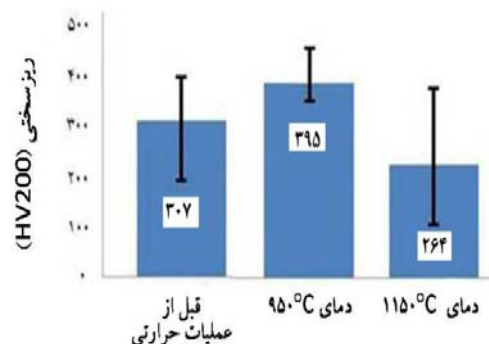
همچنین در شکل (۷) میزان استحکام چسبندگی پوشش‌های پاشش شعله‌ای بعد از عملیات حرارتی در دمای 1150°C سانتی‌گراد را نیز نشان می‌دهد. میزان استحکام چسبندگی پوشش پاشش شعله‌ای بعد از عملیات حرارتی در دمای 1150°C سانتی‌گراد در محدوده ۱۲ تا ۱۵ بدست آمد. همان‌گونه مشاهده می‌گردد استحکام چسبندگی پوشش ایجاد شده در این دما به شدت کاهش می‌یابد. علت این کاهش شدید در میزان استحکام چسبندگی پوشش پاشش شعله‌ای، ناشی از ایجاد فازهای اکسیدی و رشد دانه‌ها در دمای بالا در حین عملیات حرارتی، در پوشش پاشش شعله‌ای است [۱۳ - ۱۴].



شکل (۷): نتایج بدست آمده از آزمون استحکام چسبندگی.

۴- نتیجه‌گیری

۱- آنالیز پراش پرتو ایکس ایکس (XRD) برای پوشش پاشش شعله‌ای قبل از انجام عملیات حرارتی، تشکیل فاز بین فلزی Fe-Cr و تشکیل فازهای اکسیدی Fe_2O_3 و Fe_3O_4 را نشان می‌دهد.



شکل (۶): مقایسه میانگین سختی پوشش‌های پاشش شعله‌ای قبل و بعد از عملیات حرارتی.

از طرفی دیگر، همان‌طور که از شکل (۶) مشخص است، پراکندگی شدیدی در مقادیر سختی اندازه‌گیری شده در پوشش پاشش شعله‌ای بعد از انجام عملیات حرارتی در دماهای 1150°C درجه سانتی‌گراد، مشاهده می‌شود. بطوری که مقادیر سختی اندازه‌گیری شده، از مقادیر سختی کم تا مقادیر سختی زیاد نوسان دارد. که علت این پراکندگی در مقادیر سختی در پوشش پاشش شعله‌ای، می‌تواند ناشی از سختی متفاوت فازهای مختلف موجود در پوشش، مانند ایجاد فازهای اکسیدی Fe_2O_3 و Fe_3O_4 و تشکیل ترکیب بین فلزی Fe-Ni-Cr و وجود تخلخل‌های پراکنده در داخل پوشش می‌باشد. در نهایت این عوامل منجر به افت ریزسختی پوشش پاشش شعله‌ای بعد از انجام عملیات حرارتی در دماهای 1150°C درجه سانتی‌گراد، گردیده است. پراکندگی در مقادیر ریزسختی در فرایند پاشش شعله‌ای توسط محققین دیگر نیز، گزارش شده است [۵].

شکل (۷) میزان استحکام چسبندگی پوشش‌های پاشش شعله‌ای قبل و بعد از عملیات حرارتی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که نتایج بدست آمده نشان می‌دهد استحکام چسبندگی پوشش ایجاد شده بعد از عملیات حرارتی در دمای 950°C بسیار بالاتر از استحکام چسبندگی پوشش‌های پاشش شعله‌ای قبل از عملیات حرارتی است. میزان استحکام چسبندگی حاصل از آزمون چسبندگی برای پاشش شعله‌ای قبل از عملیات حرارتی در محدوده ۱۶ MPa تا ۱۸ و میزان استحکام چسبندگی پوشش

۵- تشکر و قدردانی

در پایان از باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد به‌خاطر فراهم کردن امکانات آزمایشگاهی و حمایت‌های مالی در جهت انجام این پروژه، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶- مراجع

- [1] J. J. Smith and R. A. Farrar, "Influence of Microstructure and Composition on Mechanical Properties of Some AISI 300 Series Weld Metals", International Materials Reviews, Vol. 38, No. 1, PP. 25-51, 1993.
- [2] S. Deshpande, S. Sampath and H. Zhang, "Mechanisms of Oxidation and its Role of in Microstructural Evolution of Metallic Thermal Spray Coatings", Surf. Coat. Technol., Vol. 200, pp. 5395-5406, 2006.
- [3] M. Rodriguez, J. Klisans, L. Bavaresco, A. Scagni and F. Arenas, Thermal Spray 2001: New Surface for a New Millennium, ASM International, P. 1061, 2001.
- [4] D. A. Stewart, P. H. Shipway and D. G. McCartney, "Influence of Heat Treatment on the Abrasive Wear Behavior of HVOF Sprayed WC-Co Coatings", Surface & Coating Tech., PP. 11-24, 1998.
- [5] L. Pawlowski, the Science and Engineering of Thermal Spray Coating, John Wiley & Sons, PP. 12-92, 1995.
- [6] R. E. Krepski, "Thermal Spray Coating Application in Chemical Process Industries", MAT, St. Louis, USA, 1993.
- [7] R. W. Smith and R. Knight, "Thermal Spraying", JOM, Vol. 48, PP. 16-19, 1996.
- [8] L. Maggy and J. L. Enrique "Microstructural Evolution and Oxidation Behavior of Nanocrystalline 316-Stainless Steel Coatings Produced Byhigh-Velocity Oxygen Fuel Spraying", Materials Science and Engineering A272 PP. 222-229, 1999.
- [9] ASTM C633-01., "Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coating", American Society for Testing and Materials Standards, Philadelphia, 2001.
- [10] K. Dobler, H. Kreye and R. Schwetzke, "Oxidation of Stainless Steel in the High Velocity Oxy-Fuel Process", Journal of Thermal Spray Technology. PP. 407-413, September 2000.

۲- آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) نشان می‌دهد که انجام عملیات حرارتی در دماهای ۸۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد منجر به کاهش فازهای اکسیدی Fe_2O_3 و Fe_3O_4 و انجام عملیات حرارتی در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد منجر به افزایش فازهای اکسیدی Fe_3O_4 و Fe_2O_3 می‌گردد.

۳- مطالعه فصل مشترک پوشش پاشش شعله‌ای توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) قبل از انجام عملیات حرارتی، نشان دهنده تشکیل یک ساختار لایه‌ای در پوشش است که ساختار پوشش حاوی تخلخل می‌باشد. اما انجام عملیات حرارتی در دماهای ۸۰۰ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش عیوب و تخلخل در پوشش می‌شود.

۴- انجام عملیات حرارتی در دماهای مختلف بر روی پوشش‌های پاشش شعله‌ای باعث تغییرات ریزسختی در پوشش می‌گردد. به طوری که عملیات حرارتی در دمای $950^{\circ}C$ سبب افزایش مقدار سختی پوشش و عملیات حرارتی در دماهای بالا ($1150^{\circ}C$) به علت رشد دانه‌ها در دمای بالا، مقدار سختی را کاهش می‌دهد.

۵- دمای بهینه جهت انجام عملیات حرارتی در محدوده دمایی ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد تعیین گردید و با افزایش دما بیش از این محدوده دمایی باعث افزایش فازهای اکسیدی در پوشش در نتیجه کاهش میزان استحکام چسبندگی در پوشش می‌گردد.

۶- انجام عملیات حرارتی بر روی پوشش‌های پاشش شعله‌ای باعث ایجاد باندهای نفوذی در فصل مشترک پوشش - زیرلایه می‌گردد. به طوری که مکانیزم اتصال پوشش به زیرلایه از مکانیکی به متالورژیکی تغییر می‌یابد.

- [13] H. Matsumoto, K. Kishitake, N. Murakami and J. Jpn, Therm. Spraying Soc. 27, P. 117, 1990.
- [14] K. Kishitake, H. Era, F. Otsubo and T. Sonoda, Therm. Spraying Soc. 33, P. 167, 1996.
- [11] M. F. J. Koolloos, "Behaviour of Low Porosity Microcracked Thermal Barrier Coatings under Thermal Loading", Technische Universiteit Eindhoven, 2001.
- [12] A. A. Boudi, M. S. J. Hashmi and B. S. Yilbas, HVOF Coating of Inconel 625 onto Stainless and Carbon Steel Surfaces: Corrosion and Bond Testing. Journal of Materials Processing Technology, PP. 2051–2055, 2004.