دهمین همایش صنایع دریایی
هفتم لغایت نهم آبانماه ۱۳۸۷
آبادان ـ خرمشهر

انتخاب پوشش اسپری حرارتی برای محافظت از خوردگی سازه‌های دریایی

مهرشاد مشرف جوادی[1]
شاهین شهر - دانشگاه مالک اشتر - پژوهشکده زیرسطحی
Mehrshad.mj@gmail.com

چکیده

پوشش‌های اسپری حرارتی از جمله پوشش‌هایی هستند که در بسیاری از صنایع و همچنین صنعت دریا به خوبی مورد استفاده قرار می‌گیرند اما در کشور ما استفاده کاملی از قابلیت‌های این پوشش‌ها نمی‌شود. هدف این مقاله ایجاد انگیزه، نشان دادن قابلیت‌ها و روش انتخاب این پوشش‌ها است. مسئله خوردگی در صنعت دریا از اهمیت خاصی برخوردار است و مقابله با آن توسط روش اسپری حرارتی از جمله روش‌هایی است که کاربرد آسان و طول عمر فوق‌العاده‌ای دارد. استفاده از این روش موجب کاهش چشمگیر هزینه‌ها و افزایش طول عمر سازه‌های دریایی می‌گردد.

چگونگی انتخاب انواع پوشش‌های اسپری حرارتی برای محافظت از سازه‌های دریایی و قسمت های مختلف آن، نکته‌ای است که همواره طراحان را به چالش می‌کشد. در این مقاله چگونگی انتخاب و طراحی پوشش‌های اسپری حرارتی و عوامل موثر در کیفیت و طول عمر آنها بیان شده‌است.

کلمات کلیدی : پوشش – خوردگی – اسپری حرارتی – سازه دریایی

---

1 – عضو هیئت علمی دانشگاه مالک اشتر

مقدمه

اسپری حرارتی به مجموعه‌ای از فرآیندهای پوشش‌دهی اطلاق می‌گردد که در آنها ماده پوشان بـه صـورت پـودر یـا سیم، توسط گرمای یک منبع حرارتی به صورت ذوب یا خمیری درآمده و بعد توسط یک گاز با فشار زیـاد بـه شـکل قطرات ریز بر روی زمینه قرار می‌گیرد. در این فرآیندها در واقع گرمای موجود برای ذوب نمودن ماده پوشـان صـرف گرم نمودن گاز نیز می‌گردد. با گرم شدن گاز فشار آن افزایش یافته ماده پوشـان را و بـا سـرعت زیـادی بـه صـورت اتمیزه بر روی قطعه می‌نشاند. تمام فرآیندهای اسپری حرارتی دارای اجزائی از جمله منبع تغذیه ماده پوشان، منبـع حرارتی، مخزن‌های گاز، تفنگ اسپری و سیستم کنترل می‌باشد.

در اسپری حرارتی امکان استفاده از دو یا چند ماده نیز وجود دارد. با توجه به این مطلب می‌توان گفت در مواردی که احتیاج به پاشش مواد مرکب و یا مخلوط وجود داشته باشد می‌توان از دو یا چند مخزن و یا چند سیم از مواد پوشان استفاده نمود و یا می‌توان پودر مواد را با هم مخلوط کرد و پاشش را انجام داد.

اسپری حرارتی

به طور کلی تقسیم بندی فرایندهای اسپری حرارتی بر حسب نوع منبع حرارتی آنها انجام می‌گیرد. این منابع شـامل سوختن گاز به شکل‌های مختلف، قوس الکتریک و قوس پلاسما می‌باشند و هر کدام دارای خواص ویژه خود هستند. از جمله پر مصرف ترین روش‌های اسپری حرارتی برای مقابله با خوردگی در صنعت دریا، می‌تـوان بـه روش اسـپری شعله‌ای و قوسی اشاره نمود. سایر روش‌ها نیز معمولا برای ایجاد انواع پوشش‌های با کیفیت بالا بر روی قطعات مـورد استفاده قرار می‌گیرد.

در اسپری شعله‌ای که ساده‌ترین فرآیند اسپری حرارتی است، حـرارت لازم بـرای ذوب نمـودن مـواد پوشـان توسـط سوختن یک گاز (معمولا استیلن) تامین می‌گردد. این روش برای پوشش‌دهی فلزات و بعـضی از مـوادی کـه نقطـه ذوب بالایی ندارند، استفاده می‌گردد. بهترین مزیت این روش سادگی، ارزانی و سرعت بالای پوشش‌دهی آن است.

در روش اسپری قوسی منبع حرارتی توسط ایجاد قوس الکتریکی بین دو سیم از جنس ماده پوشان تامین می‌گـردد. قوس بین دو سیم ازجنس ماده پوشان ایجاد می‌گردد و آنها را ذوب و اتمیزه می‌نماید. سپس با استفاده از یک جریان

گاز، ذرات پوشش بر روی زیرلایه قرار می‌گیرند. این روش سرعت پوشش‌دهی بالایی دارد و نسبتا ارزان می‌باشد. این پوشش‌ها دارای چسبندگی و پیوستگی خوبی و تخلخل کمتری هستند [۱و۲].

به طور کلی پوشش‌های فلزی نسبت به زیرلایه خود حالت آندی یا کاتدی دارند. از آنجایی‌که خوردگی در آند اتفاق می‌افتد و کاتد سالم می‌ماند، سیستم‌های پوشش ضد خوردگی طوری طراحی می‌شوند که پوشش نسبت به زیرلایه حالت آندی داشته باشد. در این‌حالت پوشش آندی خورده شده و از زیرلایه محافظت می‌کند. در بعضی موارد مقاومت خوردگی خود پوشش نیز دارای اهمیت است. در کاربردهایی که دمای بالا و یا محیط‌های شیمیایی خورنده در آنها وجود دارد، پوشش اسپری حرارتی باید دارای مقاومت خوردگی بالایی باشد. در این حالت اسپری حرارتی نقش عایق را برای حفاظت از زیرلایه ایفا می‌کند [۳ و۴].

جلوگیری از خوردگی و محافظت ازسازه‌ها

اسپری حرارتی یک فلز بر روی یک سازه به منظور جلوگیری از خورده شدن فلز پایه که معمولا فولاد است صورت می‌گیرد. برای این منظور اغلب از فلزات فعالی مانند روی، آلومینیوم و آلیاژ روی- آلومینیوم استفاده می‌شود. این مواد ارزان بوده و به راحتی قابل دسترسی هستند و علاوه بر این به صورت‌های سیم و پودر نیز وجود دارند و در نتیجه برای استفاده در اسپری حرارتی بر روی سازه‌های بزرگ مناسب هستند. وقتی این مواد با ضخامتی در حدود ۰/۱۳ تا ۰/۵ میلیمتر بر روی فولاد قرار بگیرند، قادر به ایجاد حفاظت کاتدی فولاد هستند و می‌توانند با ایجاد الکترون در محیط‌های خورنده از خورده شدن فولاد جلوگیری کنند. به این نوع حفاظت کاتدی حافظت با آند فدا شونده گفته می‌شود. در مورد سازه‌های بتنی حفاظت کاتدی به صورت الکتریکی و با استفاده از یک منبع برق که الکترون لازم را جهت جلوگیری از خوردگی تقویت کننده‌های فولادی فراهم می‌کند انجام می‌گیرد.

از فلزات روی و آلومینیوم و آلیاژ AL-Zn در حفاظت کاتدی به عنوان لایه‌های جریان هم استفاده می‌شود. با استفاده از این مواد به عنوان آند فدا شونده، حفاظت سازه فولادی شامل محل‌هایی که پوشش آسیب دیده‌است و یا امکان ایجاد پوشش در آن وجود ندارد نیز می‌شود. سایر قسمت‌هایی که می‌توانند از اسپری حرارتی استفاده نمایند شامل تونل‌های زیر آبی، درهای فولادی و بتنی در رودخانه‌ها و سیستم‌های دروازه‌ای آب بندها، صنایع نفت در کنار

دریا، لوله‌های فولادی در روی زمین و یا در زیر زمین، برج‌های آبی و ریل‌های ماشین‌ها و کشتی‌ها می‌شود. از اسپری حرارتی می‌توان برای حفاظت انواع ساختارهای فولادی در محیط‌های خورنده استفاده نمود [۲].

روش دیگر حفاظت خوردگی که با اسپری حرارتی قابل دستیابی است روش حفاظت عایق بندی است. در این روش پوشش اسپری حرارتی به عنوان عایق در بین محیط و فولاد زیرلایه عمل می‌کند. در این روش پوشش حالت فدا شونده ندارد ولی قادر به حفاظت مناطق آسیب دیده و بدون پوشش نیست. نمونه این مواد فولاد است که به طور طبیعی لایه محافظتی از اکسید کروم بر روی خود تشکیل می‌دهد. سایر موادی که اکسیدهای پایدار بر روی خود ایجاد می‌کنند شامل آلیاژهای دارای مولبیدن، کروم، نیکل، سرامیک‌ها و پلیمرها هستند [۵].

طول عمر پوشش‌ها

تخمین طول عمر یک سازه و قابل اطمینان بودن کیفیت آن در درجه اول بستگی به نحوه آماده سازی سطح و کیفیت و مشخصات پوششی که در تماس مستقیم با سطح فلز است، قراردارد. در این رابطه فلز روی و آلومینیوم دارای اهمیت و نقش اساسی هستند چرا که علاوه بر مقاومت ذاتی آنها در برابر محیط‌های خورنده به صورت گالوانیکی نیز از فولاد محافظت می‌کنند. جدول ۱ طول عمر حاصل از سیستم‌های پوشش‌دهی مختلف و نوع آنها را نشان می‌دهد.

جدول ۱ : طول عمر حاصل از سیستم‌های پوشش‌دهی مختلف و نوع آنها [۶]

Application	Paint System[a]	Typical Paint Service Life	Thermal Spray System Number[b]	Predicted Thermal Spray Service Life, years
Penstocks	Coal tar epoxy	20 – 30	6-Z-A	30 – 40
Tainter gates	Vinyl zinc-rich	20 – 25	6-Z-A	25 – 35
Tainter and roller gates (interior)	Vinyl	25 – 40	6-Z-A	40 – 50
Tainter gates (very turbulent ice- and debris-laden water)	Vinyl zinc-rich	1 – 2	6-Z-A	8 – 12
Roller gates	Vinyl zinc-rich	25 – 30	6-Z-A	30 – 40
Service bridges	Alkyd/phenolic	10 – 15	5-Z-A or 2-Z	50 - 60
Sector gates (seawater)	Epoxy zinc-rich/coal tar epoxy	15 – 20	8-A	20 - 40

[a] Paint systems described in CEGS-09965:
Coal tar epoxy = Paint System No. 6
Vinyl zinc-rich = Paint System Nos. 3-A-Z, 5-C-Z, and 5-E-Z
Vinyl = Paint System No. 4
Alkyd/phenolic = Paint System No. 2
Epoxy zinc rich/coal tar epoxy = Paint System No. 6-A-Z

[b] 6-Z-A = 400 μm (0.016 in.) 85-15 zinc-aluminum alloy
5-Z-A = 300 μm (0.012 in.) 85-15 zinc-aluminum alloy
2-Z = 300 μm (0.012 in.) zinc
8-A = 250 μm (0.010 in.) aluminum

پس از آماده سازی صحیح سطح زیرلایه، ایجاد پوشش مراحلی ساده دارد و احتیاج به نکات تکنیکی پیچیده و ملاحاظت بسیار خاص وجود ندارد. این پوشش‌ها با در نظر گرفتن طول عمری در حدود ۲۵ تا ۳۰ سال از نظر مقدار نسبت هزینه به طول عمر در نقطه بسیار خوبی قرار دارند و صرفه جویی زیادی را در هزینه تعمیر و نگهداری ایجاد می‌کنند (شکل ۱). این فرآیند ساده و اقتصادی است و می‌تواند راه حل بسیاری از مشکلات خوردگی در صنایع باشد [۶و۷].

عوامل موثر در انتخاب پوشش

عوامل محیطی : در این قسمت به شرایطی که پوشش باید با آنها مقابله کند و از طرف محیط بر پوشش اعمال می‌شود، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در واقع این شرایط هم برای سیستم پوشش اسپری حرارتی و هم برای رنگ‌ها وجود دارد. محیط کار معمولا یک یا چند مورد از شرایط مشکل را بر سطح پوشش اعمال می‌کند، که شامل دامنه دمایی، رطوبت، محیط آب و غوطه‌وری، دامنه PH، قرار گرفتن در معرض انواع محلول‌ها، چرخه‌های خشک و تر محیطی، چرخه‌های دمایی، اشعه ماوراء بنفش، ضربه و سایش، رفتگی و کاویتاسیون و شرایط خاص می‌شوند. شرایط محیطی یکی از عوامل بسیار مهم در انتخاب سیستم پوشش‌دهی قطعات می‌باشد [۶و۸].

محدوده دمایی : بسیاری از محیط‌های کاری دارای نوسان و دامنه دمایی هستند. تغییرات دمایی در نیمکره شمالی بین ۲۸- تا ۳۸ °C تغییر می‌کند. تغییرات دمایی در محیط‌های آبی نوسان کمتری دارد و بین ۱- تا ۲۷°C درجه تغییر می‌کند. این تغییرات دمایی معمولا بر روی کیفیت پوشش‌های اسپری حرارتی مانند پوشش‌های روی و آلومینیوم و غیره اثر چندانی ندارد ولی رنگ‌ها حساسیت بیشتری نسبت به این تغییرات دمایی دارند. بعضی از قطعات نیز ممکن است تحت دمایی بیشتر قرار بگیرند که در این‌صورت رنگ‌ها به جز چند مورد توانایی تحمل کمتری از خود نشان می‌دهند. بعضی از رنگ‌های روغنی از روی طبق استاندارد sspc نوع I-B یا IC تا دمای ۴۰۰°C را نیز تحمل می‌نمایند. پوشش‌های اسپری حرارتی روی و آلومینیوم و آلیاژهای آنها کیفیت بسیار بهتری را نسبت به سیستم‌های رنگ از خود نشان می‌دهند و تا نقطه ذوب روی و آلومینیوم (۴۲۰°C و ۶۶۰°C) مقاومت می‌کنند [۳و۶].

به دلیل همین مقاومت خوب در برابر دمای بالا و خوردگی برای کاربردهایی کـه دمـای آنهـا بـه ۴۰۰°C مـی‌رسـد، پیشنهاد می‌گردد که از سیستم پوشش آلومینیوم 8-A از استاندارد USACE EM 1110-2-3401 اسـتفاده شـود. در زیر این دما استفاده از سیستم رنگ و یا اسپری حرارتی بر اساس و با توجه به شرایط و سایر پارامترهای محیطـی انتخاب می‌شود.

رطوبت : رطوبت شدید معمولا همراه با ایجاد شبنم می‌باشد که بنابراین شرایط غوطه‌وری در آب شـیرین را ایجـاد می‌کند. تمام سیستم‌های اسپری حرارتـی ذکـر شـده در اسـتاندارد USACE EM 1110-2-3401 را مـی‌تـوان در محیط‌های مرطوب همراه با شبنم استفاده نمود. سیـستم اسـپری حرارتـی ۵–Z-A بـرای اسـتفاده در محـیط‌هـای مرطوب همراه با شبنم توصیه می‌شود. از آنجایی‌که رنگ از اسپری حرارتی ارزان‌تر می‌باشد، در این گونـه محـیط‌هـا بیشتر از رنگ استفاده می‌شود. با این وجود سیستم اسپری حرارتی ۵-Z-A طول عمر بسیار بیشتری نسبت به رنگ در این محیط‌ها دارد[۳و۶].

محیط آب (غوطه وری) : محیط‌های آبی شامل آب‌های یون زدایی شده تا آب‌های معمولی مـی‌گـردد و ایـن دامنه شامل آب شیرین و آب دریا نیز می‌باشد. مقدار یون‌های موجود در آب و HP آن تعیین کننده مقدار خورندگی محیط می‌باشد. در محیط‌های آب شیرین و آب دریا با توجه به مقدار سایش و ضربه وارده به پوشش می‌توان از انواع رنگ‌ها و پوشش‌های تکمیلی V-766e ,V-106-d,V-103c,V-102e و پوشش اپوکـسی قیـری C-۲۰۰A کـه در استاندارد CEGS-۰۹۹۶۵ ذکر شده‌است، استفاده نمود. پوشش اپوکسی در آب شور و پوشش‌های ونیلی در آب‌هـای شیرین بهتر عمل می‌کنند.

جهت غوطه وری در آب دریا، سیستم پوشش 8-A توصیه می‌گردد. امـروزه بـه طـور وسـیع در صـنایع نفـت جهـت محافظت قطعات غوطه ور و قطعاتی که در منطقه و پاشش دریا قرار دارند در برابر خوردگی دریا از اسـپری حرارتـی آلومینیوم استفاده می‌شود. چنین به نظر می‌رسد که پوشش اسپری حرارتی آلومینیوم در محیط غوطه وری آب دریا، بدون پوشش‌های تکمیلی آلی بهتر عمل می‌کند.

سیستم‌های پوششی ۵-Z-A و ۶-Z-A جهت پوشش‌دهی قطعاتی که در آب‌های شـیرین غوطـه‌ور هـستند، تولیـد می‌گردند و از پوشش ۶-Z-A می‌توان در محیط‌هایی با شرایط مشکل استفاده نمود. این سیستم‌های پوشش‌دهـی را می‌توان همراه و یا بدون پوشش‌های تکمیلی و عایق بندی استفاده نمود [**۳و۶**].

محدوده PH : محدوده PH محیط از محیط‌های کاملا اسیدی تا محیط‌های بازی می‌توانند اثر شدیدی بر روی کیفیت پوشش داشته باشند. در این شرایط پوشش باید عایق باشد تا از نفوذ ماده اسیدی یا بازی به سطح زیرلایه جلوگیری کند و همچنین خود نیز باید در برابر حمله شیمیایی مقاوم باشد. پوشش‌های اسپری حرارتی روی و آلومینیوم و آلیاژهای آنها در محیط‌های کاملا اسیدی و یا بازی مقاوت کمی دارند.

با افزایش و یا کاهش PH ازمقدار طبیعی ۷، حلالیت هر دو فلز آلومینیوم و روی افزایش پیدا می‌کند. از پوشش‌های اسپری حرارتی روی و آلومینیوم فقط وقتی می‌توان در محیط‌های اسیدی یا بازی استفاده نمود که عایق بندی شده و به وسیله پوشش‌های تکمیلی ونیلی یا اپوکسی تقویت شده باشند. از پوشش اسپری حرارتی روی بدون پوشش تکمیلی می‌توان در PH بین ۶ تا۱۲ استفاده نمود و پوشش آلومینیوم در محدوده ۴ تا ۸/۵ کارایی دارد. از پوشش‌های روی و آلومینیوم نباید در محیط‌هایی که احتمال وجود اسیدهای قوی مانند اسید باتری وجود دارد، استفاده نمود. رنگ‌های ونیلی و اپوکسی در محیط‌های نیمه اسیدی و نیمه بازی به خوبی مقاومت می‌کنند ولی رنگ‌هایی که محتوی ذرات روی وآلومینیوم هستند نباید در این محیط‌ها استفاده شوند. در محیط‌های به شدت اسیدی یا بازی باید از پوشش‌های آلی استفاده نمود.

حلال‌ها : محیط حلالی شامل محدوده وسیعی از انواع حلال‌ها می‌گردد. اسپری حرارتی اصولا در برابر محیط‌های حلالی مقاوم می‌باشد و انتخاب خوبی برای مقابله با این شرایط محیطی است. با این وجود بعضی از تولید کنندگان استفاده از پوشش‌های محتوی روی را در پوشش‌دهی مخازن سوخت هواپیماها مناسب نمی‌دانند. چرا که باعث آلودگی سوخت و افت کیفیت آن می‌شود. از جمله محیط‌های حلالی که ممکن است بر روی پوشش اسپری حرارتی اثر گذار باشد، مخازن نگهداری محصولات پتروشیمی است که در ته آن مقداری آب وجود دارد. وجود آب در این مخازن اثر خوردگی بیشتری نسبت به مواد شیمایی دارد. در انواع خاص محصولات پتروشیمی و یا مواد آلی که حالت اسیدی دراند نیز امکان خورده شدن پوشش وجود دارد. استفاده از پوشش‌های اسپری حرارتی در برابر محلول‌های ساده مانند شوینده‌ها و روغن‌های هیدرولیک و روانسازها مشکلی ایجاد نمی‌کند و می‌توان از این پوشش‌ها استفاده نمود. رنگ‌ها نیز با توجه به نوع حلال و نوع رنگ دربرابر انواع محیط‌ها مقاومت می‌کنند به طور کلی رنگ‌های اپوکسی بیشتر از بقیه مقاوم هستند [۳و۶و۹].

چرخه‌های تر و خشک : تر و خشک شدن مداوم سطح نیز یکی از شرایط محیطی موجود برای اغلب قطعات در کاربردهایی در اتمسفر هوا می‌باشد و بسیاری از پوشش‌ها به خوبی در برابر ین شرایط مقاومت می‌کنند. پوشش‌های اسپری حرارتی در شرایط عادی اتمسفری مقاومت بسیار خوبی از خود نشان می‌دهند و در محیط‌هایی با شرایط ساده احتیاجی به پوشش‌های ثانویه و تکمیلی وجود ندارد. در واقع اغلب انتخاب سیستم پوشش‌دهی بر حسب سایر موارد صورت می‌گیرد و این شرایط چندان حساسیت ایجاد نمی‌کند [۳و۶].

چرخه‌های حرارتی : تغییرات دما در اثر عملکرد روزانه دستگاه‌ها و مخازن عملیاتی و تغییرات دمای روز و شب در قطعات به وجود می‌آید. این تغییرات دما اغلب همراه با ایجاد تنش در پوشش‌ها می‌باشد. پوشش‌های اسپری حرارتی ضریب انبساط حرارتی نزدیکتری به زیرلایه دارند و بنابراین عدم انعطاف پذیری آنها موجب جدا شدن پوشش در چرخه‌های دمایی نمی‌گردد [۳و۶].

اشعه ماوراء بنفش : مقاومت در برابر اشعه ماوراء بنفش و فاسد شدن یکی از پارامترهای مهم در کیفیت پوشش‌ها است. اصولا پوشش‌های فلزی تحت اثر اشعه ماوراء بنفش قرار نمی‌گیرند. اما رنگ‌ها، پوشش‌های تکمیلی و پوشش‌های عایق بندی که به طور مجزا و یا برای تکمیل پوشش‌های اسپری حرارتی استفاده می‌شوند، در برابر این تابش حساس هستند. پوشش رنگ‌های آلی در برابر اشعه ماوراء بنفش دچار افت کیفیت می‌شوند و بر حسب نوع رزین و ذرات موجود در پوشش‌ها، اشعه ماوراء بنفش ممکن است باعث کدر شدن، تغییر رنگ، ترد شدن و پوسته شدن پوشش‌ها بشود. پوشش‌هایی نظیر سیلیکون و پلی یورتان آلیفاتیک۲ مقاومت بسیار خوبی در برابر اشعه ماوراء بنفش دارند [۳و۶].

ضربه و سایش : اعمال ضربه و سایش بر روی سطوح قطعات یکی از مهمترین شرایط محیطی برای هر نوع پوشش می‌باشد. سایش یکی از اولین علل تخریب پوشش‌ها در صنایع می‌باشد که ناشی از تماس مواد جامد با سطح پوشش است. مثال‌هایی از این سایش را می‌توان در سایش پوشش قطعات و سطوح کف زمین در اثر عبور و مرور افراد و وسایل، جارو زدن، ذرات ماسه درون آب، و یخ‌های شناور، مشاهده نمود. وقتی یک جسم با سرعت و وزن زیاد بر روی سطح و یا به طرف سطح در حرکت باشد سایش تبدیل به ضربه می‌شود. پدیده سایش به طور آرام و در طول

2- Alphiatic

مدت زمان طولانی تری اتفاق می‌افتد ولی ضربه به صورت سریع مـی‌باشـد. خـواص متعـددی از پوشـش‌هـا بـر روی مقاومت آنها دربرابر سایش و ضربه موثر است. به عنوان مثال چسبندگی خوب، چقرمگی، انعطاف پذیری و سـختی از مهمترین این خواص هستند. پوشش‌های اسپری حرارتی روی، آلومینیوم و آلیاژهای آنها نسبت به ضربه بسیار مقاوم هستند. پوشش روی در محیط‌های غوطه وری در آب مقاومت سایش کمی دارد، چرا کـه لایـه اکـسید روی تـشکیل شده در سطح پوشش، چسبندگی کمی دارد. در نتیجه بر اثر سایش، ایـن لایـه بـه راحتـی سـائیده مـی‌شـود و روی بیشتری اکسید می‌گردد که بنابراین پوشش سائیده می‌گردد. سیستم پوشش‌دهـی Z-A-۵ از اسـتاندارد USACE EM 1110-2-3401 بیشترین مقاومت سایش و ضربه را از خود نشان داده است. رنگ‌های نیز نـسبت بـه سـایش و ضربه مقاوم هستند ولی مقاومت آنها از پوشش اسپری حرارتی کمتر است اپوکسی‌ها مقاومت کمـی در برابـر سـایش ضربه دارند [۳و۶].

رفتگی و کاویتاسیون : شرایط مشکل تر از ضربه وسایش قرار گرفتن سطح در برابر رفتگی و کاویتاسیون است. کاویتاسیون وقتی به وجود می‌آید که حباب‌های هوا با فشار زیاد در قسمتی ایجاد شده و یـا بـر روی سـطحی عبـور کنند. قطعات فلزی دستگاه‌های هیدرولیک مانند توربین‌های هیدرولیک، شیرها، درپوش‌ها، جریان سنج‌هـا، لولـه‌هـا، پمپ‌ها و پروانه کشتی‌ها امکان بیشتری برای قرارگرفتن تحت اثر کاویتاسیون دارند. مقدار حساسیت به کاویتاسـیون بر مبنای ۸۰۰۰ ساعت کارکرد قطعه در سال تعیین می‌گردد. کاویتاسیون کم وقتی اتفاق مـی‌افتـد کـه در دو سـال پیاپی مقدار ۱/۶ تا ۳/۲ میلی متر از فولاد کربنی از بین رفته باشد. کاویتاسیون متوسط بر اسـاس نـابود شـدن mm ۱/۶ فولاد آستینی ضد زنگ در مدت یک سال تعریف می‌گردد و کاویتاسیون شدید نیز بر مبنای از بین رفتن بیش از mm ۳/۲ ازفولاد ضد زنگ آستینی در مدت شـش مـاه اتفـاق مـی‌افتـد. روش اسـتاندارد و تعمیـر آسـیب ناشـی از کاویتاسیون عبارت است از تمیز کردن سطح از آلودگی‌های خوردگی به وسیله قوس الکتریکی و سـپس سـنگ زدن سطح پوشش. در مرحله بعدی سطح تمیز شده جوشکاری می‌شود و سپس به منظور رسیدن به ابعاد مناسـب تحـت ماشینکاری قرار می‌گیرد. این روش بسیار وقت گیر و گران می‌باشد. برای مقابله با کاویتاسیون پوشش چگال و سخت حاصل از روش HVOF به عنوان پوشش مقاوم به کاویتاسیون مورد استفاده قرار می‌گیـرد و در قـسمت تعمیـر نیـز همراه با جوشکاری نقش ترمیم قطعات و ایجاد مقاومت در برابر کاویتاسیون را ایفا می‌نماید [۳و۶و۹].

محیط‌های خاص : شرایط خاص می‌تواند شامل قرارگرفتن سطوح در برابر انواع مواد خوراکی و یا آب و یا می‌تواند شامل آلوده شدن سطح نیز باشد. مثلا آلودگی‌ها و جلبک‌های ایجاد شده بر روی سطح سازه‌ها در آب دریا در این گروه قرار دارد که می‌تواند اثرات خاصی بر روی پوشش‌ها بگذارد.

بسیاری از پوشش‌های ضد خزه از مواد سمی استفاده می‌کنند که باید از نظر زیست محیطی مورد تایید باشند. پوشش‌های اسپری حرارتی روی و مس خواص ضد خزه داشته و می‌توانند به این منظور مورد استفاده قرار گیرند. پوشش‌های Z-A-۶ و Z–۳ به منظور کنترل آلودگی‌های سطوح فولاد و بتن غوطه‌ور در آب توصیه می‌شوند [۴].

سایر موارد مهم در انتخاب پوشش

علاوه برموارد ذکر شده در رابطه با محیط کار پوشش، انتخاب سیستم صحیح پوشش‌دهی مستلزم توجه به نکات دیگری نیز می‌باشد. این موارد شامل محدودیت در آماده سازی سطح آسانی استفاده و ایجاد پوشش، نیازهای معمول، شرایط میدانی، نگهداری و قیمت پوشش می‌گردد.

محدودیت در آماده سازی سطح : انتخاب سیستم پوشش‌دهی با توجه به نوع و کیفیت آماده سازی سطح یک سازه و یا قطعه خاص صورت می‌گیرد. به علت پیچیدگی‌های فیزیکی و یا حساسیت قطعات و ماشین‌ها همواره این امکان وجود ندارد که بتوان سطوح فولادی را تحت ماسه پاشی یا ساچمه پاشی قرار دارد. در چنین شرایطی می‌توان از روش‌های تمیزکردن دستی و یا روش‌های ماشینی دیگر مانند ابزارهای تمیز کننده، جت‌های آبی و یا مواد شیمیایی، استفاده نمود که در این‌حالت پوشش‌های قابل استفاده دچار محدودیت خواهند شد. این روش‌های آماده سازی کیفیت لازم زیرلایه را برای ایجاد پوشش اسپری حرارتی ایجاد نمی‌کند و کیفیت مطلوب فقط با پاشش ماسه با کیفیت خوب، اندازه ذرات مناسب و در زاویه قائمه به دست خواهد آمد. در محل‌هایی که نمی‌توان کیفیت زیرلایه را به سطح خوب رسانید، نباید از اسپری حرارتی استفاده کرد [۳و۶].

دسترسی به سطح : ممکن است استفاده از اسپری حرارتی به دلیل محدودیت دسترسی اپراتور به سطوح خاصی جهت پوشش دادن آن سطوح، محدود گردد. این مطلب اغلب ناشی از فیزیک طراحی سازه و یا شکل فیزیکی قطعه می‌باشد. پوشش‌دهی محل‌هایی مانند زوایای بسته، حفرات و درزها بسیار مشکل و یا غیر قابل انجام است.

اغلب محل‌هایی که قابلیت رنگ زدن آنها وجود دارد امکان ایجاد پوشش اسپری حرارتی نیز در آنها وجود دارد. هر دو روش احتیاج به یک مقدار فضای حرکتی و مانوری و فاصله نشست دارند. اصولا گفته می‌شود اگر بتوان یک سطح را به وسیله ماسه پاشی تمیز نمود امکان ایجاد پوشش اسپری حرارتی نیز بر روی این سطح وجود دارد. بهترین کیفیت اسپری حرارتی وقتی ایجاد می‌گردد که زاویه پاشش بر روی سطح قائمه باشد و تفنگ فاصله مناسبی ازسطح داشته باشد. اسپری حرارتی در زوایای کمتر از ۴۵ توصیه نمی‌گردد. فاصله اسپری بستگی به نوع ماده، سازنده مواد ودستگاه و نوع دستگاه مورد استفاده دارد. در صورتی‌که زاویه و فاصله اسپری را نتوان در حد مناسب نگه داشت باید از سیستم رنگ استفاده نمود [۴].

محدودیت‌های زیست محیطی : بسیاری از رنگ‌ها به علت دارا بودن ترکیبات آلی فرار از نظر زیست محیطی و آسیب زدن به لایه‌های جوی دارای ممنوعیت بوده و از نظر مقدار استفاده محدود می‌باشد. این محدودیت‌ها در محل‌های مختلف جغرافیایی و صنایع مختلف متفاوت است. برای استفاده از رنگ‌ها در محیط‌های دریایی نیز این محدودیت‌ها وجود دارد و نباید محیط‌های دریایی به وسیله رنگ آلوده گردد. پوشش‌های اسپری حرارتی از نظر جوی دارای هیچ محدودیتی نیستند و رنگ‌ها و پوشش‌های تکمیلی نیز اغلب درصد کمی از مواد فرار آلی را در خود جای داده‌اند. در بسیاری از موارد نیز پوشش‌های اسپری حرارتی بدون پوشش تکیملی و عایق بند به خوبی جوابگوی نیازهای ما هستند. پوشش‌های اسپری حرارتی فقط از نظر ایجاد غبار و آلودگی هوا دارای محدودیت‌هایی هستند که این محدودیت‌ها نیز با ایجاد تهویه و فیلتر مناسب در قسمت اسپری حرارتی قابل حل است [۳و۱۰].

نگهداری : نگهداری پوشش یکی از مسائلی است که باید در انتخاب سیستم پوشش‌دهی مورد توجه قرار گیرد. به علت طبیعت خاص و هزینه تجهیزات بیشتری که پوشش اسپری حرارتی نسبت به رنگ دارد، بازدید دوره‌ای پوشش به طور مرتب، موجب نگهداری بهتر و آسانتر قطعه و پوشش می‌گردد. تعمیرات پوشش اسپری حرارتی از تعمیر بسیاری از رنگ‌ها مشکل تر است. در واقع تعمیر جزئی پوشش اسپری حرارتی نیز مانند پوشش‌های ونیلی احتیاج به توجه خاص دارد. در حین تعمیر این پوشش‌ها باید توجه کرد تا لایه پوشش قبلی در اطراف قسمت تعمیری به علت ماسه پاشی از سطح جدا نگردد و خود پوشش جدید نیز به خوبی به سطح متصل شود. به علت مشکلات مربوط به تعمیر پوشش اسپری حرارتی معمولا این پوشش‌ها تا زمان تعویض کامل تحت تعمیر قرار نمی‌گیرند.

شرایط میدانی[3] : شرایطی که پوشش در آن کار می‌کند نیز یکی از عوامل مهم انتخاب پوشش است. شرایط خاص اتمسفری شامل رطوبت زیاد و شبنم، رسوب، بادهای شدید، دمای بسیار پایین و یا بالا و محدودیت‌های شدید در محل ایجاد پوشش، از جمله موارد مهم در رابطه با انتخاب پوشش است.

۱- برای ایجاد هر نوع پوشش باید از وجود هر گونه آلودگی تا حدی که ممکن است جلوگیری نمود. بسیاری از رنگ‌ها نسبت به وجود آب و رطوبت بر روی سطح قبل ازرنگ زدن حساس هستند. از پوشش‌های اسپری حرارتی در حالتی که بر روی سطح آلودگی وجود دارد نباید استفاده نمود.

۲- ممکن است بادهای شدید نوع آماده سازی و ایجاد پوشش را تغییر دهد. باد شدید موجب انتقال ذرات حاصل از آماده سازی سطح و ذرات پوشش تکمیلی به محلی دورتر از قسمت مورد انتظار می‌گردد. این شرایط را می‌توان با استفاده از روش‌هایی غیر از پاشش در محیط باز (اسپری و رنگ) جبران نمود.

۳- دمای بالا بر روی کیفیت بسیاری از رنگ‌ها اثر می‌گذارد و طول عمر آنها را کم می‌کند. بسیاری ازرنگ‌ها دارای محدودیت‌های دمایی در جنس ایجاد پوشش می‌باشند، اما پوشش اسپری حرارتی اصولا دارای محدودیت نیست و فقط دما باید طوری باشد که کاربر امکان کارکردن داشته باشد. اصولا قبل از اسپری حرارتی، زیرلایه پیش گرم می‌شود تا انواع آلودگی‌ها، مانند رطوبت، که بر روی سطح جمع شده‌اند از بین برود [۳].

هزینه : سیستم‌های پوشش‌دهی تا وقتی که بتوانند حفاظت از خوردگی لازم را ایجاد نمایند از نظر اقتصادی به صرفه هستند. ملاحظات اقتصادی و هزینه پوشش باید پس از انتخاب نوع پوشش جهت کار در محیط مورد نظر تحت بررسی قرار بگیرد. برای یک کاربرد خاص ممکن است چند پوشش انتخاب گردد که در این‌حالت عامل انتخاب نوع پوشش، هزینه ایجاد پوشش خواهد بود. باید توجه کرد که در حالت ایده آل اغلب به جای مقدار هزینه، نسبت هزینه به طول عمر پوشش به عنوان پارامتر اصلی در نظر گرفته می‌شود. ولی در عمل اغلب در نظر گرفتن این پارامتر به صورت کامل غیر قابل اجرا است. بنابراین اکثر پوشش‌ها بر مبنای هزینه اولیه انتخاب می‌گردند. در این‌حالت با توجه به این که هزینه ایجاد پوشش اسپری حرارتی نسبت به رنگ بیشتر می‌باشد، در اغلب موارد از این پوشش‌ها استفاده نمی‌شود. ولی باید به این نکته توجه کرد که استفاده از پوشش اسپری حرارتی موجب صرفه جویی بسیار زیادی برحسب پارامتر هزینه نسبت به طول عمر می‌گردد و بر طبق این معیار از رنگ به صرفه تر است [۳و۴].

---

3) Field Condition

انتخاب پوشش بر حسب محیط : در فرآیند اسپری حرارتی این امکان وجود دارد که نوع پوشش بر حسب محیط انتخاب گردد و در نتیجه مانند روش کروم سخت فقط یک نوع پوشش وجود ندارد. به عنوان مثال جهت جلوگیری از خوردگی در محیط‌های با شرایط متفاوت می‌توان از آلومینیوم و یا روی استفاده نمود. پوشش آلومینیوم در برابر محلول‌های رقیق اسیدی PH = ۳/۵ و بالاتر مقاومت می‌کند اما ترکیب محلول و چگونگی لایه اکسید ایجاد شده بر روی پوشش عمر آن را تعیین می‌کند. اسیدهای نیتریک، سولفوریک و اسیدهای رقیق بر روی پوشش آلومینیوم عایق بندی شده اثر کمی دارند.

بر خلاف آلومینیوم، پوشش روی در برابر اسیدهای آلی و غیر آلی مقاومت کمی دارد. از پوشش‌های روی در محیط‌هایی با PH بین ۶ تا ۱۲ استفاده می‌شود. در این پوشش نیز مانند آلومینیوم نحوه تشکیل پوشش و مشخصه‌های محیطی طول عمر پوشش را تعیین می‌کند. روی در برابر آب سخت مقاومت بیشتری نسبت به آب نرم دارد. مقاومت روی در دمای بالای ۴۲°C کاهش می‌یابد [۳].

در شرایطی که پوشش علاوه بر مقاومت خوردگی نیاز به مقاومت سایشی نیز داشته‌باشد، می‌توان از پوشش‌های اسپری حرارتی اکسید کروم و یا اکسید آلومینیوم استفاده نمود. این پوشش‌ها سختی زیادی داشته و در برابر اغلب محیط‌های خورنده نیز مقاومت می‌کنند.

نتیجه‌گیری

پوشش اسپری حرارتی روش بسیار مناسبی جهت حفاظت سازه‌های آهنی و فولادی در برابر خوردگی است که گستردگی زیادی نیز دارد و از پوشش‌های با طول عمر بسیار طولانی تا پوشش‌های ارزان که قابل رقابت با رنگ می‌باشد را در بر می‌گیرد. پوشش‌های سنگین روی و آلومینیوم را می‌توان برای شرایط خوردگی شدید استفاده کرد و طول عمری بین ۱۵ تا ۵۰ سال را ایجاد نمود. پوشش‌های نازک اسپری حرارتی به خصوص از جنس روی از نظر هزینه قابل رقابت با سایرروش‌ها مانند رنگ زدن و ورق کاری می‌باشد و اغلب کیفیت بهتری نسبت به این روش‌ها دارد.

مراجع

1- "Welding, Brazing, andSoldering", ASM Handbook vol. 6, 1993.

2- "Corrosion" ASM Handbook vol. 13, 1993

3- AWS TS 85," Thermal Spraying: Practice, Theory, and Application", American Welding Society,1997.

4- HTTP://www.usace.army.mil.

5- HTTP://www.matscieng.sunysb.edu.

6- "THERMAL SPRAYING: NEW CONSTRUCTION AND MAINTENANCE" Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC 20314-1000, EM 1110-2-3401, 1999

7- HTTP://www.corrosion.com.

8- HTTP://www.usace.army.mil.

9- "METALLIZING: HYDRAULIC STRUCTURES", UNIFIED FACILITIES GUIDE SPECIFICATIONS, UFGS-09971A, 2004.

10- "EXTERIOR COATING OF STEEL STRUCTURES", UNIFIED FACILITIES GUIDE SPECIFICATIONS, UFGS-09971, 2001.

شکل ۱: نمودار تخمین طول عمر انواع پوشش [۳].