

# فرآیند پاشش سرد

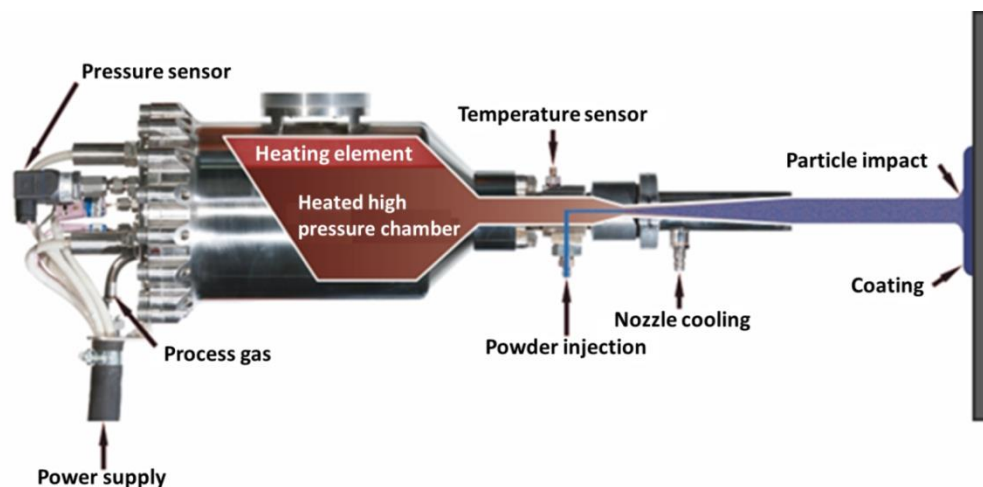


**Protect, Repair, Restore & Refinish Products**



## مقدمه

پاشش سرد<sup>۱</sup> روشی نسبتاً جدید در پوشش‌دهی به روش پاشش بوده و یکی از زیر مجموعه‌های فرآیند پاشش حرارتی<sup>۲</sup> محسوب می‌شود. در این روش با استفاده از جت گازی ایجاد شده با سرعت بسیار زیاد ( $1200-300\text{ m/s}$ ) توسط یک نازل همگرا/واگرا کننده<sup>۳</sup>، ذرات پودر ( $100-5\text{ }\mu\text{m}$ ) روی سطح یک زیرلایه که در فاصله تقریبی ۲۵ میلیمتری از خروجی نازل قرار دارد اسپری می‌شوند تا پوشش مورد نظر روی سطح تشکیل شود. بر خلاف روش‌های متداول پاشش، عامل اتصال ذرات و ایجاد پوشش در این فرآیند تغییر فرم پلاستیکی ذرات به دلیل انرژی جنبشی بالای آنها در حین برخورد به سطح است. در روش‌های پاشش حرارتی دمای بالا عامل اصلی اتصال ذرات و تشکیل پوشش است، بنابراین وجود معایبی از قبیل آخال، تنش‌های پسماند و ... اجتناب ناپذیر خواهد بود. در مقابل فرآیند پاشش سرد یک فرآیند حالت جامد است و ذرات پودر در حین تشکیل پوشش متحمل فرایندهای ذوب و انجماد نخواهند شد. در شکل (۱) شماتیک نحوه پاشش پودر و تشکیل پوشش روی سطح



شکل (۱) شماتیک نحوه پاشش پودر و تشکیل پوشش روی سطح

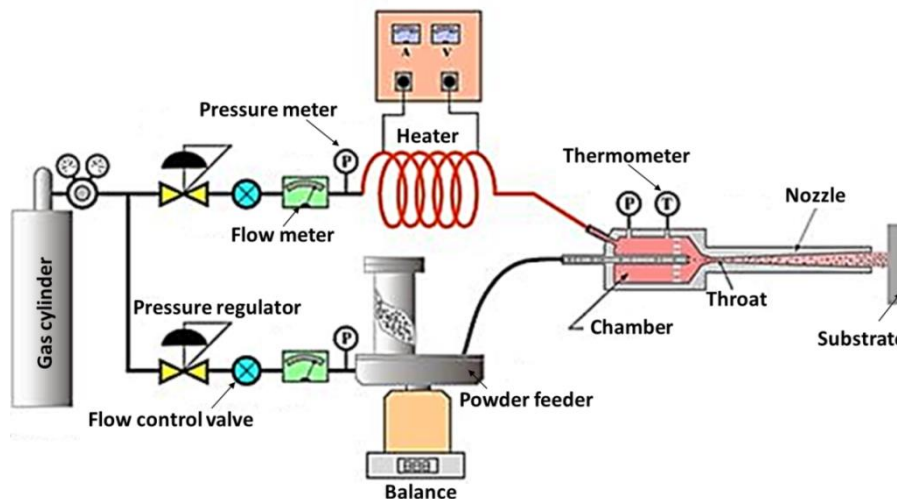
پیدایش فرآیند پاشش سرد را می‌توان به زمان اختراع فرآیند پاشش حرارتی توسط Schoop نسبت داد. با وجود اینکه استفاده از انرژی ضربه‌ای<sup>۴</sup> ذرات شتاب دهی شده با استفاده از جت گاز برای تولید پوشش به بیش از یک قرن می‌رسد اما تکنولوژی مورد نیاز برای کاربردی کردن این ایده در آن زمان پیچیده بود و به پیشرفت بیشتری نیاز داشت. پس از گذشت ۸۰ سال فرآیند پاشش سرد اولین بار بطور تصادفی در آکادمی علوم روسیه در حین آزمایش یک مدل در تونل باد (در معرض جریان دو فازی گاز- ذرات جامد) مشاهده شد. دانشمندان مشاهده کردند برخورد ذرات به سطح با سرعتی مشخص، باعث رسوب ذرات روی سطح می‌شود. بعد از این مشاهده تلاش‌های بسیاری در راستای توسعه این روش و کاربرد آن بصورت صنعتی انجام شد.

## سیستم پاشش سرد

مطابق شکل (۲) مهم‌ترین بخش‌های سیستم پاشش سرد عبارتند از:

- ۱- Cold spray
- ۲- Thermal spray
- ۳- converging/diverging nozzle
- ۴- Impact energy

- تزریق کننده پودر<sup>۱</sup>
- منبع گاز
- نازل مافوق صوت<sup>۲</sup>
- گرم کننده گاز به منظور پیشگرم گاز (در راستای جبران سرمایش ایجاد شده در اثر انبساط سریع گاز در نازل)
- سیستم نظارت و کنترل پارامترهای فرآیند پاشش سرد (برای اندازه گیری و کنترل دما و فشار گاز)



شکل (۲) شماتیک بخش‌های مختلف سیستم پاشش سرد

#### انواع سیستم پاشش سرد

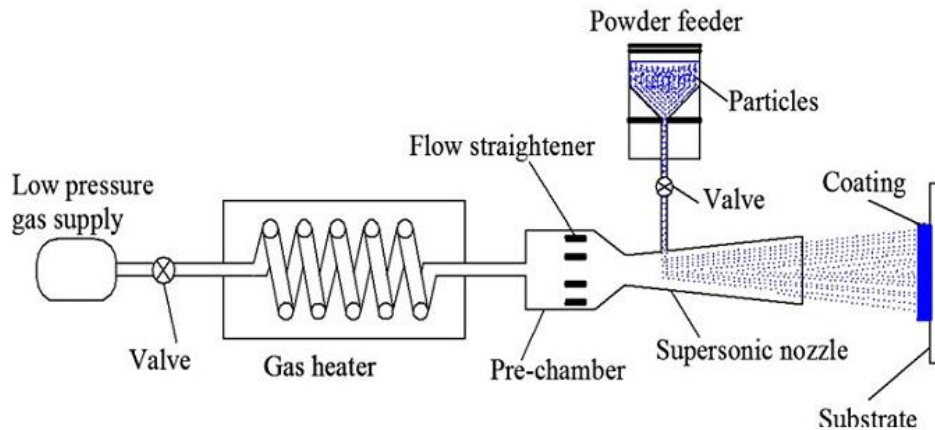
در خلال توسعه کاربردی فرآیند پاشش سرد، دو روش متفاوت برای پاشش مواد به ثبت رسیده است که امروزه از این دو روش تحت عنوان پاشش سرد با فشار پایین<sup>۳</sup> و پاشش سرد با فشار بالا<sup>۴</sup> یاد می‌شود. در سیستم پاشش سرد با فشار پایین، هوا یا نیتروژن با فشار نسبتاً کم (۵-۱۰ بار) تا دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد پیشگرم می‌شود تا خواص آیرودینامیکی آن بهبود یابد و سپس به سمت نازل هدایت می‌شود. در قسمت واگرا کننده نازل، گاز پیشگرم شده در محدوده ۳۰۰-۶۰۰ m/s شتاب گرفته و ماده پاشش را به سمت زیرلایه اسپری می‌کند. این سیستم‌ها قابل حمل و اقتصادی بوده و عموماً برای پاشش فلزات سبک بکار می‌روند. میزان راندمان پاشش در این سیستم‌ها کم و حدود ۵۰٪ است. در شکل (۳) شماتیک سیستم پاشش سرد با فشار پایین و نحوه عملکرد آن نشان داده شده است.

۱- Powder feeder

۲- Supersonic nozzle

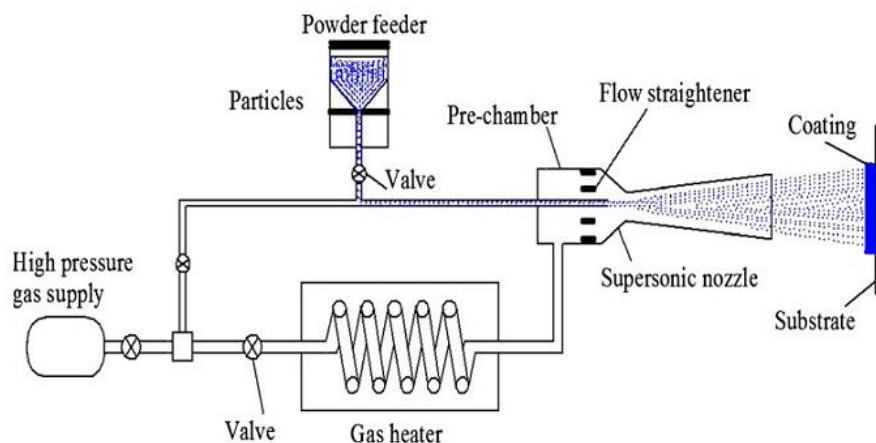
۳- Low pressure cold spray

۴- High pressure cold spray



شکل (۳) شماتیک سیستم پاشش سرد با فشار پایین و نحوه عملکرد آن

در سیستم پاشش سرد با فشار بالا، گاز هلیوم یا نیتروژن با فشار بالا (۲۵-۳۰ بار) تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد پیشگرم می-شود تا خواص آیرودینامیکی آن بهبود یابد و در ادامه به داخل یک نازل همگرا/واگرا کننده هدایت می-شود. در قسمت همگرا کننده نازل انبساط گاز منجر به تبدیل آنتالپی به انرژی جنبشی شده تا ضمن کاهش دمای گاز و حفظ ماهیت فرآیند پاشش سرد، گاز تا سرعت  $1200 \text{ m/s}$  شتاب گیرد. در ادامه ذرات پودر توسط گاز حامل به سمت زیرلایه پاشش می-شوند. نرخ پاشش در این روش بالا و راندمان حدود ۹۰٪ است. در شکل (۴) شماتیک سیستم پاشش سرد با فشار بالا و نحوه عملکرد آن نشان داده شده است.



شکل (۴) شماتیک سیستم پاشش سرد با فشار زیاد و نحوه عملکرد آن

#### مزایای فرآیند پاشش سرد

- راندمان و نرخ بالای پوشش‌دهی
- پایین بودن میزان حرارت ورودی<sup>۱</sup>
- حفظ خواص اولیه ماده پوشش
- پوشش‌دهی موضعی و محدود
- عدم وجود اکسید و آخال‌های دیگر در پوشش
- امکان ایجاد پوشش‌های متراکم یکنواخت با ضخامت‌های مختلف
- امکان پوشش‌دهی مواد مختلف روی زیرلایه‌های متفاوت و حساس به حرارت
- ایجاد پوشش‌هایی با هدایت الکتریکی و حرارتی بالا

<sup>۱</sup>- Heat input

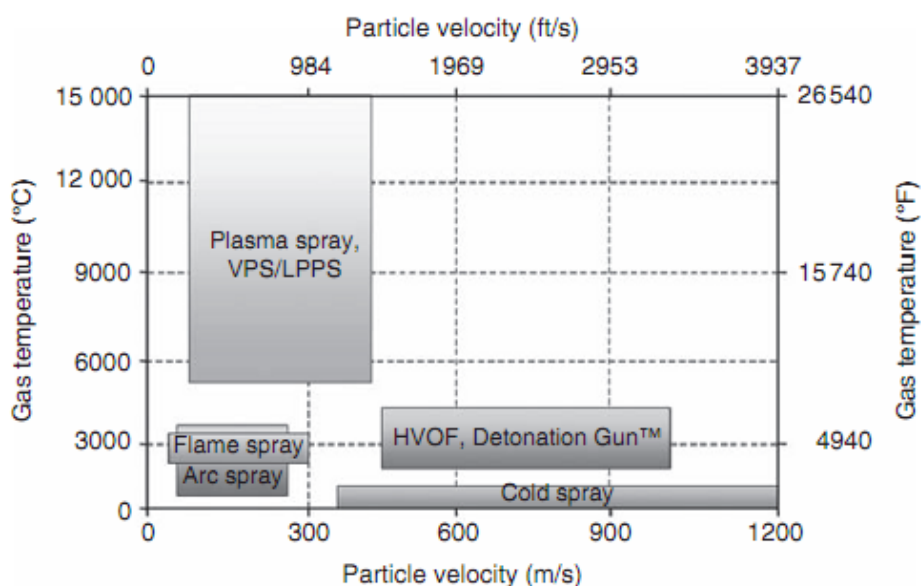
- عدم وجود تنش‌های پسماند مخرب در پوشش
- عدم تشکیل منطقه متأثر از حرارت در زیرلایه
- امکان پاشش پودرهای آمورف و نانوپودرها
- حداقل نیاز به آماده سازی سطحی
- امکان بازیابی و استفاده مجدد ذرات پودر
- عدم وجود محدودیت در ابعاد قطعه مورد نظر برای تعمیر یا پوشش‌دهی

#### معایب فرآیند پاشش سرد

- ایجاد پوشش روی سطوح داخلی و قطعات پیچیده دشوار است
- بالا بودن میزان مصرف گاز در مقایسه با روش‌های پاشش حرارتی ( $1-2 \text{ m}^3/\text{min}$ )
- فرسایش نازل
- ایجاد پوشش مستلزم داکتیل بودن زیرلایه است. به همین دلیل در پوشش دهی سرامیک‌ها با روش پاشش سرد اتصال مستحکمی بین پوشش و زیر لایه حاصل نمی‌شود.
- استفاده از گاز پر هزینه هلیوم جهت رسوب‌دهی پوشش‌های با کیفیت بالا نظیر اینکونل،  $\text{MCrAlYs}$

#### مقایسه فرآیند پاشش سرد و پاشش حرارتی

برخلاف فرآیندهای پاشش حرارتی، هدف از گرمایش گاز حامل در فرآیند پاشش سرد افزایش سرعت گاز در نازل برای ایجاد جت گازی با سرعت بالاتر و همچنین کاهش مصرف گاز در فرآیند است. در شکل (۵) دمای کاری تقریبی و سرعت ذرات در فرآیندهای پاشش سرد و پاشش حرارتی با یکدیگر مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود پاشش سرد در مقایسه با فرآیندهای رایج پاشش حرارتی فرآیندی منحصربفرد با دمای کاری بسیار پایین و سرعت بالای ذرات است.



شکل (۵) مقایسه دمای کاری تقریبی و سرعت ذرات در فرآیندهای پاشش سرد و پاشش حرارتی

وجود تخلخل و آخال‌های اکسیدی دو چالش اساسی در رسوب‌دهی به روش پاشش حرارتی است زیرا وجود تخلخل و اکسید در پوشش‌ها بطور چشمگیری باعث کاهش خواص مکانیکی خواهد شد. بکارگیری روش پاشش سرد در برخی از کاربردها می-

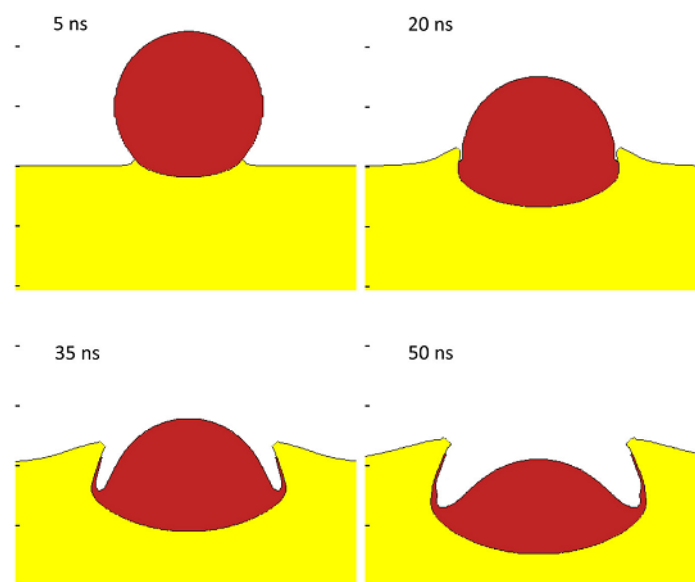
تواند این دو چالش را مرتفع کند. دلیل پایین بودن میزان تخلخل در روش پاشش سرد برخورد ذرات با سرعت بالا به سطح است که منجر به بسته شدن حفره‌های موجود می‌شود. پایین بودن میزان اکسید نیز ناشی از پایین بودن دمای کاری فرآیند است.

از دیگر محدودیت‌های روش پاشش حرارتی وجود تنش‌های کششی پسماند در قطعه است که در حین انجماد بر اثر انقباض حرارتی رخ داده و می‌تواند منجر به ایجاد ترک و یا جدایش پوشش شود. وجود تنش پسماند کششی همچنین ماکزیمم ضخامت قابل حصول برای پوشش با روش‌های متداول را محدود خواهد کرد. در مقابل در روش پاشش سرد به دلیل پایین بودن دمای کاری، تنش پسماند کششی وجود نخواهد داشت و با توجه به ماهیت فرآیند تنش پسماند از نوع فشاری و مفید خواهد بود.

### مکانیزم فرآیند پاشش سرد

در فرآیند پاشش سرد فصل مشترک ذره/ زیرلایه که منتج به ایجاد اتصال می‌شود از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا عامل تعیین کننده خواص پوشش است. بر اساس بررسی‌های آزمایشگاهی و مدلسازی‌های صورت گرفته اتصال ذره به زیرلایه تنها در شرایطی رخ می‌دهد که سرعت برخورد ذره به سطح از یک حد بحرانی بیشتر باشد و این حد بحرانی برای مواد مختلف متفاوت است. مکانیزم غالب اتصال در فرآیند پاشش سرد به ناپایداری برشی آدیاباتیک<sup>۱</sup> ایجاد شده در فصل مشترک ذره/ زیرلایه نسبت داده می‌شود. در اثر برخورد یک ذره با سرعت بحرانی به سطح، میدان تنش فشاری حاصله در محل برخورد باعث ایجاد بار برشی<sup>۲</sup> می‌شود. کرنش برشی موضعی حاصله باعث ایجاد ناپایداری برشی آدیاباتیک می‌شود.

بطور کلی کار سختی باعث تغییر فرم دانه‌ها و حرکت نابجایی‌ها می‌شود اما بیش از ۹۰٪ کار پلاستیک به شکل گرما آزاد می‌شود. حرارت آزاد شده باعث نرم شدن ماده شده تا جاییکه نرخ نرم شدن حرارتی بر کار سختی غلبه کرده و در نهایت منجر به افت تنش و افزایش کرنش می‌شود. در نتیجه ماده بطور موضعی ناپایدار شده، کرنش در نوارهای باریک تجمع کرده و باعث تشکیل جریانی از ماده شدیداً تغییر فرم یافته می‌شود. در شکل (۶) نحوه تغییر فرم ذره/ سطح تماس و تشکیل پیوند در اثر برخورد یک ذره مسی به زیرلایه آلومینیمی بصورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل (۶) نحوه تغییر فرم ذره (پودر مسی ۲۰ میکرونی)/ زیرلایه در حین برخورد

۱- Adiabatic shear instability

۲- Shear load



### سرعت ذره و سرعت بحرانی<sup>۱</sup>

یکی از پارامترهای مهم در فرآیند پاشش سرد، سرعت ذره قبل از برخورد به سطح زیرلایه است. سرعت ذره تعیین کننده رسوب ذره روی سطح و یا ساییده شده سطح زیرلایه است. بطور کلی برای هر ماده یک حداقل سرعت برای رسوب روی سطح وجود دارد که از آن تحت عنوان سرعت بحرانی یاد می‌شود. ذراتی که دارای سرعتی بیشتر از سرعت بحرانی باشند امکان رسوب و تشکیل پوشش را دارند. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر سرعت بحرانی عبارتند از:

- قطر ذرات
- گاز حامل
- دمای پیشگرم
- شرایط اکسیداسیون ذرات
- طراحی نازل

### راندمان پوشش‌دهی

یکی از ویژگی‌های مهم فرآیند پاشش سرد راندمان پوشش‌دهی است، اما با توجه به ماهیت پیچیده روش امکان حصول راندمان ۱۰۰٪ وجود ندارد. برخی از فاکتورهای مؤثر بر راندمان پوشش‌دهی عبارتند از:

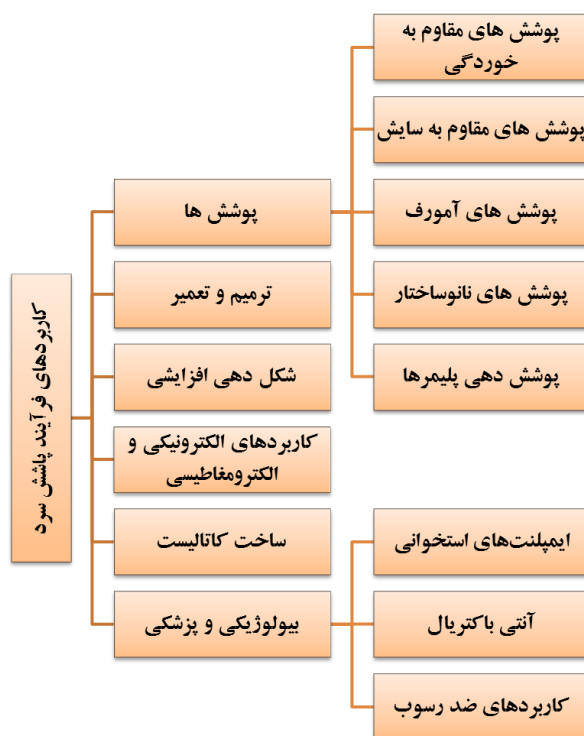
- سرعت بحرانی
- زاویه برخورد ذرات پاشش شده به سطح زیرلایه
- مرفولوژی پودر و شرایط سطحی زیرلایه
- رفتار پلاستیک ذرات و زیرلایه
- دمای ذره و زیرلایه
- شرایط سطحی زیرلایه

### کاربردهای فرآیند پاشش سرد

فرآیند پاشش سرد اغلب بعنوان روش پوشش‌دهی با استفاده از پودر روی سطوح حساس به حرارت<sup>۲</sup> مطرح می‌شود. همچنین این فرآیند برای تولید و ترمیم قطعات در صنایع پتروشیمی، اتومبیل سازی، هوافضا، الکترونیک و ... کاربرد دارد. در شکل (۷) مهم‌ترین کاربردهای فرآیند پاشش سرد ارائه شده است.

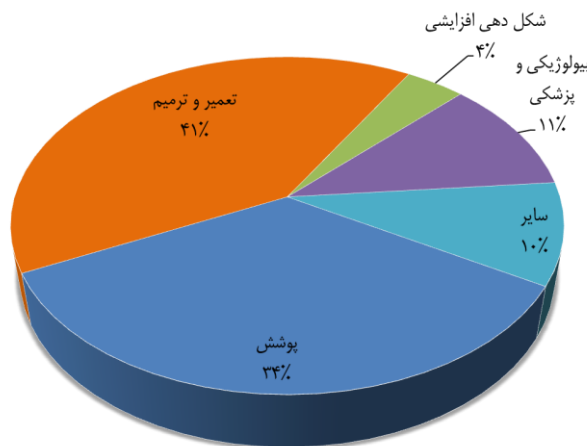
<sup>۱</sup>- Critical velocity

<sup>۲</sup>- Temperature-sensitive substrates



شکل (۷) برخی از کاربردهای متداول و در حال توسعه فرآیند پاشش سرد

با توجه به بررسی های صورت گرفته سهم تقریبی فرآیند پاشش سرد در کاربردهای مختلف در شکل (۸) تخمین زده شده است. همانطور که مشاهده می شود این فرآیند بطور عمده در پوشش دهی و تعمیر قطعات مورد استفاده قرار می گیرد.



شکل (۸) سهم تقریبی فرآیند پاشش سرد در کاربردهای مختلف

#### ۱. تعمیر قطعات

معمولاً هدف تعمیر ابعادی قطعه است و ماده مورد استفاده می تواند متفاوت از جنس قطعه باشد، به خصوص در مواردی که عیوب ایجاد شده ناشی از خوردگی است تعمیر و ترمیم با یک ماده مقاوم به خوردگی می تواند بسیار کارآمد باشد. بطور کلی انتخاب ماده برای ترمیم باید متناسب با نوع کارکرد قطعه در حین سرویس باشد. از مزایای تعمیر با این روش می توان به دمای پایین ترمیم، اتصال مستحکم و یکنواختی ابعادی حاصله اشاره کرد. یکی از صنایع ذینفع در استفاده از این روش برای تعمیر قطعات، صنایع هوافضا است. برای مثال یکی از چالش های مرتفع شده با این روش ترمیم لبه حفره های محل قرار گیری پیچ و پرچ ها در پنل های جلو هواپیمای جنگنده B-1 (شکل ۹) بوده است. باز و بسته کردن مکرر پنل ها در حین سرویس و



نگهداری منجر به سایش محل قرارگیری اتصالات شده و جریان هوا در حین پرواز عیوب ایجاد شده را تسریع خواهد کرد. این پنل‌ها از جنس آلایژ آلومینیم ۲۰۲۴ بوده و با استفاده از پودر آلایژ آلومینیم ۶۰۶۱ به روش پاشش سرد تعمیر شده است (شکل ۱۰).



شکل (۹) محل قرار گیری پنل‌های مذکور در هواپیمای جنگنده B-1 (چهار پنل در سمت راست و چهار پنل در سمت چپ قرار می‌گیرد)



شکل (۱۰) تعمیر عیوب ایجاد شده در حفره‌های محل قرار گیری پیچ و پرچ در پنل

یکی دیگر از چالش‌های مرتفع شده در صنایع هوایی تعمیر نگهدارنده رتور<sup>۱</sup> (شکل ۱۱) در هلیکوپترهای AH-64 Apache بوده است. نگهدارنده رتور از جنس آلایژ آلومینیم ۷۱۴۹ در هلیکوپترهای آپاچی، عموماً به دلیل آسیب‌های مکانیکی و خوردگی از سرویس‌دهی خارج می‌شود. با استفاده از روش پاشش سرد امکان ترمیم و سرویس دهی مجدد این قطعات فراهم شده است.



Aluminum mast support

Damaged area

Repair by cold spray

شکل (۱۱) تعمیر قطعه آلومینیمی مورد استفاده در هلیکوپتر

خوردگی در قسمت Fan case موتورهای هواپیما (شکل ۱۲) نمونه‌ای دیگر از کاربرد این روش برای ترمیم قطعات در صنایع هوافضا است. قسمت Fan case موتورهای هواپیما که از جنس آلایژهای آلومینیم است به دلیل تجمع آب در محدوده ساعت‌های ۴ تا ۸ معمولاً با آسیب خوردگی حفره‌ای<sup>۲</sup> مواجه است. استفاده از روش‌های پاشش حرارتی و جوش‌های ذوبی گرچه به لحاظ ابعادی به بازیابی قطعه کمک می‌کند اما اعوجاج ناشی از تنش‌های حرارتی و سایر خواص نامطلوب ایجاد شده

۱- Rotor Mast support

۲- Pitting corrosion

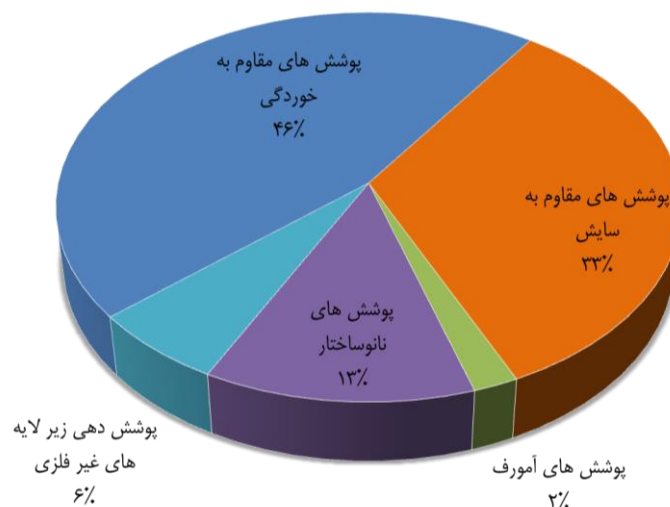
در قطعه مانع از سرویس‌دهی مجدد آن می‌شود. با استفاده از روش پاشش سرد بعنوان فرآیند جایگزین روش‌های حرارتی پودر آلایژ آلومینیم ۶۰۶۱ روی سطح مورد نظر پوشش داده شد. بررسی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی (سختی، استحکام، چسبندگی و ...) حاکی از حصول شرایط مطلوب برای سرویس‌دهی مجدد قطعه بود.



شکل (۱۲) مناطق مستعد به خوردگی در قسمت Fan case موتور هواپیما به دلیل تجمع آب

## ۲. پوشش

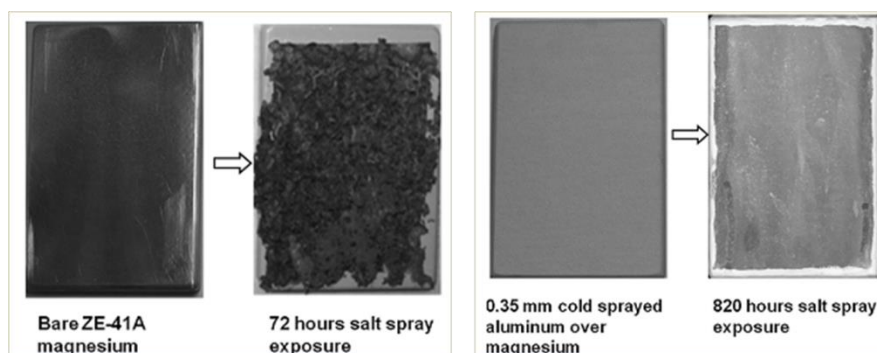
هدف از ایجاد پوشش روی سطوح بهبود خواص خوردگی و سایشی است. علاوه بر ایجاد پوشش‌های رایج، شرایط کاری منحصربفرد فرآیند پاشش سرد امکان تولید پوشش‌های آمورف و نانو ساختار را نیز فراهم کرده است و در حال حاضر این قبیل پوشش‌ها بعنوان کاربردهای جدید روش پاشش سرد در حال تحقیق و توسعه می‌باشند. ایجاد پوشش روی زیرلایه‌های غیر فلزی مانند سرامیک‌ها و مخصوصاً پلیمرها از دیگر کاربردهای در حال توسعه این روش پوشش‌دهی است. در شکل (۱۳) سهم تقریبی فرآیند پاشش سرد در هر یک از این کاربردها ارائه شده است.



شکل (۱۳) سهم تقریبی فرآیند پاشش سرد در کاربردهای مختلف پوشش‌دهی

#### - بهبود مقاومت خوردگی

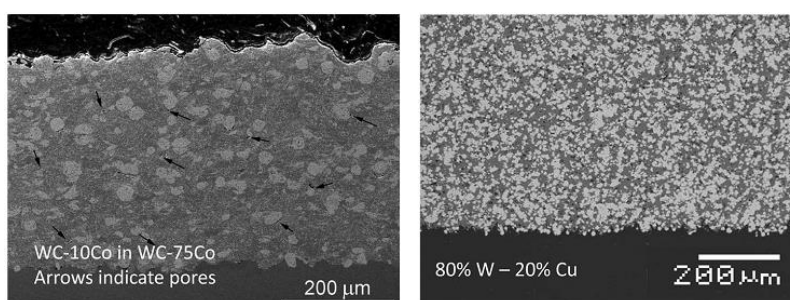
منیزیم تقریباً ۳۵٪ سبکتر از آلومینیم بوده و به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا در صنایع نظامی برای ساخت قطعات هواپیما و هلیکوپتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه منیزیم از نظر الکتروشیمیایی فلز فعالی بوده و نسبت به سایر فلزات در اتصالات غیر همجنس نقش آند را ایفا می‌کند، بنابراین برای جلوگیری از خوردگی گالوانیکی باید حفاظت شود. استفاده از فرآیند پاشش سرد برای پوشش دهی آلومینیم خالص روی منیزیم گامی مؤثر در راستای بهبود عملکرد قطعات منیزیمی مورد استفاده در صنعت مذکور بوده است. در شکل (۱۴) بهبود رفتار خوردگی منیزیم پوشش داده شده با آلومینیم به روش پاشش سرد در مقایسه با منیزیم بدون پوشش مشاهده می‌شود.



شکل (۱۴) مقایسه مقاومت خوردگی منیزیم بدون پوشش و منیزیم پوشش داده شده توسط آلومینیم به روش پاشش سرد

#### - بهبود خواص سایشی

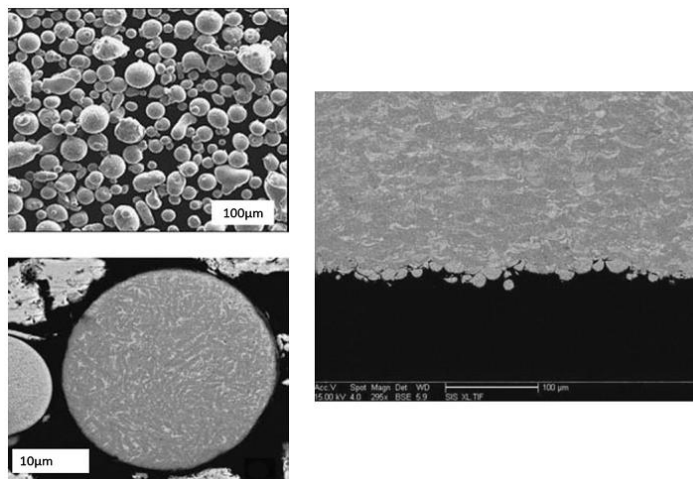
با توجه به اینکه تشکیل پوشش‌های سخت و مقاوم به سایش به دلیل عدم تغییر فرم پلاستیک ذرات ماده پاشش امکانپذیر نیست، برای حل این مشکل ذرات پودر با سختی بالا با ذرات پودر یک ماده نرم و داکتیل مخلوط شده (پوشش کامپوزیتی) و پاشش صورت می‌گیرد. با انجام این کار ماده نرم در اثر پاشش رسوب کرده و نقش زمینه را برای ذرات سخت ایفا می‌کند. پوشش حاصل یک کامپوزیت مقاوم به سایش خواهد بود. در شکل (۱۵) ساختار پوشش‌های کامپوزیتی ساخته شده با روش پاشش سرد نشان داده شده است.



شکل (۱۵) پوشش‌های کامپوزیتی مقاوم به سایش ایجاد شده به روش پاشش سرد

#### - تولید پوشش‌های آمورف

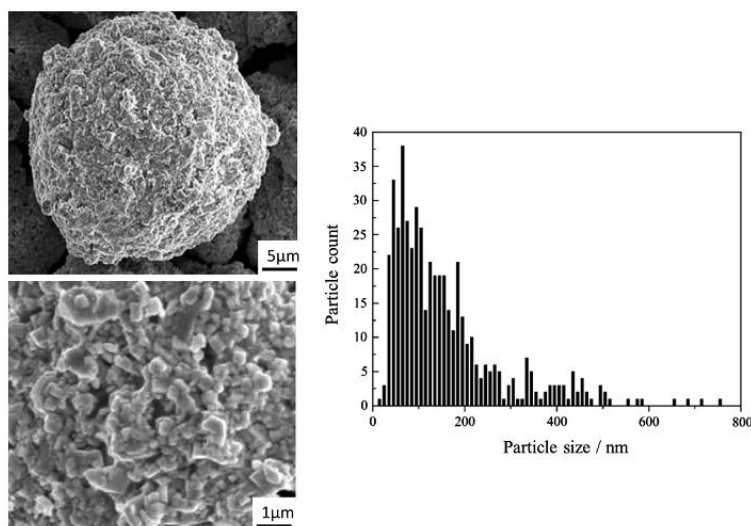
با توجه به اینکه فرآیند پاشش سرد در دمای پایین انجام می‌شود امکان حفظ ساختار و ماهیت اولیه مواد پاشش وجود خواهد داشت. بررسی‌های انجام گرفته روی پودرهای آمورف پایه آهن، مس و آلومینیم نشان داد فرآیند پاشش سرد باعث تغییر ساختار آمورف مواد پوشش نمی‌شود. در شکل (۱۶) تصاویر پودر پایه آهن آمورف قبل و بعد از پاشش سرد نشان داده شده است. تصاویر بیانگر حفظ ساختار آمورف پودر بعد از پاشش است.



شکل (۱۶) پودر آمورف پایه آهن (سمت چپ) و پاشش سرد شده (سمت راست). مناطق خاکستری روشن و تیره در ساختار پوشش به ترتیب نشان دهنده نواحی کریستالی و آمورف است

#### - تولید پوشش‌های نانوساختار

با توجه به پایین بودن دمای کاری، فرآیند پاشش سرد روشی مناسب برای تولید نانوساختارها خواهد بود. به دلیل اینکه ذرات نانو از تکانه رو به جلو<sup>۱</sup> کافی برای غلبه بر نیروهای آیرودینامیکی برخوردار نیستند، پاشش سرد این ذرات باید بصورت خوشه-های آگلومره<sup>۲</sup> شده که رفتاری شبیه ذرات بزرگتر دارند انجام شود. این خوشه‌های آگلومره پس از رسوب به خصوصیات ابعادی اولیه خود برمی‌گردند. در شکل (۱۷) ریزساختار اولیه نانو پودر WC-12%Co و توزیع اندازه ذرات بعد از پاشش سرد نشان داده شده است. نتایج حاصله نشان می‌دهد امکان تولید پوشش‌های نانوساختار به روش پاشش سرد وجود دارد.



شکل (۱۷) ریزساختار اولیه نانو پودر WC-12%Co (سمت چپ) و توزیع اندازه ذرات بعد از پاشش سرد (سمت راست)

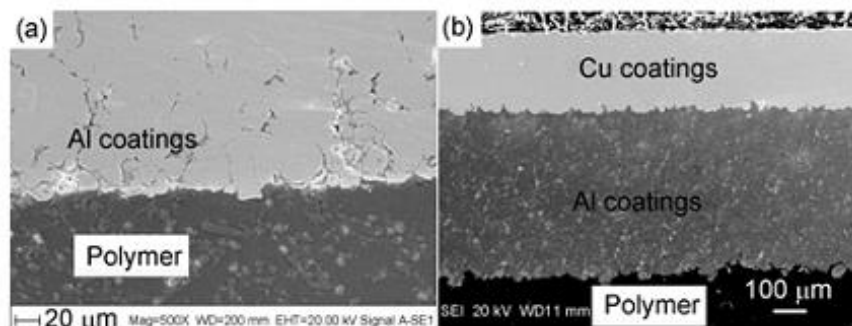
#### - پوشش‌دهی پلیمرها

۱- Forward momentum

۲- Agglomerate clusters



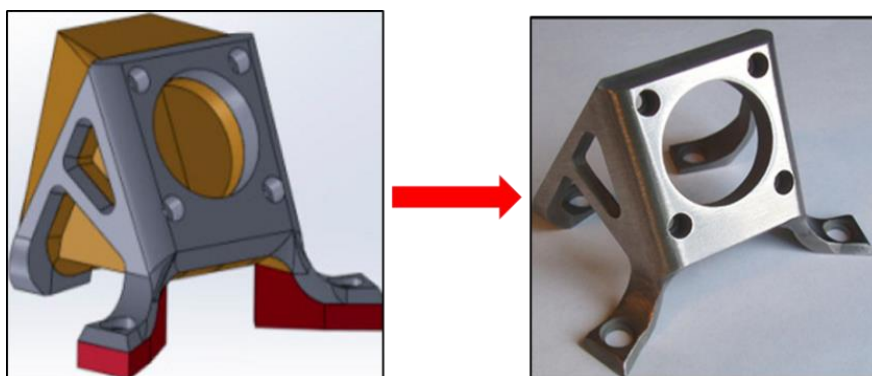
با توجه به پایین بودن دمای کاری، فرآیند پاشش سرد می‌تواند بعنوان روشی مناسب برای ایجاد پوشش‌های فلزی با ضخامت کم روی پلیمرها مطرح شود. ایجاد پوشش‌های فلزی روی سطوح پلیمری علاوه بر بهبود مقاومت خوردگی باعث ایجاد خواصی مانند هدایت الکتریکی، هدایت حرارتی و ... می‌شود. در شکل (۱۸) پوشش فلزی ایجاد شده روی پلیمر به روش پاشش سرد نشان داده شده است.



شکل (۱۸) پوشش فلزی ایجاد شده روی پلیمر به روش پاشش سرد

### ۳. شکل‌دهی افزایشی<sup>۱</sup>

با وجود اینکه فرآیند پاشش سرد بعنوان یک روشی پوشش‌دهی مطرح شده اما به لحاظ تئوری محدودیتی در میزان ضخامت قابل حصول با این روش وجود ندارد. بنابراین پاشش سرد می‌تواند برای تولید قطعات با شکل‌های گوناگون مورد استفاده قرار گیرد. این کار می‌تواند بار رسوب لایه‌های متوالی مواد برای رسیدن به ضخامت و شکل مورد نظر عملی شود. نمونه‌ای از یک قطعه ساخته شده با این روش در شکل (۱۹) نشان داده شده است.



شکل (۱۹) قطعه تولید شده به روش پاشش سرد: پاشش روی یک زیرلایه انجام شده و در ادامه زیرلایه خارج و با ماشینکاری شکل قطعه نهایی شده است

### ۴. ساخت کاتالیست

برخلاف پاشش حرارتی، در فرآیند پاشش سرد به دلیل پایین بودن دمای پوشش‌دهی امکان تغییر فاز در ذرات پودر وجود ندارد. برای مثال از اکسید تیتانیم ( $\text{TiO}_2$ ) بعنوان ماده‌ای مناسب برای تولید پوشش‌های فتوکاتالیست یاد می‌شود، اما امکان ساخت پوشش‌هایی با این خصوصیات از طریق فرآیند پاشش حرارتی امکانپذیر نیست زیرا در حین پوشش‌دهی اکسید تیتانیم دچار تغییر فاز می‌شود. در چنین شرایطی پاشش سرد می‌تواند راه حلی برای مشکل مذکور باشد.

## ۵. کاربردهای بیولوژیکی و پزشکی

### - ساخت ایمپلنت‌های استخوانی

هیدروکسی‌آپاتایت به دلیل شباهت ساختاری و شیمیایی به مینرال‌های استخوانی به طور وسیعی در ساخت ایمپلنت‌های دندان و ارتوپدی استفاده می‌شود. هیدروکسی‌آپاتایت معمولاً توسط روش پاشش پلاسمایی<sup>۱</sup> رسوب دهی می‌شود، اما حرارت زیاد در حین رسوب دهی اثرات نامطلوبی مانند تبخیر، تغییر فاز، آزادسازی گاز و تنش‌های پسماند را به همراه خواهد داشت. روش پاشش سرد با توجه به مزایایی که ذکر شد می‌تواند بعنوان روش جایگزین برای ساخت این ایمپلنت‌ها استفاده شود.

### - کاربردهای آنتی باکتریال<sup>۲</sup>

آلودگی باکتریایی ایجاد شده در اثر تماس با سطوح یکی از عوامل تشدید کننده بیماری‌های عفونی است. در چند دهه گذشته فعالیت‌های زیادی در زمینه خواص آنتی‌باکتریال مس و آلیاژهای آن در رابطه با بخش عمده‌ای از میکرواورگانیزم‌های تهدید کننده سلامت عمومی در صنایع غذایی، بهداشت و ... صورت گرفته، اما روشی مناسب برای پوشش‌دهی شناسایی نشده است. در راستای شناسایی روش مناسب برای پوشش دهی مس روی سطوح و بررسی میزان تأثیر آن بر عفونت زدایی، خواص سطوح پوشش‌دهی شده با دو روش پاشش سرد و پاشش پلاسمایی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد سطح پوشش‌دهی شده با پاشش سرد بیشترین خواص ضد میکروبی را دارد.

### - کاربردهای ضد رسوب<sup>۳</sup>

سطوح و تجهیزاتی که جهت سرویس‌دهی در زیر آب قرار دارند (کشتی‌ها، تجهیزات مرتبط با میدان‌های نفت و گاز، آب شیرین کن‌ها<sup>۴</sup> و ...) عموماً تحت تأثیر رسوب‌های بیولوژیکی<sup>۵</sup> هستند. این رسوبات به لحاظ اقتصادی تأثیر شگرفی بر این تجهیزات خواهند داشت. بررسی‌ها نشان داده است مس و آلیاژهای آن قابلیت جلوگیری از تشکیل رسوبات بیولوژیکی روی سطوح در دراز مدت را دارا هستند، اما امکان استفاده از آنها روی برخی از سطوح پلاستیکی وجود ندارد. با پیدایش روش پاشش سرد و قابلیت پاشش روی سطوح پلیمری، پلیت‌های مسی مورد استفاده با سطوح پلیمری پوشش داده شده با مس جایگزین شدند. در شکل (۲۰) اثر پوشش مسی در جلوگیری از تشکیل رسوب‌های بیولوژیکی نشان داده شده است.



شکل (۲۰) مقایسه سطح پوشش‌دهی شده با مس به روش پاشش سرد و سطح بدون پوش از نظر تشکیل رسوبات بیولوژیکی

۱- Plasma spray

۲- Antibacterial

۳- Antifouling

۴- Desalination plants

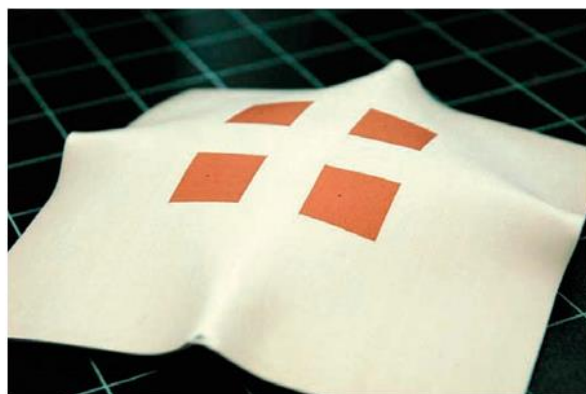
۵- Biofouling



## ۶. کاربردهای الکترونیکی و الکترومغناطیسی

### - آنتن‌ها<sup>۱</sup>

نصب آرایه‌های آنتن‌های بزرگ بطور مستقیم روی سطح بال‌ها و ساختار هواپیماها امکان استفاده از سیستم‌های ارتباطی بدون تداخل با نیروهای آیرودینامیکی با آنتن را در آینده فراهم خواهد کرد. به دلیل اشکال پیچیده هواپیماهای با کارایی بالا (سطوح با انحنا<sup>۲</sup>، نامنظم، بزرگ و ...) امکان ساخت این آنتن‌ها با روش‌های متداول وجود ندارد. با پیدایش فرآیند پاشش سرد امکان ساخت آنتن‌های فلزی روی سطوح پیچیده فراهم شده است. در شکل (۲۱) یک آنتن چهار آرایه‌ای ساخته شده از مس روی سطحی با انحنا<sup>۳</sup> دوگانه به روش پاشش سرد نشان داده شده است.



شکل (۲۱) آنتن چهار آرایه‌ای ساخته شده از مس روی سطحی با انحنا<sup>۳</sup> دوگانه به روش پاشش

### - سپر الکترومغناطیسی<sup>۴</sup>

حفاظت از محفظه‌های حاوی تجهیزات الکترونیکی با هدف جلوگیری از نفوذ و تداخل امواج الکترومغناطیسی ناخواسته می‌باشد. سپرهای مورد استفاده در جنگ‌های الکترونیک عموماً قابل حمل، سبک وزن (معمولاً آلومینیومی) و دارای ساختار شش ضلعی<sup>۴</sup> هستند. نوع ساختار این سپرها باعث ایجاد درز<sup>۵</sup> در محل اتصال هسته به پوسته می‌شود. اتصالات عموماً با استفاده از چسب‌های ارگانیک ایجاد شده و این چسب‌ها به دلیل عایق بودن باعث از دست رفتن تماس الکتریکی در سرتاسر درز می‌شود. ایجاد هدایت الکتریکی در درزها با روش‌هایی نظیر لحیم کاری به دلیل محدودیت دمایی چسب‌ها امکانپذیر نیست. با استفاده از روش پاشش سرد امکان ایجاد پوشش روی درزها برای برقراری هدایت الکتریکی وجود دارد. دمای پایین پوشش-دهی (کمتر از ۱۰۰ درجه سانتیگراد) مانع از تخریب چسب مورد استفاده در محل اتصال می‌شود. در شکل (۲۲) درز پر شده با روش پاشش سرد در یک سپر الکترومغناطیسی نشان داده شده است.

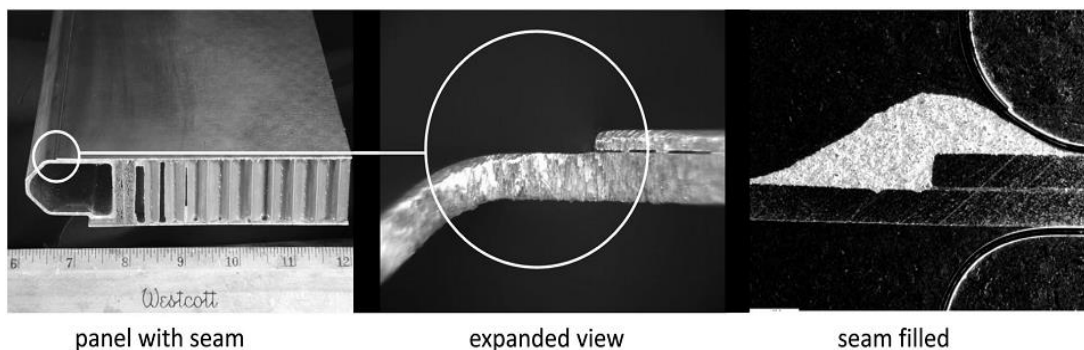
۱- Antennas

۲- Doubly curved surfaces

۳- Electromagnetic shielding

۴- Honeycomb structure

۵- Seam



شکل (۲۲) آب بندی درزها به روش پاشش سرد در سپر الکترومغناطیسی برای جلوگیری از نشت الکتریکی

### مواد پاشش مورد استفاده در کاربردهای رایج

در جدول زیر برخی از مواد پاشش مورد استفاده در کاربردهای متداول فرآیند پاشش سرد مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این نوع زیرلایه و کاربرد مورد نظر نیز ذکر شده است.

جدول (۱) برخی از مواد پاشش مورد استفاده در کاربردهای رایج

کاربرد متداول	زیرلایه	ماده پاشش
بهبود خواص خوردگی تعمیر قطعات	- آلومینیم و آلیاژهای آلومینیم - منیزیم و آلیاژهای منیزیم - فولادها و فولادهای زنگ نزن	پایه آلومینیم
تعمیر قطعات ایجاد هدایت الکتریکی و حرارتی	- مس و آلیاژهای مس - آلومینیم و آلیاژهای آلومینیم - فولادهای زنگ نزن - سرامیک‌ها	پایه مس

جدول (۵) ادامه

کاربرد متداول	زیرلایه	ماده پاشش
تعمیر چدن ایجاد خواص مغناطیسی جایگزین روش الکتروپلیت با نیکل	- چدن - مس و آلیاژهای مس - نیکل و آلیاژهای نیکل - طلا - آلیاژ نیکل / آهن (Permalloy)	پایه آهن و نیکل
بهبود خواص خوردگی ایجاد هدایت حرارتی	- منیزیم و آلیاژهای منیزیم - فولادها و فولادهای زنگ نزن	پایه روی
بهبود خواص خوردگی ایجاد هدایت الکتریکی بهبود خاصیت لجیم کاری	- آلومینیم و آلیاژهای آلومینیم	پایه قلع
بهبود خواص خوردگی	- آلومینیم و آلیاژهای آلومینیم	پایه تیتانیم

	<ul style="list-style-type: none"><li>- مس و آلیاژهای مس</li><li>- فولادها و فولادهای زنگ نزن</li><li>- سرامیک‌ها</li></ul>	
بهبود خواص سایشی	زیرلایه‌های داکتیل	اکسیدها سرامیک‌ها کاربیدها