نانو و صنعت

مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری نانو • گزارش شماره ۲۵۱

صنعت رنگ و رزین

کاربرد فناوری نانو در پوشش‌های عایق صوت و حرارت لوکوموتیو

INDnano.ir

ستاد ویژه توسعه فناوری نانو • www.nano.ir

شناسنامه

ستاد ویژه توسعه فناوری‌نانو

گروه رصد و تولید محتوای بخش ترویج صنعتی

طراحی و اجرا: توسعه فناوری مهرویژن

نظارت: داود قرایلو

تهیه‌کننده: شرکت نوآوران صنعت و نانوفناوری معین

صندوق پستی: ۱۴۵۶۵-۳۴۴

پست الکترونیک: IND@nano.ir

سال انتشار: ۱۴۰۱

تلفن: ۰۲۱-۶۳۱۰۰

نمابر: ۰۲۱-۶۳۱۰۶۳۱۰

پایگاه اینترنتی: www.nano.ir
www.INDnano.ir

اینستاگرام نانو و صنعت: @INDnano.ir

فهرست مطالب

پوشش ۳
عایق‌های صوتی ۳
عایق‌های حرارتی ۴
پوشش‌های عایق صوت و حرارت ۵
رنگ لوکوموتیو ۵
کاربرد فناوری نانو در پوشش‌های عایق صوت و حرارت ۸
تاثیر نانومواد بر خواص حرارتی پوشش‌های پلیمری نانوکامپوزیتی ۸
تأثیر نانومواد بر خواص آکوستیک پوشش‌های پلیمری ۱۱
تولیدکنندگان داخلی ۱۱
بازار جهانی پوشش‌های عایق ۱۲
پی‌نوشت‌ها ۱۴
مراجع ۱۵

پوشش

پوشش، از نقطه‌نظر مهندسی سطح، لایه‌ای از مواد است که بر روی یک بستر قرار می‌گیرد تا خواص سطح برای محافظت در برابر خوردگی و سایش را افزایش دهد. عوامل مؤثر بر انتخاب یک پوشش شامل محیط، طول عمر، سازگاری مواد بستر، شکل و اندازه اجزا و هزینه است. بیشتر پوشش‌های سطحی که در صنعت به کار می‌روند، بر پایه پلیمرهای مصنوعی هستند، موادی که به صورت صنعتی تولید می‌شوند و از مولکول‌های بسیار بزرگ و اغلب به هم پیوسته تشکیل شده‌اند که هنگام اعمال بر روی سطوح، لایه‌های چسبنده، انعطاف‌پذیر و سخت را تشکیل می‌دهند. پوشش‌های سطحی مبتنی بر پلیمر را می‌توان به عنوان مواد کامپوزیتی دو فازی متشکل از رنگدانه و سایر مواد افزودنی پراکنده در یک زمینه پیوسته از پلیمر در نظر گرفت که رنگدانه سبب ایجاد رنگ و خواص دکوراتیو پوشش است و مواد افزودنی می‌توانند بسته به نیاز سبب ایجاد یا بهبود برخی خواص فیزیکی، شیمیایی یا مکانیکی در پوشش ایجاد شده شوند[۱].

عایق‌های صوتی

صدا از ارتعاش ماده ایجاد می‌شود و توسط موج صوتی تولید شده از طریق ارتعاش سمپاتیک محیط پخش می‌شود. زمانی که امواج صوتی ایجاد می‌شوند، بخشی از آن به تدریج پخش می‌شود و بخشی از آن به دلیل جذب توسط مولکول‌های هوا تضعیف می‌شود.

هنگامی که موج صوتی با سطح یک ماده برخورد می‌کند، بخشی از آن منعکس می‌شود، بخشی از آن از ماده عبور می‌کند و بقیه آن به ماده منتقل می‌شود. قسمتی از موج صوتی که به مواد منتقل می‌شود وارد منافذ مواد می‌شود و باعث ایجاد اصطکاک و مقاومت ویسکوزیته بین مولکول‌های هوا و دیواره منافذ می‌شود، بنابراین بخشی از انرژی صوتی به انرژی گرمایی تبدیل شده و از این طریق جذب می‌شود.

به‌طور کلی ضریب جذب صوت به عنوان شاخصی برای ارزیابی عملکرد جذب صدای یک ماده استفاده می‌شود. این نسبت انرژی صوتی جذب شده توسط یک ماده (E) به انرژی کلی صوتی است که قبلاً پخش شده (E_0) و به سطح ماده رسیده است که ضریب جذب صدا (α) نیز نامیده می‌شود. از نظر ریاضی ضریب جذب صدا به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\alpha = E/E_0$$

ضریب جذب صدا به فرکانس صوت و جهت تابش صدا مربوط می‌شود. معمولاً شش فرکانس وجود دارد: ۱۲۵ هرتز، ۲۵۰ هرتز، ۵۰۰ هرتز، ۱۰۰۰ هرتز، ۲۰۰۰ هرتز و ۴۰۰۰ هرتز. هر ماده‌ای قادر به جذب صدا است. وجه تمایز این است که ظرفیت جذب آن‌ها تا حد زیادی متفاوت است. اگر میانگین ضریب جذب صوت (α) ماده‌ای در شش فرکانس ذکر شده در بالا بزرگ‌تر از ۰٫۲ باشد، ماده را ماده جاذب صدا می‌نامند.

هر ماده‌ای توانایی جذب صدا را دارد. چیزی که متفاوت است ظرفیت جذب صدا است. به طور کلی، مواد سخت، صاف، سنگین و دارای ساختار متراکم (مانند بتن ترازو، سنگ مرمر، بتن، سطح دیوار، رندر سیمان و غیره) دارای کیفیت جذب صدای ضعیف‌تر اما قدرت بازتاب قوی‌تر هستند، در حالی که مواد متخلخل خشن، سست و نرم با منافذ متقابل داخل و خارج (مانند پشم، الیاف حیوانی، پلاستیک‌های فوم و غیره)، عملکرد جذب صدای بهتر اما قدرت بازتاب ضعیف‌تری دارند.

سروصدای مداوم خطری برای سلامتی است و به همین دلیل کنترل آلودگی صوتی به یک زمینه مهم تحقیقاتی تبدیل شده است. به‌طور کلی، دو راه برای کنترل انتشار نویز وجود دارد. اولین راه کنترل فعال منابع نویز است. موادی می‌توانند سروصدا را در ماشین‌هایی که از طریق ارتعاش تولید صدا می‌کنند، کاهش دهند. این روش تا حدودی مؤثر بوده است، با این حال، کنترل تمام منابع نویز از ماشین‌ها غیرممکن است که کارایی این روش را محدود می‌کند. راه دوم روش غیرفعال است که شامل از بین بردن موج صوتی در حین انتقال آن با استفاده از مواد جاذب صوت است. عمده مواد جاذب صدا موادی سنگین و حجیم هستند و کاربری دشوار و ظرافت پایینی در اجرا دارند، ساخت مواد عایق صوتی سبک و نازک یک پیشرفت بزرگ خواهد بود چراکه استفاده از فضا و ظرافت در طراحی و ساخت را می‌توانند بهینه کند.[۲]

عایق‌های حرارتی

عایق‌سازی حرارتی فرآیند کاهش انتقال حرارت بین اجسام در تماس با منبع حرارتی یا محدوده تشعشع آن است. عایق‌های حرارتی از موادی با رسانایی حرارتی پایین تشکیل شده‌اند. عایق حرارتی را می‌توان با روش‌ها یا فرآیندهای مهندسی‌شده خاص و همچنین با اشکال و مواد مناسب به دست آورد.

از دیدگاه میکروسکوپی، انتقال انرژی حرارتی در جامدات ممکن است به دو دلیل باشد:

- مهاجرت الکترون‌های آزاد
- امواج ارتعاشی شبکه (Phonon)

هنگامی که الکترون‌ها و فونون‌ها (نوسان‌های هماهنگ همهٔ اتم‌ها در یک ساختار بلوری را فونون می‌گویند) انرژی گرمایی را حمل می‌کنند که منجر به انتقال گرما در یک جامد می‌شود، رسانایی گرمایی ممکن است به صورت زیر بیان شود:

$$K = K_e + K_{phn}$$

فلزات به طور کلی دارای رسانایی الکتریکی و هدایت حرارتی بالایی هستند. این خواص به ویژه از این واقعیت ناشی می‌شود که الکترون‌های بیرونی آن‌ها (الکترون‌های آزاد) نامستقر[۱] هستند. سهم آن‌ها در هدایت حرارتی بسیار زیاد است و به عنوان هدایت حرارتی الکترونیکی، K_e نامیده می‌شود. در نتیجه فلزات به جای عایق‌های حرارتی، رسانای حرارتی بسیار خوبی هستند.

برای جامدات غیرفلزی، K در درجه اول با K_{phn} تعیین می‌شود که با کاهش فرکانس برهمکنش بین اتم‌ها و شبکه افزایش می‌یابد. در واقع، هدایت حرارتی شبکه، مکانیسم هدایت حرارتی غالب در غیر فلزات است. در جامدات، اتم‌ها حول موقعیت‌های تعادلی خود (شبکه کریستالی) ارتعاش می‌کنند. ارتعاشات اتم‌ها مستقل از یکدیگر نیستند، بلکه به شدت بر اتم‌های مجاور تأثیر می‌گذارند. منظم بودن آرایش شبکه تأثیر مهمی بر K_{phn} دارد، به طوری که مواد کریستالی مانند کوارتز دارای رسانایی حرارتی بالاتری نسبت به مواد آمورف[۲] مانند شیشه هستند.

لازم به ذکر است که تلفات حرارتی از اجسام با حرارت بالاتر با سه مکانیسم (به صورت جداگانه یا ترکیبی) اتفاق می‌افتد:

- **انتقال حرارت:** هدایت حرارتی که رسانش گرما نیز نامیده می‌شود، در داخل یک جسم یا بین دو جسم در

تماس بدون دخالت جریان جرم و اختلاط رخ می‌دهد. این تبادل مستقیم میکروسکوپی انرژی جنبشی ذرات از طریق مرز بین دو سیستم است.

■ **همرفت حرارتی:** انتقال گرما به دلیل حرکت توده‌ای مولکول‌ها در سیالات مانند گازها و مایعات است. اگرچه مایعات و گازها به طور کلی رسانای گرما نیستند، اما می‌توانند گرما را با همرفت به سرعت انتقال دهند.

■ **تابش حرارتی:** تابش حرارتی تابش الکترومغناطیسی در ناحیه مادون قرمز طیف الکترومغناطیسی است، اگرچه برخی در ناحیه مرئی هستند.

پوشش‌های عایق صوت و حرارت

عایق‌کاری سطوح مختلف ساختمانی و تجهیزات، یکی از راه‌های جلوگیری از اتلاف انرژی و در نتیجه کاهش هزینه‌هاست. از طرفی به‌منظور جلوگیری از مزاحمت ایجاد شده توسط صدا در اتاق‌های کناری یا فوقانی ساختمان‌ها و سازه‌های صنعتی و همچنین صنایع حمل‌ونقل مانند کشتی، قطار و خودرو، ممانعت از انتقال صدا در طراحی و ساخت حائز اهمیت است. علاوه بر استفاده از سقف یا دیوار بتنی با ضخامت زیاد یا عایق‌هایی مانند پشم‌شیشه یا استفاده از لرزش‌گیرهای لاستیکی به‌منظور کاهش تلفات حرارتی و صوتی، استفاده از پوشش‌های عایق روشی نوین است. امروزه رنگ عایق حرارتی هدایت حرارتی را کاهش می‌دهد و رنگ‌های عایق صدا به گونه‌ای طراحی شده‌اند که با ضخامت بسیار کم اعمال می‌شوند اما قدرت مستهلک کردن دامنه وسیعی از ارتعاشات صوتی را دارند. برتری بزرگ دیگر این نوع پوشش‌ها ضخامت و دانسیته کم پوشش است که موجب می‌شود بار مرده کمتری بر سازه اعمال شود و فضای کمتری را اشغال کند. این موضوع در صنایع حمل‌ونقل فاکتور بسیار مهمی به حساب می‌آید. همچنین به دلیل اینکه پوشش رزینی الاستومری هستند نقش حفاظتی نیز ایفا می‌کنند و از فلزات در مقابل شرایط جوی مختلف محافظت می‌کند[۳]. با توجه به مزایای یاد شده استفاده از پوشش‌ها یا رنگ‌های عایق صوت و حرارت در صنعت ریلی نیز مورد توجه قرار گرفته است.

رنگ لوکوموتیو

تمام رنگ‌ها از رنگدانه، رزین و حلال تشکیل شده است. رزین ماده پوشش است در حالی که رنگدانه‌ها رنگ را تعیین می‌کنند و حلال‌ها رنگ را به ویسکوزیته قابل اجرا کاهش می‌دهند. با توجه به این فرمول اساسی برای رنگ، راه‌های مختلفی برای تولید رنگ‌های مفید وجود دارد و از این طریق انواع رنگ‌هایی که برای استفاده در واگن راه‌آهن مناسب هستند، به‌دست می‌آید. نوع رنگ مورد استفاده به کاربرد خاص آن بستگی دارد. جدول ۱ تعداد زیادی از رنگ‌های موجود برای لوکوموتیو را فهرست کرده و برخی از ویژگی‌های آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱- رنگ‌های رایج به‌کار رفته در واگن‌های قطار

رنگ	اجزا	ملاحظات
اپوکسی	اپوکسی رزین کاتالیز شده MEK (متیل اتیل کتون) یا دیگر محلول‌های کتونی	■ سخت، نفوذناپذیر، دوام طولانی‌مدت، مقاومت طولانی‌مدت در برابر حلال، مواد شیمیایی و سایش. ■ برای بتونه‌کاری و سطح کاری تحت پوشش‌های با کارایی بالا استفاده می‌شود. ■ ساخت بالا (High-build) می‌تواند بی‌نظمی‌ها و گودال‌های کوچک سطح را پر کند.
پلی‌اورتان	رزین‌های پلی‌استر آلیفاتیک دوجزئی (که توسط ایزوسیانت‌ها به هم متصل می‌شوند)	■ پرداخت سخت و فوق‌العاده براق مقاومت بالا در برابر خوردگی و شیمیایی ■ بسیار مقاوم در برابر ضربه و سایش ■ طولانی‌ترین ماندگاری محصول انتخابی در صنعت حمل‌ونقل
اِنامل آکریلیک	مشابه مینای آلکیدی است اما با رزین آکریلیک اصلاح شده است	با تبخیر حلال خشک می‌شود، در صورت خشک شدن چسبناک نیست و با جذب اکسیژن خشک می‌شود.
اِنامل آلکید صنعتی	رزین آلکیدی VM&P Naptha و حلال Stoddard	فیلم‌های سخت و انعطاف‌پذیر با حفظ رنگ و جلای عالی. با تبخیر حلال خشک می‌شود، وقتی خشک می‌شود چسبناک است. در محیط‌های ملایم تا متوسط استفاده می‌شود. پوشش دوره‌ای مجدد ضروری است.
اِنامل آلکید معماری	حلال رزین آلکیدی Stoddard	اِنامل داخلی آلکیدی را می‌توان در فضای داخلی تجهیزات استفاده کرد و نتایج عالی را به همراه داشت.
پرایمر	فرموله‌شده برای بیشترین چسبندگی به بستر زیرین	می‌تواند اپوکسی، آلکید یا آکریلیک باشد. رنگ‌های ویژه‌ای مانند روی-سلنیوم برای حفاظت کاتدی، روی-کرومات برای آلومینیوم و غیره برای حل مشکلات خاص موجود است.

ادامه جدول ۱- رنگ‌های رایج به‌کار رفته در واگن‌های قطار

رنگ	اجزا	ملاحظات
پرایمر قرمز ضدرطوبت Rustoleum	رزین آلکیدی، روغن ماهی و حلال VM&P Naptha	فقط روی فولاد زنگ‌زده استفاده می‌شود. روغن ماهی به فلز زنگ زده نفوذ می‌کند و هوا/ رطوبت را خارج می‌کند. محکم می‌چسبد تا زنگ بزند. ممکن است روی سطوح کمی مرطوب اعمال شود.
سرفیسر[۳]	فرموله شده برای سنباده زدن	می‌تواند اپوکسی، آلکیدی یا پلی‌اورتان باشد. سرفیسرها معمولاً با پرداخت‌های خودرو استفاده می‌شوند. یک اپوکسی ساخت بالا را می‌توان در نمای بیرونی تجهیزات راه‌آهن استفاده کرد.
اپوکسی آکریلیک	رزین اپوکسی آکریلیک کاتالیز شده در حلال آبی	خشک‌کننده سریع، سمیت و بوی کم حتی در مناطق بسته، تمیز کردن آسان با آب و صابون و پایه‌ای عالی برای روکش‌های با کارایی بالا.

پارامترهایی که برای انتخاب رنگ بدنه لوکوموتیو ضروری است عبارتند از: محافظت در برابر خوردگی و سایش شدید، طول عمر بالا، مقاومت در برابر محو شدن، سهولت کاربری (حداقل آماده‌سازی سطح) و هزینه کم. در واقع برآوردن همه این معیارها ممکن نیست، اما نزدیک شدن به آن ممکن است[۴].

شکل ۱- رنگ بدنه لوکوموتیو

کاربرد فناوری نانو در پوشش‌های عایق صوت و حرارت

امروزه با توسعه علم نانو و ورود آن به حوزه پوشش‌ها شاهد استفاده فراوان آن‌ها در صنایع و کاربری‌های مختلف هستیم. در بحث پوشش‌های عایق نیز این موضوع مستثنی نبوده و شاهد استفاده از نانومواد در این حوزه‌ایم.
با توسعه نانوپوشش‌های عایق حرارتی بر روی سطوح، می‌توان ممانعت از اتلاف انرژی را تا حد قابل قبولی بهبود داد. از طرفی ممانعت همزمان از عبور صوت از مزایای این پوشش‌ها به علت حضور ذرات نانو در ساختار است. نانوذرات موجود در پوشش‌های نانو با جذب بخشی از طیف‌های تابش و بازتابش نور خورشید، همچنین انحراف صوت، نقش عایق را به خوبی ایفا می‌کنند.
همانطور که در بحث پوشش اشاره کردیم بیشتر پوشش‌های به‌کاررفته در صنعت پوشش، پوشش‌های پلیمری هستند، از طرف دیگر در جدول ۱ مشاهده کردیم که عمده رنگ‌هایی نیز که برای پوشش بیرونی لوکوموتیوها مورد استفاده قرار می‌گیرند پایه پلیمری دارند و باید اشاره کرد که ورود علم نانو به پوشش‌های پلیمری اصطلاحی به نام پوشش‌های پلیمری نانوکامپوزیتی (ماتریس پلیمری که نانومواد مختلف به عنوان افزودنی برای بهبود برخی خواص نظیر خواص الکتریکی، حرارتی، آکوستیک[۴]، مکانیکی و غیره در آن پخش شده‌اند) را وارد این حوزه کرده است که در ادامه به بررسی نقش نانو در خواص حرارتی و آکوستیک این پوشش‌های پلیمری خواهیم پرداخت.

تاثیر نانومواد بر خواص حرارتی پوشش‌های پلیمری نانوکامپوزیتی

ویژگی‌های حرارتی پلیمرها، به دلیل اینکه می‌توانند بر ویژگی‌های مختلف دیگر مانند خواص الکتریکی و مکانیکی نیز تأثیر بگذارند، مهم‌ترین ویژگی برای توصیف ماهیت پلیمرها هستند. ویژگی‌های حرارتی را می‌توان به طور کلی به رفتار حرارتی (تغییر حالت به دلیل تغییر دما)، خواص حرارتی (خواص مربوط به گرما از جمله انتقال حرارت و انبساط حرارتی) و مقاومت حرارتی (خواص مربوط به پایداری حرارتی) طبقه‌بندی کرد. خواص معمولی هر مشخصه در جدول ۲ فهرست شده است.

جدول ۲- مشخصه و ویژگی‌های حرارتی پلیمرها

مشخصه‌های حرارتی	ویژگی‌ها
رفتار حرارتی (تغییر فاز به دلیل تغیر دما)	■ دمای انتقال شیشه T_g ■ نقطه ذوب ■ دمای کریستاله شدن
ویژگی‌های حرارتی (ویژگی‌های مربوط به انتقال دما و انبساط حرارتی)	■ دمای ویژه ■ رسانایی دمایی ■ ثابت انبساط دمایی

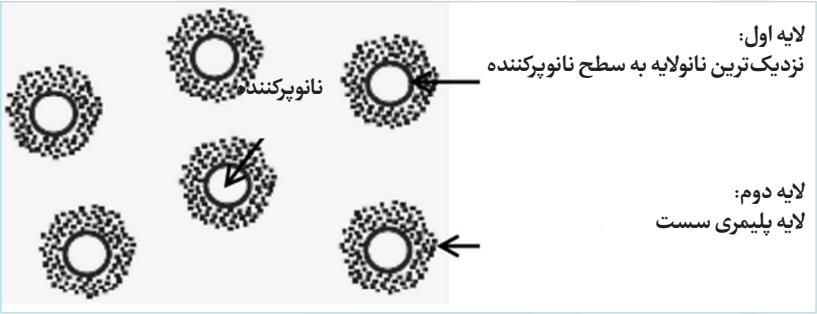
ادامه جدول ۲- مشخصه و ویژگی‌های حرارتی پلیمرها

مشخصه‌های حرارتی	ویژگی‌ها
مقاومت حرارتی (ویژگی‌های مربوط به پایداری حرارتی)	■ دمای تجزیه حرارتی ■ کاهش وزن بر اثر حرارت ■ دمای انحراف تحت بار ■ دمای سرویس مداوم

بررسی‌ها نشان می‌دهد که ویژگی‌های حرارتی پلیمرها در نتیجه گنجاندن چند درصد وزنی از نانوپرکننده در آن‌ها تغییر می‌کند[۵]. از این رو بررسی تأثیر نانوپرکننده‌ها بر ویژگی‌های حرارتی (به‌ویژه رسانایی دمایی) پلیمرها به‌عنوان مواد عایق ضروری است.

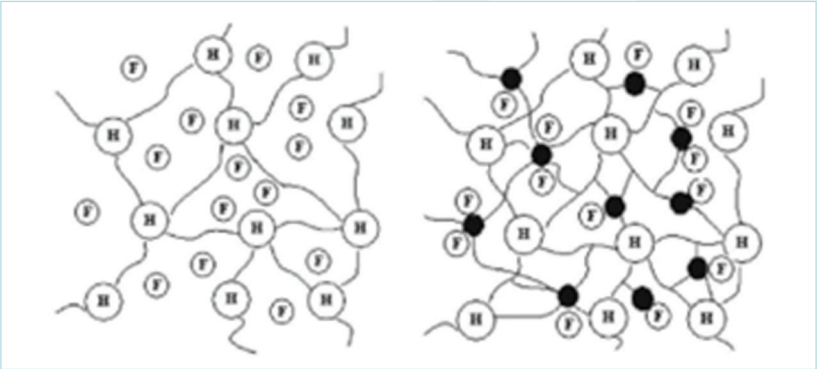
همانطور که در بحث عایق‌های حرارتی اشاره شد رسانایی گرمایی از طریق الکترون‌های آزاد لایه بیرونی و ارتعاشات مولکولی در شبکه ماتریس (فونون) صورت می‌پذیرد. پلیمرها فاقد الکترون آزاد بوده و رسانایی دمایی آن‌ها محدود به فونون‌ها است ($K = K_{phn}$). بنابراین هر عاملی که سبب استحکام مولکول‌های پلیمر در جای خود شود سبب کاهش ارتعاشات مولکولی در شبکه پلیمری، کاهش رسانایی حرارتی و در نتیجه بهبود عملکرد پلیمر به‌عنوان عایق حرارتی می‌شود. در ادامه به توضیح نقش نانوپرکننده‌ها در کاهش رسانایی حرارتی نانوکامپوزیت‌های پلیمری می‌پردازیم.

انواع واکنش‌های سطحی جذبی، دفعی و خنثی می‌تواند بین نانوپرکننده‌ها و پلیمرها رخ دهد. ویژگی‌های حرارتی پلیمرها را می‌توان با این فعل‌وانفعالات تغییر داد. شکل ۲ برهمکنش‌های سطحی نظری بین یک پلیمر معمولی (رزین اپوکسی) و نانوپرکننده را نشان می‌دهد. فرض بر این است که اولین نانولایه که نزدیک‌ترین سطح به سطح نانوپرکننده (داخلی‌ترین نانولایه) است، محکم به سطح متصل است و در نتیجه زنجیره‌های پلیمری در آنجا بسیار بی‌حرکت هستند. نانولایه پلیمری دوم کمی ضخیم‌تر از لایه اول است و شامل زنجیره‌های پلیمری است که به صورت سست به هم متصل شده‌اند. با افزایش غلظت پرکننده، فاصله بین ذرات شروع به کاهش می‌کند که می‌تواند باعث همپوشانی نواحی پلیمری بی‌حرکت در اطراف نانوپرکننده‌ها شود. این افزایش در حجم نواحی پلیمری بی‌حرکت روی هم در نانوکامپوزیت‌ها، دمای انتقال شیشه‌ای و دمای تخریب حرارتی را افزایش و رسانایی حرارتی را کاهش می‌دهد که سبب بهبود عملکرد پلیمر به عنوان عایق حرارتی می‌شود؛ بنابراین، فعل‌وانفعالات سطحی بین زنجیره‌های پلیمری و نانوپرکننده منجر به تشکیل دو لایه در اطراف نانوپرکننده می‌شود و نانولایه پلیمری با اتصال آزاد خارجی باعث تغییر ویژگی‌های حرارتی می‌شود. نوع نانوماده به‌کار رفته، غلظت نانوپرکننده، میزان پراکندگی نانوپرکننده در ماتریس پلیمری خواص سطح و در نهایت نوع پلیمر به‌کار رفته می‌توانند خواص حرارتی مانند رسانایی گرمایی در نانوکامپوزیت را تعیین کنند[۵].

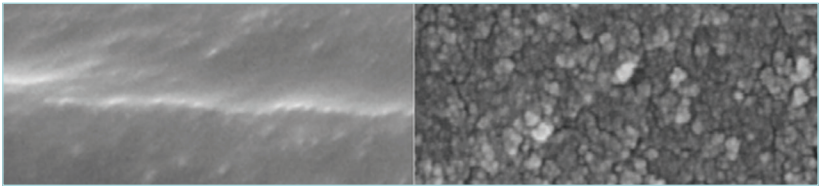


شکل ۲- مدل دولایه‌ای نانوکامپوزیت‌ها

علاوه بر مکانیسم بالا در توجیه کاهش رسانایی حرارتی نانوکامپوزیت‌های پلیمری همانطور که در بحث عایق‌های حرارتی اشاره شد شکل و ساختار منظم شبکه نیز در رسانایی حرارتی نقش دارد. نانوذرات در ماتریس پلیمری با بالا بردن درجه کراس لینک[۵] در شبکه پلیمر (شکل ۳) بی‌نظمی را افزایش می‌دهند و باعث ایجاد ساختارهای متخلخل[۶] در شبکه پلیمری میزبان خود می‌شوند (شکل ۴) که این عوامل باعث کاهش رسانایی حرارتی و در نتیجه بهبود عملکرد نانوکامپوزیت‌ها به‌عنوان عایق‌های حرارتی می‌شوند.



شکل ۳- شماتیک ساختار کراس‌لینک در نانوکامپوزیت‌ها
(خطوط خمیده: پلیمر. - نقاط سیاه: نانوذره. - H: سخت‌کننده. - F: منعطف‌کننده.)



شکل ۴- تصویر SEM از پلیمر با غلظت کم نانوپرکننده (چپ) و پلیمر با غلظت زیاد نانوپرکننده (راست)

تأثیر نانومواد بر خواص آکوستیک پوشش‌های پلیمری

هنگامی که انرژی صوتی به سطح صاف ماده کامپوزیت می‌رسد، بخشی از انرژی صوتی کاملاً منعکس می‌شود و به داخل ماده نفوذ نمی‌کند. بخش دیگر انرژی صوت به ارتعاش مکانیکی تبدیل شده و به کامپوزیت نفوذ می‌کند، بنابراین انرژی صوتی کاهش می‌یابد. دلایل مختلفی برای توضیح پراکندگی انرژی صوتی کامپوزیت‌ها وجود دارد: اول اینکه، چگالی پیوند متقابل[۷] ماتریس به دلیل اضافه شدن پرکننده‌های نانو کاهش می‌یابد. چگالی پیوند متقابل کمتر ماتریس می‌تواند خاصیت میرایی[۸] را بهبود بخشد در نتیجه ماتریس به‌گونه مؤثرتری انرژی ارتعاش مکانیکی را جذب می‌کند و مقداری از انرژی صوتی را از بین می‌برد.[۶-۸]

ثانیاً، مسیری که از طریق آن ارتعاش مکانیکی در کامپوزیت منتشر می‌شود نیز نقش مهمی ایفا می‌کند. سطح مشترک بین نانوذرات و ماتریس پلیمر و سطح مشترک بین نانوذرات و هوای محبوس شده در ماتریس می‌توانند انرژی امواج صوتی را پراکنده و بشکنند.

ثالثاً، در صورتی که نانوذرات قابلیت محبوس کردن هوا درون خود را داشته باشند (مثل نانولوله‌ها) هوای داخل حفره داخلی در فضای کوچکی محصور شده و نمی‌تواند آزادانه حرکت کند که این امر باعث شکسته شدن امواج صوتی در نانوکامپوزیت می‌شود.

در بررسی خواص آکوستیک پارامتری وجود دارد به نام STL[9] یا هدر رفت انتقال صدا که مقدار آن با ضخامت کامپوزیت رابطه مستقیم دارد و هرچه ماده‌ای ضخیم‌تر باشد مقدار STL آن نیز بیشتر می‌شود.

زمانی که ضخامت کامپوزیت‌ها ثابت است، یک پرکننده نانو نقش مهمی در تغییر مقدار STL کامپوزیت‌ها ایفا می‌کند. انرژی صوتی باید از سطح مشترک بین نانوپرکننده و ماتریس پلیمر و سطح مشترک بین هوا و نانوپرکننده عبور کند. در نتیجه وجود نانوذرات باعث می‌شود امواج صوتی مجبور به عبور از سطوح مشترک بیشتری در شبکه نانوکامپوزیتی شوند که این امر باعث شکست و پراکندگی بیشتر امواج، افزایش STL و در نتیجه بهبود عملکرد نانوکامپوزیت به‌عنوان عایق صدا می‌شود[۹].

تولیدکنندگان داخلی

در ایران شرکت مهندسی شیمی و رنگ‌سازی نیلی فام اقدام به تولید پوشش عایق صوت و حرارت برای لوکوموتیو کرده است.

شرکت مهندسی شیمیایی و رنگ‌سازی نیلی‌فام

شرکت مهندسی شیمیایی و رنگ‌سازی نیلی‌فام ری در سال ۱۳۸۱ با هدف تولید انواع رنگ‌های صنعتی با ظرفیت ۶۵۰۰ تن در سال ۱۳۸۱، به بهره‌برداری رسید.(www.nilifam.com)

محصول تولیدی این شرکت یک رزین آکریلیک پایه آب با پرکننده‌های معدنی متخلخل و مواد آلومینیومی است. از ویژگی‌های این محصول مقاومت غیرسمی در برابر حرارت و صدا (ظرفیت میرایی بالا)، اشتعال‌پذیری کم، مقاومت در برابر رطوبت بالا، ضخامت کم، چسبندگی مناسب به سطوح فولاد کربنی، فولاد ضدزنگ و آلومینیوم، آنودایز[۱۰] ارزان، استفاده آسان، خشک شدن سریع و... است. با افزودن نانوصفحات به رنگ، مقاومت به حرارت و صوت تا حد چشم‌گیری بهبود یافته است. مکانیزم عملکرد این پوشش‌ها شامل دو پدیده انتقال حرارت و همچنین انعکاس انرژی حرارتی به داخل محیط و همچنین انحراف موج صوتی توسط نانوصفحات است.

بازار جهانی پوشش‌های عایق

پیش‌بینی می‌شود اندازه بازار پوشش‌های عایق تا سال ۲۰۲۵ به ۱۱,۳ میلیارد دلار برسد. نرخ رشد سالانه مرکب ۵,۸ درصد بین سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۵ قابل انتظار است. حفاظت از تجهیزات، خطوط لوله و سایر اجزا در برابر محیط‌های خشن از محرک‌های اصلی بازار جهانی پوشش‌های عایق در طول دوره پیش‌بینی شده است.

بخش آکریلیک بزرگ‌ترین نوع بازار پوشش‌های عایق است

پوشش‌های عایق مبتنی بر آکریلیک، پوشش‌های آبی هستند و بیشترین سهم را در بازار کلی پوشش‌های عایق به خود اختصاص می‌دهند. پوشش‌های عایق مبتنی بر آکریلیک جایگزینی ایده‌آل برای مواد عایق سنتی هستند و به دلیل سهولت در نگهداری و قابلیت جلوگیری از CUI11 استفاده می‌شوند. این پوشش‌ها را می‌توان با تجهیزات اسپری کاربرپسند اجرا کرد و برای کاربردهای دمایی تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد مناسب هستند. پوشش‌های عایق آکریلیک مبتنی بر آب می‌توانند در دماهای تا ۱۷۷ درجه سانتی‌گراد کار کنند.

بخش صنعتی سریع‌ترین رشد را در صنعت پوشش‌های عایق دارد

بر اساس استفاده نهایی در صنعت، بازار پوشش‌های عایق به پنج بخش اصلی صنعتی، ساختمانی، هوافضا، خودروسازی، دریایی و غیره طبقه‌بندی می‌شود. بخش صنعتی بزرگ‌ترین صنعت استفاده نهایی برای پوشش‌های عایق است. در بخش صنعتی، عایق‌های حرارتی بیشترین استفاده را دارند. انتظار می‌رود این پوشش‌ها از آسیب‌های ناشی از گرما در محیط کار جلوگیری کنند. کاهش اتلاف گرما از ماشین‌آلات صنعتی دمای مناسبی را در محل کار برای کارگران حفظ می‌کند. پوشش حرارتی همچنین به حفظ مواد شیمیایی در دمای خاص کمک می‌کند.

پویایی بازار پوشش‌های عایق

نیاز روزافزون به عایق حرارت، الکتریسیته و صدا در صنایع مختلف و نیاز روزافزون به عایق‌سازی بسترها برای حفاظت و افزایش عملکرد، تقاضا برای پوشش‌های عایق را افزایش می‌دهد. پوشش‌های عایق حرارتی نه تنها محافظت/عایق در برابر گرما را ارائه می‌دهند بلکه به صرفه‌جویی در انرژی نیز کمک می‌کنند.

اجرای مقررات مختلف باعث افزایش مصرف پوشش‌های عایق می‌شود

انتظار می‌رود اجرای مقررات و دستورالعمل‌های مختلف تقاضا برای پوشش‌های عایق را افزایش دهد. آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (EPA12) مقرراتی دارد که بر کارایی وسایل نقلیه خودرویی حاکم است. بهبود عملکرد موردنیاز وسایل نقلیه جدید، استفاده از پوشش‌های عایق را تشویق کرده است که به بهره‌وری انرژی کمک می‌کند.

محدودیت‌ها: قیمت نسبتاً بالای پوشش‌های عایق

هزینه پوشش‌های عایق از آماده‌سازی سطح برای جلوگیری از خوردگی قبل از اجرا بالاتر است که این عامل سبب

محدودیت استفاده از پوشش‌های عایق شده و افزایش تقاضا برای عایق‌های سنتی را افزایش داده است زیرا مقرون به‌صرفه‌تر هستند.

فرصت‌ها: رشد صنایع استفاده‌کننده نهایی در بازارهای نوظهور

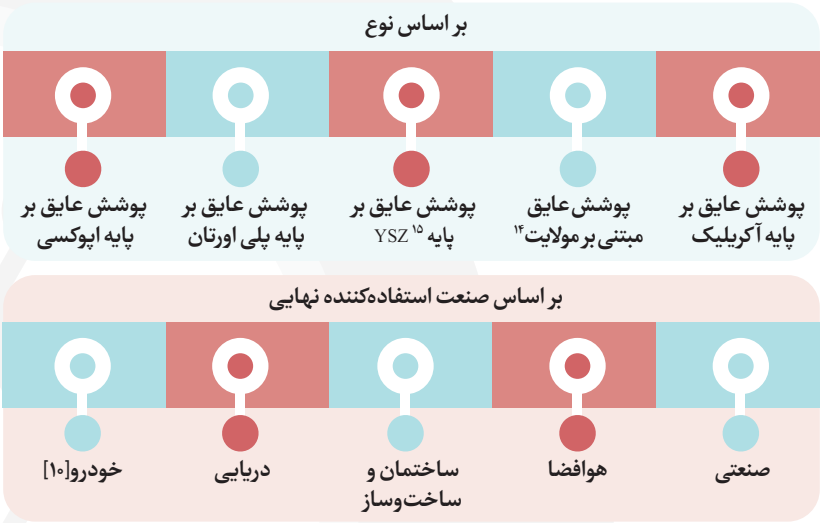
افزایش جمعیت و صنعتی شدن سریع در اقتصادهای نوظهور آسیا اقیانوسیه، خاورمیانه و آفریقا باعث افزایش بازده تولید شده که منجر به افزایش مصرف مصالح ساختمانی و خودرو می‌شود. انتظار می‌رود این روند بازار پوشش‌های عایق را به حرکت درآورد. انتظار می‌رود مقررات محیط زیستی در مورد ترکیبات آلی فرار (VOC[۱۳]) در پوشش‌ها در طول دوره پیش‌بینی در کشورهای آسیایی سخت‌گیرانه‌تر باشد. توسعه محصولات سازگار با محیط زیست برای برآوردن این الزامات خاص می‌تواند تقاضا را بیشتر افزایش دهد.

چالش‌ها: رقابت با عایق‌های سنتی

از سیستم‌های عایق سنتی مانند فایبرگلاس و پشم معدنی در صنایع مختلف استفاده می‌شود و ثابت شده است که عملکرد بهتری نسبت به پوشش عایق دارند؛ بنابراین تولیدکنندگان پوشش برای رقابت با این مواد نیاز به تولید محصولاتی با قابلیت‌های عایقی برتر دارند.

پوشش‌های عایق موجود نسبتاً گران هستند. فناوری مورد استفاده برای به کاربرد بردن پوشش نیز گران است که هزینه کل فرآیند پوشش را بالا می‌برد. توسعه پوشش عایق ارزان به کاهش هزینه کلی پوشش و افزایش جذابیت بازار کمک می‌کند. در حال حاضر هیچ محصول مقرون به‌صرفه‌ای در بازار وجود ندارد که دارای سطح کارایی مشابه با مواد عایق سنتی باشد؛ بنابراین توسعه یک پوشش مقرون به‌صرفه یک چالش برای بازار است.

در ادامه به طبقه‌بندی بازار پوشش‌های عایق بر اساس نوع، صنعت استفاده نهایی و منطقه می‌پردازیم.



پی‌نوشت‌ها

۱ Delocalized
۲ Amorph
۳ Surfacer
۴ Acoustic
۵ Cross-link
۶ Mesoporous
۷ Cross-linking density
۸ Damping
۹ Sound transmission loss
۱۰ Anodizer
۱۱ Corrosion under insulation
۱۲ Environmental Protection Agency
۱۳ Volatile organic compound
۱۴ Mullite
۱۵ Yttria-stabilized zirconia

مراجع

۱ britanica. surface coating. 2016;
Available from: https://www.britannica.com/technology/surface-coating.

۲ sound absorption.
Available from: https://www.sciencedirect.com

۳ Acoustic and thermal insulation.
Available from: https://nanoproduct.ir/product/3421

۴ DWide, E. Painting Railway Equipment. 1998;
Available from: http://www.gntrains.com/Documents/Paint.pdf.

۵ DTanaka, T. and T. Imai, Advanced nanodielectrics: fundamentals and applications. 2017: CRC press.

۶ DGao, Y., et al., Effect of montmorillonite on carboxylated styrene butadiene rubber/hindered phenol damping material with improved extraction resistance. Materials & Design, 2014. 58: p. 316-323.

۷ DWu, D., et al., Effect of epoxy resin on the thermal behaviors and viscoelastic properties of poly (phenylene sulfide). Materials Chemistry and Physics, 2011. 128(1-2): p. 274-282.

۸ DTcherbi-Narteh, A., et al., Viscoelastic and thermal properties of full and partially cured DGEBA epoxy resin composites modified with montmorillonite nanoclay exposed to UV radiation. Polymer degradation and stability, 2014. 101: p. 81-91.

۹ DShi, X., et al., Novel sound insulation materials based on epoxy/hollow silica nanotubes composites. Composites Part B: Engineering, 2017. 131: p. 125-133.

۱۰ DInsulation coating market.
Available from: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/insulation-coatings-market-26484290.html.

از مجموعه گزارش‌های صنعتی فناوری‌نانو در صنعت ریلی منتشر شده است

- کاربرد فناوری‌نانو در صنعت حمل‌ونقل ریلی
- مروری بر کاربردهای فناوری پلاسمای سرد در حمل‌ونقل ریلی و صنایع وابسته
- کاربرد نانوپوشش‌های سخت و مقاوم در صنعت حمل‌ونقل ریلی