www.nm.shahrood.ac.ir
نانومواد: ۵۷:۱۶ (۱۴۰۳) ۱۳-۱

مقاله پژوهشی

بررسی انتشار حرارتی امواج مادون قرمز در پوشش‌های کامپوزیتی آلومینیوم/مس/اپوکسی

خانعلی نکویی*[۱]، کاوه کلاه‌گر آذری[۱] و امیرحسین صیادی[۲]

۱- مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران
۲- دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

تاریخ ثبت اولیه: ۱۴۰۲/۰۹/۰۹، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۴۰۲/۱۱/۱۲، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۴۰۲/۱۱/۱۵

چکیده

امروزه پژوهشگران مبادرت به ساخت کامپوزیت‌ها به روش‌های گوناگون به دلیل خواص منحصربفردشان نموده‌اند. پژوهش‌های متعدد در زمینه کامپوزیت‌هایی با کاربرد پوششی در مقابل امواج الکترومغناطیس نشان داده که این دسته از مواد گزینه مناسبی برای استفاده در ساخت پوشش‌های الکترومغناطیس هستند. در این پژوهش به بررسی انتشار حرارتی امواج مادون قرمز در پوشش‌های کامپوزیتی سه تایی پرداخته شده است. بدین منظور پیگمنت‌های ورقه‌ای آلومینیوم و مس کروی به همراه رزین اپوکسی با درصد های وزنی ۲۰ و ۴۰ و به ضخامت‌های ۲۰ و ۴۰ میکرون به منظور تهیه پوشش‌های کامپوزیتی و بررسی انتشار امواج مادون قرمز انتخاب شدند. پوشش‌ها با ضخامت‌ها و مقدار پیگمنت‌های مورد نظر با روش Doctor Blade که روشی برای پوشش دادن سرد است بر زیر لایه فولادی اعمال شدند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد میزان انتشار حرارتی پوشش‌های بدست آمده کمتر از ۶۰ درصد است. در بین پوشش‌های اعمالی پوشش حاوی ۴۰ درصد وزنی پیگمنت ورقه‌ای آلومینیومی با ضخامت ۴۰ µm با مقدار ۲۹ درصد کمترین مقدار انتشار در محدوده ۸-۱۴ µm را از خود نشان داده و در نتیجه بهترین عملکرد در ناحیه مادون قرمز را خواهد داشت.

***واژه‌های کلیدی:* پوشش کامپوزیتی، مادون قرمز، رزین اپوکسی.**

۱- مقدمه

امروزه پوشش‌های کامپوزیتی نقش اساسی در بهبود خواص قطعات تولیدی ایفا می‌کنند. در این میان توانایی قطعات در عبور ندادن اشعه مادون قرمز در صنایع دفاعی حائز اهمیت است [۶-۱]. از جمله مواد پر کاربرد برای جلوگیری از عبور یا بازنشر امواج الکترو مغناطیس فلزاتی مانند مس، آلومینیوم، فولاد زنگ‌نزن هستند. هرچند این فلزات حفاظت نسبتا خوبی در مقابل امواج الکترومغناطیس به ویژه در فرکانس‌های پایین فراهم می‌کنند اما به سبب محدودیت در ساخت، استفاده و

* **عهده‌دار مکاتبات:** خانعلی نکویی
نشانی: مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران، ایران
تلفن: ۰۲۱-۲۲۹۳۵۳۰۰، **دورنگار:** ۰۲۱-۲۲۹۳۶۵۷۸، **پست الکترونیکی:** khnekouee@gmail.com

شکل دادن همچنین جرم بالا و حساسیت به خوردگی استفاده از این گروه پرهزینه است. این عوامل سبب شد تا محققان به سمت استفاده از کامپوزیت‌های دوتایی یا چندتایی بروند، در این میان کامپوزیت‌هایی با زمینه پلیمر بسیاری از این مشکلات را حل می‌کنند. اپوکسی، پلیمری است که صرفا با اضافه کردن هاردنر می‌تواند شکل گرفته و این مسئله اپوکسی را به یکی از محبوب‌ترین زمینه‌های پلیمری در کامپوزیت‌ها تبدیل کرده، دانشمندان دریافتند در صورت ترکیب خواص فیزیکی اپوکسی با خواص پوششی فلزاتی مانند آلومینیوم و مس می‌توان کامپوزیت‌هایی با خاصیت پوشش‌دهی در مقابل امواج الکترومغناطیس تولید کرد [۱۰-۷]. به سبب محدودیت‌های تکنولوژیکی در شبیه‌سازی، روش آزمایش بهترین روش برای بدست آوردن نتایج در این موضوع به نظر می‌رسد.

در راستای ساخت کامپوزیت‌های عایق در برابر امواج الکترو مغناطیس تحقیقات گسترده‌ای صورت پذیرفته و محققان به نتایج خوبی دست یافتند. در یکی از این پژوهش‌ها در این زمینه، ژو و همکارانش میکروسیم‌هایی که مغناطیس نرم بودند و با شیشه پوشش داده شده بود و فیبر گرافن را در رزین اپوکسی به سه طریق مختلف پخش کردند و توانستند بازنشر امواج میکروویو را از کامپوزیت ساخته شده به میزان قابل توجهی کاهش دهند [۱۰]. پژوهش آن‌ها نشان داد میکروسیم‌ها که مغناطیس نرم هستند بیشتر جلوی امواج ماکروویو را می‌گیرند و فیبرهای گرافن در فرکانس‌های بالاتر اثر پوششی دارند. بنابراین یافته‌ها ، می‌توان دریافت که مواد رسانا می‌توانند خواص خوبی در راستای جلوگیری از انتشار و بازنشر امواج الکترومغناطیس با فرکانس پایین داشته باشند، در این پژوهش مبادرت بر آن است که با استفاده از پیگمنت‌های آلومینیوم یا مس که هردو مواد دیا مغناطیس هستند به شکل پخش شده در رزین اپوکسی پوشش‌هایی عایق دربرابر امواج مادون قرمز تولید نمود.

۲- فعالیت‌های تجربی

در مطالعه حاضر با توجه به نیازی که به ایجاد پوشش‌های با خاصیت پنهان‌کنندگی در برابر حسگر مادون قرمز احساس می‌شد و با توجه به مطالعات گسترده‌ای که انجام پذیرفت، پوشش‌های کامپوزیتی حاوی رزین آلی اپوکسی به همراه پیگمنت‌های فلزی آلومینیوم ورقه‌ای و مس کروی بر زیرلایه‌ها اعمال گردید. در برخی موارد به منظور امکان ساخت نمونه برای آزمون‌ها از شیشه و در سایر موارد از فولاد به عنوان زیرلایه استفاده گردید. روش مورد استفاده در این مطالعه روش دکتر بلید(استفاده از فیلم کش) بود. پوشش‌ها با ضخامت‌های ۲۰ و ۴۰ µm و در غلظت‌های ۲۰ و ۴۰ درصد وزنی پیگمنت اعمال شده و در نهایت توسط آزمون اندازه‌گیری انعکاس مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج به دست آمده توسط نرم‌افزار اکسل به داده‌های قابل تفسیر تبدیل گردید.

با توجه به مطالعات انجام شده پیرامون انواع پوشش‌های کامپوزیتی با انتشار مادون قرمز کم و بررسی پیگمنت‌ها و رزین‌های متداول مورد استفاده در آن‌ها، خلاصه‌ای از خواص مهم آن‌ها بدست آمد (جداول ۱ و ۲). همچنین سعی گردیده موارد انتخابی از جدیدترین و معتبرترین مطالعات موجود در دنیا انتخاب گردد (با توضیح آنکه ۳ ستاره نتایج خوب، ۲ ستاره متوسط و علامت x نشان‌دهنده نتایج ضعیف بوده است) [۱۳-۱۱].

جدول ۱: خواص برخی پیگمنت‌ها

نوع پیگمنت	کمترین میزانتشار	خواص مکانیکی	قیمت	دسترسی	سال انتشار
آلومینیوم (میکرونی)	0/68	**	***	***	2010
آلومینیوم(نانو)	0/8	***	**	***	2010
آلومینیوم(ورقه ای)	0/25-0/35	**	**	**	2010-2013
	0/42	**	**	**	2009-2013
مس(کروی)	0/77	**	**	***	2009
مس(مکعبی)	0/78	**	-	-	2009
مس(ورقه ای)	0/4-0/72	**	**	*	2009 2010
نقره(میکرونی)	0/82	**	**	***	2013
نقره(نانو)	0/2	**	*	**	2007
نقره(ورقه ای)	0/18	**	*	x	2013
برنز(ورقه ای)	0/3	-	-	x	2013

جدول ۲: خواص رزین‌های استفاده‌شده در پوشش‌ها

نوع رزین	انتشار حرارتی	پایداری	خواص مکانیکی	قیمت	دسترسی	سال انتشار
پلی استایرن	**	*	*	x	*	2010
پلی استر	**	*	**	***	***	2013
اپوکسی	***	**	**	***	***	2013
اکریلیک	x	x	**	***	***	2013
پلی سیلکوکسان	**	***	**	x	x	2009
اپوکسی سیلکوکسان	**	**	**	x	x	2010
پلی اورتان	**	*	**	**	***	2013-2009
پلی اتیلن	*	*	*	*	**	2012
EPDM	*	-	**	*	**	2009

با توجه به اطلاعات جداول، پیگمنت‌های آلومینیوم ورقه‌ای و مس کروی و نیز رزین اپوکسی به عنوان اجزای اصلی پوشش انتخاب گردیدند.

در این پژوهش از فولاد ۴۱۳۰ (DIN:1.7218) که کاربرد زیادی در صنایع دارد، به‌عنوان زیرلایه استفاده گردید که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۳ بیان شده است:

جدول۳: ترکیب شیمیایی زیرلایه.

عنصر	درصد وزنی
آهن	**97/03-98/22**
کروم	**0/8-1/1**
منگنز	**0/4-0/6**
کربن	**0/28-0/33**
سیلیسیم	**0/15-0/3**
مولیبدن	**0/15-0/25**
گوگرد	**0/04**
فسفر	**0/035**

نمونه‌های فولادی به منظور ایجاد سطحی مناسب برای اعمال پوشش بر روی زیرلایه، ابتدا در ابعاد $10\times10\ cm^2$ برش داده شدند. سپس به منظور ایجاد صافی سطح کلیه نمونه‌ها توسط سمباده‌هایی از جنس SiC تا شماره ۱۰۰۰ سمباده زده شدند و نهایتا توسط آب مقطر و استون شست وشو داده شدند.

توزیع مناسب پیگمنت‌های فلزی در زمینه‌های آلی همواره با مشکل رسوب پیگمنت در پوشش مواجه بوده است. به منظور پایدار شدن و عدم‌رسوب پیگمنت‌های فلزی مورد کاربرد درون پوشش آلی عملیات اصلاح‌سازی بر روی پیگمنت‌ها انجام گردید. می‌توان این عملیات را آب‌گریز کردن پیگمنت‌ها نامید.

به نسبت ۰/۲۵ مولار استئاریک اسید به همراه ۳۰ گرم پودر پیگمنت فلزی درون زمینه اتانول قرار گرفت. این ترکیب به منظور یکنواخت شدن به مدت ۲۰ دقیقه بر روی همزن قرار گرفته و پس از آن توسط سانتریفیوژ با دور ۴۰۰ دور در دقیقه به مدت ۵ دقیقه، تصفیه گردید. در نهایت پیگمنت اصلاح شده توسط اتانول شسته شد. این عملیات برای هر کدام از پیگمنت‌ها ۳ مرتبه تکرار گردید. به منظور خشک کردن، پیگمنت‌ها به مدت زمان ۲۴ ساعت درون آون با دمای ۷۰ °C-۶۰ قرار گرفتند.

رزین اپوکسی، پودرهای فلزی مس و آلومینیوم و حلال تولوئن به نسبت‌های مشخص درون ظرفی ریخته و به منظور ترکیب و همگن شدن به مدت ۳۰ دقیقه به وسیله میکسر، همزده شدند.

پس از آن هاردنر به ترکیب اضافه گردید. از هاردنر کری آمید ۱۱۵(CRAYAMID 115)از دسته پلی آمیدو آمین (Polyamido Amid)ها در این مطالعه استفاده گردید. همچنین نسبت رزین به هاردنر ۱/۱ به ۳ در نظر گرفته شد. پس از آن ترکیب حاضر به منظور همگن‌سازی توسط میکسر هم زده شد. لازم به ذکر است پوشش‌های حاوی پودر آلومینیوم ورقه‌ای با دو غلظت مختلف ۲۰ و ۴۰ درصد وزنی پیگمنت و پوشش حاوی پودر مس با غلظت ۴۰ درصد وزنی پیگمنت در دو ضخامت ۲۰ و ۴۰ µm تهیه گردیدند.

پس از آماده شدن ترکیب‌های مختلف، پوشش‌های کامپوزیتی بر روی زیرلایه‌هایی از جنس فولاد و نیز شیشه توسط فیلم کش اعمال گردید. در این روش از دستگاه فیلم کش یا اپلیکاتور برای اعمال پوشش کامپوزیتی استفاده گردید. این روش تحت عنوان روش دکتر بلید از جمله روش‌های پر کاربرد برای اعمال پوشش‌های آلی و کامپوزیتی می‌باشد. در نهایت پوشش‌ها در هوای آزاد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردیدند.

به منظور بدست آوردن انتشار مادون قرمز پوشش‌های بدست آمده و با توجه به در دسترس قرار نداشتن دستگاهی برای اندازه‌گیری مستقیم این پارامتر، میزان انعکاس پوشش‌ها در محدوده مادون قرمز اندازه‌گیری و سپس توسط روابط موجود بین انعکاس و انتشار، انتشار حاصل از پوشش‌ها بدست آمد. این دستگاه تحت عنوان رفلکتومتر متعلق به آزمایشگاه اندازه‌گیری FTIR موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ و پوشش می‌باشد.

به منظور اندازه‌گیری انعکاس پوشش‌ها، نمونه‌ها به ابعاد ۱ در ۱ cm بریده شدند.

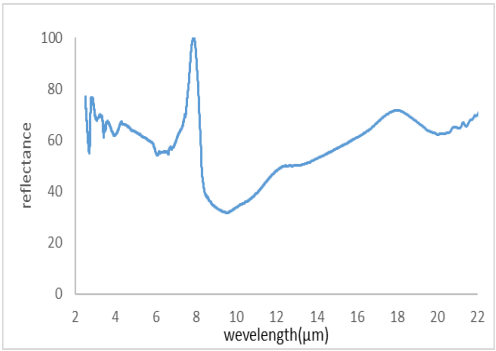
۳- نتایج و بحث

در این پژوهش پارامتر اصلی و تاثیرگذار به منظور بررسی میزان پنهان‌کاری پوشش‌های کامپوزیتی تهیه شده، انتشار مادون قرمز هر پوشش است. با توجه به عدم‌دسترسی به دستگاه اندازه‌گیری مستقیم انتشار مادون قرمز، با اندازه‌گیری

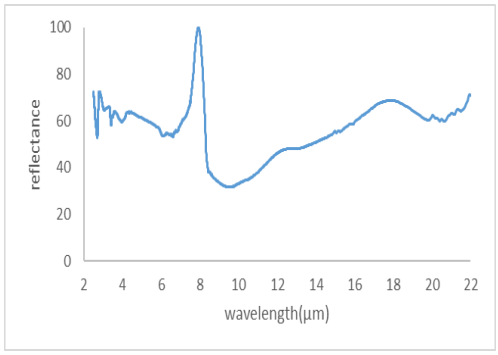
میـزان انعکـاس مـادون قرمـز پوشـش هـا توسـط دسـتگاه رفلکتومتر و تبدیل آن به انتشار از طریق روابط حاکم بین این دو پارامتر(رابطه کیرشهف)، نتایج مورد بررسی قرار گرفتند. تمـامی داده‌هـای انعکـاس بدسـت آمـده ابتـدا توسـط رابطـه کیرشهف به انتشار تبدیل گردیدند. پس از آن توسط نرم‌افزار اکسل برای شرایط مختلف، داده‌ها به دو صورت منحنی تغییر انتشار مادون قرمز بر حسب طول موج (در دو محدوده ۲۲-۲ و ۱۴-۸ µm) و نیز میانگین مقدار انتشار مادون قرمز برحسـب طول مـوج بیـان گردیـد. در ادامـه بـه منظـور بررسـی عوامـل مختلف نظیر غلظـت پیگمنـت، ضـخامت پوشـش و نیـز نـوع پیگمنت، بر روی انتشار مادون قرمز، داده‌هـای بدسـت آمـده مورد تجزیه، تحلیل و مقایسه قرار گرفتند. نحوه تغییر انتشار با تغییر هر پـارامتر مـورد بررسـی و بـا مطالعـات پـژوهش‌گـران پیشین مقایسه گردید. همچنین دلایل تغییرات ایجـاد شـده بـا توجه به منابع موجود بیان گردید.

پوشش‌های کامپوزیتی حاوی پیگمنـت‌هـای فلـزی همـراه بـا رزین آلی اپوکسی، در شرایط مختلف بـر روی زیرلایـه‌هـای فولادی و شیشه ای اعمال گردیدند.

این پوشش با دو ضخامت ۲۰ و ۴۰ µm بر روی سطح اعمـال گردیـد. شـکل ۱ و شـکلبه ترتیـب انعکـاس حاصـل از ایـن پوشش‌ها را نشان مـی‌دهـد. همـان‌گونـه کـه مـی‌دانـیم بـرای عملکرد مناسب پنهان‌کاری در محدوده مادون قرمز، پوشـش مورد نظر باید انعکاس بـالایی در ایـن محـدوده داشـته باشـد. مشاهده می‌شود که پوشش‌های اعمـالی انعکـاس قابـل‌قبـولی دارند (بیش تر از ۴۰ درصد).

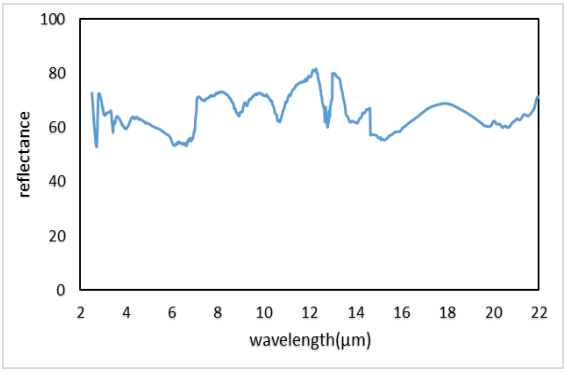


شکل ۱: منحنی انعکاس پوشش کامپوزیتی حاوی ۲۰ درصد وزنی آلومینیوم ورقه‌ای با ضخامت µm ۲۰.



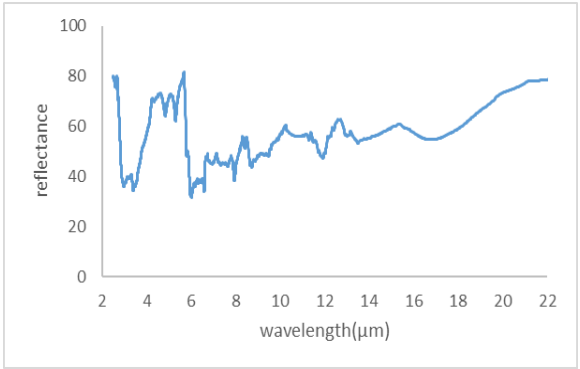
شکل ۲: منحنی انعکاس پوشش کامپوزیتی حاوی ۲۰ درصد وزنی آلومینیوم ورقه‌ای با ضخامت µm ۴۰.

این پوشش با ضخامت µm ۴۰ بر روی زیرلایه اعمال گردیـد که منحنی انعکاس آن درشکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: منحنی انعکاس پوشش کامپوزیتی حاوی ۴۰ درصد وزنی آلومینیوم ورقه‌ای با ضخامت µm ۴۰.

این پوشش به ضخامت µm ۴۰ بر زیرلایه اعمـال گردیـد کـه منحنی انعکاس آن در شکل ۴ مشخص است.



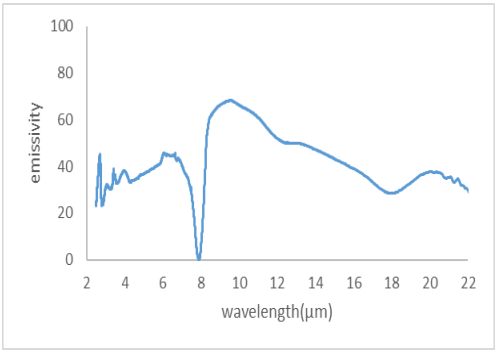
شکل ٤. منحنی انعکاس پوشش کامپوزیتی حاوی ۴۰ درصد وزنی مس کروی با ضخامت µm ۴۰.

بر اساس رابطه کیرشهف، با صرف‌نظر کردن از ضریب جذب سطح، انتشار با انعکاس(R) به صورت زیر در ارتباط است:

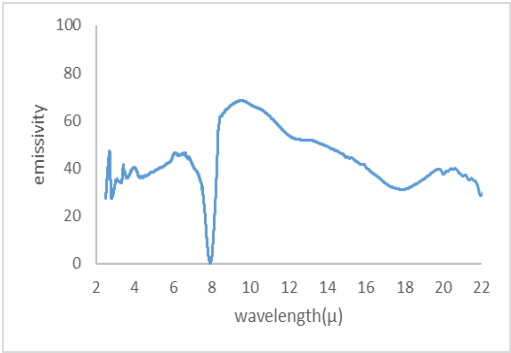
$$\varepsilon = 1 - R \qquad (1)$$

با اعمال رابطه بالا در مورد انعکاس های بدست آمده از منحنی‌های مربوط به هر پوشش، منحنی‌های انتشار مربوط به پوشش‌ها بدست آمد.

این پوشش با دو ضخامت ۲۰ و ۴۰ µm بر روی سطح اعمال گردید. شکل ۵ و شکل ۶ انتشار حاصل از این پوشش‌ها را نشان می‌دهد.

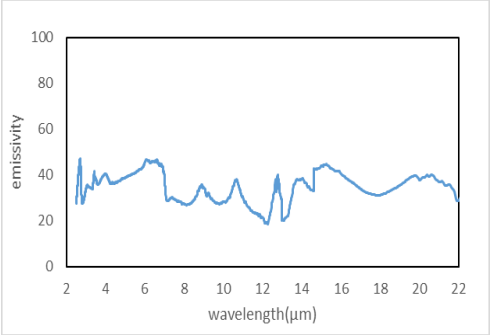


شکل ٥: منحنی انتشار پوشش کامپوزیتی حاوی ۲۰ درصد آلومینیوم ورقه‌ای (ضخامت ۲۰ µm).



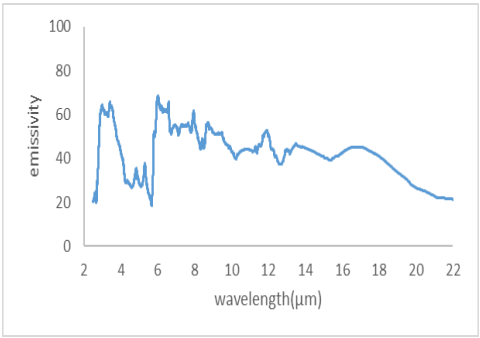
شکل ٦: منحنی انتشار پوشش کامپوزیتی حاوی ۲۰ درصد آلومینیوم ورقه‌ای (ضخامت ٤٠ µm).

پوشش حاوی پیگمنت آلومینیومی ورقه‌ای با مقدار پیگمنت ۴۰ درصد و ضخامت ۴۰ µm مورد بررسی قرار گرفت که منحنی انتشار آن در شکل ۷ مشخص است. منحنی نشان می‌دهد که مقادیر انتشار مادون قرمز در این پوشش به صورت بسیار مناسبی پایین است. این امر نشان می‌دهد که این پوشش می‌تواند پنهان‌کاری خوبی در برابر حسگر مادون قرمز از خود بروز دهد.



شکل ۷: منحنی انتشار پوشش کامپوزیتی حاوی ٤٠ درصد آلومینیوم ورقه‌ای با ضخامت ٤٠ µm.

انتشار مادون قرمز پوشش حاوی پیگمنت مس کروی با غلظت پیگنت ۴۰ درصد از طریق تبدیل انعکاس به وسیله رابطه کیرشهف بدست آمده و توسط نرم‌افزار اکسل رسم گردید. شکل ۸ منحنی چگونگی تغییر انتشار مادون قرمز این پوشش را نشان می‌دهد.



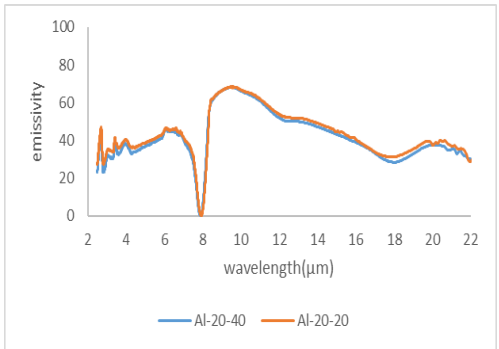
شکل ۸: منحنی انتشار پوشش کامپوزیتی حاوی ٤٠ درصد مس کروی (ضخامت ٤٠ µm).

به منظور مقایسه بهتر میانگین انتشار حرارتی پوشش‌های مختلف در محدوده‌های مختلف در جدول ۴ به اختصار بیان شده است. اعداد بدست آمده نشان می‌دهند که تمامی پوشش‌ها مقدار انتشار مناسبی (کمتر از ۰/۶) از خود نشان داده‌اند. اگرچه مقدار انتشار در پوشش‌های با شرایط مختلف متفاوت است.

جدول ٤: میانگین انتشار حرارتی پوشش‌های مختلف.

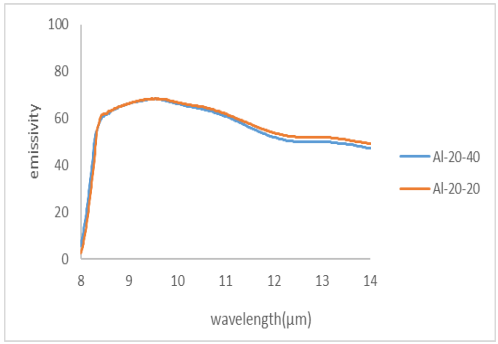
نوع پوشش	انتشار در محدوده ۲-۲۲ µm	انتشار در محدوده ۸-۱۴ µm
Al-20-20	40/22	57/29
Al-20-40	37/97	56/95
Al-40-40	35/92	29/15
Cu-40-40	44/82	46/78

به منظور بررسی نحوه تغییر انتشار حرارتی در اثر تغییر ضخامت پوشش، پوشش کامپوزیتی حاوی پیگمنت‌های ورقه‌ای آلومینیومی با دو ضخامت مختلف ۲۰ و ۴۰ µm بر روی زیرلایه اعمال و انتشار مادون قرمز آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل و شکل ۱۰ نحوه تغییر انتشار این دو پوشش را به ترتیب در کل محدوده آزمون و نیز محدوده ۸-۱۴ µm نشان می‌دهد. همچنین جدول ۴ نیز مقدار میانگین انتشار مادون قرمز را در شرایط مذکور نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار انتشار مادون قرمز با افزایش ضخامت پوشش کاهش یافته است. اگرچه این کاهش انتشار در اثر افزایش ضخامت پوشش توسط پژوهش گران قبلی نیز اثبات گردیده بود، لذا کاهش انتشار چندان قابل توجه نبوده است به‌طوری‌که با افزایش ضخامت پوشش از ۲۰ به ۴۰ µm، مقدار انتشار مادون قرمز از ۴۰/۲۲ درصد به ۳۷/۹۷ درصد رسیده است.



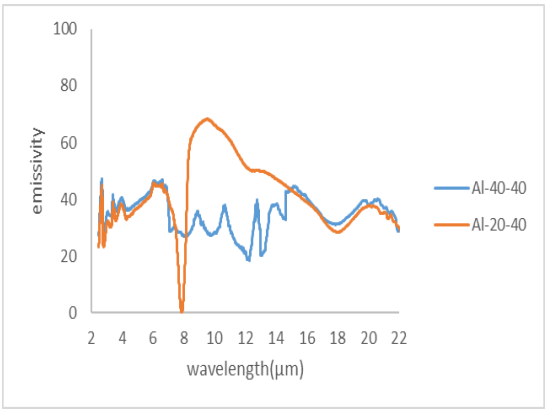
شکل ۹: انتشار مادون قرمز پوشش‌های حاوی پیگمنت آلومینیومی با در محدوده ۲-۲۲ µm.

به منظور بررسی نحوه تغییر انتشار حرارتی در اثر تغییر غلظت پیگمنت موجود در پوشش، پوشش کامپوزیتی حاوی

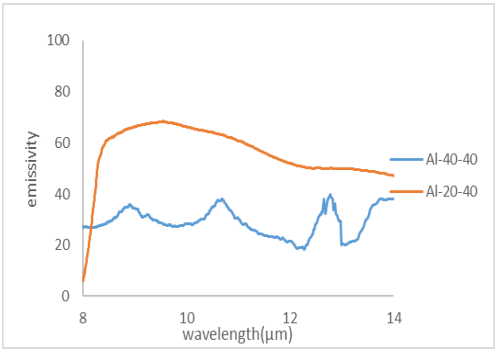


شکل ۱۰: انتشار مادون قرمز پوشش‌های حاوی پیگمنت آلومینیومی در محدوده ۸-۱٤ µm.

پیگمنت‌های ورقه‌ای آلومینیومی با دو غلظت ۲۰ و ۴۰ درصدوزنی (با ضخامت ۴۰ µm) بر روی زیرلایه اعمال و انتشار مادون قرمز آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۱۱ و ۱۲ نحوه تغییر انتشار این دو پوشش را به ترتیب در کل محدوده آزمون و نیز محدوده ۸-۱۴ µm نشان می‌دهد. همچنین جدول ۵ مقدار میانگین انتشار مادون قرمز این پوشش‌ها را در دو محدوده طول موج مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌دانیم، افزایش در مقدار پیگمنت منجر به افزایش مقدار ذرات پیگمنت درون رزین شده که نتیجه آن نزدیک‌تر شدن ذرات به هم است. این امر منجر به افزایش هدایت الکتریکی پوشش می‌شود، که نتیجه آن افزایش ضریب شکست و انعکاس می‌باشد. این امر نشان می‌دهد که با افزایش غلظت پیگمنت انتشار مادون قرمز کاهش یافته است.

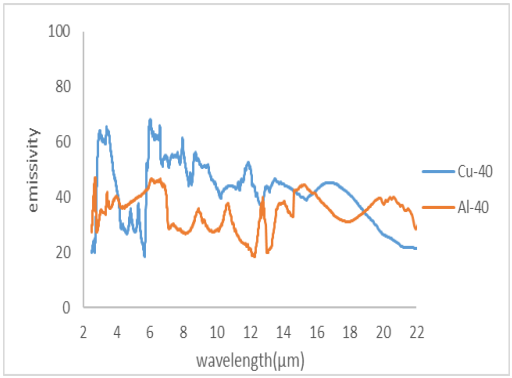


شکل ۱۱: انتشار مادون قرمز پوشش‌های حاوی پیگمنت آلومینیومی با غلظت‌های مختلف پیگمنت (محدوده ۲-۲۲ µm).



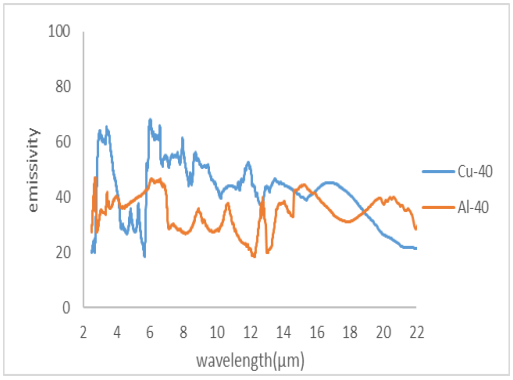
شکل ۱۲: انتشار مادون قرمز پوشش‌های حاوی پیگمنت آلومینیومی با غلظت‌های مختلف پیگمنت (محدوده μm ۱۲-۸).

به منظور بررسی نحوه تغییر انتشار حرارتی در اثر تغییر نوع پیگمنت موجود در پوشش، پوشش کامپوزیتی با دونوع پیگمنت آلومینیوم ورقه‌ای و مس کروی در ضخامت و غلظت پیگمنت یکسان بر روی زیرلایه اعمال و انتشار مادون قرمز آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

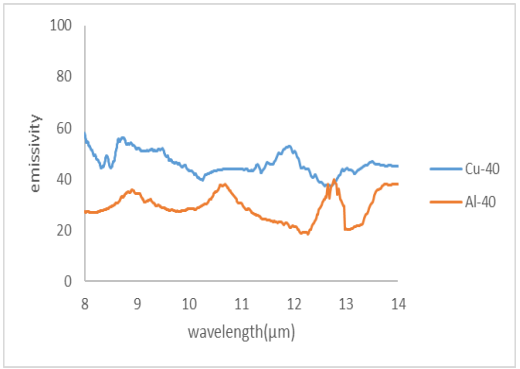


شکل ۱۳ و شکل ۱۴ به ترتیب نحوه تغییر انتشار این دو پوشش را در کل محدوده آزمون و نیز محدوده μm ۱۴-۸ نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۵ میانگین انتشار این پوشش‌ها در دو محدوده مختلف آمده است.

نتایج نشان می‌دهد که انتشار در پوشش حاوی پیگمنت ورقه‌ای آلومینیومی به وضوح کمتر از انتشار پوشش حاوی پیگمنت مس کروی می‌باشد. از آن‌جایی که به صورت طبیعی انعکاس و در نتیجه انتشار مادون قرمز پیگمنت‌های آلومینیومی و مسی تقریبا به هم نزدیک است، این اختلاف قطعا ناشی از شکل پیگمنت‌های مورد استفاده در پوشش‌هاست. لذا همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد پوشش حاوی پیگمنت ورقه‌ای به وضوح انتشار مادون قرمز کمتری را از خود نشان داده و در نتیجه برای کاربردهای پنهان کار در برابر مادون قرمز مناسب‌تر به نظر می‌رسد. پژوهش‌گران قبلی نیز تایید کرده‌اند که استفاده از پیگمنت‌های ورقه‌ای شکل انتشار مادون قرمز کمتری را نسبت به سایر اشکال پیگمنت نظیر کروی یا مکعبی در پی خواهد داشت [۱۳].



شکل ۱۳: انتشار مادون قرمز پوشش‌های کامپوزیتی حاوی پیگمنت‌های آلومینیومی و مسی (محدوده μm ۲۲-۲).



شکل ١٤: انتشار مادون قرمز پوشش‌های کامپوزیتی حاوی پیگمنت‌های آلومینیومی و مسی (محدوده μm ۱٤-۸).

جدول۵: میانگین انتشار مادون قرمز پوشش‌های کامپوزیتی با دو نوع پیگمنت مختلف.

نوع پوشش	انتشار در محدوده ۲۲-۲ μm	انتشار در محدوده ۱۴-۸ μm
Al-20-40	37/97	56/95
Al-40-40	35/95	29/15

در این پژوهش پوشش‌های کامپوزیتی حاوی پیگمنت‌های فلزی با انتشار مادون قرمز کم، همراه با رزین اپوکسی بر

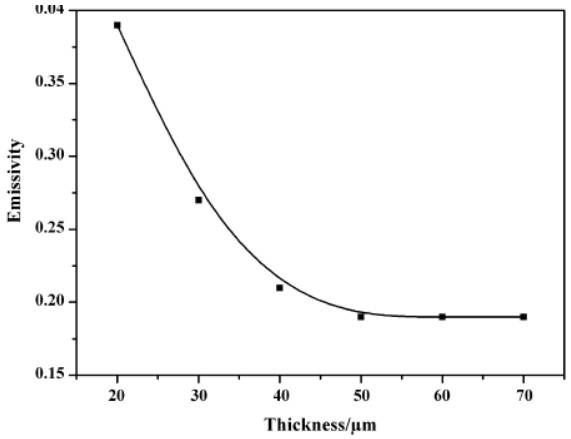
زیرلایه‌هایی از جنس فولاد و نیز شیشه اعمال گردید. عمده نتایج بدست آمده در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

اعمال پوشش‌های کامپوزیتی چنان‌که اشاره شد می‌تواند یک لایه با خاصیت انتشار حرارتی کم و در نتیجه پنهان‌کار در محدوده مادون قرمز ایجاد کند.

نتایج بدست آمده از پوشش‌های مختلف در پژوهش حاضر به صورت خلاصه آمده است. اعداد و ارقام بدست آمده نشان می‌دهند که تمامی پوشش‌های اعمالی در محدوده انتشار مادون قرمز مناسب برای پنهان‌کار بودن (انتشار حرارتی کمتر از ۶۰ درصد) قرار می‌گیرند. اما همان‌طور که مشخص است میزان پنهان‌کاری پوشش‌ها با توجه به مقدار میانگین انتشار حرارتی بدست آمده برای هر پوشش متفاوت است. پوشش حاوی ۴۰ درصد وزنی پیگمنت‌های ورقه‌ای شکل آلومینیوم که با ضخامت ۴۰ µm اعمال شده، کمترین مقدار انتشار مادون قرمز را از خود نشان داد. این امر نشان می‌دهد پوششی با این شرایط بهترین عملکرد پنهان‌کاری در محدوده مادون قرمز را خواهد داشت.

یکی از پارامترهای متغیر در این پژوهش ضخامت پوشش کامپوزیتی اعمالی بود. پوششی با مقدار پیگمنت یکسان را در دو ضخامت مختلف اعمال کرده و میزان انتشار حرارتی آن‌را مورد مطالعه قرار دادیم. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که با افزایش ضخامت پوشش، انتشار حرارتی کاهش یافت (شکل ۱۵)

نحوه تغییر انتشار مادون قرمز پوشش کامپوزیتی با تغییر ضخامت پوشش در شکل ۱۵ دیده می‌شود [۱۴].



شکل ۱۵: نحوه تغییر انتشار حرارتی با تغییر در ضخامت پوشش حاوی پیگمنت آلومینیوم ورقه‌ای(۱٤).

این امر نشان می‌دهد که:

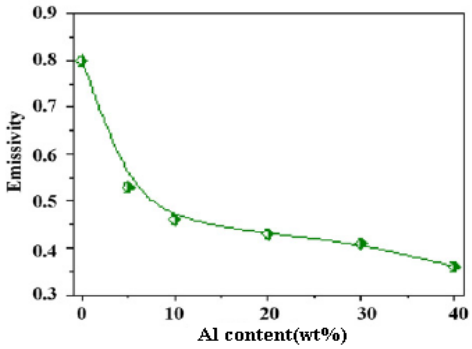
افزایش ضخامت در این پوشش می‌تواند یکی از راه‌های کاهش انتشار مادون قرمز و در نتیجه افزایش میزان پنهان کاری باشد.

دیگر پارامتر متغیر در این مطالعه تغییر غلظت پیگمنت موجود در پوشش بود. پوشش‌هایی حاوی پیگمنت‌هایی از یک جنس و با ضخامت یکسان، با دو درصد وزنی مختلف پیگمنت بر روی زیرلایه‌ها اعمال گردید. نتایج بدست آمده در جدول ۶ مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش غلظت پیگمنت، انتشار مادون قرمز پوشش کاهش می‌یابد. مشاهده می‌شود در ضخامت یکسان با افزایش غلظت پیگمنت از ۲۰ درصد وزنی به ۴۰ درصد وزنی، مقدار انتشار حرارتی در محدوده ۱۴-۸ µm از ۵۶/۹۵ به ۲۹/۱۵ درصد می‌رسد. این امر نشان می‌دهد که افزایش غلظت پیگمنت تاثیر بسیار زیادی در کاهش انتشار مادون قرمز و در نتیجه بهبود عملکرد پنهان‌کاری پوشش کامپوزیتی اعمال شده خواهد داشت.

جدول ٦: نحوه تغییر انتشار مادون قرمز در اثر افزایش غلظت پیگمنت پوشش.

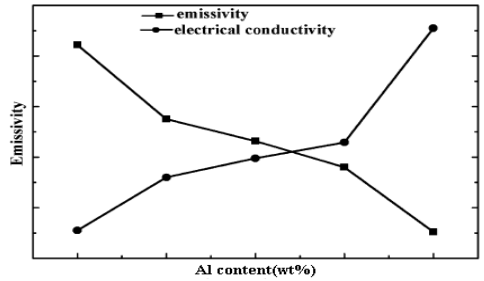
نوع پوشش	انتشار در محدوده ۲۲-۲ µm	انتشار در محدوده ۱۴-۸ µm
Al-20-40	37/97	56/95
Al-40-40	35/92	29/15

نحوه کلی تغییر انتشار مادون قرمز با تغییر غلظت پیگمنت موجود در پوشش کامپوزیتی در شکل نشان داده شده است.



شکل ۱۶: نحوه تغییر انتشار مادون قرمز با تغییر در غلظت پیگمنت آلومینیوم ورقه‌ای در پوشش(۱۴).

افزایش در مقدار پیگمنت منجر به افزایش مقدار ذرات پیگمنت درون رزین شده که نتیجه آن نزدیک‌تر شدن ذرات پیگمنت به هم بوده که منجر به افزایش هدایت الکتریکی پوشش می‌شود. مشخص گردیده که افزایش هدایت الکتریکی پوشش‌های کامپوزیتی منجر به کاهش انتشار مادون قرمز خواهد شد. رابطه بین این سه پارامتر در شکل ۱۷ دیده می‌شود.



شکل ۱۷: رابطه بین مقدار پیگمنت، هدایت الکتریکی و انتشار مادون قرمز پوشش کامپوزیتی حاوی پیگمنت آلومینیوم ورقه‌ای(۱۴).

در نتیجه می‌توان گفت:

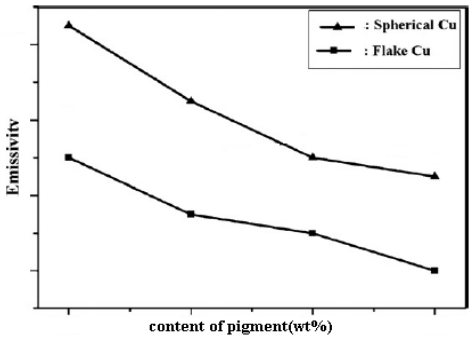
با افزایش غلظت پیگمنت در پوشش کامپوزیتی، مقدار انتشار مادون قرمز کاهش یافته و در نتیجه عملکرد پنهان کاری در محدوده مادون قرمز بهبود می‌یابد.

یکی دیگر از فاکتورهای تاثیرگذار بر روی انتشار مادون قرمز پوشش‌های کامپوزیتی شکل پیگمنت مورد استفاده در پوشش می‌باشد. در این پژوهش دو نوع پیگمنت کروی و ورقه‌ای مورد استفاده قرار گرفتند که نتایج حاصل از آن‌ها در جدول ۷ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پیگمنت ورقه‌ای باعث کاهش انتشار حرارتی پوشش کامپوزیتی شده است

جدول۷: نحوه تغییر انتشار مادون قرمز در اثر تغییر نوع پیگمنت پوشش.

نوع پوشش	انتشار در محدوده ۲-۲۲ µm	انتشار در محدوده ۸-۱۴ µm
Al-40-40	35/92	29/15
Cu-40-40	44/82	46/78

به صورت کلی تاثیر شکل پیگمنت بر روی انتشار مادون قرمز در شکل ۱۸ نشان داده شده است. از تصویر می‌توان دید که شکل پیگمنت فلزی تاثیر بسیار زیادی بر کاهش انتشار مادون قرمز دارد. مشاهده می‌شود که استفاده از پیگمنت‌های ورقه‌ای نسبت به پیگمنت‌های کروی بسیار موثرتر خواهد بود [۱۵].



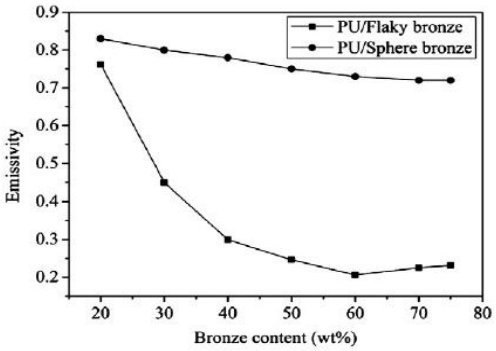
شکل ۱۸: نحوه تاثیر شکل پیگمنت در مقدار انتشار مادون قرمز پوشش‌های کامپوزیتی(۱۵).

بنابراین می‌توان گفت:

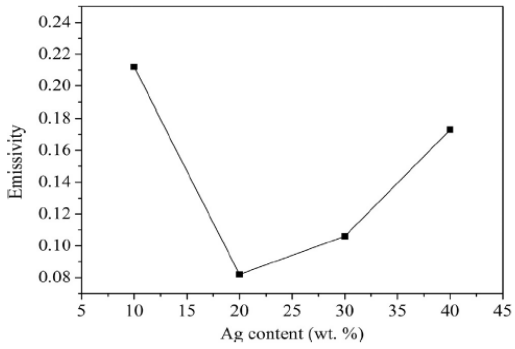
استفاده از پیگمنت‌های ورقه‌ای شکل در پوشش‌های کامپوزیتی باعث کاهش انتشار مادون قرمز و در نتیجه بهبود عملکرد پنهان‌کاری پوشش خواهد شد.

در پژوهش حاضر از دو نوع پیگمنت آلومینیوم ورقه‌ای و مس کروی برای ایجاد پوشش‌های کامپوزیتی استفاده گردید. نتایج نشان داد که هر دو پیگمنت انتشار حرارتی کم

و درنتیجه عملکرد پنهان‌کاری خوبی را از خود نشان می‌دهند. به صورت ویژه پوشش حاوی پیگمنت آلومینیوم ورقه‌ای با شرایط بهینه نتایج بسیار خوب و قابل قبولی را از خود نشان داد. سایر پژوهش‌گران نشان داده‌اند که استفاده از پوشش‌های کامپوزیتی حاوی پیگمنت‌های فلزی ورقه‌ای شکلی نظیر برنز یا نقره نیز می‌تواند نتایج خیلی خوبی را در پی داشته باشد [۱۶]. همان‌طور که در شکل ۱۹ و ۲۰ دیده می‌شود [۱۷]، به ترتیب پیگمنت‌های ورقه‌ای برنز و نقره میزان انتشار مادون بسیار پایینی را از خود نشان می‌دهد.



شکل ۱۹: عملکرد پوشش کامپوزیتی حاوی پیگمنت فلزی برنز ورقه‌ای و کروی(۱۷).



شکل ۲۰: عملکرد پوشش کامپوزیتی حاوی پیگمنت فلزی نقره ورقه‌ای [۱۷].

بنابراین در صورت در دسترس بودن این دو نوع پیگمنت می‌توان مطالعات بعدی را بر روی خواص پوشش‌های حاصل از آن‌ها به همراه رزین اپوکسی متمرکز ساخت.

یکی از فاکتورهای تاثیرگذار بر روی انتشار مادون قرمز و در نتیجه میزان پنهان‌کاری یک پوشش کامپوزیتی، زبری سطحی نهایی حاصل از پوشش می‌باشد. نشان داده شده که پوشش با زبری کمتر (صافی بیش‌تر)، میزان انتشار مادون قرمز کمتری را در پی خواهد داشت. این مطلب در جدول ۸ دیده می‌شود [۱۸].

جدول۸: نحوه تاثیر زبری سطحی بر مقدار انتشار مادون قرمز پوشش کامپوزیتی.

Sample	Roughness (μm)	Emissivity
1	0/92	0/14
2	1/01	0/15
3	1/23	0/18
4	1/39	0/2

اما یکی از عوامل موثر بر زبری سطحی روش اعمال پوشش خواهد بود. به عنوان مثال در جدول ۹ تفاوت انتشار مادون قرمز حاصل از دو روش اعمال پوشش مختلف را که ناشی از اختلاف در زبری سطحی حاصل از آن‌هاست، دیده می‌شود. همان‌طور که در تصویر دیده می‌شود، پوشش اعمال شده به روش کندوپاش زبری سطح کمتری خواهد داشت که نتیجه آن کاهش انتشار مادون قرمز است.

جدول ۹: نحوه تغییر انتشار مادون قرمز در اثر تغییر روش اعمال پوشش [۷]

Sample	Painitng method	Roughness(μm)	Infrared emissivity
PU/50%Cu	Doctor blade	1/9	0/15
	Sputtering	1	0/1

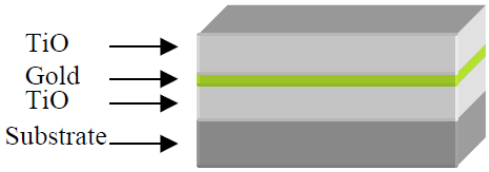
در مطالعات پیشین نشان داده شده که انجام فرآیند پخت پس از اعمال پوشش، می‌تواند در کاهش انتشار مادون قرمز پوشش موثر باشد. این موضوع در جدول ۱۰که مربوط به پوشش کامپوزیتی حاوی پیگمنت ورقه‌ای آلومینیوم است به وضوح قابل مشاهده است.

جدول۱۰: نحوه تغییر انتشار مادون قرمز در اثر اعمال فرآیند پخت بر پوشش.

Sample	Emissivity	
	Without Cured	With Cured
40% Al	0.41	0.15

یکی از راه‌های ایجاد یک پوشش با انتشار مادون قرمز کم، ایجاد پیگمنت‌ها چند لایه است. به عنوان مثال، پژوهش‌گران نشان دادند با ایجاد یک ساختار سه لایه به وسیله طلا و دی

اکسید تیتانیوم (شکل)، می‌توان به یک پوشش با خواص پنهان‌کاری مناسب دست یافت [۱۹].

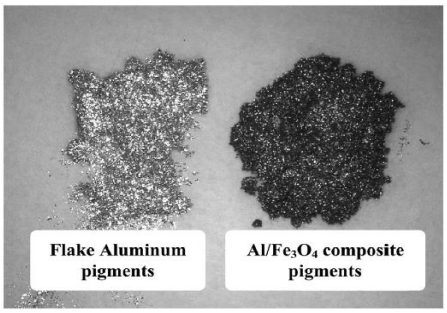


شکل ۲۱: شماتیک ساختار یک پیگمنت سه لایه مورد استفاده در پوشش کامپوزیتی.

نتایج نشان داد که این ترکیب از مواد، انعکاس بالا و در نتیجه انتشار مادون قرمز کمی از خود نشان دادند. بنابراین یکی دیگر از پیشنهادات به منظور ایجاد پوششی با انتشار کم مادون قرمز استفاده از پیگمنت‌هایی با ساختار ۳ یا چند لایه درون پوشش کامپوزیتی است.

عملیات پوشاندن یک روش مهم اصلاح‌سازی سطح است. اگر لایه پوسته با ضخامتی مشخص به صورت یکنواخت سطح هسته را بپوشاند، امکان ایجاد ماده هسته/پوسته که همزمان دارای خواص مواد هسته و پوسته است، ایجاد می‌شود.

در چندین سال گذشته، محققین زیادی بر روی افزایش خواص خوردگی و بدست آوردن خواص نوری، الکتریکی و مغناطیسی پیگمنت‌های فلزی توسط عملیات پوشاندن تمرکز کرده‌اند. تعداد کمی گزارش نیز در زمینه پیگمنت‌های با انتشار کم که دارای وزن کم هستند، وجود دارد. یوان [۲۰] پیگمنت کامپوزیتی شامل Cr_2O_3 اعمال شده بر روی سطح آلومینیوم ورقه‌ای را گزارش کرد و نشان داد که پوشش ایجاد شده علاوه بر انتشار مادون قرمز کمی که دارد، وزن بسیار سبکی نیز خواهد داشت [۱۶]. طی پژوهشی دیگر پیگمنت کامپوزیتی مغناطیسی آلومینیوم/مگنتیت به روش سولوترمال و به منظور ایجاد پوششی با انتشار مادون قرمز کم و سبک، اعمال گردید. در شکل ۲۲، تصویر پودر آلومینیوم ورقه‌ای قبل و بعد از عملیات پوشاندن قابل مشاهده است. در ادامه مشخص گردید که چنین پوششی دارای انتشار مادون قرمز کم و همزمان وزن سبک می‌باشد.



شکل ۲۲: تصویر پودر آلومینیوم ورقه‌ای قبل و بعد از عملیات پوشاندن.

محققین همچنین نشان دادند می‌توان پیگمنت‌های هسته/پوسته چندلایه‌ای با خواص انتشار کم مادون قرمز ایجاد کرد [۱۰]. پیگمنت چندلایه‌ای پلی اورتان/تیتانیا/سیلیکا به وسیله رسوب TiO_2 بر روی سطح SiO_2 و متعاقب آن پیوند دادن پلیمری بدست آمد. ذرات TiO_2/SiO_2 از ذرات SiO_2 تنها انتشار مادون قرمز کمتری را نشان داد که دلیل آن برهمکنش‌های سطحی بیان گردید (جدول ۱۱). علاوه بر این، کریستال‌های TiO_2 خواص انتشار مادون قرمز کامپوزیت را تحت تاثیر قرار دادند. همان‌طور که در جدول ۱۱ مشخص است با افزایش لایه‌های پیگمنت، انتشار مادون قرمز پوشش کاهش یافته است. بنابراین یکی دیگر از پیشنهادات برای کاهش انتشار مادون قرمز پوشش‌های کامپوزیتی و در نتیجه بهبود عملکرد پنهان‌کنندگی آن‌ها، انجام عملیات پوشاندن بر روی پیگمنت‌ها و در پی آن استفاده از پیگمنت‌های هسته-پوسته یک یا چند لایه در پوشش است.

جدول ۱۱: تاثیر افزایش لایه‌های پیگمنت در انتشار مادون قرمز پوشش [۱۰].

Samples	Infrared emissivity($\varepsilon_{\pi R}$ at 8-14 μm)
SiO_2	0.782
TiO_2 (amorphous)/SiO_2	0.721
TiO_2 (anatase)/SiO_2	0.685
LPU/TiO_2/SiO_2	0.553

٤- نتیجه‌گیری

یکی از پیشنهادات موثر در راه کاهش انتشار حرارتی پوشش‌های کامپوزیتی، اعمال فرآیند پخت در دمای مناسب خواهد بود. عوامل متعددی در تغییر انتشار مادون قرمز یک پوشش موثرند. در پژوهش حاضر تاثیر چند پارامتر نظیر غلظت و ضخامت پیگمنت بررسی گردید. اگرچه انتشار مادون قرمز پوشش عمدتا به خواص پیگمنت مورد استفاده وابسته است، لذا خواص رزین نیز می‌تواند تا حدودی بر این خاصیت اثرگذار باشد. به عنوان مثال ویسکوزیته رزین می‌تواند منجر به اختلاف واضح در توزیع پیگمنت و نیز مورفولوژی نزدیک به سطح پوشش شود، که این امر به وضوح بر نشر مادون قرمز تاثیر می‌گذارد. بنابراین یکی دیگر از پیشنهادات موجود برای مطالعات بعدی می‌تواند بررسی نحوه تغییر انتشار مادون قرمز پوشش‌ها با تغییر در ویسکوزیته رزین مورد کاربرد باشد.

مراجع

[1] M. Zhou, W. Gu, G. Wang, J. Zheng, C. Pei, F. Fan, *Journal of Materials Chemistry A*, **46**, 2020, 24267.

[2] B. Shen, Y. Wang, L. Lu, H. Yang, *Ceramics International*, **47**, 2021, 18947.

[3] C. Hu, G. Xu, X. Shen, *Journal of alloys and compounds*, **486**, 2009, 371.

[4] Y.L. Xu AU, D. Estevez, Y. Luo, H.X. Peng, F.X., Qin, *Composites Science and Technology*, **189**, 2020, 273.

[5] H. Yuan, T. Li, Y. Wang, P. Ma, M. Du, T. Liu, *Composites Communications*, **22**, 2020, 157.

[6] S.P. Mahulikar, H.R. Sonawane, G.A. Rao, *Progress in Aerospace Sciences*, **43**, 2007, 247.

[7] H. Yu, G. Xu, X. Shen, X. Yan, C. Cheng, *Applied Surface Science*, **12**, 2009, 255.

[8] L. Yuan, X. Weng, L. Deng, *Infrared Physics & Technology*, **56**, 2013, 1.

[9] Z. Mao, W. Wang, Y. Liu, L. Zhang, H. Xu, Y. Zhong, *Thin solid films*, **558**, 2014, 288.

[10] H. Yu, G. Xu, X. Shen, X. Yan, C. Shao, C. Hu, *Progress in organic Coatings*, **66**, 2009, 83.

[11] H. Babrekar, S. Jejurikar, J. Jog, K. Adhi, S. Bhoraskar, *Applied Surface Science*, **257**, 2011, 95.

[12] H. Nagar, R.M.A. Majeed, V. Bhoraskar, S. Bhoraskar, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **266**, 2008, 781.

[13] S. Chen, L. Yuan, X. Weng, L. Deng, *Infrared Physics & Technology*, **377**, 2014, 67.

[14] G. Wu, D. Yu, *Progress in Organic Coatings*, **76**, 2013, 12.

[15] H.A. Babrekar, N.V. Kulkarni, J.P. Jog, V.L. Mathe, S.V. Bhoraskar, *Materials Science and Engineering: B.*, **168**, 2010, 4.

[16] P.K. Biswas, A. De, N. Pramanik, P. Chakraborty, K. Ortner, V. Hock, *Materials letters*, **57**, 2003, 32.

[17] W. Zhang, G. Xu, R. Ding, J. Qiao, K. Duan, *Physica B: Condensed Matter*, **36**, 2013, 9.

[18] C.D. Wen, I. Mudawar, *International journal of heat and mass transfer*, **49**, 2006, 89.

[19] C. Hu, G. Xu, X. Shen, C. Shao, X. Yan, *Applied surface science*, **11**, 2010, 63.

[20] L. Yuan, X. Weng, L. Deng, *Chinese Optics Letters*, **11**, 2013, 173.