

واژه‌های کلیدی:

خوردگی
خود ترمیم شونده
پوشش‌های پلیمری

پوشش‌های مقاوم در برابر خوردگی بر پایه سامانه‌های خودترمیم شونده

فرهاد عزیزادگان، سید مجتبی میرعابدینی، شهلا پازکی فرد*
تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، گروه رنگ و روکش های سطح

چکیده ...

استفاده از پوشش‌های پلیمری، یکی از روش‌های حفاظت فلزات در برابر خوردگی است. خوردگی در فلزات به عنوان فرایندی مخرب باعث ایجاد خسارات اقتصادی قابل توجهی می‌شود. هزینه سالانه ناشی از پدیده خوردگی در جهان بالغ بر ۳۰۰ میلیارد دلار در سال تخمین زده می‌شود. تنش‌های اعمال شده بر پوشش منجر به بروز ترک‌های (Crack) ریز و درشت در آن می‌شود که موجب نفوذ بیشتر رطوبت و اکسیژن در سطح مشترک (Interface) فلز با پوشش شده، منجر به خوردگی، افت چسبندگی و در نهایت جدا شدن پوشش از سطح فلز می‌شود. معمولاً قطعات آسیب دیده از طریق روش‌های مرسوم مانند جوشکاری (Welding)، چسباندن (Gluing) یا وصله زدن (Patching) ترمیم می‌شوند. این روش‌ها برای ترمیم پوشش‌های سطح، کاربردی نیستند. استفاده از سامانه خودترمیمی، روش جدیدی برای ترمیم ناحیه آسیب دیده در پوشش است. خودترمیمی به معنای توانایی مواد و ترکیبات در ترمیم آسیب دیدگی خود با کمترین مداخله عوامل خارجی است. در این مقاله به معرفی سامانه‌های خودترمیم شونده، نظریه‌های مربوط، نکات کلیدی در انتخاب آن‌ها و آخرین دستاوردها در این زمینه پرداخته می‌شود.

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

s.pazokifard@ippi.ac.ir

۱ مقدمه

خوردگی به عنوان عاملی مخرب، سالانه موجب هزینه‌های بسیار زیادی می‌شود و هزینه‌ای معادل با درصد قابل توجهی از تولید ناخالص کشورها (بالغ بر ۳۰۰ میلیارد دلار) را بر اقتصاد آن‌ها وارد می‌کند [۱]. ضعف در خواص مکانیکی پوشش‌های پلیمری منجر به بروز عیوبی از قبیل آسیب دیدن پوشش در هنگام قرارگیری در معرض تنش‌های مختلف شده، با گذشت زمان در اثر نفوذ رطوبت و اکسیژن، افت چسبندگی پوشش بر سطح فلز و جداشدگی پوشش از سطح فلز را به دنبال خواهد داشت [۲]. استفاده از پلیمرهای خودترمیم شونده، به عنوان نسل جدیدی از ترکیبات هوشمند، یکی از راه‌کارهایی است که برای رفع این مشکل به کار می‌رود. این ترکیبات، توانایی خود ترمیم شونده بدون نیاز به عوامل خارجی را دارند. خودترمیم شونده‌گی مزایایی از قبیل کاهش احتمال تخریب پوشش، افزایش زمان خدمات‌رسانی و کاهش هزینه نگهداری دارد [۲]. اغلب پلیمرهای تولید شده در سال‌های اخیر جزء ترکیبات هوشمند بوده، با هدف کاهش هزینه‌های حفظ و نگهداری و بازسازی، طراحی و ساخته شده‌اند. ویژگی مهم سامانه‌های خودترمیمی، حضور ساختاری پاسخگو به تحریک‌های خارجی با توانایی بازگرداندن خواص اولیه ترکیبات است. پلیمر قادر به شناسایی آسیب بوده، به صورت خودکار ناحیه تخریب شده را ترمیم می‌کند [۳]. از دیدگاه ترمودینامیکی برای این که فرایندی به صورت خودبه خودی انجام بگیرد، انرژی کل فرایند (رابطه ۱)، باید کمتر از صفر باشد [۴].

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S < 0 \quad (1)$$

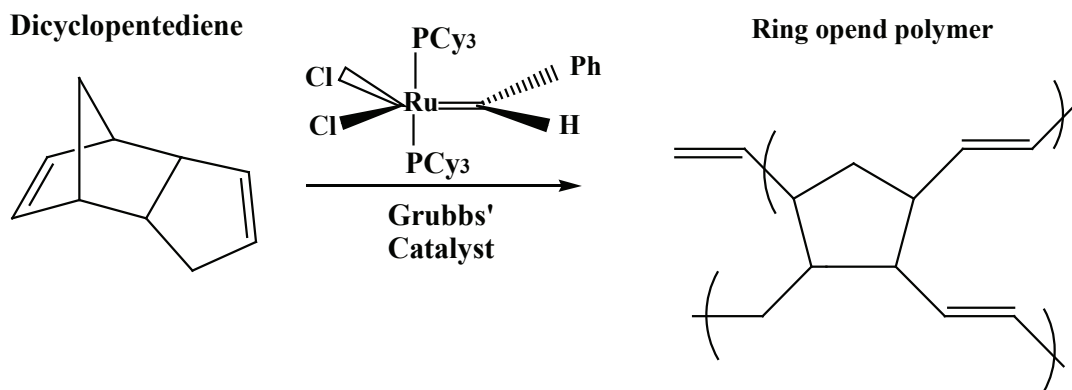
در رابطه ۱، ΔG تغییرات انرژی آزاد گیبس، ΔH تغییرات آنتالپی، T دما و ΔS تغییرات آنتروپی (بی نظمی) است. بدین ترتیب لازمه انجام فرایند خودترمیمی آن است که ΔG چنین سامانه‌ای منفی باشد. تغییرات آنتالپی در طول چرخه ترمیم، ΔG را تحت تأثیر قرار می‌دهد و برای اینکه ترمیم روی بدهد باید $\Delta H < 0$ باشد. تغییرات مثبت در مقدار ΔS عامل مؤثر دیگر در رسیدن به خودترمیمی است، زیرا با افزایش بی‌نظمی، تعداد احتمالات موجود برای بازآرایی زنجیرهای پلیمری افزایش یافته و مقدار $\Delta S > 0$ و در نتیجه تغییرات انرژی گیبس منفی می‌شود و ترمیم روی می‌دهد.

۲ فرایند خودترمیمی

مواد خودترمیم شونده، گروهی از ترکیبات هوشمند هستند که از نظر ساختاری توانایی ترمیم خودبه‌خودی آسیب‌های ایجاد شده در اثر عوامل مختلف را در زمان خدمات‌رسانی دارند [۴]. ترکیبات خودترمیم شونده، می‌توانند با بازگرداندن یکپارچگی ساختاری پس از ایجاد ترک و آسیب در پوشش و یا خوردگی، باعث افزایش طول عمر مفید محصول شوند [۵]. میکروترک در جایی که زنجیرهای پلیمری مجاور یکدیگر صدمه می‌بینند و آسیب ایجاد شده سبب تضعیف تمامی زنجیرهای پلیمری می‌شود، به وجود می‌آید. ترکیبات پلیمری خودترمیم شونده، از فرایندی سه مرحله‌ای پیروی می‌کنند. مرحله اول تحریک سریع در ناحیه آسیب دیده پس از ایجاد صدمه است. مرحله دوم شامل انتقال مواد ترمیم کننده به ناحیه آسیب دیده است که این مرحله نیز سریع انجام می‌گیرد و مرحله سوم که بسته به سازوکار ترمیم متفاوت است، فرایند ترمیم شیمیایی در ناحیه ترک است (به عنوان مثال: پلیمر شدن، گره خوردگی، شبکه‌ای شدن برگشت‌پذیر و ...) [۴].

اولین سامانه ترمیم‌شونده توسط White و همکارانش [۵] در سال ۲۰۰۱ معرفی شد. این سامانه حاوی میکروکپسول‌هایی با هسته دی‌سیکلوپنتادی‌ان (DCPD) به عنوان مایع ترمیم کننده و غشایی از جنس پلی‌اوره-فرمالدهید (PUF)، همراه با ذرات کاتالیزور Grubb's بود که فرایند خودترمیمی طی فرایند پلیمر شدن حلقه‌گشایی دی‌سیکلوپنتادی‌ان انجام می‌شود (شکل ۱). دو سال بعد همین محققان از طریق پلیمر شدن درجا (In Situ Polymerization)، پوشش خودترمیمی حاوی میکروکپسول با هسته DCPD و غشای PUF را سنتز کردند [۶].

روش‌های فعال‌سازی فرایند ترمیم شونده برای ایجاد خاصیت خودترمیمی را می‌توان از جنبه‌های مختلفی طبقه‌بندی و بررسی کرد. یکی از این طبقه‌بندی‌ها براساس ذاتی (Intrinsic) یا غیرذاتی بودن (Extrinsic) فرایند خودترمیم‌شوندگی است [۷ و ۸]. خودترمیمی ذاتی براساس برهمکنش‌های فیزیکی (حرارتی)، شیمیایی (واکنش‌های معکوس و تشکیل مجدد زنجیرها) و سوپرامولکولی صورت می‌گیرد. ترکیبات دارای خاصیت ترمیم‌کنندگی، توانایی انجام فرایند ترمیم به صورت چند مرتبه‌ای را دارند و توانایی آن‌ها در بازگرداندن خواص، ذاتی است. این توانایی به صورت محسوسی به فرایند گره خوردگی (Entanglement)



شکل ۱ پلیمر شدن حلقه گشای DCPD معرفی شده به عنوان اولین سامانه خودترمیمی [۴]

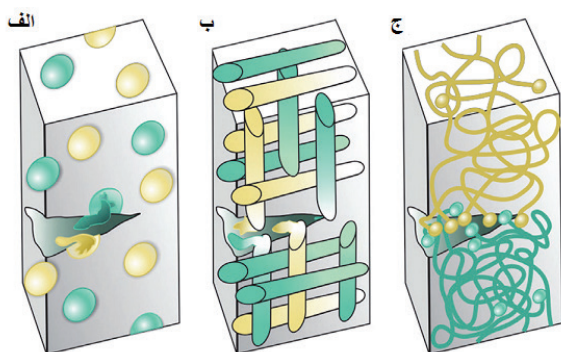
پوشش‌های خودترمیم شونده، معمول‌ترین و مرسوم‌ترین روش است [۹].

۳ میکروکپسوله کردن (Micro-Encapsulation)

میکروکپسوله کردن فرایندی است که در آن ذرات یا قطرات ریز توسط پوشش (Coating)، احاطه شده، کپسول‌های کوچکی را با خواص مفید متعدد فراهم می‌آورد. از این فرایند می‌توان برای محاط کردن جامدات، مایعات یا گازها در درون غشا با ضخامت میکرونی ساخته شده از مواد سخت یا نرم استفاده کرد. در ساده‌ترین شکل، میکروکپسول گره‌ای کوچک با قطر میکرونی و ضخامت پوسته مشخص تعریف می‌شود. مواد داخل میکروکپسول به عنوان هسته یا فاز داخلی شناخته می‌شوند و دیواره‌ی آن، پوشش، محافظ یا پوسته نامیده می‌شود [۱۰]. میکروکپسول‌ها قطری بین چند میکرومتر تا چند میلی‌متر دارند. کاربردهای میکروکپسول‌ها بسیار گسترده است که می‌تواند شامل تهیه کاغذ کپی

زنجیرهای پلیمری در زمینه پلیمری بستگی دارد. اگر ترمیم به صورت خودبه‌خودی و پس از ایجاد خراش در زمینه پلیمری ایجاد نشود از یک تحریک خارجی مانند فشار، نور یا حرارت و ... استفاده می‌شود. پلیمرهای ترمیم کننده ذاتی بر اساس تشکیل شبکه‌ی سوپرامولکولی با پیوند هیدروژنی، یونومرها، برهمکنش‌های $\pi-\pi$ یا واکنش‌های برگشت پذیر حرارتی از نوع پیوند فلزی ایجاد می‌شوند [۳].

سامانه خودترمیمی طبیعی غیرذاتی، آسیب‌های ناشی از شکست یا خستگی را ترمیم می‌کنند. سامانه‌های ترمیمی غیرذاتی که بر اساس سامانه‌های زیستی (Biologic Systems) طرح ریزی شده‌اند، به هیچ عامل تحریک خارجی برای ترمیم نیاز ندارند و ترمیم در آن‌ها به طور کاملاً مستقل صورت می‌گیرد. ترمیم مستقل آسیب‌ها باعث افزایش ایمنی و نیز اطمینان از عملکرد پوشش می‌شود و با افزایش عمرکاری قطعات، هزینه‌های بازرسی و نگهداری به طور محسوسی کاهش می‌یابد. یکی از مؤثرترین روش‌ها برای ترمیم غیرذاتی، ذخیره و پراکندن عامل ترمیم کننده درون زمینه کامپوزیت است، به نحوی که در حضور ترک بتواند وارد عمل شده، عیوب مورد نظر را ترمیم نماید. ذخیره عامل ترمیمی درون الیاف تو خالی، شبکه‌های مویرگی و میکروکپسول‌ها ممکن خواهد بود (شکل ۲) [۸]. علیرغم نوپا بودن ایده پلیمرهای خودترمیم شونده، روش‌های مختلفی برای ایجاد این پلیمرها معرفی شده‌اند. در همه این روش‌ها عوامل ترمیم‌دهنده باید در داخل واسطه ذخیره و در داخل ترکیبات برای ترمیم تعبیه شوند که پس از آسیب سطح، امکان خروج آنها وجود داشته باشد و بتواند در مجاورت کاتالیزور، آسیب وارده را ترمیم کند. روش استفاده از میکروکپسول‌ها به دلیل سهولت تهیه

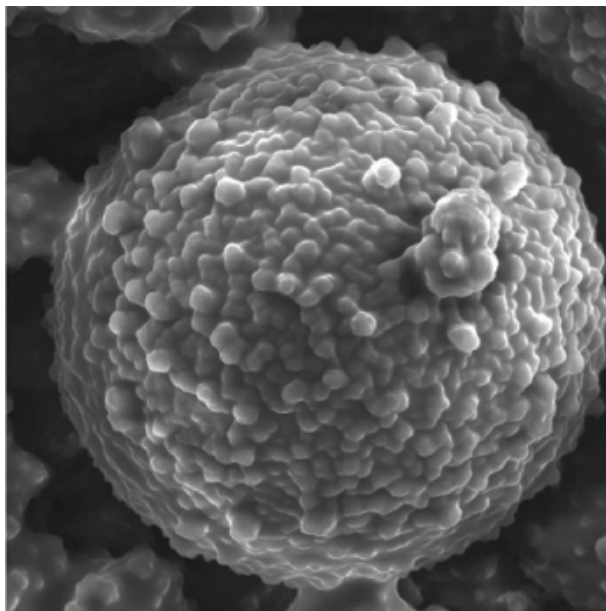


شکل ۲. روش‌های خودترمیمی غیرذاتی با استفاده از: الف) میکروکپسول‌ها (ب) الیاف تو خالی (ج) شبکه‌های مویرگی [۳]

مزایا، معایبی را هم به همراه دارد که در برخی موارد کاربرد آن‌ها را محدود کرده است. وجود میکروکپسول‌ها می‌تواند منجر به افت خواص مکانیکی و کاهش عمر مفید پوشش‌ها شود. یکی دیگر از معایب اینگونه پوشش‌ها عدم وجود اطمینان کافی در استفاده مجدد آن‌ها پس از اولین ترمیم‌دهندگی است [۱۴].

بهبودنسب و همکارانش [۱۵]، میکروکپسول‌هایی حاوی روغن بزرک با پوسته اوره-فرمالدهید را از طریق پلیمره شدن درجا تهیه کردند (شکل ۳)، و به بررسی خواص مکانیکی پوشش اپوکسی حاوی این میکروکپسول‌ها پرداختند. تحقیقات نشان داده است که افزایش هر چه بیشتر میکروکپسول‌ها سبب کاهش خواص کششی پوشش می‌شود به طوری که پوشش حاوی ۳٪ وزنی از میکروکپسول‌های با قطر ۵۳ میکرون باعث کاهش ۸/۶٪ مدول الاستیک پوشش می‌شود.

اسحاقی و همکارانش [۱۶]، در سال ۲۰۱۵ به بررسی خواص خودترمیمی و مکانیکی پوشش آب پایه اکریلیک حاوی میکروکپسول‌هایی از جنس اتیل سلولز با هسته روغن بزرک پرداختند. در این تحقیق نشان داده شده است که اضافه شدن میکروکپسول‌های اصلاح سطح شده با سیلان تأثیر مثبتی بر خواص مکانیکی پوشش دارد. میزان این تأثیر به نوع سیلان و درصد وزنی میکروکپسول‌های استفاده شده در پوشش



شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی میکروکپسول اوره-فرمالدهید حاوی روغن بزرک [۱۵]

بدون کربن، چسب‌ها، وسایل آرایشی، آفت‌کش‌ها و ... باشد. میکروکپسوله کردن در صنایع متفاوتی از قبیل کشاورزی، ریسندگی، کامپوزیت‌ها، داروسازی، صنایع بهداشتی و پوشش‌ها کاربردهای فراوانی دارد [۷]. نظریه تشکیل کپسولی از یک مایع در مایع دیگر اساساً بر مبنای تفاوت انرژی سطحی دو مایع استوار است. به طوری که، ترکیب تشکیل دهنده هسته، انرژی سطحی بیشتری نسبت به ترکیب دیواره دارد. هسته با داشتن انرژی سطحی بیشتر، استحکام داخلی بیشتری دارد که توانایی کپسوله شدن این ترکیب را ایجاد می‌کند.

۴ روش‌های کپسوله کردن

در حالت کلی تهیه میکروکپسول‌ها به دو روش فیزیکی و شیمیایی انجام می‌گیرد. اگر در راکتور مربوط به تولید میکروکپسول، فاز مایع باشد فرایند، شیمیایی و اگر فاز گاز باشد فرایند، فیزیکی یا مکانیکی است. به بیان دیگر فرایندهای شیمیایی شامل روش‌هایی است که مواد واکنشگر به صورت منومر یا پیش‌پلیمر هستند و برای تهیه میکروکره‌ها واکنش‌های شیمیایی انجام می‌گیرد. فرایندهای فیزیکی شامل روش‌هایی است که مواد واکنشگر به صورت پلیمری بوده، بدون دخالت واکنش‌های شیمیایی تشکیل میکروکره‌ها به صورت کاملاً فیزیکی انجام می‌شود [۱۱]. روش‌های مختلفی برای ایجاد قابلیت خودترمیم‌شوندگی با استفاده از میکروکپسول‌ها در توده مواد وجود دارد، اما تمام آن‌ها بر یک اصل مشترک استوار هستند؛ ماده ترمیم‌کننده درون فضایی که اطراف آن را پوسته‌ای از ماده پلیمری فراگرفته، محبوس می‌شود. فرایندهای متعددی مانند پلیمره شدن بین‌سطحی (Interfacial Polymerization)، انباشته شدن (Coacervation)، پلیمره شدن درجا، جدایی فازی (Phase Separation) و ... برای تولید میکروکپسول‌ها استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین سامانه‌های مصرفی برای فرایند توده‌ای پیچیده، سامانه ژلاتین-صمغ است. ژلاتین و صمغ عربی به عنوان ماده غشا یا دیواره استفاده می‌شوند [۱۱]. بار سطحی ژلاتین وابسته به pH است. همین امر باعث می‌شود که فرایند ساخت میکروکپسول‌ها وابسته به pH بوده، به سادگی قابل کنترل باشد [۱۲ و ۱۳]. از بین روش‌های مختلف، پلیمره شدن درجا، آسان‌ترین و بهترین روش برای تهیه میکروکپسول‌ها است، زیرا نیاز به تجهیزات بسیار مدرن و پیشرفته ندارد [۱۴ و ۱۵].

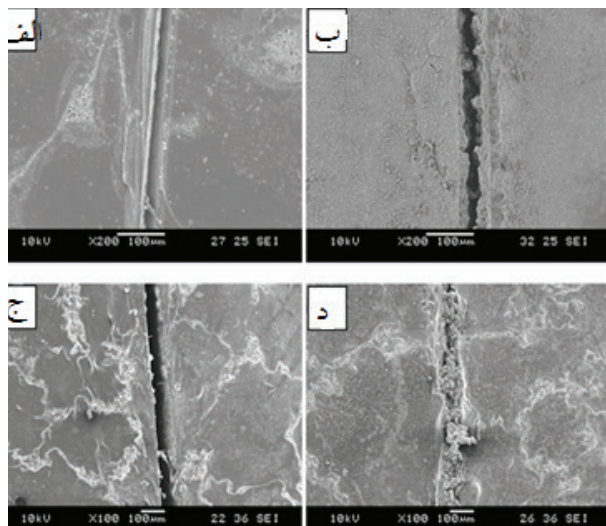
استفاده از میکروکپسول‌ها در پوشش‌های سطح، در کنار

سامانه‌ها، رطوبت موجود در محیط است. به عنوان مثال، در سال ۲۰۰۸ یانگ و همکارانش [۱۸]، توانستند از طریق تهیه پیش‌پلیمر پلی‌یورتانی دارای ترکیبات فعال ایزوسیاناتی، میکروکپسول پلی‌یورتانی با هسته ایزوفورن‌دی ایزوسیانات (IPDI) تهیه کنند. این سامانه عاری از کاتالیزور است و در حضور رطوبت پخت می‌شود. پوسته این میکروکپسول‌ها از طریق تهیه پیش‌پلیمری که از او-۴- بوتان دی‌ال و تولوئن دی ایزوسیانات تهیه شده بود، به دست آمد (شکل ۴) [۱۹].

۵ بررسی خواص خودترمیمی و ضدخوردگی در پوشش‌های حاوی میکروکپسول‌ها

شکل ۵، تصاویر SEM پوشش اپوکسی تازه خراش داده شده فاقد میکروکپسول (الف) و حاوی میکروکپسول‌ها (ب)، بر روی سطح فلز که به مدت ۴۸ ساعت در داخل آب نمک قرار گرفته بود را نشان می‌دهد. تصاویر نشان دهنده این مطلب است که پوشش فاقد ترکیب ترمیم‌دهنده پس از خراش به همان حالت باقی مانده است (ج)، ولی پوشش دارای عامل ترمیم‌دهنده (د) محل خراش را پر کرده و ترمیم یافته است. [۲۰]

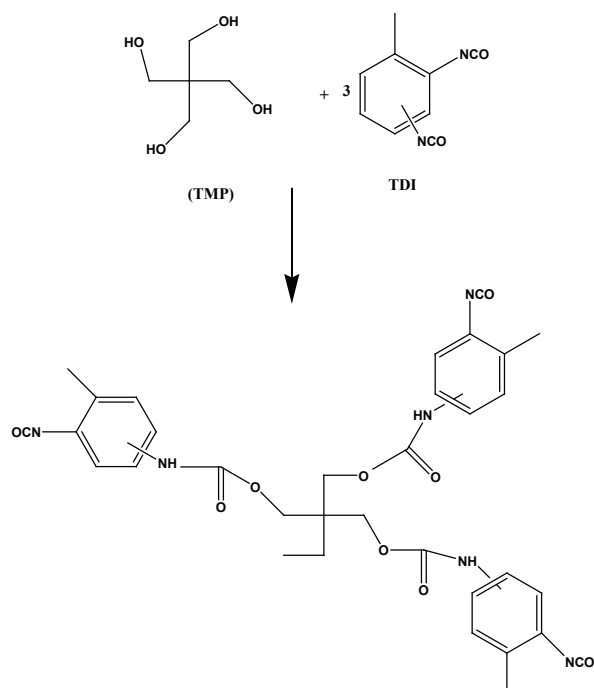
برای بررسی مقاومت در برابر خوردگی پوشش‌های پلیمری به طور معمول از دو آزمون پاشش مه نمک (Salt-Spray) و طیف‌سنجی الکتروشیمیایی امدانس (Electrochemical



شکل ۵ تصاویر SEM سطح پوشش اپوکسی الف) بلافاصله پس از ایجاد خراش در فیلم فاقد میکروکپسول (ب) بلافاصله پس از ایجاد خراش در فیلم حاوی میکروکپسول (ج) خراش داده شده فاقد میکروکپسول پس از ۴۸ ساعت قرارگیری در آب-نمک (د) خراش داده شده حاوی میکروکپسول پس از ۴۸ ساعت قرارگیری در آب-نمک [۲۰]

بستگی دارد. پوشش اپوکسی حاوی میکروکپسول‌های اصلاح شده با سیلان بر پایه آمین خواص مقاومتی بهتری از خود نشان داد که به خاطر برهم‌کنش مناسب بین آمین و زمینه پلیمری است. حقایق و همکارانش [۱۷]، نشان دادند که با افزایش درصد میکروکپسول‌های پلی‌یورتانی از ۱ به ۱۰ درصد وزنی در پوششی از جنس اپوکسی خواص مکانیکی پوشش کاهش می‌یابد که این پدیده می‌تواند به علت تجمع یا توزیع نامناسب میکروکپسول‌ها و نیز حضور هرچه بیشتر حباب‌های هوا در پوشش باشد.

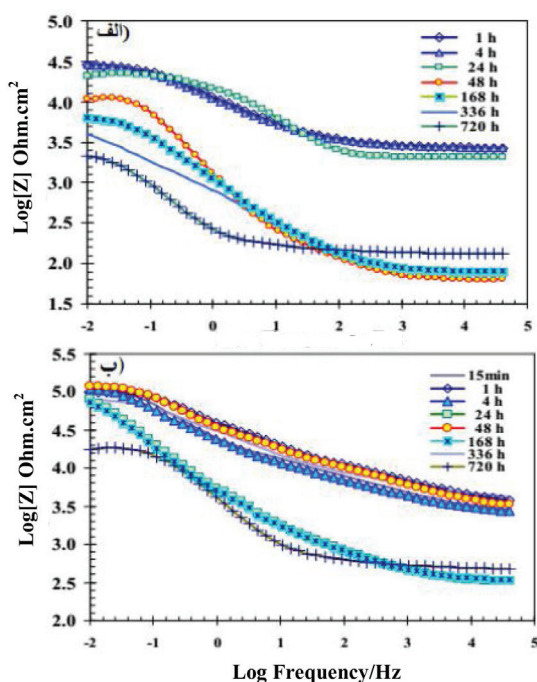
یکی از عواملی که در پوشش‌ها به خصوص در کاربردهای مقاوم در برابر خوردگی همواره مورد توجه بوده است، تأثیر رطوبت بر جدایش فیلم محافظت‌کننده از سطح زیرین و ایجاد خوردگی است. در اغلب پوشش‌هایی که برای کاربرد در محیط‌های مرطوب طراحی می‌شوند، سعی بر این است که زمان عبور رطوبت از فیلم و رسیدن به سطح زیرین تا حد ممکن طولانی شود. برای بهبود کارایی سامانه‌های خودترمیمی از طریق تعبیه میکروکپسول‌ها، تلاش‌ها در راستای تهیه سامانه‌های عاری از کاتالیزور است. یکی از ترکیباتی که تمایل زیادی به واکنش با رطوبت و تشکیل فیلم دارند، ایزوسیانات‌ها هستند. از ترکیبات ایزوسیاناتی به عنوان ترکیب هسته استفاده می‌شود که در حضور رطوبت توانایی پخت دارند. به عبارت ساده‌تر، عامل پخت در این



شکل ۴ پیش‌پلیمر پلی‌یورتانی برپایه تولوئن دی ایزوسیانات [۱۹]

خوردگی از طریق اندازه‌گیری تغییرات امپدانس پوشش صورت می‌گیرد.

حقایق و همکارانش [۱۷]، آزمون EIS را برای پوشش اپوکسی خالص و حاوی ۵٪ حاوای میکروکپسول‌های حاوی IPDI در محلول الکترولیت ۳/۵٪ NaCl انجام دادند. نتایج نشان داد که امپدانس پوشش فاقد میکروکپسول به دلیل عدم وجود لایه محافظتی (مانع تحرک یون‌های انتقال بار)، بیشتر از پوشش حاوی میکروکپسول کاهش یافته است. پوشش دارای میکروکپسول با هسته IPDI کاهش امپدانس کمتری را در طول زمان‌های مختلف در معرض محلول الکترولیت، نشان داد. در شکل ۷، منحنی‌های Bode برای نمونه فاقد و حاوی ۵٪ وزنی میکروکپسول ایزوسیاناتی در زمان‌های مختلف غوطه‌وری در محلول ۳/۵٪ وزنی NaCl نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که حضور میکروکپسول در پوشش خراش‌دار، موجب افزایش امپدانس پوشش در فرکانس‌های پایین در اثر ترمیم محل خراش توسط مواد ایزوسیاناتی شده است.



شکل ۷ منحنی‌های Bode برای نمونه پوشش‌های خراش‌دار در طول ۷۲۰ ساعت غوطه‌وری در محلول الکترولیت ۳/۵٪ NaCl (الف) اپوکسی خالص (ب) اپوکسی حاوی ۵٪ وزنی میکروکپسول‌های حاوی IPDI [۱۷]

(Impedance Spectroscopy)، استفاده می‌شود. در آزمون پاشش مه نمک، نمونه‌های خراش داده شده و بدون خراش در معرض مه نمک قرار داده می‌شوند و در زمان‌های مختلف تغییرات ناشی از بروز خوردگی در زیر لایه از قبیل تاول زدگی، جداشدگی، وجود زنگ و محصولات خوردگی در نمونه مورد آزمون بررسی می‌شود. در شکل ۶، تصاویر نمونه پوشش اپوکسی عاری از میکروکپسول‌های پر شده و حاوی میکروکپسول‌های پر شده از هگزامتیلن دی ایزوسیانات (HDI)، پس از ۴۸ ساعت قرارگیری در معرض آزمون مه نمک (۱۰ درصد NaCl) نشان داده شده است. چنانچه در شکل مشاهده می‌شود، پوشش ترمیم شونده، عاری از زنگ زدگی و خوردگی است، در حالی که نمونه پوشش اپوکسی فاقد میکروکپسول، دچار خوردگی و زنگ زدگی شده است [۲۰].

آزمون دوم برای بررسی خوردگی در فلزات، آزمون طیف‌سنجی الکتروشیمیایی امپدانس (EIS) است. در این روش می‌توان قابلیت حرکت و انتقال یون‌ها از الکترولیت به سطح فلز و تشکیل جریان خوردگی را قبل از اینکه آثار خوردگی در زیر لایه قابل رویت باشد، بطور کمی شناسایی کرد. اساس کار این روش، اعمال جریان متناوب بر سامانه متشکل از الکترولیت، الکتروود مرجع و سطح فلز پوشش‌دار و اندازه‌گیری امپدانس متناوب در محدوده‌ای از فرکانس است [۲۱]. آزمون EIS در بحث خوردگی فلزات، بسیار کاربردی‌تر از آزمون پاشش مه نمک عمل می‌کند، زیرا قبل از پدیدار شدن آثار خوردگی در سطح فلز، EIS می‌تواند فرایند خوردگی را ارزیابی کند. بررسی فرایند



شکل ۶ (الف) صفحه فلزی با پوشش اپوکسی فاقد میکروکپسول و ایجاد محصولات ناشی از خوردگی (ب) صفحه فلزی با پوشش اپوکسی حاوی میکروکپسول بدون زنگ‌زدگی. نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در معرض محلول ۱۰ درصد آب-نمک قرار گرفتند [۲۰]

۶ نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین انواع پوشش‌های هوشمند، پوشش‌های خودترمیم شونده هستند که هم‌زمان یا پس از ایجاد ترک، با آزادسازی محتویات فعال درون کپسول‌ها، باعث ترمیم خودبه‌خودی پوشش می‌شوند. سامانه‌های خودترمیم شونده در دو نوع دوجزئی و تک‌جزئی تهیه می‌شوند. نوع دوجزئی، حاوی هسته و کاتالیزور است و نوع تک‌جزئی شامل میکروکپسول‌های دارای هسته ایزوسیاناتی است که پس از رهاسازی با رطوبت هوا واکنش داده، باعث ترمیم در پوشش می‌شود و همچنین با ممانعت از رسیدن رطوبت به سطح فلز، از ایجاد خوردگی در سطح فلز جلوگیری می‌کند. قطر و غلظت میکروکپسول‌ها نقش مؤثری در میزان

ترمیم‌شوندگی پوشش مورد نظر دارند. هرچه قطر میکروکپسول‌ها بزرگ‌تر باشد و غلظت آن‌ها در پوشش بیشتر باشد، عامل ترمیم‌دهنده بیشتری در پوشش ذخیره شده، ترمیم به صورت مؤثرتری انجام می‌شود، در نتیجه زنگ‌زدگی و خوردگی در سطح فلز کمتر اتفاق می‌افتد. برای بررسی مقاومت در برابر خوردگی پوشش‌های پلیمری به طور معمول از دو آزمون پاشش مه نمک و طیف‌سنجی الکتروشیمیایی امپدانس استفاده می‌شود. آزمون EIS در بحث خوردگی فلزات، بسیار کاربردی‌تر از آزمون پاشش مه نمک عمل می‌کند؛ زیرا قبل از پدیدار شدن آثار خوردگی در سطح فلز، EIS می‌تواند فرایند خوردگی را از طریق اندازه‌گیری تغییرات امپدانس پوشش ارزیابی کند.

مراجع

1. Koh E., Kim N., Polyurethane Microcapsules for Self-Healing Paint Coatings, *RSC Advances.*, 4, 16214-16223, **2014**.
2. White S.R., Braun P., Self-Healing Polymer Coating, *Advanced Materials.*, 21, 645-649, **2009**.
3. Wolfgang H. Binder, Self-Healing Polymers From Principles to Application, WILEY-VCH, Germany, 43-50, **2013**.
4. Yang Y., Urban M.W., Self-Healing Polymeric Materials, *Chemical Society Reviews*, 42, 7446-7467, **2013**.
5. White, Scott R., Geubelle P. H., Brown E. N., Autonomous Healing of Polymer Composites, *Nature*, 409, 794-797, **2001**.
6. Brown E. N., Kessler M. R., Sottos N. R., White S. R., In Situ poly(Urea-Formaldehyde) Microencapsulation of Dicyclopentadiene, *Journal of Microencapsulation*, 20, 719-730, **2003**.
7. Murphy Erin. B., The World of Smart Healable Materials , *Progress in Polymer Science* , 35, 223-251, **2010**.
8. Emami M., Aram E., Mahdavian A., Smart Polymers: III. Self Healing Polymers , *Baspaersh*, 3, 27-38, **2013**.
9. Hassani E., http://www.civilica.com/Paper-process04-process04_177.html, The fourth science and engineering congress of process, **2015**.
10. Umar H., Nigam H., Tamboli, A.M., Microencapsulation: Process, Techniques and Applications, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Sciences.*, 2, 2229-3701, **2011**.
11. Dubey R., Shami T.C., Bhasker Rao K.U., Microencapsulation Technology and Applications, *Defence Science Journal.*, 59, 1, 82-95, **2009**.
12. Lyklema. J., Fundamentals of Interface and Colloid Science: Particulate Colloids, 1st Edition, Academic Press , **2005**.
13. Thimmaa R. T., Tammishetti S., Study of Complex Coacervation of Gelatin with Sodium Carboxymethyl Guar Gum: Microencapsulation of Clove Oil and Sulphamethoxazole, *Journal of Microencapsulation: Micro and Nano Carriers*, 20, 203-210, **2003**.
14. Samadzadeh M., Bouraa S., Peikaria M., Kasirihab S.M., Ashrafc A., A Review on Self-Healing Coatings Based on Micro/nanocapsules, *Progress in Organic Coatings.*, 68, 159-164, **2010**.
15. Behzadnasab M., Esfandeh M., Mirabedini S.M., Zohuriaan-Mehr M.J., Farnood R.R., Preparation and Characterization of Linseed Oil-Filled Urea-Formaldehyde Microcapsules and Their Effect on Mechanical Properties of an Epoxy-Based Coating, *Colloids and Surfaces A, Elsevier*, 457, 16-26, **2014**.
16. Es-haghi H., Mirabedinia S. M., Imani M., Farnood R.R., Mechanical and Self-Healing Properties of a Water-based Acrylic Latex Containing Linseed Oil filled Microcapsules: Effect of Presilanization of Microcapsules' Shell, *Compound Composites Part B, Elsevier*, 85, 305-314, **2016**.
17. M. Haghayegh, S. M. Mirabedini, H. Yeganeh, Preparation of Microcapsules Containing Multi-Functional Reactive Isocyanate-Terminated-Polyurethane-Prepolymer as Healing Agent, Part II: Corrosion Performance and Mechanical Properties of a Self Healing Coating, *RSC Advances*, 6, 50874-50886, **2016**.
18. Yang J., Keller M. W., Moore J. S., White S. R., Sottos N. R., Microencapsulation of Isocyanates for Self-Healing Polymers, *Macromolecules*, 41, 9650-9655, **2008**.
19. Haghayegh M., Mirabedini S. M., Yeganeh H., Microcapsules Containing Multi-Functional Reactive Isocyanate Terminated Polyurethane Prepolymer as a Healing Agent, Part 1: Synthesis and Optimization of Reaction Conditions, *Journal of Materials Science*, 51, 3056-3068, **2016**.
20. Huang M. X., Yang J., Facile Microencapsulation of HDI for Self-Healing Anticorrosion Coatings , *Journal of Materials Chemistry.*, 21, 11123-11130, **2011**.
21. Stanburg E. E., Buchanan R. A., Fundamentals of Electrochemical Corrosion, *Materials Park*, ASM International, 233-268, **2000**.