

اثر عملیات حرارتی آنیل نفوذی پوشش بر ریزساختار و خواص مکانیکی فولاد ساده کربنی پوشش داده شده با آلومینیوم بروش APS

مجتبی منتظری¹
فرشید مالک قایینی²
امیررضا فرنی¹

چکیده:

استفاده از پوشش‌دهی پاششی آلومینیوم بر روی فولادهای ساده کربنی بروش (APS) (Atmospheric Plasma Spray) به منظور بهبود مقاومت به سایش و خوردگی داغ، از نقطه نظر متالورژیکی و اقتصادی راه حل مناسبی است. از آنجا که اتصال پوششهای پاششی از نوع مکانیکی می‌باشد، استحکام چسبندگی مناسبی با زمینه ایجاد نمی‌کنند. در این تحقیق با انجام عملیات حرارتی آنیل نفوذی بر نمونه‌های فولاد ساده کربنی (CK60) پوشش داده شده بروش APS به ضخامت تقریبی 400 میکرون، پوششی نوین با خواص توأمان مقاومت به خوردگی و سایش ایجاد گردید. تغییرات ساختار و خواص مکانیکی آن نیز مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور آزمایشات متالوگرافی با میکروسکوپیهای نوری و الکترونی SEM و نیز آنالیز EDAX انجام پذیرفت و نتایج به خوبی نشان داد که باند نفوذی تا عمق 200 میکرون به صورت کاملاً یکنواخت در فولاد حاصل گردیده است. همچنین آنالیز EDAX نتایج میکروسختی بیانگر تشکیل فازهای بین فلزی (Al-Fe) در باند نفوذی مذکور، می‌باشد. بنابراین با اعمال عملیات حرارتی آنیل نفوذی اتصال پوشش ایجاد شده از مکانیکی به متالورژیکی تغییر یافت.

واژگان کلیدی: آنیل نفوذی، پوشش پاششی، پودر آلومینیوم، فولاد ساده کربنی، APS

1 - دانشجوی کارشناسی ارشد شناسایی و انتخاب مواد مهندسی دانشگاه تربیت مدرس Mojtaba2088@yahoo.com

2 - استادیار متالورژی و عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس Farshidmalek@yahoo.com

مقدمه:

پوششهای پاششی به منظور محافظت از سایش، خوردگی و شوکهای حرارتی بکار گرفته می‌شوند. در این روشها از جت گاز داغ جهت ذوب و شتاب‌دهی پودر فلزات، سرامیکها و... به منظور اعمال پوشش بر سطح قطعات استفاده می‌شود [1 و 2].

استفاده از پوشش‌دهی و یا روکش‌دهی آلومینیوم به منظور ایجاد مقاومت به خوردگی داغ یکی از روش‌های موثر در مهندسی سطح می‌باشد که اغلب به صورت روکش‌دهی سرد¹ و یا آلومینایزینگ انجام می‌شود. ایجاد مقاومت قطعات فولادی در محیطهای خورنده با اتمسفرهای صنعتی حاوی گوگرد، مواد فسفات-نیترا ناشی از کودهای شیمیایی، اسیدهای آلی در پسماندهای غذایی و محیطهای دریایی و نیز مقاومت در شرایط اکسیدی تا دمای 1150°C از مزایای آلومینایزینگ فولاد می‌باشد. همچنین لوله‌های سوخت‌پاش، بدنه دودکش‌های صنعتی، لوله‌های بدون درز بویلرها و رآکتورهای شیمیایی از عمده کاربردهای پوشش آلومینیوم بر فولاد می‌باشند. پوشش آلومینیوم بر فولاد در رآکتورهای هسته‌ای در شرایط کاری دما و فشار بالا (105°C و 600MPa) باعث کاهش سرعت نفوذ هیدروژن تا 16٪ حالت بدون پوشش و در نهایت مقاومت به تردی هیدروژنی می‌گردد. [6]

پوشش پاششی آلومینیوم در اتمسفر (APS) و بررسی انجماد و مدل‌های عددی آن [3] و نیز اثر آماده-سازی سطح و زاویه پاشش بر کیفیت و شکل قطرات مذاب توسط محققان قبلی مورد ارزیابی قرار گرفت. [4 و 5]

اما از آنجا که مشکل عمده پوشش‌های پاششی اتصال مکانیکی و به تبع استحکام چسبندگی پایین آنها می‌باشد [7]، در این تحقیق بر آن شدیم که با اعمال عملیات حرارتی آنیل نفوذی و تشکیل فازهای بین فلزی Fe-Al در فصل مشترک، خواص سایشی فولاد را به همراه خواص خوردگی افزایش دهیم که در ادامه به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرد.

مواد و روش تحقیق

مواد تحقیق:

فولاد مورد استفاده جهت فلز پایه میلگرد از جنس فولاد ساده کربنی (1.1221) CK60 می‌باشد که آنالیز آن در جدول (1) آمده است. نمونه‌ها به شکل استوانه با قطر 25 mm و ارتفاع 30 mm تهیه شدند. در این تحقیق از پودر آلومینیوم خالص تجاری با ترکیب شیمیایی که در جدول (2) آمده است، استفاده شد. پودرهای مصرفی بکمک الکهای استاندارد در محدوده 100-58 میکرون جدا شدند زیرا پودرهای ریزتر از این محدوده به هنگام پوشش دهی به حالت خمیری درآمده و به مجرای تغذیه می‌چسبند.

آماده‌سازی نمونه‌ها قبل از پوشش

سطح نمونه‌ها پس از برش و ماشینکاری به منظور اتصال بهتر پوشش با الکل شسته شدند و سپس برای ایجاد ناهمواری سطحی و خشن‌سازی تحت عملیات ذره‌پاشی¹ قرار گرفتند. دستگاه ذره‌پاشی مورد استفاده از نوع فشاری با فشار 7 bar و حجم خروجی $400 \text{ m}^3/\text{hr}$ بوده است که هوای خروجی قبل از ورود به محفظه دستگاه توسط یک سیستم خشک‌کن، خشک و تمیز می‌گردد تا عاری از هرگونه رطوبت و یا آلودگی‌های دیگر باشد. ذرات ساینده از جنس Al_2O_3 بودند که با زاویه 90° به سطح قطعه پاشیده شد و نمونه‌ها پس از ذره‌پاشی با استون شستشو شد. [5]

پوشش دهی نمونه‌ها

جهت پوشش دهی از دستگاه CNC پلاسما اسپری مدل Plasma Thech A30005 استفاده شد. پارامترهای اعمال شده در پوشش دهی در جدول (3) آمده است. زاویه پاشش 90° در نظر گرفته شد [4] و ضخامت پوشش ایجاد شده 400 میکرون اعمال گردید. نمونه‌ها پس از پوشش دهی در هوا سرد شدند و سپس از دستگاه خارج شدند.

عملیات حرارتی نمونه‌ها

عملیات حرارتی نمونه‌های پوشش داده شده توسط کوره المنتی با گاز محافظ آرگون انجام پذیرفت. برای اطمینان بیشتر نمونه‌ها با یک لایه رنگ نسوز پوشیده شدند و سپس به مدت 3 ساعت در دمای 1000 درجه سانتیگراد قرار گرفتند و در کوره سرد شدند. [6]

نمونه‌ها پس از برش، مانع سرد و آماده‌سازی بکمک میکروسکوپ نوری و الکترونی مورد بررسی قرار گرفتند. از آنجا که هدف اصلی بررسی میکروسکوپی ساختار فصل مشترک در فولاد بود از محلول اچ نایتال 2/5٪ استفاده شد.

میکروسکوپ نوری مورد استفاده از نوع Union ساخت کمپانی Gawaseiki کشور ژاپن با بزرگنمایی 2000x و میکروسکوپ الکترونی (SEM) از نوع Topcom مجهز به دستگاه آنالیز عنصری EDAX بود.

همچنین نمونه‌ها تحت میکروسختی سنجی قرار گرفتند که از دستگاه Zwick با بار 100 gr و به صورت 5 بار در یک عرض انجام پذیرفت و نتایج بصورت میانگین مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها

تصاویر متالوگرافی حاکی از نفوذ آلومینیوم درون فولاد و تشکیل باندهای نفوذی به ضخامت تقریبی $200\mu\text{m}$ و زمینه فولادی فریتی-پرلیتی بود. (شکل 1)

نتایج حاصل از میکروسختی در جدول (4) و نمودار (1) مشاهده می‌گردد. بیشترین مقدار سختی در سطح 780 HV و کمترین مقدار سختی در مغز فولاد حدود 128 HV می‌باشد.

نتایج حاصل از EDAX در فواصل مختلف از سطح فصل مشترک در جدول (5) و نمودار (1) آمده است. شکل‌های (2 و 3) نمونه‌هایی از آنالیز عنصری در فواصل مشخص باندهای نفوذی می‌باشد.

بحث

متالوگرافی

با توجه به مشاهدات متالوگرافی تشکیل باندهای نفوذی بین نفوذ آلومینیوم در فولاد می‌باشد که با توجه به دمای ذوب پایین‌تر آلومینیوم این نتیجه مورد انتظار بوده است. با توجه به دیاگرام فازی آهن-آلومینیوم نفوذ آلومینیوم در آهن که در دماهای بالاتر از 660°C تشدید می‌گردد، باعث تشکیل فازهای بین فلزی در آهن می‌گردد. برای درک بهتر شرایط حاصل از نفوذ، فازهای بین فلزی به همراه ترکیب شیمیایی وسختی در جدول (6) آمده است. با توجه به دیاگرام فازی اولین فازی که در اثر نفوذ تشکیل می‌گردد FeAl_3 می‌باشد و با افزایش نفوذ فاز Fe_2Al_5 تشکیل می‌گردد. همچنین آلومینیوم بدلیل فعالیت بودن،

ابتدا لایه‌های اکسیدی سطح آهن را احیا می‌کند که منجر به نفوذی یکنواخت در فولاد می‌گردد. اما بمنظور شناسایی فازهای تشکیل شده مقایسه آنالیز عنصری و میکروسختی نیز لازم بنظر می‌رسد.

آنالیز عنصری

آنالیز عنصری نشان داد که در فاصله $1\mu\text{m}$ از سطح فصل مشترک حدود $56\% \text{Al}$ وجود داشت که با توجه به دیاگرام فازی، تشکیل فاز بین فلزی Fe_2Al_5 محتمل است. همچنین درصد آلومینیوم در فواصل 10 و 30 میکرونی احتمال تشکیل فازهای FeAl و Fe_3Al را قوت می‌بخشد. در فاصله‌های بیش از 110 میکرون ترکیب شیمیایی بیانگر تشکیل محلول جامد Fe-Al می‌باشد. به‌منظور اثبات نتایج این بخش از نتایج میکروسختی کمک می‌گیریم.

میکروسختی سنجی

همانطور که نتایج میکروسختی نشان می‌دهد سختی در نزدیک سطح ($1\mu\text{m}$) 780 و بکرز می‌باشد و با توجه به سختی فاز Fe_2Al_5 همخوانی بسیار زیادی بین آنالیز عنصری و میکروسختی مشاهده می‌گردد. همچنین در فواصل 10 و 30 میکرونی با توجه به آنالیز عنصری و میکروسختی به ترتیب تشکیل فازهای FeAl و Fe_3Al به خوبی اثبات می‌گردد. همچنین در فواصل بیش از 110 میکرون آنالیز و میکروسختی احتمال تشکیل محلول جامد را قوت می‌بخشد و امکان تشکیل فاز بین فلزی تقریباً غیر ممکن می‌گردد.

نتیجه گیری

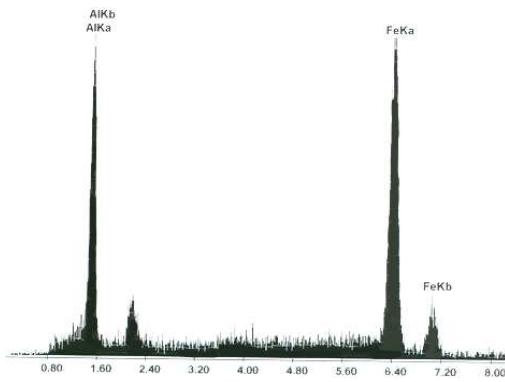
- 1- مهمترین نتیجه حاصل از این پژوهش، نفوذ پوشش نرم آلومینیوم بروش APS بروی فولاد ساده کربنی می باشد که منجر به ایجاد پوششی نوین با اتصال متالورژیکی گردید که پیش بینی می شود منجر به بهبود همزمان خواص سایشی و مقاومت به خوردگی داغ فولاد گردد.
- 2- بدلیل دمای ذوب کمتر آلومینیوم نسبت به فولاد و نیز فعالیت بودن آن، باند نفوذی یکنواخت با ضخامت حدود 200 میکرون تشکیل شده است.
- 3- نفوذ آلومینیوم درون فولاد با تشکیل فازهای بین فلزی Fe-Al در فواصل مختلف همراه بوده است که در نواحی سطحی فاز سخت Fe_2Al_5 تشکیل شده است.
- 4- تشکیل فازهای بین فلزی و محلول جامد باعث افزایش سختی سطح گردید.
- 5- با اعمال شرایط بهینه آماده سازی پوشش دهی، پوششی یکنواخت و با تخلخل کم حاصل گردد.

منابع

1. M. Raessi, J. Mostaghimi *, M. Bussmann. "Effect of surface roughness on splat shapes in the plasma spray coating process" Thin Solid Films 506– 507 (2006) 133 – 135
2. Mokhtar Bounazef. et al. "Effect of APS process parameters on wear behaviour of alumina–titania coatings" Materials Letters 58 (2004) 2451–2455
3. A.M. Ahmed, R. H. Rangel, Int. J. Heat Mass Transfer 45 (2002) 1077
4. Tzu-Hsiang Ko. et al. "Effect of spray angle on three-dimensional flow and deposition process in atmospheric plasma spray torch: A numerical study" Surface & Coatings Technology 200 (2006) 3376 – 3379
- 5- محمد فروغیه، 1373 پارامترهای مختلف آماده سازی سطح در پوشش های پلاسما اسپری، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران
- 6- محمدرضا گرسیوز، 1377 آلومینایزینگ فولاد بروش اسپری حرارتی، پایان نامه کارشناسی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
- 7- ضیا والفی 1371، فرآیند پلاسما اسپری، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران



شکل (1): مشاهده باند نفوذی در فصل مشترک



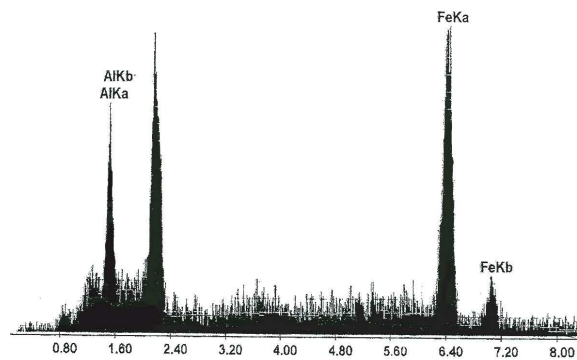
EDAX ZAF Quantification (Standardless)

Element Normalized

Element	Wt%	At%	K-Ratio
AlK	27.19	43.60	0.1122
FeK	72.81	56.40	0.7054
Total	100.00	100.00	

شکل (3): آنالیز عنصری در فاصله 10 میکرون از فصل

مشترک



EDAX ZAF Quantification (Standardless)

Element Normalized

Element	Wt%	At%	K-Ratio
AlK	18.87	32.49	0.0727
FeK	81.13	67.51	0.7936
Total	100.00	100.00	

شکل (2): آنالیز عنصری در فاصله 30 میکرون از فصل

مشترک

جدول (1): ترکیب شیمیایی فولاد CK60

عنصر	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
درصد	0/58	0/4	0/75	0/03	0/03	-	-	-	Balance

جدول (2): ترکیب شیمیایی پودر آلومینیوم

عنصر	Fe	Si	Zn	Cu	Al
درصد	0/22	0/1	0/17	0/12	99/6

جدول (3): پارامترهای فرآیند پوشش دهی

کمیت	پارامتر
20 ^{gr} /min	نرخ تغذیه پودر
30 RPM	سرعت همزن
5 ^{lit} /min	نرخ ورود گاز حامل
12 ^{lit} /min	نرخ ورود گاز هیدروژن
500 A	آمپراژ دستگاه
110 RPM	سرعت دوران دیسک نگهدارنده
300 RPM	سرعت دستگاه
50 ^{mm} /s	سرعت خطی تفنگک پاشش
10	تعداد لایه های پوشش
58-106 میکرون	اندازه پودر
50 ^{lit} /min	نرخ ورود گاز آرگون

جدول (4): نتایج میانگین میکروسختی سنجی

سختی HV	فاصله از فصل مشترک (میکرون)
780	1
564	10
497	20
432	30
267	60
258	90
228	120
194	150
154	200
148	230
128	مغز فولاد

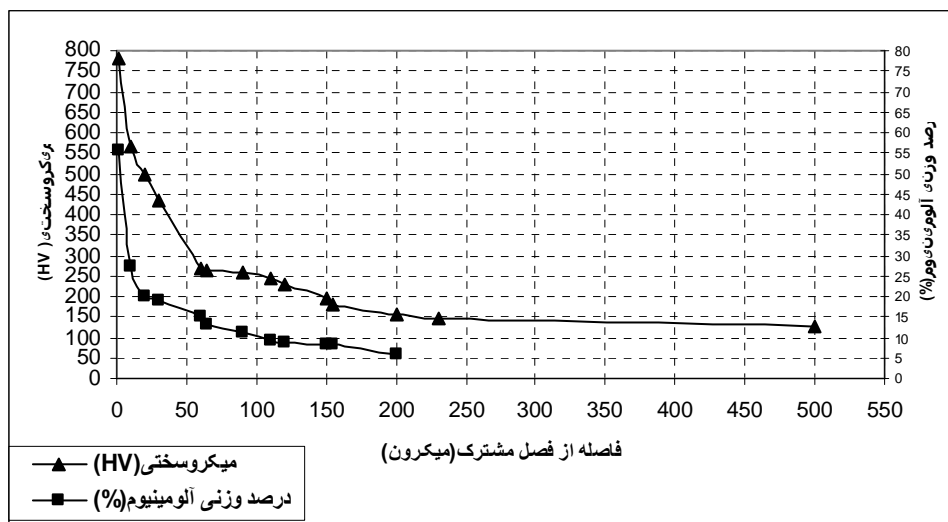
جدول (5): نتایج آنالیز عنصری EDAX

فاصله از فصل مشترک (میکرون)	درصد وزنی آلومینیوم
1	55/7
10	27/2
30	18/9
65	13
110	9/2
155	8/21
200	6/02

جدول (6): مشخصات فازهای بین فلزی Fe-Al

فاز بین فلزی	Fe% wt	Al% wt	سختی HV
Fe_2Al_9	37/5	68/5	1080
$FeAl_3$	40/82	59/18	990
Fe_2Al_5	42/29	57/71	820
$FeAl_2$	50/87	49/13	1030
$FeAl$	67/43	32/57	640
Fe_3Al	86/13	13/87	350

نمودار (1): منحنی تغییرات سختی و درصد وزنی آلومینیوم در فولاد



The Effect Of Diffusion Annealing Heat Treatment On Microstructure & Mechanical Properties Of Plain Carbon Steel, Al Coated By APS (Atmospheric Plasma Spraying)

M. Montazeri¹
F. malek ghaeni²
A. Farnia¹

Abstract

Aluminum sprayed coatings using APS technique was subjected to a heat treatment at 1000 C in order to achieve a metallurgical bonded joint. After metallographic examination by optical and scanning electron microscopy the microstructure of the coating both outside and inside the interface was found to have changed significantly. In addition to the initial 400 μ m coating a diffusion band of 200 μ m was achieved inside the steel. The EDAX analysis indicated the existence of Fe-Al intermetallic phases and the 780Hv micro-hardness of the coating at the initial interface supported the existence of the intermetallics. The hardness profile progressively declined from the highest value at the initial interface formed by APS to lower values towards the secondary interface formed by diffusion.

Keywords: Diffusion Annealing, Spray Coating, Al powder, Plain Carbon Steel, APS

1 - MS Student of metallurgical engineering, Tarbiat Modares University. Mojtaba2088@yahoo.com

2- Asistant Professor of Metallurgy, Tarbiat Modares Uneversity. Farshidmalek@yahoo.com