

شرکت پترو پولاد پارس
((سازنده سازه های سبک و سنگین فلزی))



Petro Poulad Pars.Co

عملیات سطحی

فهرست مطالب

۱- کلیات فرآیند	۱
۲- فرآیندهای پاشش حرارتی	۴
۱-۲- پاشش سیمی توسط شعله اکسی گاز (OFW)	۶
۲-۲- پاششی سیمی توسط قوس الکتریکی (EAW)	۸
۱-۲-۲- مزایا و معایب فرآیند EAW	۱۰
۳-۲- پاشش پودری توسط شعله اکسی گاز (OPF)	۱۱
۱-۳-۲- پاشش شعله ای و نفوذ	۱۳
۴-۲- پاشش پودری توسط قوس پلاسما (PA)	۱۴
۱-۴-۲- پاشش پلاسما در خلاء	۱۶
۲-۴-۲- پاشش توسط قوس پلاسما منتقل شده	۱۸
۳-۴-۲- مزایا و محدودیت های فرآیند PA	۱۹
۵-۲- پاشش پودری توسط شعله اکسی گاز با سرعت بالا (HVOF)	۱۹
۱-۵-۲- پاشش پودری توسط شعله اکسی گاز با سرعت بالا و با روش احتراق پالسی	۲۰
۲-۵-۲- پاشش پودری توسط شعله اکسی گاز با سرعت بالا و با روش احتراق پیوسته	۲۱
۳- آماده سازی سطح	۲۵
۱-۳- تمیزکاری شیمیایی	۲۵
۲-۳- خُرده پاشی	۲۵
۳-۳- رزوه کاری خشن	۲۶
۴-۳- پوشش های پیوندی	۲۷
۵-۳- پیشگرم	۲۷
۴- عملیات نهایی	۲۷
۵- مواد پاشش حرارتی و کاربردها	۲۹
۱-۵- پوشش های مقاوم در برابر سایش	۳۱
۲-۵- پوشش های مقاوم در برابر خوردگی	۳۱
۳-۵- پوشش های محافظ در برابر اکسیداسیون	۳۳
۴-۵- پوشش های عایق حرارتی	۳۳

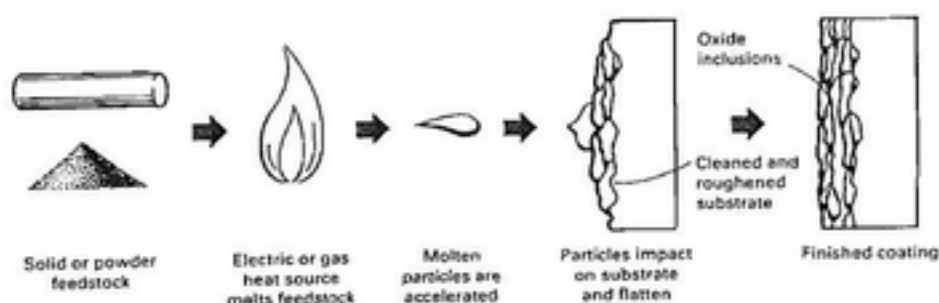


۵ - ۵ - پوشش های مانع حرارت	۳۳
۵ - ۶ - پوشش هادی الکتریکی	۳۴
۵ - ۷ - پوشش های بازتابی ابعادی	۳۴
۶ - ساختار و خواص پوشش ها	۳۴
۶ - ۱ - ریز ساختار پوشش	۳۴
۷ - ایمنی	۳۷
مراجع	۳۹

۱- کلیات فرآیند

فرآیندهای پاشش حرارتی به گروهی از فرآیندها اطلاق می شود که در آنها مواد و ترکیبات فلزی و غیرفلزی (مانند مواد سرامیکی و پلیمری) به صورت نیمه ذوب، بر روی یک زمینه آماده شده، اسپری می شوند و پوشش چسبنده ای را تشکیل می دهند.

مواد پوشش دهنده، به صورت سیم، میله یا پودر می باشند و از طریق واحد اسپری کننده تغذیه شده و تا رسیدن به حالت مذاب یا پلاستیک، گرم و توسط جریان گاز فشرده با سرعت زیاد به سطح کار برخورد می کنند و باعث صاف شدن سطح، از طریق قرار گرفتن در ناهمواری های زمینه، می شوند. در نتیجه یک لایه پوششی نازک تولید می شود. چسبندگی لایه در اثر قفل درونی^۱ و ذوب ذرات ریز حاصل می شود. به طور کلی در این فرآیندها، دمای زمینه را می توان کمتر از 200°C نگه داشت تا تغییرات متالورژیکی در آن رخ ندهد. مشعل اسپری، حرارت لازم برای ذوب را از طریق احتراق گازها، قوس الکتریکی یا پلاسما فراهم می کند. در این فرآیندها به دلیل عدم ذوب فلز پایه، میزان رقت صفر است. شکل ۱ کلیات یک فرآیند پاشش حرارتی را نشان می دهد.



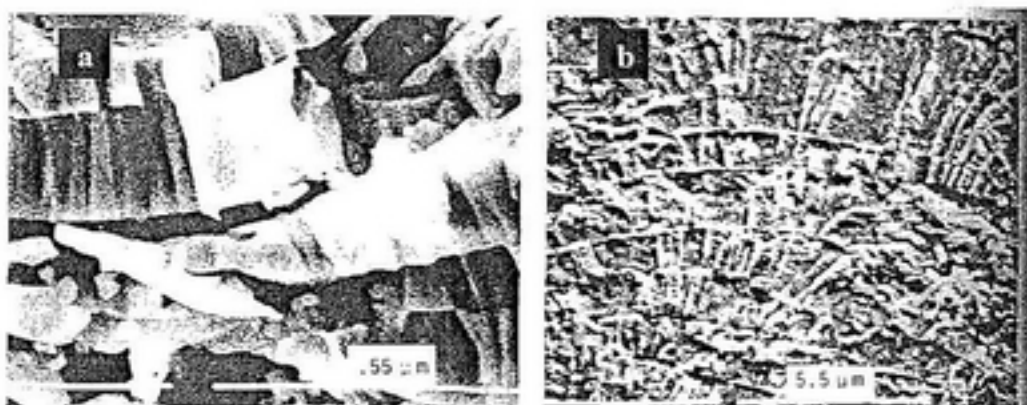
شکل ۱: شماتیک از کلیات فرآیند پاشش حرارتی [۱].

ساختارهای رسوب کرده پوشش های حاصل از پاشش حرارتی با مواد مشابه کاربردی^۲ متفاوت است، زیرا در پاشش حرارتی مواد به صورت مذاب بوده و پوشش حاصله می تواند با گازهای فرآیند و یا اتمسفر واکنش دهد. به عنوان مثال زمانی که هوا یا اکسیژن، جریان گاز فشرده را در فرآیند تأمین

^۱-Inter Locking

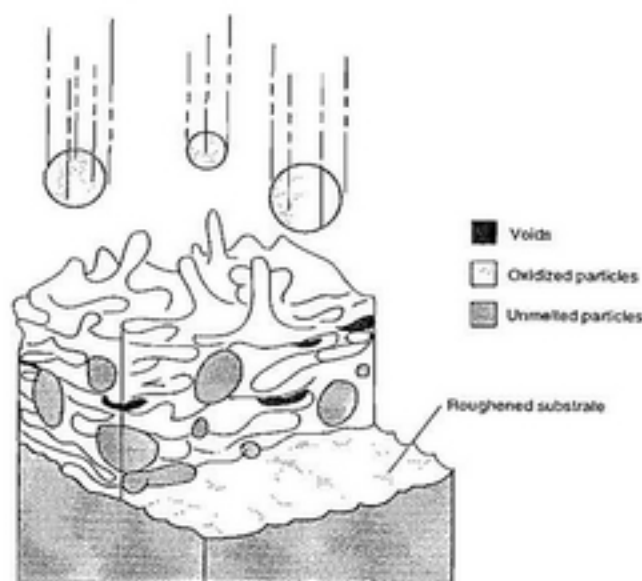
^۲-Wrought

می کنند، ممکن است مواد پوششی اکسید شده و قسمتی از پوشش از مواد اکسید شده تشکیل شود [۱]. پوشش های حاصل از اسپری حرارتی معمولاً در چندین پاس توسط یک مشعل بر سطح قطعه تشکیل می شوند. شکل ۲ مقطع عرضی یک نمونه از پوشش حرارتی را نشان می دهد. در این شکل می توان طبیعت لایه ای پوشش ها را مشاهده کرد [۲].



شکل ۲: میکروساختار پوشش فلزی اعمال شده روش قوس پلاسما. در شکل ساختار Splat و ساختار پلوری ریز داخل Splat ها قابل مشاهده می باشد [۲].
a: تصویر میکروسکوپ الکترونی از یک سطح شکست؛
b: تصویر میکروسکوپ نوری از همان قسمت؛

تغییرات ساختاری به نوع فرآیند پاشش حرارتی، پارامترهای فرآیند، تکنیک و ماده پاششی مورد استفاده بستگی دارد. در شکل ۳، ریز ساختار به دست آمده از فرآیند پاشش حرارتی نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می شود، ذرات مذاب پخش شده و در برخورد با زمینه، تغییر شکل می دهند. این ذرات ابتدا به ناهمواری های سطحی و پس از آن به یکدیگر می چسبند. در صورتی که هوا میان پوشش، حبس شده باشد، امکان تشکیل حفره وجود خواهد داشت. پیوند جزئی بین پوشش اسپری شده و زمینه، معمولاً توسط نیروهای مکانیکی، همچنین چسبندگی، نفوذ و جوشکاری حالت جامد، به وجود می آید. آماده سازی مناسب سطح قبل از اسپری کردن، مهم ترین تاثیر را بر استحکام پیوند پوشش و زمینه خواهد گذاشت [۱].



شکل ۳: پوشش حاصل از پاشش حرارتی بر روی یک سطح ناهموار [۱].

یکی از مزایای اصلی فرآیندهای پاشش حرارتی، تنوع زیاد موادی است که به منظور پوشش در این روش ها به کار می روند. هر ماده ای که بدون تجزیه شدن ذوب شود را می توان در این فرآیند به کار برد. مزیت دیگر این فرآیندها آن است که در اکثر آن ها بدون نیاز به گرم کردن زیاد زمینه، می توان پوشش را ایجاد کرد. در نتیجه بدون اینکه خواص قطعه تغییر کند یا تغییر شکل حرارتی در آن ایجاد شود، فرآیند انجام می گیرد. مزیت سوم، توانایی پوشش دهی مجدد قسمت های آسیب دیده بدون تغییر خواص یا ابعاد قطعه می باشد.

یکی از معایب اصلی فرآیندهای پاشش حرارتی آن است که پوشش را فقط در جایی می توان نشانند که در معرض دید باشد؛ از طرفی محدودیت های ابعادی نیز وجود دارند؛ به عنوان مثال پوشش دهی قطعات کوچک یا حفرات عمیقی که مشعل یا تفنگ در درون آن قرار نمی گیرد معمولاً با مشکل مواجه می شود.

کاربردهای پوشش های حاصل از پاشش حرارتی بسیار وسیع هستند، اما هدف عمده از ایجاد این پوشش ها، مقاومت در برابر خوردگی و یا فرسایش می باشد. همچنین بازپایی ابعادی، سدهای حرارتی،

هادیهای حرارتی، مقاومت یا هادیهای الکتریکی و حفاظهای الکترومغناطیسی از دیگر کاربردهای این پوشش‌ها می‌باشند. این پوشش‌ها در تمامی صنایع از جمله هوا-فضا، کشاورزی، خودروسازی، معدن، کاغذسازی، نفت و گاز، مواد شیمیایی، پلاستیک‌ها و بیوشیمی کاربرد دارند [۲].

۲- فرآیندهای پاشش حرارتی

اختراع اولین فرآیند پاشش حرارتی توسط M. U. Schoop از کشور سوئیس در سال ۱۹۱۱ میلادی صورت گرفت که امروزه به آن پاشش شعله‌ای^۱ گفته می‌شود. فرآیندهای پاشش حرارتی را بر اساس روش و منبع تولید حرارت می‌توان به دو گروه اصلی تقسیم کرد. در گروه اول، گازهای قابل اشتعال به عنوان منبع حرارتی به کار برده می‌شوند و در گروه دوم، نیروی برق وظیفه تامین حرارت را بر عهده دارد. به طور کلی مهم‌ترین روش‌های پاشش حرارتی شامل پنج تکنیک زیر می‌باشد:

- پاشش سیمی توسط شعله اکسی گاز^۲
- پاشش سیمی توسط قوس الکتریکی^۳
- پاشش پودری توسط شعله اکسی گاز^۴
- پاشش پودری توسط قوس پلاسما^۵
- پاشش پودری توسط شعله اکسی-گاز با سرعت بالا^۶

در شکل ۴، نمودار طبقه بندی فرآیندهای پاشش حرارتی نشان داده شده است.

۱- Flame Spraying

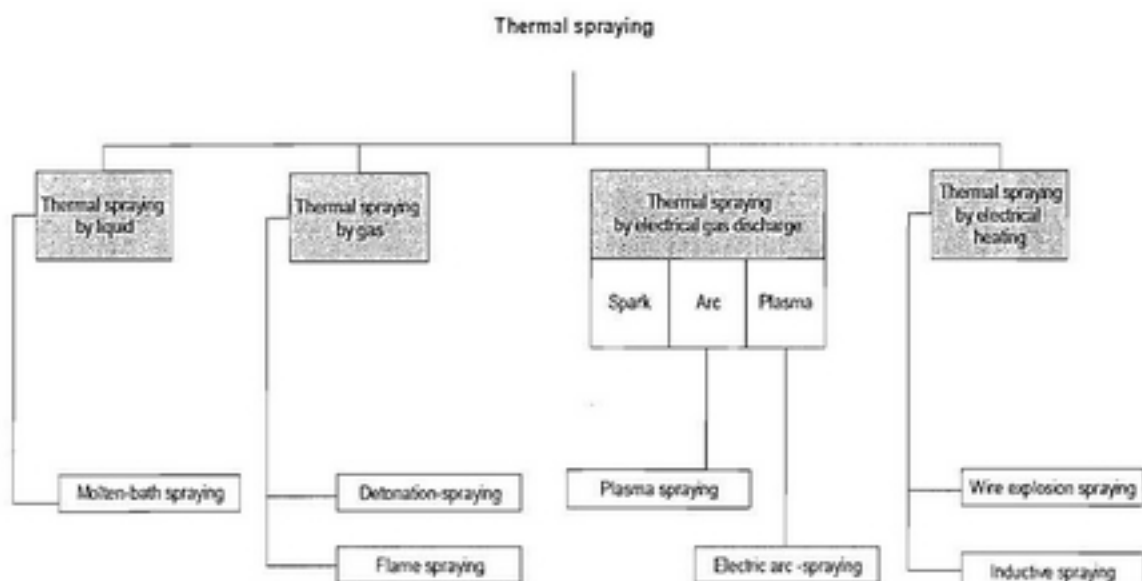
۲- Oxyfuel Wire(OFW) Spray

۳- Electric Arc Wire(EAW) Spray

۴- Oxyfuel Powder(OPF) Spray

۵- Plasma Arc(PA) Powder Spray

۶- High-Velocity Oxyfuel(HVOF) Powder Spray



شکل ۴: فرآیندهای پاشش حرارتی [۳].

در میان مهم‌ترین فرآیندهای ذکر شده، تکنیک قوس پلاسما بیشترین کاربرد را دارد. بررسی‌های بازار نشان می‌دهد که در سال ۲۰۰۰ میلادی، پاشش قوس پلاسما (PA) حدود ۴۸٪، پاشش پودری توسط شعله اکسی-گاز با سرعت بالا (HVOF) حدود ۲۵٪، روش قوس الکتریکی حدود ۱۵٪ و روش‌های احتراقی (OFW, OFP) مجموعاً ۱۲٪ میزان کاربرد پاشش حرارتی را به خود اختصاص داده‌اند.

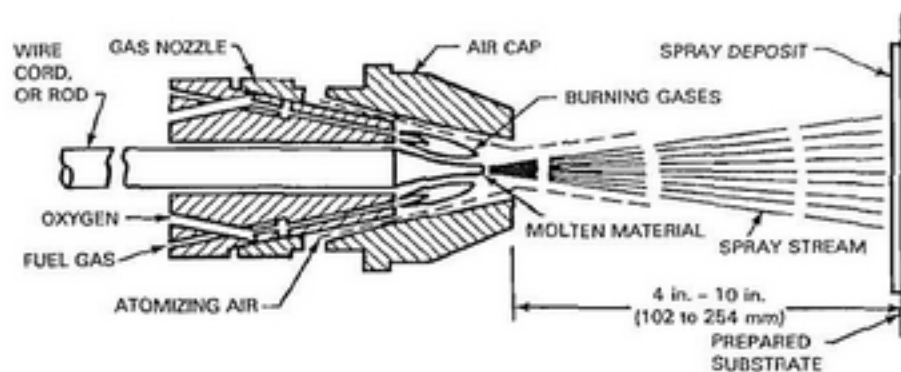
انتخاب روش مناسب پاشش حرارتی بر اساس فاکتورهای زیر تعیین می‌شود:

- ماده پوششی مورد نظر؛
- ملزومات اجرایی پوشش؛
- در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و هزینه؛
- اندازه قطعه کار و قابلیت حمل تجهیزات.

۱-۲- پاشش سیمی توسط شعله اکسی گاز (OFW)

فرآیند پاشش سیمی توسط اکسی گاز (که به آن پاشش شعله ای یا فرآیند احتراقی نیز گفته می شود) قدیمی ترین روش پاشش حرارتی است و هزینه کمی به عنوان سرمایه اولیه نیاز دارد. در این فرآیند از شعله گاز سوختنی-اکسیژن به عنوان منبع حرارتی استفاده می شود. هر ماده ای به صورت سیم و قابل ذوب در دمایی کمتر از 2480°C را می توان به عنوان ماده پوششی در این فرآیند به کار برد. از میله جامد نیز می توان به عنوان ماده پوششی استفاده کرد. در زمان عملیات، سیم توسط غلتک های جلوبرنده، که نیروی محرکه خود را از طریق یک توربین هوای قابل تنظیم یا موتور الکتریکی به دست می آورند، به داخل شعله وارد می شود. نوک سیم با ورود به شعله ذوب شده و توسط جتی از هوای فشرده اتمیزه شده (به ذرات بسیار کوچکی تبدیل شده) و روی قطعه کار می نشیند [۱]. شکل ۵، تصویر شماتیک فرآیند OFW را نشان می دهد.

قطر سیم های مورد استفاده در این روش ۳ تا ۵ میلی متر می باشد و نرخ تغذیه آنها مطابق با نیروی شعله باید تنظیم شود [۴]. گازهای سوختنی متداول، استیلن، پروپان، پروپیلن، هیدروژن و گاز طبیعی می باشد که هر کدام می توانند با اکسیژن ترکیب شوند [۱].



شکل ۵: فرآیند پاشش سیمی توسط شعله اکسی گاز [۶].

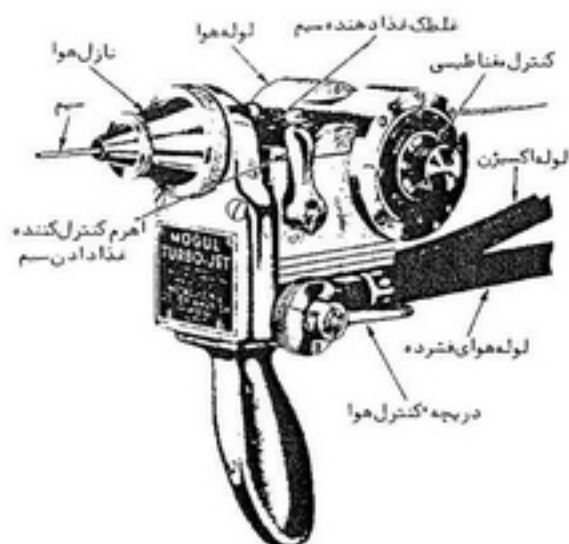
با توجه به جدول ۱ و میزان درجه حرارت شعله اکسی استیلن، این منبع حرارتی به طور وسیعی به کار برده می شود. نسبت حجمی اکسیژن به استیلن به سرعت ذوب و اکسیداسیون، همچنین اندازه قطرات بستگی دارد و معمولاً در حدود ۱ تا ۱/۲ در نظر گرفته می شود [۴].

جدول ۱: درجه حرارت منابع حرارتی مختلف [۲]

Heat source	Approximate temperature (stoichiometric combustion)
Propane-oxygen	2526 °C (4579 °F)
Natural gas-oxygen	2538 °C (4600 °F)
Hydrogen-oxygen	2660 °C (4820 °F)
Propylene-oxygen	2843 °C (5240 °F)
Methylacetylene/propadiene-oxygen	2927 °C (5301 °F)
Acetylene-oxygen	3087 °C (5589 °F)
Plasma arc	2200 to 28,000 °C (4000 to 50,000 °F)

Source: Adapted from Publication 1G191, National Association of Corrosion Engineers

وزن مشعل پاشش سیم در حدود ۳ - ۱/۵ کیلوگرم می باشد که سیم هایی با قطرهای متفاوت را به سطح مورد پوشش تغذیه می کند و قادر است ۲ تا ۶ کیلوگرم در ساعت ماده پوششی به موضع مورد نظر بپاشد. شکل ۶، نمونه ای از این مشعل را نشان می دهد.



شکل ۶: نمونه ای از مشعل پاشش سیم در فرآیند OFW [۴].

مشعل شامل دو قسمت اصلی است «واحد تغذیه^۱» که سیم را به داخل نازل یا افشانک هدایت می کند و «سرگازی» که جریان گاز سوختنی، اکسیژن و هوای فشرده را کنترل می نماید. سیم به محض عبور از نازل، ذوب و به کمک شعله به صورت ذرات ریز در آمده و توسط جریان هوای فشرده به طرف قطعه کار هدایت می شود [۴]. هوای فشرده همچنین موجب سرد کردن سطح کار و حفظ دمای آن تا زیر 205°C می شود [۵].

مشعل اسپری سیم معمولاً به عنوان یک وسیله دستی در کاربردهای داخل کارگاهی به کار می رود، هر چند که مشعل با محرک موتور الکتریکی برای استفاده در حالت های ثابت و حجم تولید بالا و مکرر توصیه می شود [۱]. فاصله بین مشعل و قطعه کار در حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلی متر در نظر گرفته می شود [۴].

نرخ پاشش در فرآیند OFW، ۰/۵ تا ۱۰ کیلوگرم در ساعت می باشد که به نقطه ذوب ماده و نوع گاز سوختنی بستگی دارد [۱]. در این روش آلودگی صوتی بسیار زیاد می باشد (بیش از ۱۰۰ دسی بل (dB)) و قطرات زیادی از ماده پوشش دهنده هدر می روند [۴]. ضخامت لایه های اسپری شده بر روی سطح قطعه معمولاً کمتر از ۰/۲۵ میلی متر می باشد [۱].

فرآیند OFW معمولاً به منظور مقاومت در برابر خوردگی در سازه های بزرگ مانند پل ها و مخازن ذخیره و نیز بازایی ابعادی اجزای فرسایش یافته دستگاه ها به کار می رود. پوشش دهی در این روش سریع و با هزینه کم اعمال می شود و مواد مختلفی را می توان به عنوان ماده پوششی به کار برد. مواد اسپری معمول، عبارتند از: فولادهای زنگ نزن آستنیتی و مارتنزیتی، آلومیناید نیکل، آلیاژهای نیکل، کروم، برنز، مونل، باییت، آلومینیم، روی و مولیبدن.

به طور کلی پوشش های ناشی از اسپری شعله ای سیم، نسبت به روش های پلاسما یا قوس الکتریکی، استحکام پیوند کمتر، تخلخل بیشتر و بازده دمایی کمتری داشته و حرارت بیشتری را به قطعه زیرین خود انتقال می دهند.

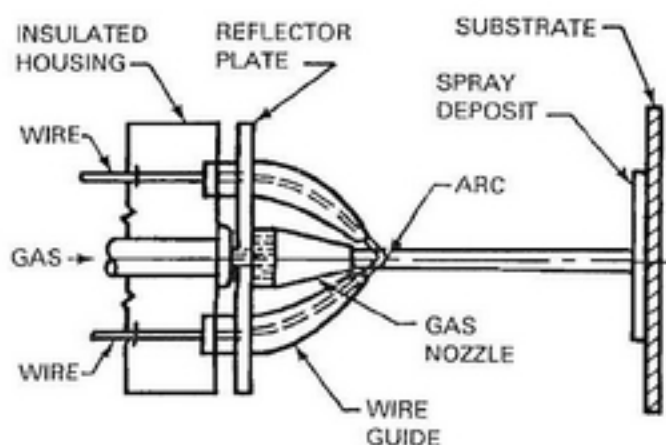
۲-۲- پاششی سیمی توسط قوس الکتریکی (EAW)

در اسپری قوس الکتریکی سیمی، مواد پوششی به صورت سیم هایی رسا و با قطر حدود ۱/۵ mm به کار می روند. موتورهای Push-Pull، دو سیم را که به صورت الکتریکی شارژ شده اند، از طریق مشعل به جلو می رانند. قوس الکتریکی بین دو سیم به وجود می آید و با ایجاد دمایی بیش از

^۱-Power Unit

۵۵۰۰°C آنها را ذوب می‌کند. هوای کمپرس شده، فلز مذاب را اتمیزه کرده و آن را روی سطح آماده شده می‌پاشد [۱]. سیم‌ها زاویه‌ای در حدود ۳۰ تا ۶۰ درجه نسبت به یکدیگر دارند [۴]. در این روش حرارت انتقالی به ماده نسبت به فرایندهای شعله‌ای کمتر است. زیرا در فرایندهای شعله‌ای، شعله با سطح قطعه مورد نظر در تماس می‌باشد. در شکل ۷، طرح شماتیکی از فرایند EAW نشان داده شده است.

در فرایند EAW، معمولاً از منابع نیروی جریان یکنواخت ولتاژ ثابت استفاده می‌شود. یک سیم مثبت (آند) و دیگری منفی (کاتد) می‌باشد. نوک سیم کاتد بیشتر از نوک سیم آند گرم شده و زودتر ذوب می‌گردد. در نتیجه در یک قطر مساوی، ذرات تولید شده از کاتد کوچکتر از ذرات حاصل از آند می‌باشند.



شکل ۷: فرایند پاشش سیمی توسط قوس الکتریکی [۶].

منبع نیروی یکنواخت، ولتاژی در حدود ۱۸ تا ۴۰ ولت تولید می‌کند که امکان کار در گستره وسیعی از فلزات و آلیاژها را فراهم می‌سازد. نمونه‌ای از پارامترهای مورد استفاده در فرایند EAW در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: نمونه ای از پارامترهای مورد استفاده در فرایند EAW [۴]

Wire Diameter (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Wire Speed (m/min)	Compressed Air (bar)	Distance Gun-Surface (mm)
۱.۶-۲	۳۰۰-۴۰۰	۲۰-۳۰	۸۰	۳.۵-۶	۲۰

۲-۲-۱- مزایا و معایب فرآیند EAW

از مزایای EAW به موارد زیر می توان اشاره کرد:

- ۱- هزینه کلی این فرآیند به طور تقریبی ۷۰٪ کمتر از فرآیندهای پاششی شعله ای می باشد. یکی از دلایل مهم این مزیت، سرعت رسوب بالا در پاشش سیم هایی از جنس فولاد، روی، سرب، آلومینیم، مس و آلیاژهای آن می باشد.
 - ۲- در این فرآیند نیازی به استفاده از گازهای احتراقی نیست، بنابراین تمام خطرات و مشکلات ناشی از کاربرد این گازها از بین می رود.
 - ۳- این فرآیند نسبت به فرآیندهای شعله ای به آماده سازی سطحی کمتری نیاز دارد.
 - ۴- احتمال اکسیداسیون ذرات پاششی و لایه پوشی نسبت به فرآیندهای شعله ای ۵۰٪ تا ۶۰٪ کمتر می باشد. بنابراین پیوندهایی با استحکام کششی، فشاری و خمشی بیشتری حاصل می شود.
 - ۵- قوس الکتریکی در این فرآیند می تواند بین دو سیم از دو ماده مختلف، مثلاً فولاد زنگ نزن و آلومینیم برنز ایجاد شود و مخلوط این دو ماده بر روی سطح قطعه کار قرار گیرد.
 - ۶- استحکام چسبندگی پوشش در این فرآیند به دلیل دمای بسیار زیاد ذرات بالاست (بیش از ۶۹MPa برای برخی از فلزات).
 - ۷- با توجه به اینکه در این روش فقط از هوای کمپرس شده و الکتریسیته استفاده می شود، تجهیزات را به راحتی می توان جابجا کرد [۵].
- برخی از معایب EAW نیز عبارتند از:
- ۱- به دلیل عدم وجود گاز محافظ مقادیر قابل توجهی از کربن سیم های فولادی می سوزد. همچنین امکان از بین رفتن Mn و Si در این سیم ها نیز وجود دارد.

۲- سرعت پاشش قوسی کمتر از پاشش شعله‌ای است.

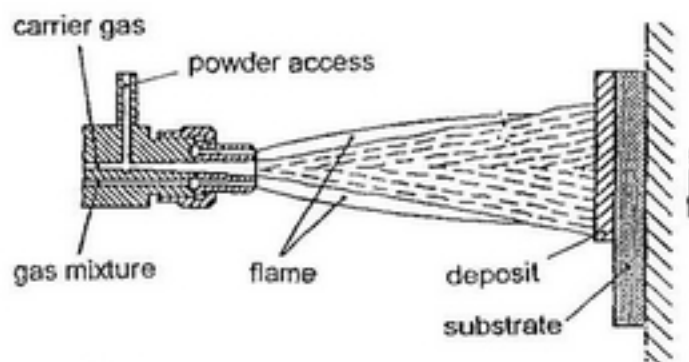
۳- در این فرآیند، در اطراف قطعه کار، بخار و زنگ تولید می‌شود.

۴- در این روش نمی‌توان از مواد غیر هادی استفاده کرد.

فرآیند EAW برای کاربردهایی که نیازمند پوشش سنگین یا دارای سطوح بزرگ هستند، بسیار مناسب است (مانند پوشش آلومینیم و روی بر پل‌های فولادی). سیستم قوس می‌تواند پوششی با ضخامت ۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر ایجاد کند. سرعت رسوب‌دهی برخی از آلیاژهای نیکل در این روش به $55 \frac{kg}{h}$ می‌رسد در این روش می‌توان خواص پوشش از جمله سختی بافت سطحی را با توجه به کاربرد مورد نظر تنظیم کرد [۱].

۳-۲- پاشش پودری توسط شعله اکسی گاز (OFP)

در فرآیند OFP نیز از گازهای احتراقی به عنوان منبع حرارتی استفاده می‌شود. مواد زیادی همچون فلزات خاص، آلیاژها، سرامیک‌ها، سرب‌ها، کربیدها و سایر مواد پوششی سخت قابل ذوب، می‌توانند به عنوان عامل پوشش‌دهنده مورد استفاده قرار گیرند. در این روش با استفاده از نیروی ثقل یا فشار، پودر به داخل مشعل تغذیه شده و به نازل می‌رسد. پودر، داخل شعله اکسی استیلن ذوب شده و توسط جریان گاز یا هوای فشرده به روی سطح آماده شده منتقل می‌شود (شکل ۸) [۱].



شکل ۸: فرآیند پاشش پودری توسط شعله اکسی-گاز [۸].

در سیستم فشاری، پودر توسط هوای فشرده به طرف قسمت میانی نازل هدایت می‌شود، سپس شعله گاز این ذرات ریز را ذوب کرده و به کمک هوای فشرده با سرعت زیاد به موضع مورد نظر می‌رساند. در سیستم غیرفشاری (ثقلی)، از هوای فشرده جهت انتقال پودر پوششی به مشعل استفاده نمی‌شود [۵].

برای معارف عمومی سیستم جریان ثقل (غیر فشاری) کاربرد دارد و در زمانی که پوشش بسیار دقیق یا سرعت‌های بالای پاشش مورد نیاز است از سیستم تغذیه فشاری استفاده می‌گردد [۱]. مشعل، مشخصات پودر (شکل، اندازه، وزن و نقطه ذوب دانه‌ها) و پارامترهای جوشکاری با توجه به فاکتورهای زیر باید هماهنگ با یکدیگر باشند:

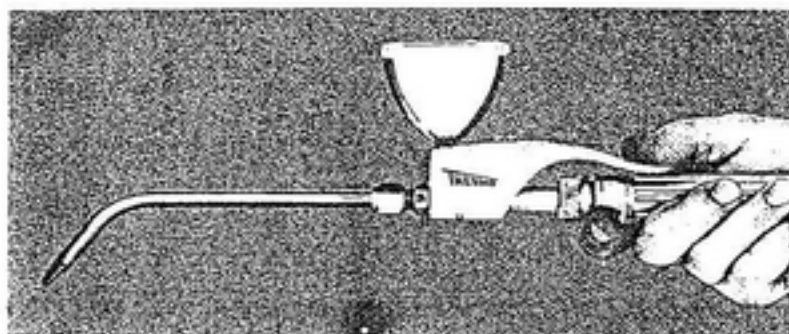
- مشعل باید پودر را به راحتی به سمت قطعه کار تغذیه کند. این عامل به شکل و اندازه دانه‌های پودر بستگی دارد.
- تغذیه پودر توسط مشعل باید به صورتی باشد که پخش پودر در مرکز شعله متمرکز گردد. این عامل به وزن و اندازه دانه‌های پودر بستگی دارد. دانه‌هایی که در اطراف شعله پخش می‌شوند به دما و سرعت کافی نخواهند رسید و عدم پیوند مناسب و ایجاد حفره در رسوب را به همراه خواهند داشت.
- مشعل باید پودر را با سرعت مناسب تغذیه کند. در غیر این صورت نیروی شعله قادر به ذوب ذرات نخواهد بود. سرعت تغذیه پودرها در مشعل، متأثر از شکل و اندازه آنها می‌باشد.
- سرعت دانه‌ها و فاصله بین مشعل و سطح قطعه کار تعیین کننده زمان ذوب دانه‌ها می‌باشد. نیروی شعله باید متناسب با این زمان، اندازه، شکل و نقطه ذوب ذرات باشد.

پودرهای مورد استفاده در فرایند OFP باید دارای مشخصات زیر باشند:

- ۱- به منظور جریان مناسب در سیستم تغذیه، شکل کروی داشته باشند؛
- ۲- جهت ذوب هم‌زمان، تا حد امکان دارای اندازه‌های یکسان باشند؛
- ۳- دارای میزان اکسیژن کمی باشند؛
- ۴- اندازه‌ای متناسب با فرایند پاشش حرارتی داشته باشند.

در روش OFP به طور معمول از یک لایه میانی دارای « $80\% \text{Ni} + 20\% \text{Al}$ » بر روی قطعه کار استفاده می شود [۴].

مشعل OFP شبیه مشعل OFW، ولی ساده تر بوده و فاقد واحد قدرت می باشد. در شکل ۹، نوع بسیار ساده ای از این مشعل نشان داده شده است.



شکل ۹: نمونه ساده ای از مشعل پاشش پودر فلزی [۴].

به طور کلی تجهیزات OFP، سبک تر و فشرده تر از دیگر انواع تجهیزات پاشش حرارتی می باشد. اما به دلیل سرعت کمتر ذرات، پوشش ها معمولاً دارای استحکام پیوند کمتر، تخلخل بیشتر و به طور کلی چسبندگی کمتری نسبت به دیگر فرایندهای حرارتی می باشند. از کاربردهای این فرآیند می توان به تعمیرات ماشین آلات و استفاده آنها در آببندهای موتورهای توربین گازی اشاره کرد [۱].

۲-۳-۱- پاشش شعله ای و نفوذ

پاشش شعله ای و نفوذ، یکی از روش های بهبود یافته OFP می باشد. در این روش، مواد به کار رفته جهت پوشش دهی، خود فلاکس^۱ هستند (یعنی عناصری در آنها وجود دارد که با اکسیژن یا اکسیدها واکنش داده و اکسیدهای کم دانسیته ای ایجاد می کنند که روی سطح شناور می شوند). این مواد نقطه ذوب نسبتاً پایینی داشته و نیازمند عملیات حرارتی بعد از اسپری می باشند. به طور کلی از

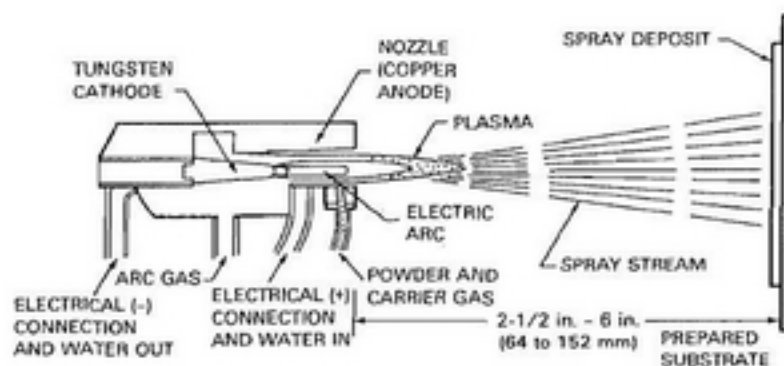
^۱Self-Fluxing

آلیاژهای پایه نیکل یا کبالت به همراه فسفر، بور یا سیلیسیم برای پایین آوردن نقطه ذوب و گدازآوری استفاده می شود. در عمل در این روش، قطعات مشابه دیگر روش های پاشش حرارتی آماده و پاشش دهی می شوند و سپس عملیات نفوذ انجام می شود. این فرآیند به دو صورت انجام می شود: اسپری و نفوذ، اسپری - نفوذ. در حالت اسپری و نفوذ، عملیات نفوذ بعد از رسوب دهی با استفاده از یکی از روش ها نظیر مشعل یا شعله، کوره القایی یا کوره های خلاء و گاز خنثی یا هیدروژن، انجام می شود. در حالت اسپری - نفوذ، رسوب دهی و نفوذ همزمان صورت می گیرد. نفوذ آلیاژهای به کار رفته معمولاً در دمای 1010°C تا 1175°C صورت می گیرد که به ترکیب شیمیایی آنها بستگی دارد. کاربرد گسترده پوشش های شعله ای همراه با نفوذ زمانی است که ترکیبی از سایش همراه با تنش های زیاد (برشی یا ضربه ای) بر روی قطعه اعمال شود. سختی پوشش می تواند به ۶۵HRC برسد. استفاده از این پوشش ها به موادی محدود می شود که قادر به نفوذ در دمای 1175°C - 1010°C باشند. دمای نفوذ می تواند خواص عملیات حرارتی برخی آلیاژها را تغییر دهد. با این وجود این پوشش ها معمولاً تحمل عملیات حرارتی بعدی روی قطعه را خواهند داشت. برای کاهش ترک هایی که به علت بالا بودن ضخامت یا تفاوت زیاد ضریب انبساط حرارتی پوشش و زمینه رخ می دهند، می توان نرخ سرد کردن را کاهش داد.

۲-۴- پاشش پودری توسط قوس پلاسما (PA)

فرآیند پاشش توسط قوس پلاسما یکی از پیچیده ترین و پرکاربردترین روش های پاشش حرارتی است که در آن از مواد پوششی به صورت پودر استفاده می شود. در این روش از مشعلی با قوس پلاسما منتقل نشده^۱ با ظرفیت ۸۰-۲۰ KW برای ایجاد قوس به منظور ذوب و پرتاب مواد پوششی روی سطح کار استفاده می شود. اصطلاح قوس منتقل نشده به این معنی است که قوس پلاسما درون مشعل است و قطعه کار قسمتی از مدار الکتریکی را تشکیل نمی دهد. قوس با شدت بالا و با جریانی مستقیم از طریق گاز خنثی بین آند مسی خنک شونده با هوا و کاتد تنگستنی (الکتروود) برقرار می شود (شکل ۱۰).

۱-Non Transferred Arc



شکل ۱۰: فرآیند پاشش توسط قوس پلاسما [۶].

دمای به دست آمده توسط تجهیزات تجاری پلاسما، 11000°C و بسیار بالاتر از نقطه ذوب یا حتی تبخیر هر ماده شناخته شده می‌باشد. تجزیه مواد در حین اسپری به دلیل سرعت بالای گاز و زمان کوتاهی که مواد در محیط پلاسما قرار دارند، به حداقل می‌رسد. در فرآیند پاشش پودری توسط قوس پلاسما، اتمسفر کنترل شده‌ای برای ذوب و انتقال ماده پوششی وجود دارد که در آن اکسیداسیون به حداقل می‌رسد. سرعت بالای گاز موجب تولید پوششی با دانسیته بالا و تخلخل کم می‌گردد. گازهای مورد استفاده در این فرآیند، آرگون و نیتروژن می‌باشند. سطح انرژی گازها با عبور از قوس الکتریکی بالا می‌رود و آزاد شدن انرژی در بازگشت گاز به حالت اولیه، باعث تولید دمای بسیار بالایی می‌گردد. اتفاقی که در این مرحله رخ می‌دهد این است که ابتدا مولکول‌های گاز پلاسما (نیتروژن) به دو اتم مجزا تجزیه می‌شوند. سپس این اتم‌ها یونیزه شده و الکترون‌های آزاد آنها را می‌گردند. این الکترون‌ها در خارج از قوس الکتریکی مجدداً جذب اتم‌ها می‌شوند و انرژی حاصل از این فرآیند به صورت حرارت و نور آزاد می‌گردد. از طرفی، انرژی الکترون‌ها به یون‌های مثبت منتقل می‌شود و به آنها شتاب می‌دهد تا زمانی که پلاسما به حالت تعادل برسد. در نتیجه یک پلاسمای حرارتی ایجاد می‌شود که در آن انرژی الکترون‌ها به حرارت تبدیل شده است. در این زمان ماده پوششی معلق شده در یک گاز به پلاسما تزریق و سپس ذوب شده و با سرعت بالا (300 m/s) تا 550 m/s روی قطعه می‌نشیند. در عمل مقدار کمی گاز ثانویه مانند هیدروژن یا هلیوم با گاز پلاسمای اولیه مخلوط می‌شود تا ولتاژ عملیاتی و انرژی حرارتی افزایش یابد.

دمای بالا و سرعت زیاد گاز در روش پلاسما، موجب تولید پوشش هایی می شود که از لحاظ مکانیکی و متالورژیکی بر روش های OFW یا OFP برتری دارند. فرآیند پلاسما به خصوص جهت پوشش مواد با کیفیت بالای سرامیکی مانند اکسید زیرکیم در محفظه های احتراق موتور توربین به کار می رود.

تکنولوژی فعلی اسپری پلاسما را می توان به طور کاملاً اتوماتیک و با کنترل کامپیوتری سطح نیرو، شدت جریان، گاز پلاسما، نرخ تغذیه و شروع و پایان عملیات اجرا کرد [۱].

در هر یک از روش های پودری پاشش حرارتی، درجه کارکرد شعله برای ذوب و شتاب بخشیدن پودر، به پارامترهای حرارتی ماده پوشش دهنده، اندازه و شکل ذرات، سرعت تغذیه پودر، جریان گاز پلاسما، جریان گاز حمل کننده پودر، زاویه رسوب دهی و طراحی مشعل و فاصله مشعل از سطح قطعه کار بستگی دارد [۲].

هر ترکیبی از ماده پوششی و مشعل دارای یک اندازه دانه بهینه می باشد. ذرات بسیار ریزتر از این اندازه ایده آل، بیش از حد گرم شده و تبخیر می شوند و ذرات بسیار بزرگ تر ذوب نمی شوند و از شعله فرو می ریزند.

هر نوع ماده که با اندازه ای مناسب برای پودر وجود داشته باشد را می توان در پوشش فرآیند اسپری پلاسما به کار برد. پوشش های اسپری پلاسما می توانند به صورت عنصری (آلومینیم، مولیبدن، نیکل یا کروم)، آلیاژی (نیکل، آهن یا کبالت)، سرامیک و سرامت^۱ (Cr_2O_3 یا Cr_2C_3) و یا کامپوزیت (نیکل - آلومینیم، کاربید تنگستن یا پیوند کبالت، یا Al_2O_3 روکش داده شده) باشند [۱].

اکسیدها، نیتريد ها، بورايد ها و کاربیدها به راحتی توسط قوس پلاسما ذوب می شوند. اما ضخامت چنین پوشش های سختی نمی تواند خیلی زیاد باشد. به عنوان مثال Cr_2O_3 که نمی توان آن را توسط روش های شعله ای اسپری کرد در ۴۰ لایه با ضخامت ۰/۰۲ میلی متر اسپری می شود تا ضخامت کلی آن به ۰/۸ mm برسد [۴]. به طور کلی ضخامت پوشش های پلاسما بین ۰/۰۵ mm تا ۰/۵ mm می باشند [۱].

۲-۴-۱- پاشش پلاسما در خلاء^۲

در مدت فرآیند رسوب دهی، علاوه بر دما و سرعت ذرات، فاکتور دیگری که نقش مهمی را ایفا می کند، میزان واکنش ذرات پودر با گازهای فرآیند یا گازهای محیط اطراف (هوا) می باشد. در فرآیند

۱- Cermet

۲-Vacuum Plasma Spraying

اسپری پلاسما در هوا، میزان اکسیداسیون ذرات پودر تابعی از طراحی مشعل، پارامترهای اجرایی و فاصله مشعل از قطعه کار می باشد. اکسیداسیون بیش از حد پودرهای فلزی و کاربریدی منجر به کاهش شدید دانسیته پوشش، استحکام چسبندگی و استحکام پیوند و تغییرات پارامترهای اجرایی خواهد شد که این مشکل را می توان با انجام عملیات در یک محفظه خلاء و تحت یک اتمسفر خنثی رفع کرد. در این فرآیند مشعل و قطعه در یک محفظه خلاء قرار می گیرند و کل عملیات در اتمسفر خنثی و در فشار پایین (۵۰ torr یا ۷ Kpa) انجام می شود.

فرآیند پاشش دهی در اتمسفر خنثی و در محفظه های کم فشار مزایای منحصر به فردی نسبت به فرآیندهای معمولی پاشش دهی قوس پلاسما دارد. به دلیل فشار کمتر در این محفظه ها، پروفیل دما و سرعت جریان گاز پلاسما تا فواصل بیشتری گسترش پیدا می کند. بنابراین خواص پوشش حساسیت کمتری نسبت به فاصله مشعل از قطعه کار دارند. به علاوه، می توان قطعه را پیشگرم کرد، بدون آنکه فرآیند اکسیداسیون رخ دهد. در نتیجه کنترل تنش پسماند و استحکام پیوند بهتری حاصل خواهد شد.

از مزایای دیگر این سیستم ها می توان به بازدهی بیشتر رسوب دهی به دلیل افزایش زمان میرایی^۱ ذرات پودر در منطقه حرارتی بزرگتر پلاسما و دمای بالاتر زمینه اشاره کرد. همچنین در این سیستم ها کنترل ضخامت پوشش افزایش می یابد و مشکلات محیطی مانند ایجاد غبار و تولید صدا به حداقل می رسد [۲].

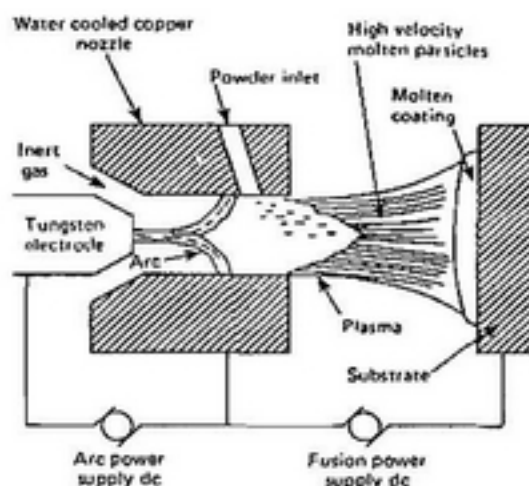
با این وجود در این روش هزینه تجهیزات بیشتر بوده و اندازه قطعه با توجه به اندازه محفظه محدود می شود. از کاربردهای این روش می توان به پوشش دهی ایرفویل های توربین و اعمال پوشش های پیچیده و مقاوم در برابر خوردگی داغ مانند Ni-Cr-Al-Y و دیگر آلیاژهای نوع M-Cr-Al-Y بر روی تجهیزات موتور هواپیما اشاره کرد.

در این تکنیک از پودرهای بسیار ریز (مش ۲۲۵-) به منظور دستیابی به حداکثر دانسیته پوشش استفاده می شود. در صورت نیاز به پوشش با خلوص بالا، پودر باید تحت پوشش گاز خنثی تولید و در گاز خنثی انمیزه شود تا خلوص آن حفظ گردد [۱].

^۱-Dwell Time

۲-۴-۲- پاشش توسط قوس پلاسمای منتقل شده^۱

این نوع فرایند پاشش دهی توسط قوس پلاسمای قادر به حرارت دادن و ذوب سطحی ماده زمینه می باشد. در شکل ۱۱، این فرایند به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۱۱: فرایند پاشش دهی قوس پلاسمای منتقل شده [۶].

در این روش یک جریان قوس ثانویه از طریق پلاسمای و قطعه کار برقرار می شود که ذوب سطحی و عمق نفوذ را کنترل می کنند. از مزایای این روش می توان به برقراری پیوند متالورژیکی، ایجاد پوشش هایی با دانسیته بالا، سرعت های رسوب دهی بالا و تشکیل رسوب با ضخامت هایی بالا در هر پاس، اشاره کرد. در یک عملیات تک پاس، با سرعت تغذیه پودر 9 kg/h می توان پوشش هایی با ضخامت $6/35 \text{ mm}$ - $0/5 \text{ mm}$ و عرض 32 mm ایجاد کرد. به علاوه در این تکنیک به نیروی الکتریکی کمتری نسبت به فرایندهای قوسی منتقل نشده نیاز می باشد. به عنوان مثال برای رسوب دهی $1/88$ کاربرد تنگستن و $1/12$ کبالت با ضخامت $0/3$ میلی متر و عرض $9/5$ میلی متر، جهت تشکیل پوششی با حداکثر خواص، نیاز به 24 پاس و ظرفیت 60 KW - 40 KW در فرایند قوس منتقل شده می باشد.

^۱-Transferred Plasma-Arc

در حالی که در روش قوس منتقل شده، به دست آوردن همین پوشش با شرایط مشابه مستلزم انجام عملیات با یک پاس و ظرفیت تقریباً ۲/۵KW می باشد.

این فرآیند دارای محدودیت هایی نیز هست که مهم ترین آنها عبارتند از:

- ۱- به دلیل حرارت ماده زمینه، تغییر میکروساختار غیرقابل اجتناب می باشد.
- ۲- استفاده از این فرآیند محدود به موادی می باشد که رسانای الکتریکی باشند و بتوان آنها را ذوب کرد.

فرآیند پاشش دهی توسط قوس پلاسمای منتقل شده در سخت پوشی^۱ مواد و تجهیزات مختلف کاربرد دارد [۲].

۲-۴-۳- مزایا و محدودیت های فرآیند PA

از مزایای فرآیند پاشش توسط قوس پلازما می توان به موارد زیر اشاره کرد:

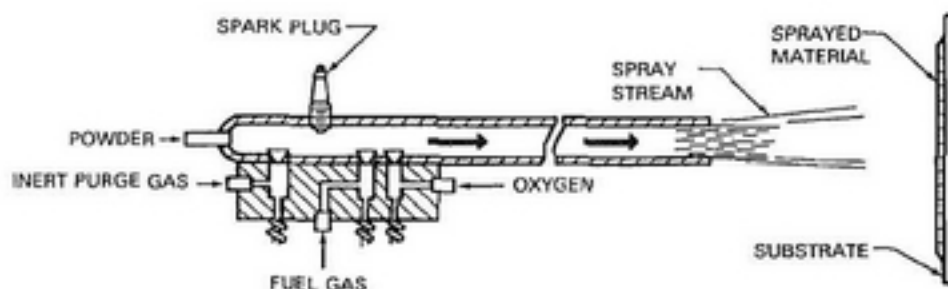
- ۱- تقریباً تمام مواد می توانند توسط این فرآیند پوشش داده شوند.
 - ۲- استحکام پیوند بالا و دانسیته پوشش زیاد است.
 - ۳- مشکلات ناشی از عدم توزیع نامناسب حرارت حداقل می باشد.
- از معایب فرآیند می توان به آلودگی صوتی بسیار زیاد در حدود ۱۰۰ دسی بل (dB) و آسیب های ناشی از آن و ایجاد تشعشعات مادون قرمز و ماوراء بنفش که موجب سوختگی می شوند اشاره کرد. از این رو لازم است که از پوست و چشم ها محافظت شود [۵].

۲-۵- پاشش بودری توسط شعله اکسی گاز با سرعت بالا (HVOF)

در فرآیند HVOF از انرژی سنیتیک بسیار زیاد و انرژی حرارتی کنترل شده خروجی، برای تولید پوشش هایی با تخلخل بسیار کم، با استحکام پیوند بالا و تنش های پسماند کم استفاده می شود. HVOF با دو روش احتراق پالسی و احتراق پیوسته انجام می گیرد.

۵-۲-۱- پاشش پودری توسط شعله اکسی گاز با سرعت بالا و با روش احتراق بالسی

در این فرآیند که به صورت شماتیک در شکل ۱۲ نشان داده شده است، از یک سری انفجارات کنترل شده توسط مخلوطی از اکسیژن و استیلن برای احتراق پودر و قرارگیری آن روی سطح نمونه استفاده می شود. در این روش از یک مشعل انفجاری^۱ استفاده می شود که از یک بشکه سرد شونده با آب با طول چندین فوت، به قطر داخلی حدود ۲۵ میلی متر و گاز همراه و تجهیزات اندازه گیری پودر تشکیل می شود. در عمل، درون بشکه مخلوطی از اکسیژن و استیلن، همراه با پودر معلق در نیتروژن قرار گرفته است. گاز شعله ور می شود و پودر توسط مشعل حدود 760 m/s سرعت می گیرد و تا نقطه ذوب یا بیش از آن گرم می شود. در داخل مشعل دما به 3900°C می رسد. فاصله ای که پودر در گاز با سرعت بالا قرار می گیرد، بسیار بیشتر از فاصله ای است که پودر در تجهیزات پلاسما یا اسپری شعله قرار دارد و در نتیجه سرعت ذرات بیشتر خواهد بود. بعد از خروج پودر از بشکه یک پالس نیتروژن به آن وارد می شود. مشعل ۴ تا ۸ بار در ثانیه تخلیه می شود.



شکل ۱۲: فرآیند پاشش توسط مشعل انفجاری (D-Gun) از فرآیندهای HVOF [۶].

سرعت زیاد ذرات در این روش موجب ایجاد پوششی با دانسیته بالاتر، استحکام داخلی و استحکام پیوند بیشتر نسبت به اسپری پلاسما معمولی یا اسپری پودری اکسی گاز می گردد. D-Gun کاربرد موفقی در پوشش دهی قسمت های بحرانی اجزاء دقیقی که از انواع آلیاژهای تجاری ساخته شده اند داشته است. ضخامت معمول پوشش کمتر از ۰/۷۵ میلی متر است، اما در بسیاری از کاربردها فقط به ضخامتی در حدود ۰/۰۷۵ میلی متر یا کمتر نیاز می باشد.

1-Detonation Gun, D-Gun

مواد مناسب پوشش‌های D-Gun شامل فلزات خالص، آلیاژها، اکسیدها، کاربیدها و کامپوزیت‌ها می‌باشد. این روش به خصوص در پوشش‌دهی کاربیدها و اکسیدهایی که مقاوم در برابر سایش سخت هستند کاربرد زیادی دارد. در این روش سطح قطعه به ندرت بیش از 150°C گرم می‌شود. در نتیجه قطعه را می‌توان ساخت و قبل از پوشش‌دهی به طور کامل عملیات حرارتی کرد. به علاوه مواد دارای نقطه ذوب بسیار بالا (مثل WC-Co) را می‌توان روی زمینه‌های با نقطه ذوب پایین (مثل آلومینیم) پوشش داد. معمولاً در این روش اعوجاج بسیار کم رخ داده یا اصلاً رخ نمی‌دهد و ریزساختار و استحکام زمینه در فرآیند پوشش‌دهی تغییر نمی‌کند.

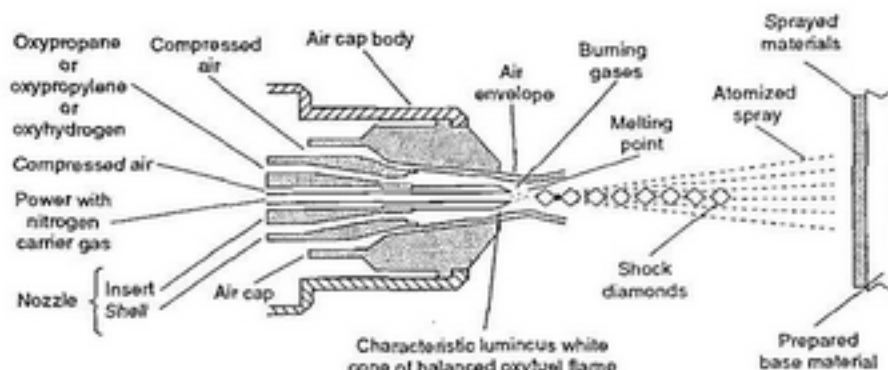
فرآیند D-Gun دارای صدایی بیش از ۱۵۰ دسی بل می‌باشد، از این رو لازم است که در اتاق‌های ضد صدا انجام شود.

۲-۵-۲- پاشش پودری توسط شعله اکسی گاز با سرعت بالا و با روش احتراق پیوسته

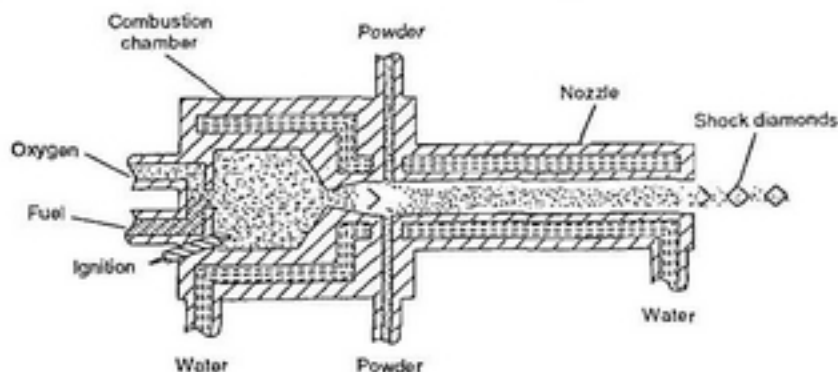
در فرآیندهای HVOF که با روش احتراق پیوسته صورت می‌گیرند نیز احتراق داخلی صورت می‌گیرد و از یک مخلوط سوخت اکسی گاز شامل اکسیژن و یکی از گازهای پروپیلن، پروپان، هیدروژن و حتی سوخت‌های مایع مثل کروزین استفاده می‌شود. قسمت احتراق مشعل‌های HVOF توسط آب یا هوا سرد می‌شوند و مخلوط سوخت/اکسیژن را تحت فشار محترق می‌کنند و جریان گاز محترق شده به سمت یک لوله با سیستم خنک شونده حرکت می‌کند. پودرها، به همراه گازهای حامل (مانند نیتروژن) به داخل نازل تغذیه می‌شوند و با گازهای محترق فشار بالا تماس پیدا می‌کنند (شکل ۱۳). گازهای دارای سرعت بالا الگوهای الماسی شکلی پدید می‌آورند که در شکل ۱۳ قابل مشاهده می‌باشند.

در این فرآیند دمای احتراق به 2750°C می‌رسد و شعله‌ای دایره‌ای شکل ایجاد می‌شود. پودر به صورت محوری به شعله وارد می‌شود تا به صورت یکنواخت حرارت ببیند. ذرات پودر توسط گازهایی که سرعت آنها معمولاً به ۱۳۷۰ تا $2160 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ می‌رسد، شتاب می‌گیرند و سرعتی در حدود $760 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ تا $900 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ پیدا می‌کنند. در تمام روش‌های HVOF گازها تحت فشاری بیشتر از فشار اتمسفر سوزانده می‌شوند و گازهای احتراقی، گازهای حامل و پودرها در لوله شتاب می‌گیرند. طول نازل، طراحی محفظه‌های حرارتی، شکل هندسی و محل تغذیه پودر و سرد کردن توسط آب و یا هوا، پارامترهای مختلفی هستند که می‌توانند تغییر کنند.

تنش باقی مانده کم در فرآیند HVOF و احتراق پیوسته، باعث می شود که بتوان قطعات را با ضخامت بیشتری نسبت به روش پلاسما پوشش داد و در عین حال پوششی با تخلخل کمتر، مقدار اکسید کمتر و چسبندگی بیشتر حاصل شود. پوشش های تولید شده به روش HVOF احتراق پیوسته، نسبت به دیگر پوشش ها قابلیت ماشینکاری بهتری داشته و تخلخل پوشش مشابه مواد کارپذیر است و این موضوع توسط تست های نفوذپذیری تایید می شود. سیستم های HVOF احتراق پیوسته می توانند با کنترل کامپیوتری و به صورت رباتیک انجام می شوند. در شکل های ۱۴ و ۱۵ استحکام پیوند و سختی پوشش های رسوب داده شده در فرآیندهای مختلف اسپری حرارتی مقایسه شده است. رابطه بین سختی و سرعت ذرات در شکل ۱۶ نشان داده شده است [۱].

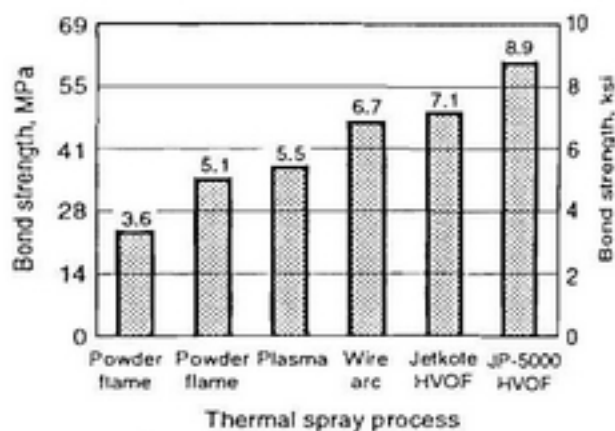


(a)

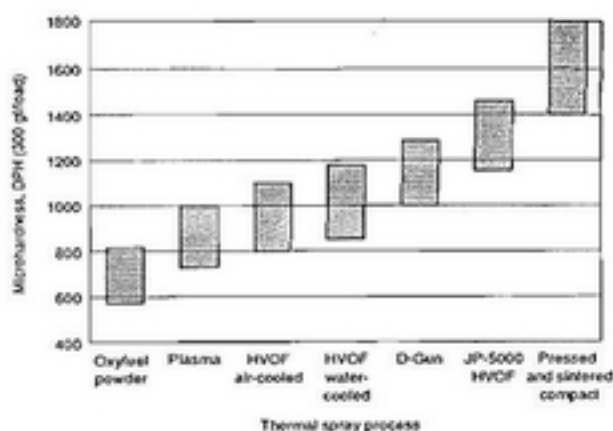


(b)

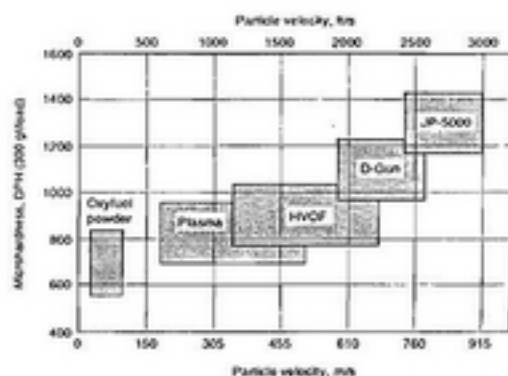
شکل ۱۳: فرآیند پاشش حرارتی HVOF احتراق پیوسته (a) خنک شونده با هوا (b) خنک شونده با آب [۱].



شکل ۱۴: استحکام پیوند پوشش فولاد زنگ نزن رسوب داده شده توسط فرایندهای مختلف پاشش حرارتی [۱].



شکل ۱۵: سختی پوشش WC-CO رسوب داده شده توسط فرایندهای مختلف پاشش حرارتی [۱].



شکل ۱۶: رابطه بین سختی پوشش WC-CO و سرعت ذرات در فرایندهای مختلف پاشش حرارتی [۱].

در جدول ۳، مشخصات فرایندهای مهم پاشش حرارتی مقایسه شده است:

جدول ۳: مقایسه مشخصات فرایندهای پاشش حرارتی [۲]

Process	Materials	Feed material	Surface preparation	Substrate temperature		Particle velocity	
				C	F	m/s	ft/s
Powder flame spray	Metallic, ceramic, and fusible coatings	Powder	Grit Blasting or rough threading	۱۰۵-۱۶۰	۲۲۵-۳۲۵	۶۵-۱۳۰	۲۰۰-۴۰۰
Wire flame spray	Metallic coatings	Wire	Grit Blasting or rough threading	۹۵-۱۳۵	۲۰۰-۲۷۵	۲۳-۲۹۵	۷۰-۹۰۰
Ceramic rod spray	Ceramic and cermet coatings	Rod	Grit Blasting	۹۵-۱۳۵	۲۰۰-۲۷۵	۲۶-۳۶۰	۸۰۰-۱۱۰۰
Two-wire electric-arc	Metallic coatings	Wire	Grit Blasting or rough threading	۵۰-۱۲۰	۱۲۵-۲۵۰	۲۴۰	۸۰۰
Nontransferred arc plasma	Metallic, Ceramic, Plastics and compounds	Powder	Grit Blasting or rough threading	۹۵-۱۲۰	۲۰۰-۲۵۰	۲۲-۵۶۰	۸۰۰-۱۸۵۰
High-velocity oxyfuel	Metallic, Cermet, some ceramic	Powder	Grit Blasting	۹۵-۱۵۰	۲۲۵-۳۰۰	۱۰۰-۵۵۰	۳۲۵-۱۸۰۰
Detonation gun	Metallic, Cermet, and ceramic	Powder	Grit Blasting or rough threading	۹۵-۱۵۰	۲۲۵-۳۰۰	۷۳-۷۹۰	۲۴۰۰-۲۶۰۰
Super D-Gun	Metallic, Cermet, and ceramic	Powder	Grit Blasting or rough threading	۹۵-۱۵۰	۲۲۵-۳۰۰	۸۵۰-۱۰۰۰	۲۸۰۰-۳۳۰۰
Transferred arc plasma	Metallic fusible coatings	Powder	Light Grit Blasting or chemical cleaning	Fuses base metal	Fuses base metal	۴۹۰	۱۶۰۰

۳- آماده‌سازی سطح

پوشش‌های پاشش حرارتی بر اساس پیوندهای مکانیکی با زمینه ایجاد می‌شوند. با توجه به اینکه این نوع پیوندها متکی به قفل شدگی مکانیکی ذرات اسپری یا سطح زمینه می‌باشد، آماده‌سازی سطح قطعه کار برای ایجاد پوششی مناسب رضایت‌بخش، اهمیت ویژه‌ای خواهد داشت. آماده‌سازی زمینه قبل از اسپری کردن به طور کلی برای تمامی فرآورده‌ها یکسان است. رنگ، محصولات خوردگی، روغن‌ها، گریس، روان‌سازها، رنگ و سایر آلودگی‌های سطح قبل از رسوب‌دهی پوشش توسط روش‌های مختلف مانند تراشیدن^۱، برس سیمی، ماشینکاری، خردپاشی^۲ یا روش‌های شیمیایی باید حذف شوند.

۳-۱- تمیزکاری شیمیایی

تمیزکاری شیمیایی به منظور تمیزکاری سطوح قطعانی به کار می‌رود که آلوده شده به موادی هستند که با دیگر فرآورده‌های آماده‌سازی نمی‌توان آنها را حذف کرد. سطوح را می‌توان به صورت شیمیایی با روغن‌زدایی توسط بخار، شستن با دترژنت داغ و یا به‌کارگیری حلال‌های شیمیایی صنعتی، تمیزکاری کرد. روغن‌زدایی معمولاً اقتصادی‌ترین و سریع‌ترین روش پاک‌سازی روان‌سازها و روغن‌ها می‌باشد. حلال‌ها باید توسط افراد آموزش دیده و در مناطقی که دارای تهویه مطبوع باشد، به کار روند. اخیراً جهت اجتناب از خطرات ناشی از کاربرد حلال‌های خورنده و تمیزکننده‌های قلیایی با روش آلتراسونیک آماده‌سازی انجام می‌شود.

۳-۲- خردپاشی

این روش یکی از متداول‌ترین روش‌های آماده‌سازی سطح می‌باشد. در این تکنیک با ایجاد زبری، آلودگی‌های سطحی که مانع پیوند مناسب می‌شوند، از بین می‌رود و پروفیل نامنظمی با سطح دنداندار به وجود می‌آید و در نتیجه چسبندگی بیشتر پوشش حاصل خواهد شد. قبل از به‌کارگیری پوشش اسپری حرارتی، زمینه تمیز شده با این روش باید به شرایط آلیاژ سفید، مطابق با (Steel Structures Painting Council Specification SSPS-SPS-۸۲) درآید و حداقل زبری پروفیل سطح باید $Ra = 6 \mu m$ (میانگین جبری زبری سطح) باشد. خردپاشی معمول به

۱-Scraping

۲-Grit Blasting

کار رفته در فرایند خَرده‌پاشی، چدن تبریدی^۱، آلومینا (Al_2O_3)، ماسه سیلیکا، گارنت خَرده شده^۲، کاربید سیلیسیم و سرباره خَرده شده می‌باشد [۱].

انتخاب نوع خَرده با توجه به زمینه‌ای که آماده‌سازی می‌شود، انجام می‌گیرد. زیرا باقیمانده‌های خَرده ممکن است باعث اثر نامطلوب روی بعضی از پوشش‌ها و کاهش پیوند آن‌ها با زمینه شوند. از طرفی سازگاری شیمیایی در پوشش نهایی نیز باید در نظر گرفته شود.

خَرده‌های آلومینا، ماسه و به خصوص کاربید سیلیسیم ممکن است در فلزات نرم‌تر مانند آلومینیم، مس و آلیاژهای آن‌ها فرو روند؛ بنابراین توصیه می‌شود، برای کاهش فرورفتگی این فلزات، فشار کم هوا به کار رود. چدن تبریدی باید در آماده‌سازی سطوحی که پاشش شعله‌ای و نفوذ در آن‌ها صورت می‌گیرد، استفاده شود. آلومینا، سیلیکا یا کاربید سیلیسیم ممکن است مانع از پیوند این پوشش‌ها شوند.

محدوده اندازه خَرده، میش ۱۰/۳۰ - میش ۱۴/۴۰، میش ۳۰/۸۰ - میش ۳۰/۱۰۰ می‌باشد. انتخاب اندازه خَرده بر اساس زبری مورد نیاز برای پیوند مناسب تعیین می‌شود و ممکن است با توجه به ضخامت پوشش محدود شود. زبری سطح می‌تواند به وسیله فشار هوا نیز کمی تغییر کند. فشار هوا در خَرده‌پاشی از ۲۱۰ kPa تا ۶۲۰ kPa با توجه به فاصله تا سطح قطعه کار (۵۰ mm تا ۱۵۰ mm) تغییر می‌کند. قطر دهانه نازل Grit Blush معمولاً ۶ تا ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. زاویه خَرده‌پاشی نسبت به سطح قطعه کار تقریباً باید ۹۰° باشد. اعمال بیش از اندازه این روش موجب ایجاد ناخالصی‌های ناشی از خَرده‌ها در زمینه خواهد شد.

سطح قطعه کار بعد از خَرده‌پاشی باید تمیز شود تا باقیمانده‌های گرد و خاک از بین رود. برای این کار می‌توان از هوای تمیز و خشک استفاده کرد [۲].

۳-۳- رزوه‌کاری خشن

رزوه‌کاری خشن^۳ بیشتر برای سطوح استوانه‌ای شکل با پوشش‌های ضخیم به کار می‌رود و می‌تواند همراه با روش خَرده‌پاشی به عنوان عملیات آماده‌سازی سطح مورد استفاده قرار گیرد. این تکنیک چسبندگی بسیار خوب پوشش به زمینه را به همراه خواهد داشت.

۱-Chilled Iron

۲-Crushed Garnet

۳-Rough Threading

۳-۴- پوشش های پیوندی

پوشش های پیوندی^۱ معمولاً وقتی به کار می روند که یا استحکام پیوند بسیار بالا مورد نیاز باشد و یا تغییر شکل مکانیکی زمینه غیرممکن باشد. در این روش مواد اسپری شونده گرمایزا و خودپیوند^۲ مورد استفاده قرار می گیرند. آلیاژهای نیکل - آلومینیوم (۲۰٪ Al - ۵٪ Ni) و مولیبدن متداول ترین مواد پیوندی می باشند. یک پوشش نازک (حدود ۱۲۵-۵۰ μm) از ماده پیوندی معمولاً قبل از پوشش اسپری حرارتی اعمال می شود. باید توجه داشت که ماده پیوندی با پوشش سازگار باشد و پیل گالوانیک تشکیل نشود، چون ممکن است اجرای سیستم پوشش با مشکل مواجه شود.

۳-۵- پیشگرم

پیشگرم کردن ماده زمینه معمولاً مفید است. پیشگرم کردن تا ۶۵-۹۵°C رسوب های سطحی را حذف می کند و تفاوت انقباض بین پوشش و زمینه را کم می کند. پیشگرم کردن معمولاً در فرآیندهای پاشش شعله ای به کار می رود.

۴- عملیات نهایی

پوشش های اسپری حرارتی معمولاً دو مشخصه بعد از رسوب دارند، سطح سنباده ای شکل و ساختاری متخلخل. زبری سطح معمول پوشش، بعد از اسپری می تواند بین $Ra = 5-12 \mu m$ متفاوت باشد. تخلخل نیز معمولاً ۱۷-۲۰ درصد حجمی است، که به فرآیند رسوب پاشش و ماده اسپری شده بستگی دارد. در بسیاری موارد، پوشش های اسپری حرارتی به اجزاء ماشینی اعمال می شوند که جزء پوشش یافته باید دقت ابعادی زیادی داشته باشد. در کاربردهای بسیاری نیز پوشش ها در معرض محلول های خورنده یا سیالات هیدرولیک قرار می گیرند که ممکن است در تخلخل ها وارد شوند و موجب نشست سیال یا خوردگی فلز پایه شوند. این شرایط می تواند موجب شکست زودتر از موقع پوشش شود. به طور کلی در بسیاری از مواقع لازم است قبل از عملیات نهایی توسط ماشین کاری یا سنگ زنی، عملیات آب بندی^۳ انجام شود تا از پوشش محافظت به عمل آید.

۱- Bond Coats

۲- Self-Bonding

۳- Sealing

• آب بندی

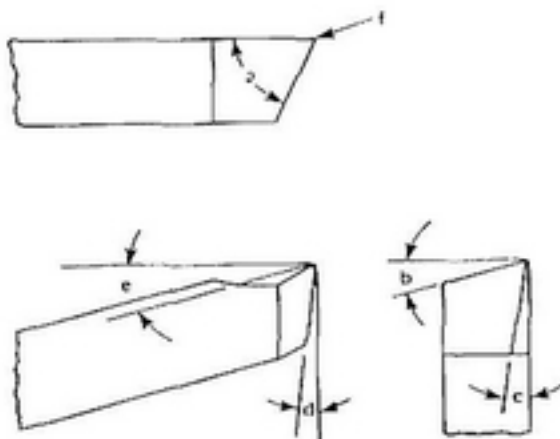
آب بندی فرآیندی است که طی آن منافذ پوشش پر می شوند تا احتمال ورود سیالات یا واسطه های خورنده که موجب شکست پوشش می شوند از بین برود. مواد آب بندی را می توان توسط برس، اسپری یا غوطه وری در واکس های نفتی، یا مواد آبی مثل فنول ها، رزین های اپوکسی، پلی استرها و پلی میدها روی پوشش اعمال کرد.

• عملیات نهایی پوشش

اگرچه در برخی از کاربردها، پوشش ها بدون عملیات نهایی مورد استفاده قرار می گیرند، اما در اغلب موارد سطح آنها برای شرایط کاری بسیار زیر می باشد. بنابراین پوشش ها با روش هایی چون سنگ زنی، پولیش، ماشینکاری، برس زنی و... تحت عملیات نهایی قرار می گیرند. مواد سختی نظیر سرامیک ها و کاربیدها را می توان با روش سنگ زنی همراه با چرخ های الماسی^۱ برای آماده سازی به کار برد. چرخ های سنگ زنی و ابزارهای مورد استفاده در عملیات نهایی برای پوشش های اسپری حرارتی و نمونه های مشابه کار شده یا ریختگی متفاوت می باشد. بنابراین، این تجهیزات نباید به جای یکدیگر به کار رود. بیشتر پوشش های اسپری حرارتی دارای مقداری تخلخل هستند. با این وجود پوشش اعمالی توسط روش HVOF رفتار نزدیک ماشینکاری و سنگ زنی را به مواد کارپذیر دارد. به طور کلی پوشش های اسپری حرارتی را می توان تا $Ra = 1-2 \mu m$ ماشینکاری و $0.5 \mu m$ تا $Ra = 0.25$ خرد کرد [۱].

برخی از پوشش های فلزی نرم تر را می توان توسط فولادهای ابزار تندبر با روش تک نقطه ای ماشینکاری کرد. عملیات نهایی بهتر با استفاده از ابزارهای کربیدی یا پوشیده شده با کربید حاصل می شود. شکل ۱۷ نمونه هایی از ابزارهای فولادی و کربیدی مورد استفاده در ماشینکاری را نشان می دهد [۲]. ابزارهای کربید تنگستن را برای پوشش هایی که سختی آنها تا ۶۰ HRC می رسد و ابزارهای نیراید بر را برای پوشش هایی با سختی کمتر از ۶۰ HRC می توان به کار برد. انتخاب چرخ سنگ زنی بسیار مهم و با توجه به ترکیب و نوع پوشش تعیین می شود. استفاده از برس معمولاً برای مواد نرم مانند قلع و روی جهت تولید سطحی یکنواخت کاربرد دارد [۲].

۱- Diamond Wheels



Dimension	Carbide	High-speed metal
a	65-90°	80°
b	0°	0 to 15°
c	7°	10°
d	7° max	7° max
e	0-8° max	15° max
f	0.79375 mm (0.03125 in.)	0.762-1.016 mm (0.030-0.040 in.)

شکل ۱۷: اشکال مناسب برای ابزارهای برش فولادی تندبر و کاربیدی مورد استفاده در ماشین کاری پوشش های اسپری حرارتی [۲]

۵- مواد پاشش حرارتی و کاربردها

خصوصیت بارز فرایند پاشش حرارتی، کاربردهای گسترده آن می باشد که ناشی از دو مزیت مهم می باشد:

۱- انتخاب مواد پاشش دهی نامحدود است.

در حقیقت بالغ بر ۲۰۰ ماده با خواص مختلف زبری، ضریب اصطکاک، سختی و دیگر خواص هستند که می توان آنها را به عنوان مواد پوشش دهی به کار برد. این مواد به گروه های زیر تقسیم می شوند:

- فلزات خالص
- آلیاژهای فلزی
- سرمته ها
- سرامیک ها

- کاربردها

- پلیمرها

- مواد کامپوزیتی خاص مثل پودرهای کامپوزیتی نیکل - آلومینیم و نیکل گرانیث.

۲- فرآیند پاشش حرارتی به خوبی قابل کنترل می باشد. در این فرآیند حرارت کمی به زمینه منتقل می شود (۱۰۰ تا ۲۶۰°C) و در نتیجه تغییرات متالورژیکی، اعوجاج و اکسیداسیون در قطعه رخ نخواهد داد. به همین دلیل پوشش های اسپری حرارتی را تقریباً روی هر زمینه ای (مانند فلزات، پلاستیک ها، کامپوزیت ها و غیره) می توان اعمال کرد. همچنین در مواقعی که نمی توان از فرآیندهای جوشکاری، عملیات حرارتی یا سایر فرآیندهای دمای بالا استفاده کرد، این پوشش ها را می توان روی قطعه ماشینکاری شده نهایی نشانند.

انتخابهای مختلفی از پوشش های اسپری حرارتی برای مهندسين طراح وجود دارد. این پوشش ها خواصی از مواد را ارائه می دهند که در فلزات کاربردی وجود ندارد. پوشش ها را می توان روی قسمتهای خاصی از قطعه و نه لزوماً کل آن اعمال کرد. هزینه های تولید را می توان با حذف مراحل مختلف غیرضروری کاهش داد. با طراحی مشخصات اجرایی فوق العاده، می توان عمر مفید پوشش ها را افزایش داد و محصول جدید و قابل قبولی به بازار ارائه کرد.

پوشش های اسپری حرارتی، راه حل مناسبی برای برطرف کردن مشکل ناشی از عدم مقاومت مکانیکی و الکتریکی قطعات، همچنین عدم مقاومت در برابر خوردگی آنها می باشند. با این وجود کاربردهای خاصی وجود دارند که این پوشش ها را نمی توان در آنها به کار برد. قبل از انجام پوشش دهی اسپری حرارتی باید معیارهای زیر در نظر گرفته شود:

- قطعه ای که آماده برای اسپری می شود باید قابلیت تحمل هر بار مکانیکی که در

حین کار ممکن است بر آن اعمال شود را داشته باشد (در برخی کاربردها می توان با پوشش اسپری حرارتی استحکام را افزایش داد، با این وجود این کاربردها غیر معمول بوده و باید به دقت تست شوند).

- اگر قسمتی که اسپری می شود یا هر قسمتی از قطعه در حین کار، تحت بار برشی قرار می گیرند، پاشش حرارتی برای آن قطعه مناسب نیست.

- بارگذاری نقطه ای همراه با تماس خطی رسوب فلز اسپری شده موجب جدا شدن رسوب می شود. اگر رسوب روی یک قسمت متحرک است که تحت این بار می باشد، به سرعت از بین می رود.

• اگر فلز پایه نیتريده شده باشد، روشی جز HVOF برای آن پیشنهاد نمی‌شود، مگر اینکه نیتريده شدن قبل از فرآیند اسپری حذف شود. در دیگر روش‌های سخت کردن زمینه نیازمند عملیات خاصی مانند خردده‌پاشی شدید می‌باشد. در حال حاضر متداول‌ترین کاربرد اسپری حرارتی در اجزاء پیشرفته هواپیماها و توربین‌های گازی می‌باشد. مواد پوششی متداول شامل آلیاژهای پایه کبالت، کاربید تنگستن-کبالت، و سرمتهای کروم نیکل و نیکل کروم ($70\% \text{NiCr} - 30\% \text{Cr}_2\text{O}_3$) می‌باشند. به دیگر کاربردهای کلیدی فرآیند در ادامه اشاره خواهد شد.

۵-۱- پوشش‌های مقاوم در برابر سایش

این پوشش‌ها جهت مقاومت در برابر سایش، حفرة دار شدن، خوردگی سایشی و کاهش اصطکاک به کار می‌روند و شامل محدوده وسیعی از فلزات و آلیاژهای آنها، سرامیکی، سرمته‌ها، کاربیده‌ها و حتی پلاستیک‌های کم اصطکاک می‌باشند. سختی معمول پوشش‌ها از ۲۰ تا ۷۰ HRC متغیر است. زمینه‌های فلزی در اثر انجماد سریع، افزودن جداگانه فازهای سخت مانند کاربیده‌های کروم، تنگستن، تیتانیم و یا تانتالیم و ناخالصی‌های اکسیدی سخت می‌شود. در جدول ۴ لیست پوشش‌های مختلف مقاوم در برابر سایش و اصطکاک آمده است.

۵-۲- پوشش‌های مقاوم در برابر خوردگی

روی، آلومینیم و آلیاژهای آنها متداول‌ترین مواد به کار رفته در پوشش‌های اسپری حرارتی مقاوم در برابر خوردگی می‌باشند. این مواد کاربرد گسترده‌ای برای جلوگیری از خوردگی آهن و فولاد دارند و حفاظت آنها بسیار طولانی مدت (بیش از ۲۰ سال) هم در زیر آب و هم در محیط صنعتی می‌باشد. دیگر مواد پوششی مقاوم به خوردگی، فولادهای زنگ‌نزن استینیتی، آلومینیم، برنز، آلیاژهای پایه نیکل و مواد M-Cr-Al-Y می‌باشد. انتخاب آلیاژ مورد نظر به محیط کار بستگی دارد. وقتی از این آلیاژها استفاده می‌شود، باید توجه داشت که این پوشش‌ها سلول گالوانیک با فلز پایه فولادی تشکیل ندهند. این مشکلی است که به علت وجود تخلخل پوشش‌های اسپری حرارتی رخ می‌دهد. باید توجه زیادی شود که این پوشش‌ها به خوبی آب‌بندی شوند تا ماده خورنده به فلز زیرین نفوذ نکند و خوردگی در مرز پوشش-زمینه رخ ندهد.

جدول ۴: پوشش های پاشش حرارتی مورد استفاده در کاربردهای سخت پوششی [۱]

Type of wear	Coating material	Coating process(es)	Applications
Adhesive wear	Soft bearing coatings:		
	Aluminum bronze	OFW, EAW, OFP, PA, HVOF	Babbitt bearings, hydraulic press sleeves, thrust bearing shoes, piston guides, compressor crosshead slippers
	Tobin bronze	OFW, EAW	
	Babbitt	OFW, EAW, OFP	
	Tin	OFW, EAW, OFP	
	Hard bearing coatings:		
	Mo/Ni-Cr-B-Si blend	PA	Bumper crankshafts for punch press, sugar cane grinding roll
	Molybdenum	OFW, EAW, PA	journals, antigalling sleeves, rudder bearings, impeller shafts, pinion gear journals, piston rings (internal combustion); fuel pump rotors
	High-carbon steel	OFW, EAW	
	Alumina/titania	OFP, PA	
Abrasive wear	Tungsten carbide	OFP, PA, HVOF	
	Co-Mo-Cr-Si	PA, HVOF	
	Fe-Mo-C	PA	
	Aluminum oxide	PA	Slush-pump piston rods, polish rod liners, and sucker rod couplings (oil industry); concrete mixer screw conveyors; grinding hammers (tobacco industry); core mandrels (dry-cell batteries); buffing and polishing fixtures; fuel-rod mandrels
	Chromium oxide	PA	
	Tungsten carbide	PA, HVOF	
	Chromium carbide	PA, HVOF	
	Ni-Cr-B-SiC/WC (fused)	OFP, HVOF	
	Ni-Cr-B-SiC (fused)	OFP, HVOF	
	Ni-Cr-B-SiC (unfused)	HVOF	
Surface fatigue wear			
Fretting: Intended motion applications	Molybdenum	OFW, PA	Servomotor shafts, lathe and grinder dead centers, cam followers, rocker arms, piston rings (internal combustion), cylinder liners
	Mo/Ni-Cr-B-SiC	PA	
	Co-Mo-Cr-Si	PA, HVOF	
Fretting: Small-amplitude oscillatory displacement applications:			
Low temperature (<540 °C, or 1000 °F)	Aluminum bronze	OFW, EAW, PA, HVOF	Aircraft flap tracks (air-frame component); expansion joints and mid-span supports (jet engine components)
	Cu-Ni-In	PA, HVOF	
	Cu-Ni	PA, HVOF	
High temperature (>540 °C, or 1000 °F)	Co-Cr-Ni-W	PA, HVOF	Compressor air seals, compressor stators, fan duct segments and stiffeners (all jet engine components)
	Chromium carbide	PA, HVOF	
Erosion	Chromium carbide	PA, HVOF	Exhaust fans, hydroelectric valves, cyclone dust collectors, dump valve plugs and seats, exhaust valve seats
	Tungsten carbide	PA, HVOF	
	WC/Ni-Cr-B-SiC (fused)	OFP, HVOF	
	WC/Ni-Cr-B-SiC (unfused)	OFP, HVOF	
	Chromium oxide	PA	
Cavitation	Ni-Cr-B-SiC-Al-Mo	PA	Wear rings (hydraulic turbines), water turbine buckets, water turbine nozzles, diesel engine cylinder liners, pumps
	Ni-Al/Ni-Cr-B-SiC	PA	
	Type 316 stainless steel	PA	
	Ni-Cr-B-SiC (fused)	OFP, HVOF	
	Ni-Cr-B-SiC (unfused)	HVOF	
	Aluminum bronze	PA, HVOF	
	Cu-Ni	PA, HVOF	

(a) OFW, oxyfuel wire spray; EAW, electric arc wire spray; OFP, oxyfuel powder spray; PA, plasma arc spray; HVOF, high-velocity oxyfuel powder spray

۵-۳- پوشش های محافظ در برابر اکسیداسیون

پوشش های پاشش حرارتی در صنعت کاربرد زیادی به منظور حفاظت اجزاء فولادی و سازه ها در برابر اکسایش گرم تا دماهای 1095°C دارند. این پوشش ها به خصوص جهت حفاظت فولادهای کم آلیاژ یا کربنی بسیار موثرند. در جدول ۵، لیست پوشش های اسپری حرارتی برای کاربرد در دماهای بالا آمده است.

آلومینیم به طور گسترده جهت پوشش دهی فولادهای ذکر شده که دمای سطح آنها در سرویس به 550°C می رسد، به کار می رود. آلیاژهای نیکل - کروم و M-Cr-Al-Y نیز جهت حفاظت در محیط هایی که دما به 1000°C می رسد، استفاده می شود.

جدول ۵: پوشش های پاشش حرارتی مورد استفاده در کاربردهای دمای بالا [۱]

Service temperature	Coating metal or alloy	Coating thickness	
		µm	mils
Up to 550°C (1020°F)	Aluminum	175	7
Up to 550°C (1020°F) in the presence of sulfurous gases	Ni-43Cr-2Ti	375	15
$550-900^{\circ}\text{C}$ ($1020-1650^{\circ}\text{F}$)	Aluminum or aluminum-iron	175	7
$900-1000^{\circ}\text{C}$ ($1650-1830^{\circ}\text{F}$)	Nickel-chromium or MCrAlY	375	15
$900-1000^{\circ}\text{C}$ ($1650-1830^{\circ}\text{F}$) in the presence of sulfurous gases	Nickel-chromium, followed by aluminum	375	15
		100	4

Source: Ref 20

۵-۴- پوشش های عایق حرارتی

اکسیدهای آلومینیم و یا زیرکونیم که دارای هدایت حرارتی کمی هستند، اگر به عنوان پوشش مورد استفاده قرار گیرند، موجب کاهش هدایت حرارتی به فلزات پایه خواهند شد. این اکسیدها با کاهش دمای فلزات پایه پوشش داده شده، باعث کاهش اتلاف حرارتی، اثرات انتقال حرارتی و اثرات خوردگی و اکسیداسیون دمای بالا می شوند.

۵-۵- پوشش های مانع حرارت

این پوشش ها از مادهای سرامیکی با هدایت حرارتی کم رسوب داده شده بر یک پوشش پیوندی M-Cr-Al-Y تشکیل شده اند. سرامیک می تواند زیرکونیا (ZrO_2 تا Y_2O_3 ۸٪ وزنی) که به طور

جزئی پایدار شده یا ضخامت ۰/۲۵ میلی متر و با درصد تخلخل ۱۰ تا ۱۵٪ باشد. $NiCrAlY$ یا $CoCrAlY$ نیز می توانند به عنوان پوشش پیوندی مورد استفاده قرار گیرند. این پوشش ها بر روی تجهیزات مورد استفاده در موتورهای توربین گازی و موتورهای آدیاباتیکی به منظور بهبود بازدهی و کاهش دمای فلز به کار می روند.

۵-۶- پوشش های الکتریکی

این پوشش ها شامل آلیاژهای نقره، مس، آلومینیم، روی و برنز می باشد. هدایت این پوشش ها می تواند ۴۰٪ تا ۹۰٪ مواد کارپذیر، بسته به روش پوشش حرارتی، تغییر کند. پوشش های هادی جهت حفاظت الکترونیکی در برابر فرکانس های رادیویی یا تداخل مغناطیسی کاربرد دارند.

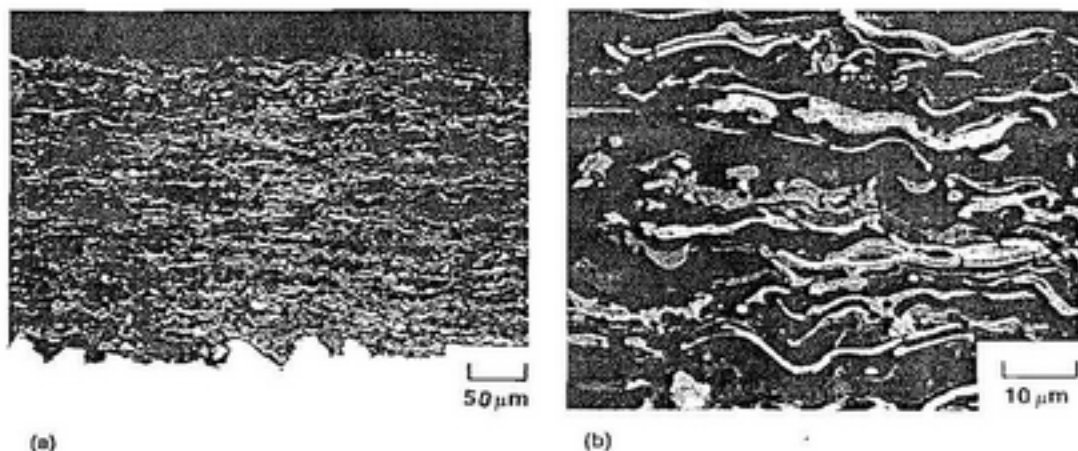
۵-۷- پوشش های بازیابی ابعادی

پوشش های پاشش حرارتی را می توان جهت تعمیر یا بازسازی قطعاتی که دچار سایش یا خوردگی سطحی شده اند، تا ضخامت ۳ میلی متر به کار برد.

۶- ساختار و خواص پوشش ها

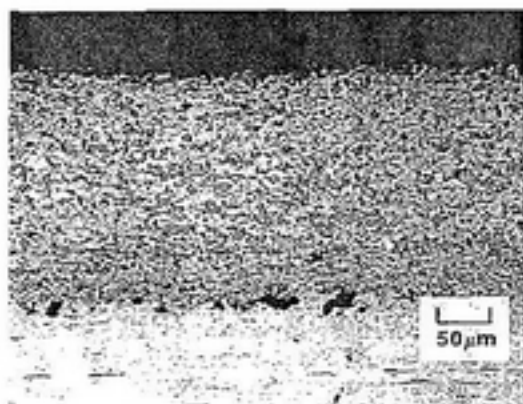
۶-۱- ریز ساختار پوشش

پوشش های اسپری حرارتی از لایه های نازک متعدد روی هم ذرات تشکیل شده است. به این لایه ها Splat گفته می شود. مقاطع پوشش های متداول، در شکل های ۱۸ تا ۲۰ نشان داده شده است. معمولاً هر چه سرعت ذرات در فرآیند پوشش دهی بیشتر باشد، پوشش چگالتر و با پیوندهای قوی تر به دست خواهد آمد. تخلخل تخمین زده شده به روش متالوگرافی در پوشش های اعمالی توسط (D-Gun) و برخی پوشش های HVOF کمتر از ۲٪ است در حالی که تخلخل اکثر پوشش های اسپری پلاسما ۱۵٪-۵۰٪ است. تخلخل پوشش های اسپری شعله ممکن است بیش از ۱۵٪ باشد. میزان اکسیداسیونی که در فرآیند رسوب دهی انجام می گیرد، تابعی از ماده رسوب داده شده، روش رسوب دهی و فرآیند خاص رسوب دهی می باشد. اکسیداسیون ممکن است به علت پتانسیل اکسیداسیون مخلوط سوخت گازی در اسپری شعله، HVOF یا D-Gun و یا در روش اسپری پلاسما یا دیگر روش ها، ممکن است به علت هوای وارد شده در جریان گاز باشد. در روش اسپری پلاسما با استفاده از گاز خنثی یا محفظه های کم فشار، می توان این مشکل را برطرف کرد.

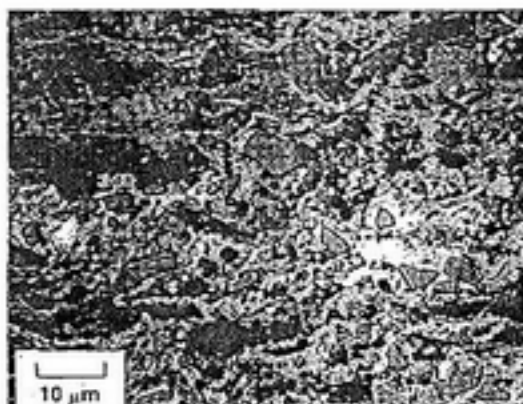


شکل ۱۸: ریزساختار رسوب آلومینا و تیتانیا توسط فرآیند ID-Gun [۲].

با استفاده از مخلوط های گازی پرکربن در فرآیندهای اکسی گاز می توان برای بعضی پوشش های فلزی شرایطی را فراهم کرد که کربوراسیون بیش از اکسیداسیون رخ دهد. اکسایش در حین رسوب می تواند موجب تخلخل بیشتر و پوشش ضعیف تر شود و معمولاً نامطلوب است. در بیشتر فرآیندهای اسپری حرارتی ذرات به سرعت کوئنچ می شوند. سرعت کوئنچ $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$ $10^6 - 10^4$ برای سرامیک ها، و برای فلزات تخمین $\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$ $10^8 - 10^6$ زده می شود. در نتیجه مواد رسوب کرده می تواند از لحاظ ترمو دینامیکی در حالت فوق پایدار بوده و دانه های داخل Splat با اندازه زیر میکرون یا حتی آمورف باشند. فازهای فوق پایدار ممکن است خواص مورد نیاز از جمله مقاومت به خوردگی نداشته باشند و این عامل باید در انتخاب ترکیب پوشش مورد توجه قرار گیرد.



(a)



(b)

شکل ۱۹: ریزساختار پوشش کاربید تنگستن / سرمت کبالت توسط فرآیند D-Gum [۲].
a - پولیش شده b - اچ شده.



(a)



(b)

شکل ۲۰: ریزساختار پوشش کاربید کرم / سرمت کرم نیکل که به صورت مکانیکی مخلوط شده اند [۲].
a - پولیش شده b - اچ شده.

۷- ایمنی

مانند دیگر فرآیندهای صنعتی، روش‌های پوشش اسپری حرارتی نیز دارای جنبه‌های سلامتی، ایمنی و محیطی قابل توجهی هستند که به طور کلی مشابه دیگر فرآیندهای جوشکاری می‌باشند. واضح است که تمام قوانین کارخانه‌ای، آزمایشگاهی، محلی، ایالتی و دولتی باید رعایت شود. هیچ یک از فرآیندهای اسپری حرارتی نباید توسط پرسنل غیر متخصص و بدون توجه به خطرات مربوط به مواد خاص مورد استفاده برای ایجاد پوشش، انجام گیرد. توجه به نگهداری تجهیزات، شامل تمام خطوط الکتریکی و گازی بسیاری از خطرات متحمل کاهش خواهد داد. در تمام فرآیندهای اسپری حرارتی بخار و غبار تولید می‌شود و حفاظت از اپراتورها باید به طور مناسب به عمل آید. در صورت امکان، فرآیند پوشش‌دهی باید در یک اتاقک به همراه تجهیزات تهویه و جمع‌آوری غبار انجام شود و اپراتورها خارج از آن قرار گیرند. هر فرآیند اسپری حرارتی نیازمند نوعی جریان هوا برای تهویه مناسب است و تولید کنندگان تجهیزات باید راهنمایی‌های لازم در این زمینه را ارائه کنند. باید هر از گاهی از مونیتورهای نشان دهنده غبار استفاده شود تا اطمینان حاصل شود که سیستم تهویه خوب کار می‌کند. اگر لازم باشد که اپراتورها به داخل اتاقک بروند یا انجام پوشش‌دهی در محیط باز ضروری باشد، لازم است که اپراتورها از ماسک استفاده کنند. نوع ماسک مورد استفاده، به ماده رسوب داده شده بستگی دارد.

صداها تولید شده توسط فرآیندهای اسپری حرارتی می‌تواند از ۸۰ dB تا ۱۲۰dB در فرآیندهای HVOF باشد. این صداها می‌تواند در فرآیندهای اسپری پلاسما تا ۱۵۰dB نیز برسد. برای همه موارد به جز مورد آخر، گوشی برای اپراتورها کافی است اما در مورد آخر به اتاقک‌های کاهش صدا نیاز خواهد بود. مقدار صدا در محل کار اپراتور باید اندازه‌گیری شود. به علاوه تمام پرسنل در محل عملیات اسپری باید تحت معاینه شنوایی قرار گیرند.

اشعه‌های نور ساطع شده توسط دستگاه‌های اسپری حرارتی می‌تواند از مادون قرمز تا ماوراء بنفش تغییر کند. از این رو باید از حفاظت کامل چشم و پوست اطمینان حاصل کرد. لنزهای شماره ۵ در برخی فرآیندهای پاشش شعله‌ای کافی است اما برای اسپری پلاسما و قوس الکتریکی، عینک شماره ۱۲ مورد نیاز است.

برای حفاظت پوست از سوختگی، باید از پارچه‌های ضد حریق استفاده شود. سوختگی ممکن است بر اثر پرش ذرات داغ از ماده زمینه، گازهای داغ یا نور ایجاد شود. تشعشعات ماوراء بنفش،



پوست را می سوزاند و در چند دقیقه سوختگی مشابه آفتاب سوختگی شدید در پوست به وجود می آورد [۱].

مراجع

- ۱- ASM Handbook, ۱۹۹۳, Vol. ۶, "Welding, Brazing and Soldering".
- ۲- ASM Handbook, ۱۹۹۳, Vol. ۵, "Surface engineering".
- ۳- Hartman, "Surfacing", SLV, ۱۹۹۹.
- ۴- امیر حسین کوکبی، "تکنولوژی جوشکاری"، انتشارات آزاده، ۱۳۸۲، چاپ پنجم.
- ۵- Khana, "Welding Technology Handbook".
- ۶- AWS Handbook, ۱۹۹۷, Vol. ۲, "Thermal Spraying"