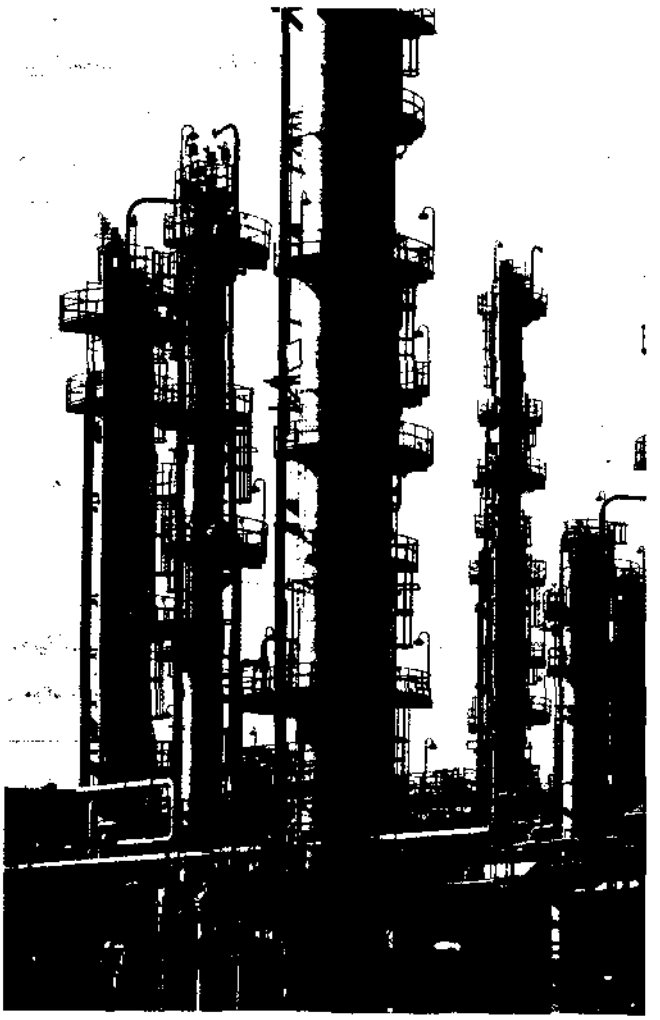
کاربرد پوششهای پلیمری و پلاستیکهای مقاوم در برابر خورندگی در صنایع شیمیایی (قسمت دوم)



«THE USE OF POLYMER LINING AND REINFORCED PLASTICS (FRP) AGAINST CORROSION IN CHEMICAL INDUSTRY.»

تألیف: دکتر ایرج رضائیان

واژه‌های کلیدی:

چسبندگی پوششهای پلیمری، آماده سازی سطحی، انرژی آزاد سطحی، پوششهای ورقه‌ای، تاول زدگی پوشش، بازسازی و ترمیم پوششهای پلیمری

چکیده

هدف از کاربرد پوششهای پلیمری ایجاد یک لایهٔ مقاوم در برابر خورندگی و چسبنده با ضخامت یکنواخت بر روی سطح مورد نظر است. در این مقاله پارامترهای مؤثر برچسبندگی پوششهای پلیمری بر روی سطح فولاد، فرایندهای مهم پوشش دهی، چگونگی تخریب، کنترل کیفیت، بازسازی و ترمیم این پوششها بررسی خواهد شد.

Key Words:

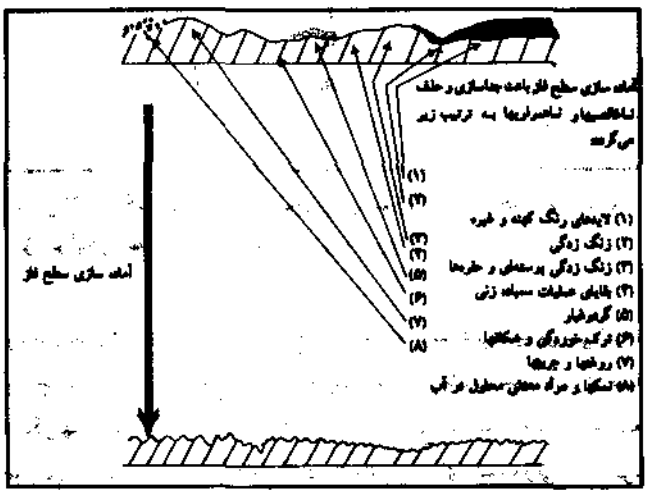
Polymer lining adhesion, Surface preparation, Surface free energy, Sheet lining, Lining blistering, Polymer lining repair

چسبندگی پوششهای پلیمری به فلزات [1]

مهمترین مسئله در کاربرد پوششهای پلیمری، چسبندگی آنها به فلز تحت پوشش است. شرط اصلی چسبندگی خوب یک لایه پوششی این است که عملیّات آماده سازی سطح فلز به خوبی انجام گیرد و موادزائد و مزاحم کاملاً زدوده شوند. شرط دوم، ایجاد پیوندهای قوی بین مولکولهای مادهٔ پوششی و مولکولهای سطح فلز است. در بررسی مسائل مربوط به چسبندگی پوششهای پلیمری به فلزات باید موارد زیر را در نظر داشت:

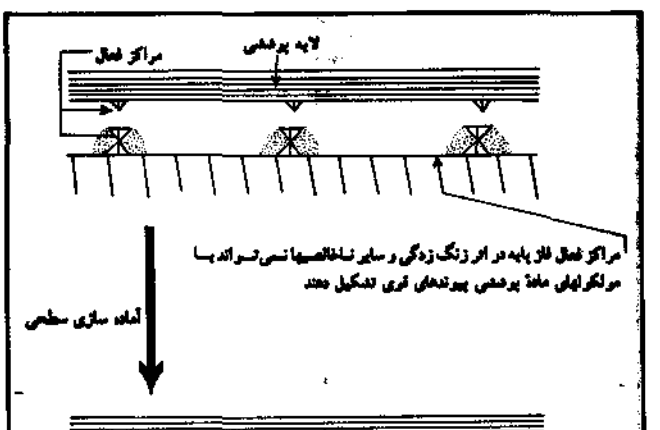
هدف از آماده سازی سطح فلز برای پوشش دادن

ــ اطمینان از یکنواختی و همگنی سطح فلز مطابق شکل (۱)



شکل (۱) آماده سازی سطحی که باید پوشش داده شود

ــ به وجود آوردن مراکز فعال بر روی سطح فلز برای ایجاد ارتباط با مولکولهای مادهٔ پوششی از طریق ایجاد پیوندهای شیمیایی یا نیروهای جاذبه شیمی ــ فیزیکی (پیوندهای هیدروژنی و نیروهای

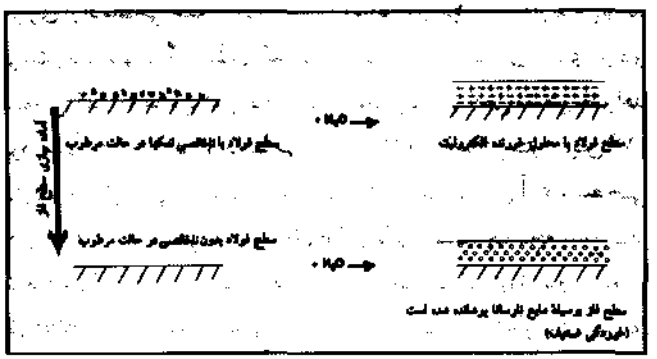


جداسازی قسمتهای زنگ زدهٔ سطح فلز باعث ایجاد پیوند بین مراکز فعال سطح فلز و مولکولهای مادهٔ پوششی می‌گردد

شکل (۲) جداسازی مواد و اجزای ناخواسته از سطحی که باید پوشش داده شود

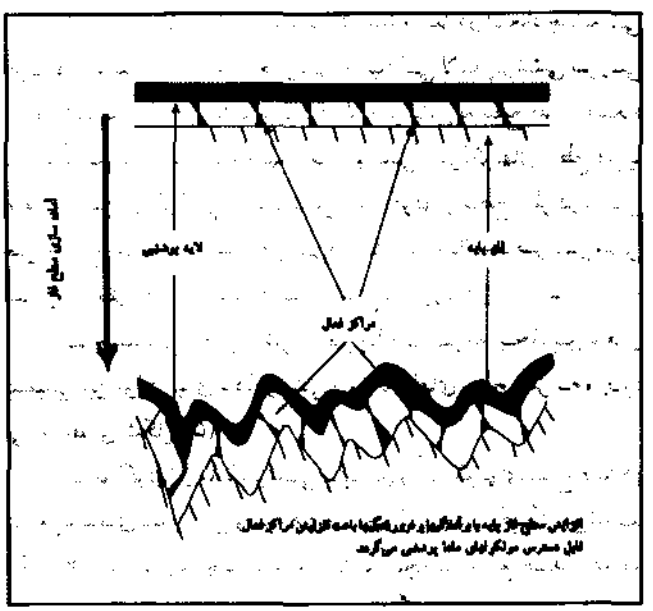
واندروالس). با انجام عملیات آماده سازی سطح فلز مطمئن خواهیم شد که ناخالصی‌های مزاحم مانند چربیها، روغنها، زنگ زدگی، سایر موادآلی و معدنی زدوده شده‌اند شکل (۲).

ــ با آماده سازی سطح فلز و در نتیجه چسبندگی خوب لایه پوششی مطمئن خواهیم شد که پوشش سطح فلز تحت‌تأثیر موادآلی محلول در آب قرار نمی‌گیرند و سایر مواد معدنی نیز به زیر لایه پوششی نفوذ نمی‌کنند شکل (۳).



شکل (۳) تأثیر آماده‌سازی سطحی که باید پوشش داده شود برروی مواد محلول درآب که باید جدا شوند

ــ با آماده سازی سطح فلز از چسبندگی لایه پوششی مطمئن خواهیم شد، زیرا بدین ترتیب احتمال ارتباط مراکز فعال سطح فلز با مولکولهای مادهٔ پوششی افزایش خواهد یافت. چسبندگی لایه پوششی با افزایش سطح قابل دسترس برای مولکولهای مادهٔ پوششی مطابق شکل (۴) افزایش می‌یابد. روشهای عملی برای این منظور، ایجاد ناهمواری سطحی مکانیکی یا شیمیایی است (سمباده زدن، دمیدن هوا و اثر حلالهای شیمیایی).



شکل (۴) تأثیر آماده سازی سطحی بر روی افزایش چسبندگی پوشش

پوشش دهی سطح فلزات توسط مواد پلیمری

چنانچه گروههای فعال مادهٔ پوشش دهنده به مراکز فعال فلز دسترسی نداشته باشند تمام عملیات آماده سازی سطحی بی‌فایده خواهد بود. فاصله بین مراکز فعال سطحی فلز و گروههای فعال مادهٔ پوششی باید خیلی کم و در مقیاس شعاع اتمی یا مولکولی باشد.

معمولاً انرژی آزاد سطح فلز تمیز شده بالاست، حدود cm/grs ۰/۵۱ (سانتی‌متر / دین ۵۰۰) و به راحتی به وسیله محلول پلیمرها که انرژی آزاد سطحی حدود cm/grs ۰/۰۲ (سانتی‌متر/دین ۲۰) دارند می‌توانند پوشش داده شود. اگر سطحی که باید پوشش داده شود دارای انرژی آزاد و سطحی کمتر از مادهٔ پوشش دهنده باشد عمل پوشش دهی مشکل خواهد بود. مثلاً تفلون انرژی آزاد سطحی cm/grs ۰/۰۱۷ (سانتی‌متر / دین ۱۷) دارد و پوشش دهی آن توسط یک مادهٔ پوششی با انرژی آزاد و سطحی cm/grs ۰/۰۲۶ (سانتی‌متر/دین ۲۵) امکان پذیر نیست. چنانچه سطح فلز ناخالصیهایی مانند روغنها و چربیها داشته باشد که انرژی آزاد و سطحی کم cm/grs ۰/۰۲ (حدود سانتی‌متر / دین ۲۰) و تمایل شدیدی برای پراکنده شدن روی سطح فلز دارند انرژی آزاد آن کاهش می‌یابد و در نتیجه عملیات پوشش دهی سطح فلز مشکل می‌شود.

به طور خلاصه یک مادهٔ پوشش پلیمری با سطح انرژی آزاد حدود cm/grs ۰/۰۳ (سانتی‌متر / دین ۳۰) به راحتی می‌تواند یک سطح تمیز فلزی با انرژی آزاد سطحی cm/grs ۰/۴ (سانتی‌متر / دین ۴۰۰) را بپوشاند اما همین مادهٔ پوششی نمی‌تواند سطح فلز آغشته به مواد روغنی و چربی با سطح انرژی کاهش یافته به حدود cm/grs ۰/۰۲ (سانتی‌متر / دین ۲۰) را بپوشاند.

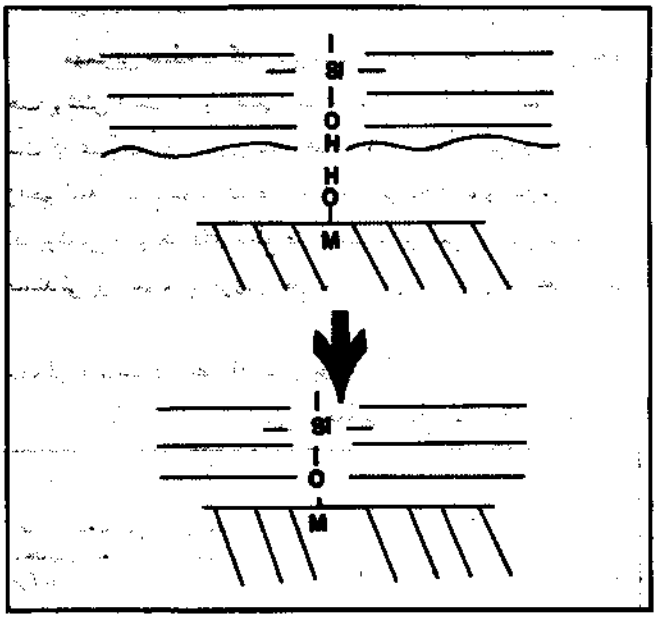
خصوصیات چسبندگی پوششهای پلیمری به فلزات

تا اینجا بحث دربارهٔ آماده سازی سطح فلز در ایجاد چسبندگی خوب لایه پوششی بود اکنون چگونگی چسبندگی لایه پوششی بررسی خواهد شد. پیش از این علت چسبندگی لایه پوششی به سطح فلز را ایجاد پیوندهای شیمیایی بین مولکولهای مادهٔ پوششی و مولکولهای سطح فلز یا به هم پیوستن مولکولهای مادهٔ پوششی و مولکولهای سطح فلز در داخل خلل و فرج موجود در سطح فلز می‌دانستند. در حال حاضر بر همین اساس دو نظر به زیر پیشنهاد شده است که مورد قبول هستند.

ـ چسبندگی مادهٔ پوششی به فلز پایه در نتیجه ایجاد پیوندهای شیمیایی بین مولکولهای مادهٔ پوششی و مولکولهای سطح فلز به وجود می‌آید مطابق شکل (۵).

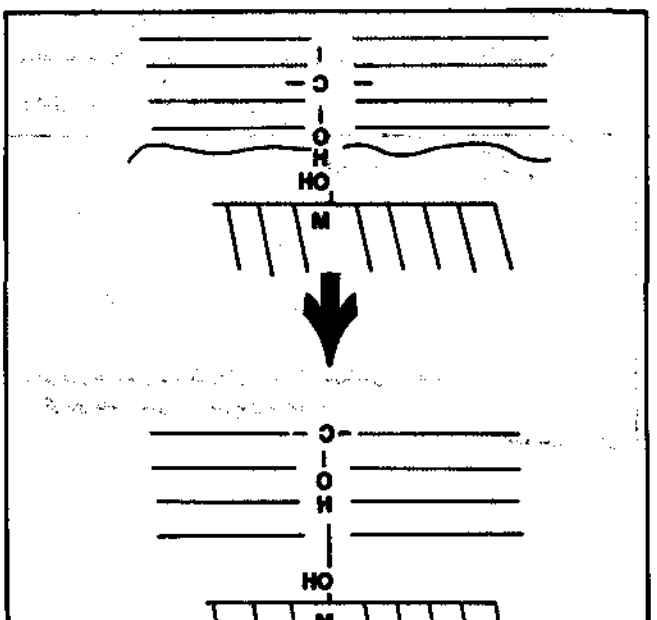
ـ مولکولهای مادهٔ پوششی پلیمری و مولکولهای سطح فلز در نتیجه پیوندهای هیدروژنی و نیروهای واندروالس جذب یکدیگر می‌شوند شکل (۶). این نیروی جاذبه مشابه است با آنچه که مانع جدا شدن دو صفحه شیشه‌ای که در فشار اتمسفر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند می‌شود.

همانطور که انتظار می‌رود پیوندهای شیمیایی بین مولکولهای مادهٔ



شکل (۵) تشکیل پیوندهای شیمیایی بین مولکولهای مادهٔ پوششی و مولکولهای سطحی که باید پوشش داده شود

پوشش پلیمری و مولکولهای سطح فلز باعث چسبندگی بیشتر می‌شود. این چسبندگی ممکن است در نتیجه ایجاد پیوندهای نسبتاً قوی با مولکولهای پوشش آستری (*primer*) بر روی سطح فلز به وجود آید. به طور کلی چسبندگی پوشش‌هایی که در نتیجه پیوندهای هیدروژنی به وجود می‌آیند مقاومتی کمتر از پیوندهای شیمیایی دارند. مثلاً چسبندگی



شکل (۶) تشکیل اتصالات هیدروژنی بین مولکولهای مادهٔ پوششی و مولکولهای سطحی که باید پوشش داده شود

پوششهای حاصل از رزین اپوکسی به علت پیوندهای شیمیایی بین گروههای قطبی مولکول اپوکسی (یک گروه قطبی OH و دو پیوند اتری) و عامل پخت (*curing agent*) با مولکولهای سطح فلز است. [1]

دلایل عدم چسبندگی پوششهای پلیمری به‌فلزات

علت اصلی عدم چسبندگی پوششهای پلیمری به‌فلزات اختلاف نسبتاً زیاد انبساط حرارتی لایه پوششی و فلز پایه در اثر تغییرات دما و فشارهای ناشی از آن است. مثلاً افزایش دمای حدود $50^{\circ}C$ در طول ۲/۴ متر لایه پوششی پلی وینیلیدین فلورید، *PVDF*، باعث می‌شود که این ماده ۱۳ میلی‌متر بیشتر از فولاد و ۱۰ میلی‌متر بیشتر از پلی‌استر تقویت شده با الیاف، *FRP*، انبساط حرارتی داشته باشد. بنابراین در اثر پوشش فلز یا *FRP* با *PVDF* پیوندهای حاصل تحت تنش زیادی قرار خواهند گرفت. این تنشها تحت‌تأثیر دو پارامتر عمده یعنی ضخامت و مدول کشسانی مادهٔ پوششی خواهد بود. هرچه ضخامت پوشش و مدول کشسانی بیشتر باشد تنشهای ناشی از حرارت بیشتر خواهد بود. ممکن است پوششهای با ضخامت کم مناسب‌تر به‌نظر برسند ولی در اکثر موارد حداقل ضخامت مجاز پوشش که بتواند در برابر نفوذ مواد خورنده مقاومت کند موردنیاز خواهد بود.

در سالهای اخیر از پوششهای پلیمری مرکب استفاده شده است. این پوششها شامل یک لایه پوششی نسبتاً ضخیم در تماس مستقیم با محیط خورنده و یک لایه میانی چسبیده به‌فلز است. این لایه میانی مدول کشسانی کم و قابلیت انعطاف بیشتری دارد و می‌تواند تنش‌های حرارتی را تحمل کند. بعضی از این پوششهای پلیمری مرکب عبارت‌اند از:

ـ پوششهای مرکب حاصل از یک لایه لاستیک سخت در تماس مستقیم با محیط خورنده و یک لایه لاستیک نرم چسبیده به‌سطح فلز در جلوگیری از شکنندگی لاستیک سخت در برابر ترک‌خوردگی ضمن تغییرات دما بسیار مؤثر بوده‌اند.

ـ پوشش مرکب *PVC* سخت متصل به‌یک لایه *PVC* نرم که به‌فولاد چسبانده می‌شود مقاومت خوبی در برابر خوردگی می‌دهد. *PVC* نرم به‌صورت خمیری (*plastisol*) به‌اندازه کافی نرم است و قابلیت انعطاف لازم برای مقاومت در برابر تنشهای حرارتی را دارد و در ضمن می‌تواند غیر یکنواختیهای سطوح برجسته را بپوشاند.[3]

ـ ورقه‌های پلی وینیلیدین فلورید (*PVDF*) را که قبلاً به‌یک لایه لاستیک نئوپرن چسبانده شده است با استفاده از چسبهای لاستیکی به‌روش سیمانکاری به‌فولاد می‌چسبانند. صفحات *PVDF* باید جوشکاری شوند تا فواصل بین آنها گرفته شود. گرچه این پوششهای مرکب اخیراً مورد استفاده قرار گرفته‌اند اما امید زیادی به‌مزایا و گسترش کاربرد آنها وجود دارد.

ـ پوششهای *CPVC* و *PVC* را می‌توان مستقیماً به *FRP* چسباند زیرا استیرن موجود در پلی‌استر به‌کار رفته در *FRP* با *PVC* و *CPVC* ترکیب می‌شود و قدرت چسبندگی خیلی خوبی به‌دست می‌آید.

ـ *FRP* را می‌توان مستقیماً به‌فولاد چسباند ولی اغلب از یک پوشش اولیه رزین اپوکسی برای جلوگیری از زنگ‌زدگی فولاد و افزایش چسبندگی *FRP* استفاده می‌شود.

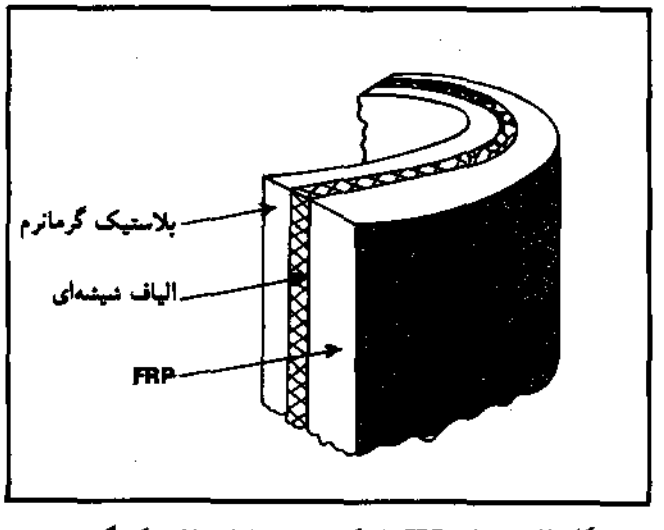
ـ در طول بیست سال گذشته کاربرد صفحات مرکب *FRP* و یک پلاستیک گرمانرم محدودهٔ وسیعی از مقاومت حرارتی و شیمیایی لازم را برای کاربردهای زیادی فراهم کرده است. اغلب استفاده از صفحات مرکب *FRP* و یک پلاستیک گرمانرم معادل یا بهتر از فلزات گرانقیمت شناخته شده است. در طول چند سال گذشته کاربرد صفحات مرکب *FRP* و پلاستیکهای گرمانرم به‌دلایل زیر توسعه نسبتاً آهسته‌ای داشته است.

ـ ناآشنایی مصرف‌کنندگان با این مواد

ـ عدم دسترسی به‌تکنولوژی و روش چسباندن ورقه‌های *FRP* به‌پلاستیکهای گرمانرم.

ـ دسترسی به‌تعداد محدودی از تولیدکننده‌ها که در جوش دادن و چسباندن ورقه‌های پلاستیک گرمانرم به *FRP* تجربه کافی دارند.

صفحات مرکب *FRP* و پلاستیکهای گرمانرم مطابق شکل (۷) اکنون برای کاربردهای زیادی در صنایع شیمیایی استفاده می‌شوند.



شکل (۷) صفحات FRP با یک پوشش داخلی پلاستیک گرمانرم

چگونگی تخریب و از بین رفتن پوششهای پلیمری[8]

پوششهای پلیمری دائمی نیستند و تخریب آنها تحت تأثیر محیط خورنده تابع عوامل متعددی است که مهمترین آنها عبارتند از: خصوصیات و ترکیب مواد تشکیل دهندهٔ پوشش، عدم آماده‌سازی مناسب سطحی که باید پوشش داده شود، روش پوشش‌دهی، پوشش ناقص سطحی، طراحی نامناسب سطحی که باید پوشش داده شود.

به‌طورکلی عملیات بازسازی و ترمیم پوششهای پلیمری باید پس از بررسی خصوصیات محیط خورنده و سایر عوامل مؤثر انجام گیرد و اغلب روش استاندارد و واحدی برای این منظور وجود ندارد، لیکن آنچه

مسلم است بازسازی قسمتهای آسیب‌دیده باید سریع و دقیق انجام گیرد. تجربه نشان داده است که بازسازی قسمتهای آسیب‌دیده پوششهای پلیمری خیلی گرانتر از پوشش‌دهی اولیه تمام می‌شود. بنابراین بهترین روش جلوگیری از تخریب بی‌موقع پوششهای پلیمری، انتخاب مادهٔ پوششی مناسب، دقت در عملیات نصب پوشش، بازرسی دقیق کیفیت پوشش در هنگام نصب و کاربرد آن است.

مکانیسم تخریب پوششهای پلیمری

نفوذ و جذب بخارات و مایعات در پوششهای پلیمری باعث از بین رفتن چسبندگی لایه پوششی و تاول‌زدگی در اثر تجمع مایعات بین لایه پوششی و فلز پایه می‌گردد. تورم لایه پوششی، با ایجاد تنش و از بین رفتن چسبندگی پوشش به‌فلز پایه همراه است. نفوذ مواد خورنده در بعضی از پوششهای پلیمری مانند پوششهای تفلون *(PTFE)* به‌آسانی انجام می‌گیرد ولی میزان جذب خیلی کم است. به‌طورکلی میزان نفوذ و جذب مواد خورنده را می‌توان با محاسبه پارامترهای انحلال‌پذیری و پراکندگی به‌دست آورد.

مواد شیمیایی و اکسیژن پس از نفوذ در لایه‌های پوششی می‌توانند به‌فلز پایه حمله کنند و این پدیده در دماهای بالا شدت می‌یابد. نفوذ گازها و بخارات از طریق سوراخهای ریز، خلل و فرج لایه پوششی، حرکت مولکولهای گازی نفوذکننده در لایه پوششی در اثر فشار اُسمزی *[2]* و سرانجام جدا شدن پوششهای محافظ فلزات به‌صورت مرحله‌ای به‌ترتیب زیر انجام می‌گیرد.

تاول‌زدگی

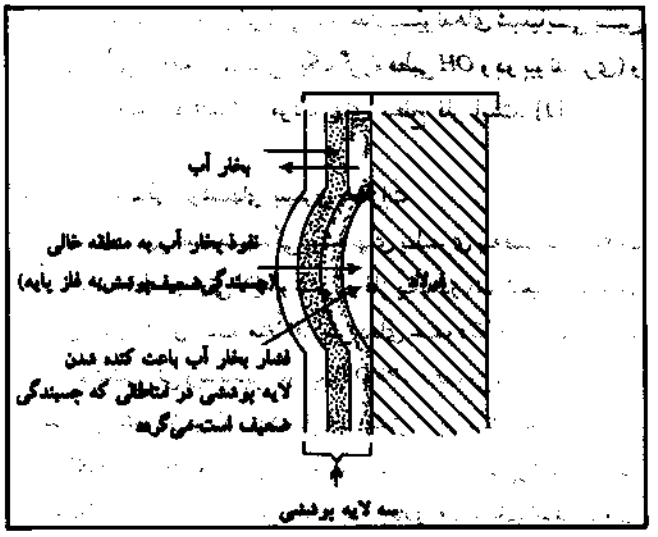
بخارآب و گازهای شیمیایی پس از نفوذ و عبور از لایه پوششی، مواد یونی مادهٔ پوشش دهنده و فلز پایه را در خود حل می‌کنند و یک فشار اُسمزی را به‌وجود می‌آورند. در اثر غلظت متغیر مواد حل شده در گازها و تجمع ذرات آب بین لایه پوششی و فلز پایه، حالت تاول‌زدگی پیش می‌آید. استانداردمربوط بمشاهدات بصری تاول‌زدگی پوششها *ASTMD714-56[3]* است. بنابراین مراحل اولیه خورندگی پوششهای پلیمری به‌صورت تاول‌زدگی لایه پوششی، در اثر نفوذ گازها و بخارات، شروع می‌شود و سپس خورندگی فلز پایه شدت می‌یابد شکل (۸) و شکل (۹).

زنگ‌زدگی

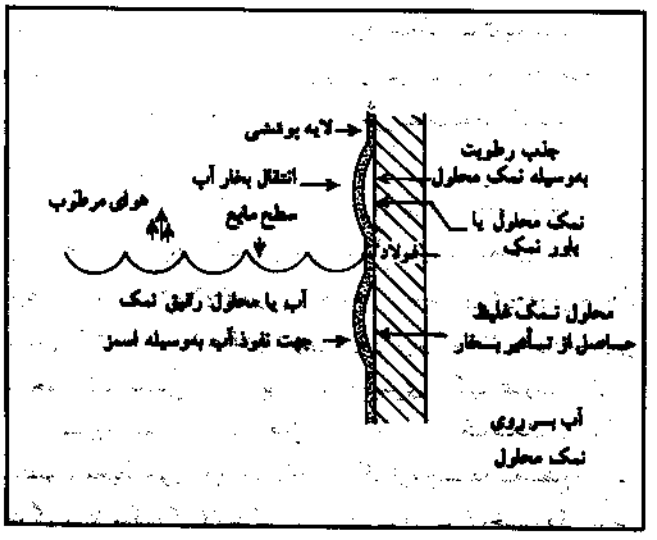
بعد از مشاهدات اولیه تاول‌زدگی لایه پوششی و زنگ‌زدگی فلز پایه، مراحل پیشرفت مناطق زنگ‌زده شروع می‌شود و خورندگی فلز پایه ادامه پیدا می‌کند.

جدا شدن لایه پوششی

مرحله بعدی خورندگی شامل جدا شدن لایه پوششی و در معرض



شکل (۸) نفوذ بخار آب در ناحیهٔ زیر پوشش با چسبندگی ضعیف به فلز پایه



شکل (۹) نفوذ آب براساس پدیدهٔ اُسمزی و اثر آن بر روی لایه پوششی

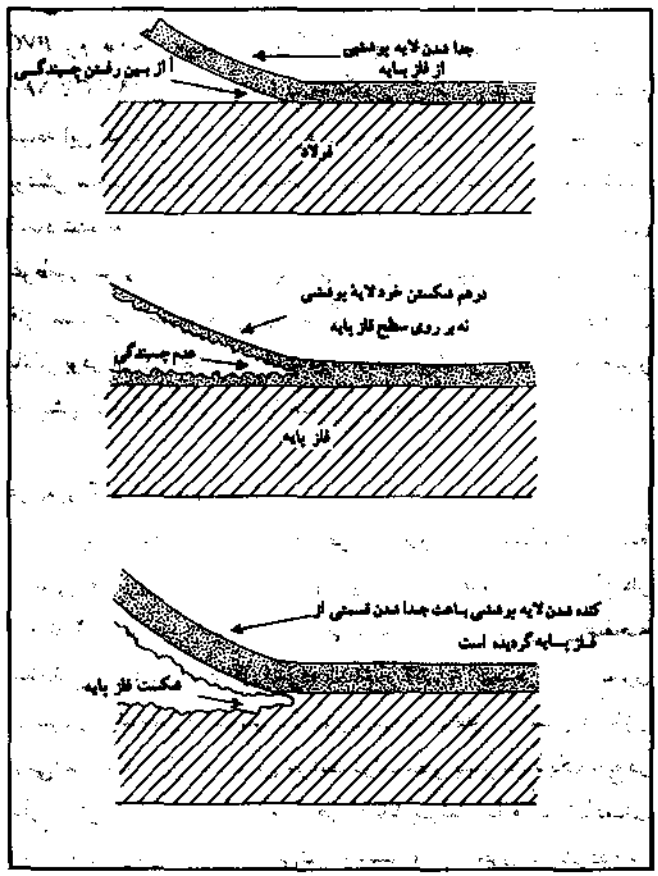
محیط خورنده قرار گرفتن فلز پایه است شکل (۱۰). بمحض جدا شدن لایه پوششی، خورندگی فلز پایه به‌طور غیریکنواخت و مستمر ادامه پیدا می‌کند.

سوراخ و پوسته پوسته شدن فلز پایه

در اثر خورندگی فلز پایه بروش الکتروشیمیایی، زنگ‌زدگی و ایجاد حفره‌ها در سطح فلز پایه بسرعت پیشرفت می‌کند.

از بین رفتن سازه‌های فلزی

نفوذ و ترکیب شیمیایی بخارات و گازهای خورنده در سطح فلز پایه بدون پوشش، باعث پیشرفت سریع خورندگی می‌شود. سوراخهای به وجود آمده به تدریج گسترش می‌یابند و از بین رفتن سازه فلزی به طور فاجعه‌آمیزی اتفاق می‌افتد.



شکل (۱۰) از بین رفتن چسبندگی لایه پوششی به فلز پایه

به طور کلی نفوذ مایعات و گازها در پوششهای پلیمری بستگی به سه پارامتر زیر دارد:

الف ــ افزایش دما

ب ــ کاهش نسبی دما

ج ــ ضخامت پوشش

تغییرات دما اثرات قابل توجهی بر سرعت نفوذ گازها و مایعات در پوششهای پلیمری دارد. به هرحال رابطه میزان نفوذ گازها و مایعات با ضخامت پوششهای پلیمری به ترتیب زیر است:

کاهش نفوذ گازها و مایعات در پوششهای پلیمری متناسب است با ضخامت لایهٔ پوششی به توان دو.

معمولاً در کاربرد پوششهای پلیمری این رابطه درنظر گرفته می‌شود لیکن مشکلات ناشی از کاربرد پوششهای ضخیم عبارتند از:

الف ــ پوششهای ضخیم پلیمری تنشهای حرارتی بر روی پیوندهای حاصل از چسبندگی مادهٔ پوششی و فلز پایه را افزایش می‌دهند.

ب ــ شکل‌پذیری پوششهای ضخیم مشکلتر است.

ج ــ جوش‌کاری ورقه‌های فولادی با پوشش ضخیم مشکل است.

د ــ هزینه پوششهای پلیمری بستگی به ضخامت آنها دارد و ممکن است افزایش قیمت برای پوششهای با ضخامت بیشتر از نظر اقتصادی غیرقابل‌قبول باشد. این مسئله در مورد پوششهای تفلون صادق است.

روشهای بازسازی و ترمیم پوششهای پلیمری

معمولاً بازسازی و ترمیم پوششهای پلیمری کار مشکلی است و ارائه یک روش عمومی غیرعملی است. با وجود این موارد زیر خلاصه‌ای از عملیات ترمیم و بازسازی مناطق آسیب‌دیده پوششهای پلیمری است.

ــ قسمت آسیب دیده پوشش باید با روش مناسب تمیز و آماده عملیات پوشش‌دهی مجدد گردد و دقت شود که ضمن این عملیات قسمتهای با پوشش سالم محافظت شود.

ــ سطحی که باید پوشش داده شود باید سخت و محکم باشد، بنابراین مناطق آسیب دیدهٔ فلز پایه را با استفاده از بتون سیمانی یا رزین اپوکسی ترمیم می‌کنند.

ــ پس از آماده‌سازی مناطق آسیب‌دیدهٔ پوشش ابتدا لایهٔ آستری مناسب و سپس لایه‌های ثانوی زده می‌شوند.

ــ عملیات پُخت و تکمیل پوشش در قسمتهای آسیب‌دیده باید به طور کامل انجام گیرد و در صورت نیاز از حرارت دادن یا عبور هوای گرم فشرده استفاده شود به‌طوری‌که تاحدامکان سعی می‌شود مقاومتی برابر پوشش اولیه به دست آید.

ــ پیشنهادات ویژه در مورد بازسازی و ترمیم بعضی از پوششهای پلیمری عبارتند از:

الف ــ معمولاً پوششهای پورتان نیاز به یک لایه آستری اپوکسی جهت چسبندگی مناسب به فلزپایه و پوشش اولیه دارند.

ب ــ برای پوشش نهایی قطران ذغال‌سنگ ــ اپوکسی باید دقت شود که از پوشش آستری پلی‌آمید ــ اپوکسی جهت چسبندگی بیشتر استفاده شود.

ج ــ در مورد مواد پوششی که پُخت آنها نیاز به دماهای نسبتاً بالایی دارد، مانند رزینهای فنولی و اپوکسی ــ فنولی، عملیات پُخت باید مشابه پوشش اولیه انجام گیرد، در غیر این‌صورت عملیات بازسازی موفقیت‌آمیز نخواهد بود.

د ــ در مورد پوششهای ضخیم لاستیکی باید مناطق آسیب‌دیده یا تاول‌زده بریده و برداشته شود و پوشش لاستیکی جدید جایگزین و پُخت شود.

ذ ــ برای بازسازی لایه‌های پوششی ورقه‌ای پلاستیکهای گرما نرم (معمولاً پلی‌وینیلها) مناطق آسیب‌دیده به شکل مربع بریده و برداشته می‌شوند و آن‌گاه یک مربع مشابه از پوشش جدید را پس از آماده‌سازی سطحی با استفاده از چسب مناسب در جای خالی می‌چسبانند. محل اتصال بین پوشش قدیم و جدید را با یک نوار پلاستیک گرما نرم در اثر حرارت جوش می‌دهند.

ر ــ بازسازی پوششهای حاوی الیاف شیشه معمولاً مشکل است و قسمت آسیب دیده به صورت شکافهای مکانیکی مشاهده می‌گردد. در این‌گونه موارد معمولاً جایگزینی الیاف شیشه مشکل است.

ز ــ تعمیر پوششهای رزین‌اپوکسی یا پُلی‌استر تقویت شده با الیاف شیشه

را می‌توان با استفاده از ضخامت الیاف شیشه، الیاف شیشه بافته شده به صورت پارچه و ترکیب رزین و کاتالیزور اولیه انجام داد.

به طور خلاصه توضیحات فوق فقط می‌تواند به عنوان یک راهنما در بازسازی پوششها به کار رود. به هر حال در نگهداری و مراقبت از پوششهای پلیمری رعایت نکات زیر ضروری است.

بررسی و انتخاب مواد پوششی مناسب، بازرسی کیفیت پوشش، مشاهدات و کنترل شرایط محیط، تعیین میزان خرابی پوشش که نیاز به بازسازی دارد.

فرآیندهای پوشش‌دهی فلزات با مواد پلیمری

امروزه از مواد متنوع پلیمری با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوت برای پوشش فلزات استفاده می‌شود. هدف اصلی از پوشش‌دهی فلزات ایجاد یک لایه مقاوم، یکنواخت و چسبنده با ضخامت یکسان بر روی فلز پایه است. معمولاً ضخامت این پوششها ۰/۵ تا ۱۰ میلی‌متر است. انتخاب و کاربرد روش مناسب پوشش‌دهی بستگی به خصوصیات مادهٔ پوششی دارد. جدول (۱) درصد هزینه‌های سه نوع پوشش مختلف را نشان می‌دهد. در هر سه مورد به طور متوسط ۴۲ درصد از کل هزینه‌های پوشش‌دهی مربوط به آماده‌سازی سطحی می‌شود، ۳۶ درصد آن مربوط به هزینه‌های کارگری و ۲۰ درصد باقیمانده هزینه مواد پوششی است. در اکثر موارد سعی می‌شود که مناسبترین مادهٔ پوششی انتخاب شود.

جدول (۱) هزینه‌های آماده‌سازی سطحی، کارگری و مواد پوششی برای سه نوع پوشش مختلف

هزینه‌های پوشش‌دهی فلزات با مواد پلیمری	پوشش اولیه فلز روی و دو پوشش پلیمری	سه لایه پوشش رزین آلکید	سه لایه پوششی مقاوم از مواد آلی	متوسط
هزینه‌های آماده‌سازی سطحی	۴۲/۶٪	۴۰٪	۴۹٪	۴۲٪
هزینه‌های کارگری	۳۲٪	۴۶٪	۳۳٪	۳۶٪
هزینه مواد پوشش پلیمری	۲۵/۴٪	۱۴٪	۱۹٪	۲۰٪

فرآیندهای مهم پوشش دهی با مواد پلیمری عبارت‌اند از:

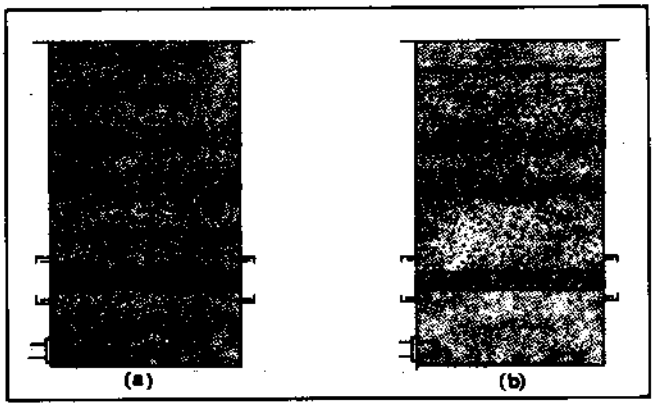
غوطه‌وری

روش نسبتاً ساده‌ای است برای پوشش دهی فلزات و سایر اشیاء. تجهیزات مورد نیاز عبارت‌اند از وسائل تمیز و آماده سازی فلز، کورهٔ مجهز به کنترل دما، مخزن *PVC* نرم (پلاستیسول) که شامل حدود چهل درصد مادهٔ نرم کننده و سایر مواد افزودنی است (پُرکننده، پایدار کننده و مواد رنگی). اندازهٔ ذرات *PVC* حدود ۰/۱ تا ۰/۵ میکرون است. اشیایی را که باید پوشش داده شوند ابتدا آماده و تمیز می‌کنند. سپس پوشش آستری را می‌زنند و پس از گرم کردن آن در کورهٔ ۱۴۰ تا ۱۸۰°C در داخل مخزن *PVC* نرم غوطه‌ور می‌سازند. آن گاه آنها را به آرامی بیرون آورده و در ۱۸۰ تا ۱۹۰°C برای ۱۰ تا ۲۵ دقیقه نگاه می‌دارند تا پوشش ذوب شود. در نتیجه این عملیات *PVC* در مادهٔ نرم کننده حل می‌شود و پس از سردشدن، پوشش سخت با خاصیت لاستیکی به وجود می‌آید. ضخامت لایه پوششی ایجاد شده به این ترتیب حدود ۰/۱ تا ۳ میلی‌متر خواهد بود. در فرایندهای غوطه‌ور سازی ضخامت مادهٔ پوششی تابع شرایط پیش گرم کردن سطح فلز است. ضخامت لایه پوششی بستگی به مقدار گرمای سطح فلز و میزان بالاتر بودن آن از نقطه ذوب یا ژله‌ای شدن ماده پوششی دارد. عوامل مؤثر در پیش گرم کردن فلز پایه با مسائل طراحی آن ارتباط مستقیم دارد.

غوطه‌ور کردن در بستر سیال

این فرایند یک روش مخصوص غوطه‌ور کردن است که در آن مادهٔ پوششی به صورت پودر به کار می‌رود. پودر پلیمر به صورت ذرّات با قطر ۰/۲ تا ۰/۳ میلی‌متر وارد یک مخزن می‌شود که در قسمت پائین آن صفحه متخلخلی وجود دارد و هوای فشرده با فشار ۲ تا ۸ اتمسفر وارد مخزن می‌شود و درنتیجه پودر پلیمر به صورت ذرات معلّق در فضای مخزن درمی‌آید (شکل ۱۱). تحت این شرایط ذرات معلق پلیمر مانند یک مایع در حال جوش خواهد بود. جسم مورد نظر که باید پوشش داده شود تا دمای بالاتر از دمای ذوب پلیمر گرم می‌شود و سپس وارد مخزن می‌گردد و در نتیجه سطح آن به طور کامل پوشش پیدا می‌کند.

ضخامت پوشش حاصل بستگی به ظرفیت حرارتی جسم و مدت غوطه‌ور شدن دارد که معمولاً ۳ تا ۲۰ ثانیه است. ضخامت پوشش به دست آمده با این روش حدود ۰/۲۵ تا یک میلی‌متر است.



شکل (۱۱) مخزن بستر سیال. ارتفاع پودر پلیمری قبل (a) و بعد (b) از سیال شدن.

افشاندن

کاربرد عمدهٔ روش افشاندن برای رنگهاست ولی گاهی برای ایجاد لایه‌های پوششی نیز از این روش استفاده می‌شود.

جدول (۲) اطلاعات مربوط به پوششهای حاصل به روش غوطه‌ور کردن در بستر سیال را ارائه می‌دهد. کاربردهای عمدهٔ این روش پوشش دهی برای قطعات پمپها، همزنها و شیرآلات است.[5]

جدول (۲)

دمای پیش گرم (°C)	۲۱۵-۱۸۵	۲۱۵-۱۸۵	۲۰۰	۲۰۰	۱۸۰	۱۸۰
ضخامت پوشش (میلی‌متر)	۰/۴ تا ۰/۸	۰/۴ تا ۰/۸	۰/۴ تا ۰/۸	۰/۴ تا ۰/۸	۰/۴ تا ۰/۸	۰/۴ تا ۰/۸
ماکسیمم دمای کاربرد (°C)	۶۰	۶۰	۹۵	۹۲۰	۹۲۰	۹۲۰
سختی (Shore)	۹۲ تا ۹۳	۹۵ تا ۹۵	۸۵	۹۰	۹۵	۹۵
رنگ	تمام رنگها	تمام رنگها	تمام رنگها	رنگهای محدود	رنگهای محدود	شفاف یا سیر
اتصال پاشدی	خوب، خوبی می‌پذیرد	خوب، خوبی می‌پذیرد				
مقاومت شیمیایی: آبها بازها روغنها حلالها	خوب خوب خوب محدود	خوب خوب محدود محدود	خوب خوب محدود محدود	خوب خوب محدود محدود	خوب ضعیف خوب محدود	خوب خوب خوب خوب

۱ ــ *PVC* نرم، لایه پوشش اولیه حاصل به روش افشاندن به ضخامت ۰/۱۵ میلی‌متر می‌تواند در دمای ۲۵ تا ۳۰°C بعد از دوساعت خشک شود. پوششهای به ضخامت یک میلی‌متر و بیشتر را می‌توان در نتیجه ایجاد لایه‌های پوششی متوالی و رعایت زمان لازم برای خشک شدن هر لایه بدست آورد. در این روش احتیاجی به گرم کردن شیء برای پوشش دهی نیست، بنابراین می‌توان برای پوشش دهی بتون و فلزات از آن استفاده کرد.

۲ ــ پنتون (پلی اتر کلردار) پراکنده شده در آب یا حلال آلی را می‌توان با روش افشاندن برروی فلزات نشاند. پوششهایی با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و بیشتر را می‌توان در دمای ۲۲۰ تا ۲۶۰°C با این روش به دست آورد.

این پوششها برای قسمتهای مختلف سانتریفوژ، شیرآلات، صفحات صافی و غیره به کار میروند.

۳ ــ روش افشاندن شعله‌ای، در روش افشاندن شعله‌ای معمولاً خطر اکسایش و تخریب مادهٔ پلیمری وجود دارد. این روش اغلب برای پوشش دهی اشیاء نسبتاً بزرگ به کار می‌رود. در این روش ابتدا اشیایی که باید پوشش داده شوند به وسیله شعله اکسیژن ــ استیلن حرارت می‌بینند. سپس افشاندن شعله‌ای پلاستیک گرما نرم و سرانجام حرارت دادن به وسیله شعله برای ذوب پلاستیک گرمانرم منجر به تشکیل یک پوشش یکنواخت می‌گردد.

۴ ــ عملیات پوشش دهی با استفاده از برس و غلطک *(coating by brush and roller)*، این روش معمولاً برای لاستیک سنتزی نئوپرن در یک حلال آروماتیک (مانند *xylol*) انجام می‌گیرد. با افزایش مواد تسریع کننده و ولکانش عملیات پخت یک تا چند ساعت طول می‌کشد. ضخامت پوششهای حاصل از این روش در هر نوبت ۰/۵ تا ۰/۲۵ میلی‌متر است که می‌توان پس از حدود چهارساعت پوشش دهی بعدی را انجام داد و در نهایت ضخامت ۰/۸ تا ۱/۵ میلی‌متر را به دست آورد. معمولاً برای چسبندگی بهتر از یک لایه پوشش آستری استفاده می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان فولاد، اغلب فلزات غیر فولاد، بتون و حتی چوب خشک را پوشش داد.

۵ ــ پوشش دهی ورقه‌ای، پس از آماده‌سازی سطحی که باید پوشش داده شود، صفحات پلاستیک گرمانرم به ضخامت ۲ تا ۴ میلی‌متر را مطابق شکل موردنظر بریده و سپس به وسیله چسب مناسب به سطح فلز پایه چسبانده می‌شود. اتصالات بین این صفحات به روش جوش‌کاری یا چسباندن انجام می‌گیرد.

برای تشخیص درز و شکافهای احتمالی اتصالات از آزمایشهای الکتریکی در ولتاژهای ۵۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ ولت استفاده می‌شود. در این روش معمولاً از صفحات *PVC* نرم، پلی‌اترهای کلردار، لاستیکهای نئوپرن، بوتیل، پلی ایزوبوتیلن، پلی اتیلن کلروسولفون دارشده (هایپلون) و لاستیک‌های نیتریل برای پوشش فلزات استفاده می‌شود.

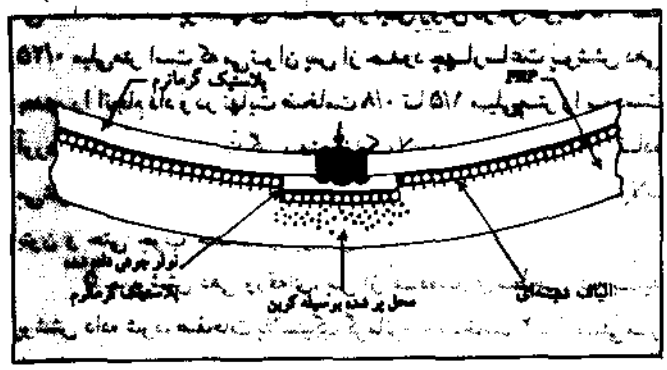
با پیشرفت و تکامل روشهای شکل‌دهی حرارتی، ورق و صفحات پلاستیکهای گرمانرم را می‌توان به صورت اشکال پیچیده و موردنیاز برای پوششهایی با کیفیت یکنواخت تولید کرد. به این ترتیب به طور مؤثر و قابل ملاحظه‌ای از جوش دادن لبه‌ها که مستلزم هزینه زیاد کارگری و ایجاد مراکز احتمالی نشت مایعات است جلوگیری می‌شود. با استفاده از روش شکل‌دهی حرارتی می‌توان درپوش مخازن را که کلوچه مانند و برآمدگی و انحناء دارند به راحتی تولید کرد که در غیراینصورت باید آنها را طی مراحل بُرش، جاگذاری و جوش دادن تهیه نمود. به هرحال در تولید پوششهای پلاستیکی گرمانرم جوش دادن ورقه‌ها اجتناب ناپذیر است و حتی قطعات حاصل از شکل‌دهی حرارتی را برای به هم پیوستن باید جوش داد. برای اطمینان از عملیات جوشکاری افراد جوشکار باتجربه، دستگاههای جوشکاری مناسب، بازرسی دقیق محل‌های جوش داده شده و آزمایشهای لازم برای اطمینان از استحکام و کیفیت جوشکاری ضروری است *[6]*.

جوشکاری پلاستیکهای گرمانرم برای کاربردهای پوششی با استفاده از روشهای زیر انجام می‌گیرد جدول (۳).

(۱) جوشکاری لب به لب ــ در این روش صفحات پلاستیک گرمانرم را که باید جوش داده شوند به شکل مربع بریده و به وسیله یک صفحه داغ فلزی آن را حرارت می‌دهند و سپس به یکدیگر فشرده و جوش می‌دهند.

(۲) جوشکاری به وسیله هوای گرم ــ در این روش حرارت لازم برای جوشکاری از یک دمندهٔ گاز گرم تأمین می‌گردد. یک لوله یا نواری از پلاستیک گرمانرم با فشار وارد قسمت جوشکاری می‌شود و به این

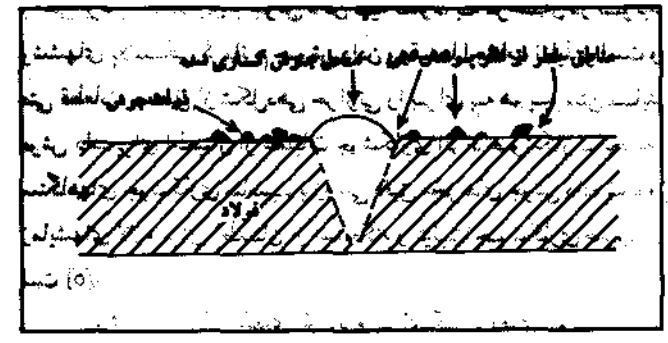
ترتیب یک اتصال دراثر ذوب به وجود می‌آید شکل (۱۲).



شکل (۱۲) جوشکاری به روش گاز گرم برای تولید صفحات الیاف شیشه ــ پلاستیک گرمانرم در تجهیزات حاصل از FRP

(۳) جوشکاری به روش اکستروژن ــ در این روش یک لوله پلاستیک گرمانرم اکسترود شده حرارت داده می‌شود و به محلی که باید دو صفحه پلاستیک گرمانرم به هم متصل شوند وارد گردد.

برای تعیین مقاومت محل جوش داده شده بین صفحات پلاستیک گرمانرم در کاربردهای پوششی از آزمایش استاندارد *ASTMD638* استفاده می‌شود و با مقاومت صفحه مشابهی که جوشکاری نشده مقایسه می‌گردد. این نسبت را ضریب جوشکاری می‌نامند. در بیشتر موارد ضریب جوشکاری پلاستیکهای گرمانرم ۸۰ تا ۱۰۰ درصد است به استثنای *CPVC* که این ضریب ۵۰ تا ۷۰ درصد است. جوشکاری *CPVC* به روش مذاب خیلی مشکل است و این مسئله در انتخاب مادهٔ مناسب برای پوشش دهی و جوشکاری باید درنظر گرفته شود.



شکل (۱۳) نمایش یک محل جوش کاری شده با ذرات پاشیده شده جوش

جوشکاری به روش گاز گرم برای *PVDF* و *FEP* (پلیمر فلوئور اتیلن) مشکلتر از پلاستیکهای گرمانرم با نقطه ذوب نسبتاً پائین مانند *PVC* یا پلی‌پروپیلن است. بهرحال افراد جوشکار آموزش دیده باید دارای مهارت لازم باشند. کیفیت جوشکاری باید با ارزیابی متناوب مشخص شود.

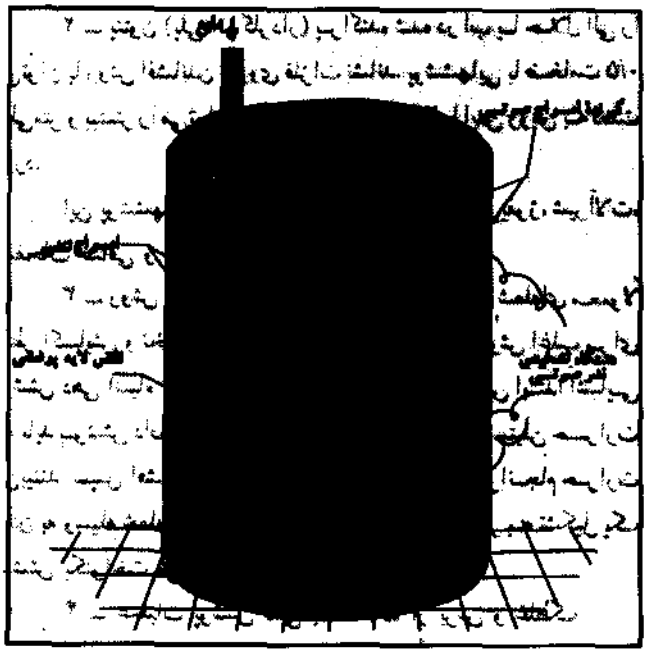
درزها و شکافهای موجود در محلهای جوش داده شده یک دلیل عمومی برای مقاوم نبودن و ضعف پوششهای پلاستیکی گرمانرم است. جوشکاری به روش اکستروژن نسبتاً جدید و امیدوارکننده است. این روش شامل اکسترود کردن طول مشخصی از لولهٔ پلاستیک گرمانرم است که به طرف محلی که باید جوش داده شود هدایت و حرارت داده می‌شود و یک جوش خوب و یکنواخت را به وجود می‌آورد.

آزمایشهای مربوط به تعیین کیفیت پوششهای پلیمری

امروزه از روشهای مختلف برای ارزیابی کیفیت و چسبندگی پوششهای پلیمری بر روی سطوح فلزی استفاده می‌شود. نمونه‌هایی از این آزمایشها عبارتند از:

آزمایش ایجاد جرقه الکتریکی

با استفاده از دستگاههای ایجاد جرقه الکتریکی در ولتاژهای نسبتاً بالا ۱۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ vac می‌توان میزان ترک خوردگی، تخلخل، اتصالات ضعیف محلهای جوش داده شدهٔ پوششهای پلیمری را تشخیص داد شکل (۱۴). استفاده از ولتاژهای بالا در این آزمایشها مستلزم دقت زیادی است چون امکان سوختگی پوشش در ضمن تشخیص نقص وجود دارد. معمولاً در آزمایشهای جرقه الکتریکی به یک رسانای الکتریسیته در قسمت پشت پوشش نیاز داریم. سازه‌های فلزی مراکز رسانش الکتریکی خوبی را برای آزمایش جرقه الکتریکی به وجود می‌آورند. در *FRP* قسمت پشت محلهای جوش داده شده یا قسمتهای دیگری را که مورد آزمایش جرقه الکتریکی قرار می‌گیرند از یک پوشش دودهٔ کربن ــ رزین، نوارهای مسی یا آلومینیومی به عنوان رسانش الکتریسیته استفاده می‌شود.



شکل (۱۴) آزمایش نشر صوتی درمورد یک مخزن *FRP*

جدول (۳) مزایا و معایب روشهای جوشکاری صفحات پلاستیک گرمانرم برای کاربردهای پوششی را نشان می‌دهد.

مزایا	معایب
(۱) جوش کاری به روش لب به لب (Butt welding) جوش قوی و محکم با کیفیت خیلی خوب بدست می‌آید مقاومت جوش ۹۰ درصد به اضافه درصد پارامتر* جوش است.	احتیاج به تنظیم به وسیله دستگاه دارد. فقط برای جوشکاری مستقیم یا دایره‌ای به کار می‌رود. نیاز به دقت در آماده سازی شکل اتصال دارد.
(۲) جوش کاری به روش گاز گرم به صورت گردان و متحرک استفاده می‌شود. شکلهای پیچیده مهندسی را می‌توان جوشکاری کرد.	نیاز به جوشکار ماهر دارد. نقاط جوشکاری خیلی قوی نیستند. مقاومت جوشکاری ۸۵ درصد به اضافه درصد ضریب جوشکاری است.
(۳) جوشکاری به روش اکستروژن عملیات جوشکاری سریع است. حرارت کمی مورد نیاز است. بعد از جوشکاری نیاز به کاهش فشار نیست.	احتیاج به تجهیزات مخصوص جوشکاری دارد. جوشکاری اشکال پیچیده مشکل است.

* پارامتر جوشکاری عبارت است از مقاومت کششی در امتداد محل جوشکاری بخش بر مقاومت کششی صفحه بدون جوش

آزمایش نشر صوتی

آزمایش غیر تخریبی نشر صوتی برای تشخیص ترکهای درحال توسعه در دیوارهٔ تجهیزات به کار می‌رود. در این آزمایش صدای امواج انتشار یافته از ترکها به وسیله تعدادی گیرنده واقع بر روی دیوارهٔ ظرف به دستگاه تشخیص و شناسایی انتقال می‌یابد. با انجام آزمایشهای نشر صوتی می‌توان میزان رشد و توسعه و ورقه ورقه شدن تجهیزات *FRP* را تشخیص داد [4].تعیین نقائص مربوط به چسبندگی لایهٔ پوششی به وسیله آزمایش نشر صوتی جدید است و احتیاج به تحقیقات بیشتر برای تکمیل آزمایش و به دست آوردن نتایج قابل قبول و دقیق دارد.

آزمایش چسبندگی پوششهای پلیمری [2]

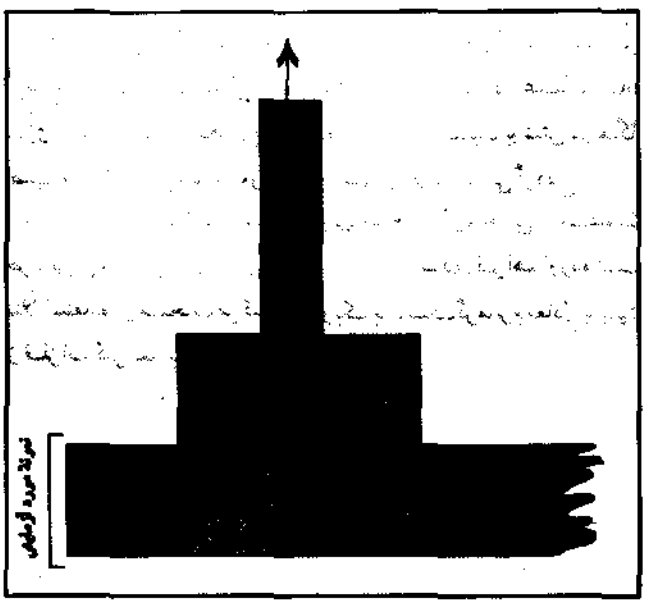
یکی از خصوصیات مهم پوششها چسبندگی آنها به سطح مورد نظر برای طول عمر مفید است. از آزمایشهای کیفی متعددی مانند تعیین مقاومت در برابر خراشیدگی، خمیدگی و غیره برای این منظور استفاده شده است. اطلاعات کمی دربارهٔ کیفیت چسبندگی پوششها را می‌توان با استفاده از روش *ASTMD4541* به دست آورد. در این روش نیروی لازم برای جدا کردن پوشش از سطح فلز به وسیله یک دستگاه سیار مطابق شکل (۱۵) اندازه‌گیری می‌شود. این آزمایش نتایج قابل اطمینان و دقیقی درمورد میزان چسبندگی پوششها می‌دهد. در این آزمایش ارتباط قسمت اعمال نیرو به سطح پوشش به وسیله صفحه چسبنده (چسب اپوکسی) انجام می‌گیرد. با اعمال نیروی کششی و افزایش تدریجی آن سرانجام پوشش از سطح مورد نظر جدا می‌شود. مقاومت چسبندگی پوشش به ترتیب زیر محاسبه می‌گردد.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

مقاومت در برابر جدا کردن پوشش از سطح فلز $\sigma = (kgs.m^{-2})$

ماکسیمم نیروی کششی به کار رفته $F = (kgs)$

سطح مقطعی که نیروی کششی بر آن اعمال شده است $A = (m^2)$



شکل (۱۵) آزمایش اندازه‌گیری چسبندگی پوششهای پلیمری

رعایت موارد زیر در دقت انجام این آزمایش ضروری است:

ـ سطح پوشش قبل از آزمایش باید کاملاً تمیز باشد.

ـ در چگونگی اعمال نیرو باید دقت شود چون در غیر اینصورت رخنه‌هایی در چسب اپوکسی ایجاد می‌گردد و نتایج غیر دقیق به دست می‌آید.

ـ زمان لازم برای آزمایش می‌تواند مطابق دستورالعمل *ASTM* باشد میزان تنش باید کمتر از ۱۰ اتمسفر در ثانیه باشد و ماکسیمم نیرو باید در کمتر از ۱۰۰ ثانیه اعمال شود.

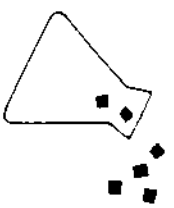
ـ پارامترهای عمده در دقت عمل این آزمایش عبارت‌اند از: انتخاب چسب مناسب، سازگاری چسب با پوشش، درنظر گرفتن زمان لازم برای پُخت و تکمیل چسب، انتخاب دمای آزمایش متناسب با خصوصیات و شرایط پوشش.

نتیجه‌گیری

کاربرد پوششهای پلیمری در صنایع شیمیایی به منظور ایجاد یک لایه یکنواخت، چسبنده و مقاوم در برابر عوامل خورنده گسترش و اهمیت بیشتری پیدا کرده است. امروزه با استفاده از مواد متنوع پلیمری و فرایندهای جدید پوشش دهی امکانات بیشتری برای محافظت فولاد در برابر خورندگی فراهم گردیده. دراین مقاله چگونگی تشکیل پیوندهای مولکولی بین مادهٔ پوششی و سطح فلز، عوامل مؤثر در چسبندگی لایه پوششی بررسی گردیده و علت اصلی عدم چسبندگی پوششهای پلیمری به فلزات اختلاف نسبتاً زیاد انبساط حرارتی لایه پوششی و فلز پایه در نتیجه تغییرات دما می‌باشد.

معمولاً سعی می‌شود مناسب‌ترین مادهٔ پوشش پلیمری برای کاربرد مورد نظر با ضخامت ۰/۵ تا ۱۰ میلی‌متر انتخاب شود. مهمترین عوامل مؤثر در افزایش طول عمر مفید پوششهای پلیمری و جلوگیری از تخریب بی‌موقع آنها شامل چسبندگی مادهٔ پوشش پلیمری، دقت در عملیات آماده سازی سطح فلز، فرایندهای پوشش دهی، بازرسی کیفیت پوشش در هنگام نصب و کاربرد، ترمیم و تعویض پوششهای فرسوده می‌گردد.

کاربرد صفحات مرکب پلیمری محدودهٔ وسیعی از مقاومت حرارتی و شیمیایی لازم را برای کاربردهای زیادی فراهم آورده است. مثلاً استفاده از صفحات مرکب *FRP* و یک پلاستیک گرمانرم معادل یا بهتر از فلزات گرانقیمت شناخته شده است.



REFERENCES

[1] Hare, Clive H. , "Surface Preparation and Adhesion", Protective Coating and Lining Journal, May (1989). .

[2] Soltani E. C., Semirco Corp., "Quantitative Adhesion Testing of Coatings on Pipe Line", Protective Coating and Lining Journal, May (1989)

[3] Kidd, J. A., "The Use of Dual Laminates in the Chemical Industry", In the "Managing Corrosion With Plastics", IV, NACE, Houston (1979)

[4] "Recommended Practice for Acoustic Emission Testing of Fibre Glass Reinforced Resins (FRP), Tanks and Vessels", Soc. of the Plastics Ind., New York (1983)

[5] Verney Evans, Plastics as Corrosion Resistant Materials, Pergamon Press (1966)

[6] Niesse John. E., Innovations in Organic linings, Chem. Eng. Progress Journal, June (1986)

[7] Snogren, Richard C., Hand Book of Surface Preparation, Palmerton Publishing Co., (1974)

[8] Munger, C. G., "Understanding Protective Coating Failures, PartI", Plant Eng., Journal April 15 (1976)

[9] Azimi, A., "Thermoplastic Coating, Iranian Journal of Polymer Sci and Tech. Vol 1, No 1, Nov (1988).