

بررسی خواص مکانیکی و خواص گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات مکسین

محمد حسین کریمی*، امید معینی جزینی*

دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

چکیده ...

این پژوهش به بررسی نانومکسین‌ها به‌عنوان پرکننده‌های دوبعدی در رزین‌های اپوکسی می‌پردازد و پتانسیل آن‌ها را برای افزایش عملکرد این مواد گرماسخت برجسته می‌کند. اپوکسی و مکسین‌ها دو نوع مواد شیمیایی هستند که در صنایع مختلف به‌ویژه در ساخت‌وساز و تولید محصولات صنعتی کاربرد فراوانی دارند. رزین‌های اپوکسی به‌دلیل خواص مکانیکی عالی، انقباض کم در طول پخت و مقاومت حرارتی و شیمیایی خوب، کاملاً شناخته شده‌اند و آن‌ها را برای کاربردهای مهندسی پیشرفته پیشنهاد می‌کنند. با این حال، شکنندگی ذاتی و هدایت حرارتی و الکتریکی ضعیف آن‌ها چالش‌هایی را ایجاد می‌کند. نانومکسین، خانواده نوظهوری از مواد دوبعدی است که با رسانایی الکتریکی بالا، فعالیت الکتروشیمیایی و زیست‌سازگاری مشخص می‌شود. بنابراین راه‌حل امیدوارکننده‌ای را ارائه می‌دهد. این پژوهش به پیشرفت‌های اخیر در استفاده از نانومکسین‌ها، برای بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی رزین‌های اپوکسی و کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف آن‌ها می‌پردازد. کاربردهای این مواد پیشرفته بر نقش مهم مکسین‌ها در بهینه‌سازی عملکرد رزین‌های اپوکسی تأکید می‌کند و راه را برای کاربردهای نوآورانه آن در صنایع مختلف، به‌ویژه در ساخت‌وساز و تولید محصولات صنعتی هموار می‌کند. توسعه مستمر نانومکسین‌ها، مرز هیجان‌انگیز در علم مواد را نشان می‌دهد که با پتانسیل زیاد این مواد، ایجاد انقلابی در خواص و کاربردهای نانوکامپوزیت‌های اپوکسی می‌شود. در این پژوهش به روش‌های سنتز، خواص مکانیکی، خواص گرمایی و پیشرفت‌های اخیر در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با نانومکسین پرداخته می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

نانومکسین،
رزین اپوکسی،
سنتز، خواص مکانیکی،
خواص گرمایی

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

karami.polymerpostdoc@gmail.com, o.moini@eng.ui.ac.ir

۱ مقدمه

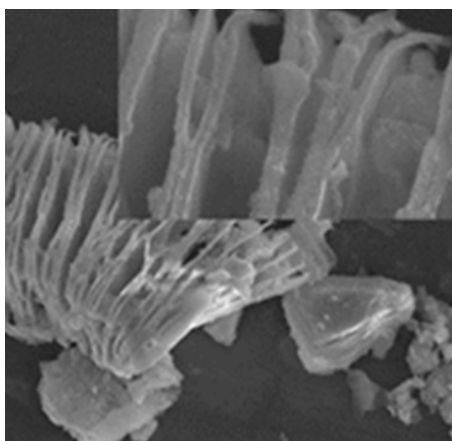
رزین‌های اپوکسی به‌عنوان بخشی از خانواده گرماسخت، اجزای مناسبی برای کاربردهای مهندسی پیشرفته هستند، زیرا خواص مکانیکی فوق‌العاده و جمع‌شدگی کم در طول پخت، تنش‌های پسماند کم و حرارتی و شیمیایی خوب از خود نشان می‌دهند [۱،۲]. آن‌ها همچنین به‌عنوان ماتریس بسیاری از پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف استفاده می‌شوند. رزین‌های اپوکسی معمولاً از دو جزء تشکیل شده‌اند. پیش‌پلیمر با وزن مولکولی کم با دو یا چند گروه اپوکسید و سخت‌کننده یا اتصال‌دهنده عرضی که می‌تواند آمین باشد یا به‌صورت ترکیب انیدرید یا کاتالیزگر باشد. رزین‌های اپوکسی طیف گسترده‌ای از ترکیبات را ارائه می‌دهند که برای تعداد زیادی از کاربردها از جمله چسب‌ها، پوشش‌ها و مواد کامپوزیت مناسب هستند [۳]. با این وجود، علاقه زیادی به بهبود عملکرد رزین‌های اپوکسی وجود دارد تا خواص جالب دیگری به آن‌ها بدهد. مانند بسیاری از پلیمرها، رزین‌های اپوکسی از نظر الکتریکی نارسا هستند و هدایت گرمایی آن‌ها نیز ضعیف است [۴]. خواص مکانیکی خوب آن‌ها ناشی از شبکه بسیار متقابل است، اما به همین دلیل است که رزین‌های اپوکسی موادی شکننده با چقرمگی شکست متوسط در مقایسه با سایر پلیمرها هستند. تلاش‌های زیادی برای غلبه بر این اشکالات صورت گرفته است [۵]. مخلوط با گرمانرم‌ها یا الاستومرها چقرمگی را بهبود می‌بخشد و ذرات غیرآلی مانند نانورس یا سیلیس استفاده شده است. در حال حاضر، افزودن نانوذرات پتانسیل زیادی را نشان می‌دهد زیرا نسبت سطح به حجم بالای آن‌ها جنبه‌های سطحی را افزایش می‌دهد و بنابراین نیاز به بارگذاری کم دارد. نانومواد دوبعدی به دلیل ویژگی‌های فوق‌العاده‌ای که از نسبت تصویر بالا و ویژگی‌های خاص آن‌ها به دست می‌آیند، اکنون بسیار محبوب هستند. اپوکسی و مکسین‌ها دو نوع مواد شیمیایی هستند که در صنایع مختلف به‌ویژه در ساخت‌وساز و تولید محصولات صنعتی کاربرد فراوانی دارند [۶]. اپوکسی‌ها به خاطر خواص چسبندگی و مقاومت بالا در برابر حرارت و مواد شیمیایی شناخته شده‌اند و معمولاً در تولید رنگ‌ها، پوشش‌ها و چسب‌ها استفاده می‌شوند. از سوی دیگر، مکسین‌ها به‌عنوان ترکیباتی با ویژگی‌های خاص در بهبود عملکرد مواد و افزایش دوام آن‌ها به کار می‌روند. این دو ماده به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردشان، نقش مهمی در بهینه‌سازی فرایندهای صنعتی و افزایش کیفیت محصولات ایفا می‌کنند. مکسین‌ها خانواده‌ای در حال تحول از مواد دوبعدی هستند که به‌طور خاص شامل کاربیدها، نیتریدها و کربن نیتریدهای فلزات واسطه می‌شوند و اولین بار در سال ۲۰۱۱

کشف شدند [۷]. این مواد از لایه‌های فلزات واسطه و کربن یا نیتروژن تشکیل شده‌اند و ساختاری مشابه گرافن دارند. بیش از ۳۰ نوع مختلف از مکسین‌ها سنتز و شناسایی شده‌اند که با فرمول‌های عمومی (M_4X_3 ، M_3X_2 ، M_2X) و گروه‌های انتهایی سطحی ($-OH$ ، O^- یا $-F$) مشخص می‌شوند. این مواد دارای خواص شگفت‌انگیزی هستند، از جمله هدایت الکتریکی بالا و فعالیت الکتروشیمیایی قابل‌توجه و آب‌دوستی که ایجاد تعلیق‌های آبی پایدار را تسهیل می‌کند [۸].

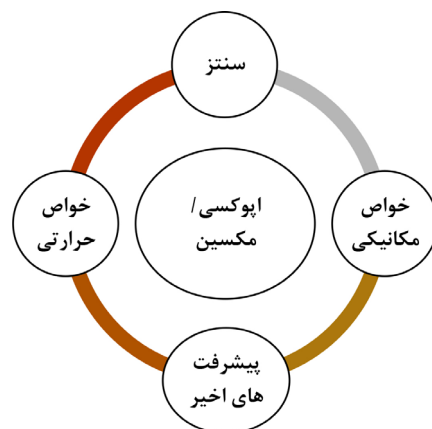
علاوه بر این، مکسین‌ها زیست‌سازگار هستند و خواص ضدباکتری دارند. ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن‌ها باعث می‌شود که برای کاربردهای مختلفی از جمله ذخیره‌سازی انرژی (باتری‌ها و ابرخازن‌ها)، بهبود محیط زیست (جذب آلاینده‌ها، جداسازی غشایی، شیرین‌سازی آب) و محافظت در برابر تداخل الکترومغناطیسی مناسب باشند [۹]. در نتیجه، مکسین‌ها دسته امیدوارکننده‌ای از مواد دوبعدی با خواص استثنایی هستند که امکان استفاده از آن‌ها در زمینه‌های مختلفی مانند ذخیره‌سازی انرژی، کاربردهای محیطی و غیره فراهم است [۱۰]. توسعه مداوم و قابلیت آن‌ها برای کاربردهای نوآورانه، آن‌ها را به حوزه‌ای هیجان‌انگیز در تحقیقات علم مواد تبدیل کرده است. در نتیجه، این بررسی آثار اخیر را در مورد استفاده از مکسین‌ها به‌عنوان نانوپرکننده‌های دوبعدی در رزین‌های اپوکسی ارائه می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مکسین‌ها خواص مکانیکی، گرمایی و الکتریکی رزین‌های اپوکسی و کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف آن‌ها را افزایش می‌دهد. کاربردها در کامپوزیت‌ها، مقاوم در برابر شعله، دستگاه‌های محافظ الکترومغناطیسی و پوشش‌های ضد خوردگی/مقاوم در برابر سایش گزارش شده است. برای افزایش استفاده واقعی از آن‌ها برخی از مشکلات مکسین‌ها باید برطرف شوند [۱۱]. در این پژوهش مهم‌ترین نکات در خصوص بررسی خواص و کاربردهای مهم نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانومکسین گزارش خواهد شد.

۲ روش سنتز نانومکسین

ساختارهای دوبعدی را می‌توان با جدا کردن ورق‌های مختلف روی هم که یک ترکیب را تشکیل می‌دهند، به دنبال روشی از بالا به پایین به دست آورد [۱۰]. این روش بر اساس تفاوت در استحکام پیوندها در داخل ورق‌ها و بین لایه‌های مجاور است. اگر پیوندهای بین لایه‌ها ضعیف باشد، که معمولاً است، با شکستن نیروهای بین‌لایه‌ای می‌توان ورق‌های دوبعدی را به‌دست آورد. مثال‌های متعدد این مفهوم را نشان می‌دهد [۱۱].



شکل ۲ مکسین اصلاح شده با محلول اسید [۱۴].



شکل ۱ خواص مهم در ارزیابی کاربردهای کامپوزیت های اپوکسی حاوی نانوذرات مکسین.

استفاده شده، لازم است اطمینان حاصل شود که ورق های $Mn+1X_n$ به اندازه کافی از چند لایه به دست آمده جدا شده اند، که معمولاً $Li+$ در آن ها وارد می شود و فضای بین لایه را افزایش می دهد (شکل ۲).

برای کامل کردن لایه برداری، چندین روش در دسترس است. فراصوت مستقیم یا هم زدن برای مدت طولانی روش های مناسبی هستند. فراصوت به جداسازی نانوصفحات در زمان کوتاه تر کمک می کند. گزینه دیگر این است که از حلالی استفاده شود که به جدایی بین ورق ها به وسیله میان افشانی کمک می کند. مانند دی متیل سولفوکسید (DMSO) یا هیدروکسید تترابوتیل آمونیوم (TBAOH) محلول های MXene را می توان به طور مستقیم یا با حذف حلال از طریق صافش یا خشک کردن انجام دادی استفاده کرد [۱۵]. فیلم هایی که با صافش خلأ یا پوشش دهی دورانی به دست می آیند، روش های رایج برای تهیه جاذب ها یا الکترودها هستند، اما برای رزین های اپوکسی مفید نیستند. در هر صورت، تعلیق های کلونیدی MX-ene باید به سرعت استفاده شوند یا تثبیت شوند تا از تجمع مجدد و اکسایش جلوگیری شود. حتی بیشتر به این دلیل که لایه M پس از حکاکی بیشتر در معرض دید قرار می گیرد و MXen های لایه لایه شده مستعد اکسایش در آب هستند و TiO_2 تولید می کنند. در شکل ۳، ساختارهای متفاوت مکسین نشان داده شده است [۱۶].

۳ روش سنتز کامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات مکسین

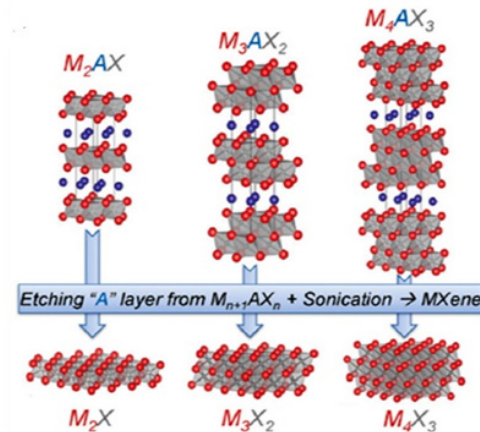
روش های فراوری نانوکامپوزیت های رزین اپوکسی با نانوصفحات مکسین، نقش اساسی در خواص نهایی مواد دارند. روش ساخت انتخاب شده به ترکیب پرکننده ها در نانومکسین ها

گرافن از گرافیت و ورقه های نیتريدبور شش ضلعی یا دی سولفید مولیبدن به دست می آید. به همین ترتیب، ورق های مکسین را می توان از فازهای ماکس به دست آورد. روش های پایین به بالا نیز برای سنتز مکسین ها با رسوب بخار شیمیایی با روش های الگو در دسترس هستند، اما تاکنون، روش های بالا به پایین معمول تر است.

روش بالا به پایین شامل دو مرحله، حکاکی (Etching) و لایه برداری است. فازهای MAX کاربیدها و نیتريد های سه تایی لایه ای با خواص فلزی و سرامیکی هستند. فازهای MAX همان طور که در بالا گفته شد دارای ساختار $Mn+1AX_n$ هستند. برای به دست آوردن صفحات MXene، اتم های لایه میانی "A" باید حذف شوند. متداول ترین فازهای MAX از Ti ، Al و C تشکیل شده اند که در آن ها آلومینیوم عنصری است که باید با حکاکی حذف شود. لایه حک شده با چندین گروه پایانی Tx جایگزین می شود که ممکن است $-O$ ، $-OH$ یا $-F$ باشد. بنابراین، این ماده از لایه های $Mn+1AX_n$ تشکیل شده است که توسط پیوندهای هیدروژنی یا دیگر برهم کنش های واندروالس به هم متصل شده اند. Ti_3AlC_2 تا حد زیادی پر استفاده ترین فاز MAX است که Ti_3C_2TX را تولید می کند، اما بسیاری دیگر نیز ممکن است برای به دست آوردن MXen های مختلف حکاکی شوند [۱۲]. به منظور حذف لایه A، محلول های اسید فلوریدر در ترجیح داده می شوند. محلول HF مستقیماً اضافه می شود [۱۵، ۲۱، ۲۲] یا به صورت پلیمری شدن از طریق واکنش اسید کلریدریک با نمک فلورید (LiF) [۲۳-۲۵] تشکیل می شود. فاز MAX در محلول های اسیدی هم زده می شود. غلظت، زمان واکنش و دما بر بازده و ساختار مکسین تأثیر می گذارند [۱۳].

پس از شستشو برای حذف لایه A حک شده و اسیدهای

می‌شود [۱۸]. برای انتخاب حلال، هم پراکندگی نانومکسین‌ها و هم حلالیت رزین اپوکسی در حلال در نظر گرفته می‌شود. همچنین حلال‌های آلی عمدتاً استون، DMF و کلروفرم نیز برای به‌دست آوردن پراکندگی‌های نانومکسین غیر اکسیدشده بسیار لایه‌لایه‌شده استفاده می‌شوند. این فرایند را می‌توان با هم زدن با برش بالا یا فراصوت تسریع کرد، اگرچه ممکن است بر ساختار نانوصفحات مکسین تأثیر بگذارد. حلال تحت خلأ یا فشار اتمسفر تبخیر می‌شود. بنابراین، باقی ماندن حلال در نانوکامپوزیت و ذخیره مجدد احتمالی نانوصفحات مکسین، می‌تواند باعث ایجاد اشکالاتی برای خواص خاص و متعاقب آن شود [۱۹]. روش اختلاط مکانیکی از استفاده از حلال با پراکندگی پرکننده‌ها در رزین با اعمال نیروهای برشی بالا جلوگیری می‌کند. به‌طور کلی، پرکننده‌ها به‌راحتی پراکنده نمی‌شوند و پدیده‌های انباشته‌شدن مجدد به‌عنوان یکی از معایب اصلی این روش است. پرکننده‌های با ساختار سه‌بعدی در رزین‌های اپوکسی منجر به حفظ ماتریس پلیمری بدون تخریب ساختارهای اصلی می‌شوند. قالب‌گیری نفوذی و اشباع به کمک خلأ به ترتیب با ریختن رزین مایع در ساختارها و تسریع در پرشدن رزین از خلأ، نفوذ رزین اپوکسی به ساختارهای ایجادشده را می‌دهد [۲۰]. در مقایسه با روش‌های اختلاط فیزیکی، شبکه سه‌بعدی از نانوپرکننده‌ها یا سازه‌های هم‌تراز خوب می‌تواند با انتخاب روش‌های مناسب فرایند، منجر به عدم حذف خواص مناسب شود [۲۱].



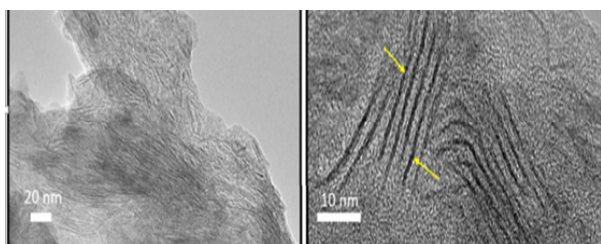
شکل ۳ ساختارهای متفاوت مکسین.

یا به عدم حضور افزودنی‌ها بستگی دارد. برای انتخاب بهترین روش باید تطبیق‌پذیری برای ترکیب پرکننده‌ها، سادگی، سهولت کنترل و آسانی برای رسیدن به توزیع همگن پرکننده‌ها در ماتریس پلیمری را در نظر گرفت. جدول ۱ مزایا و معایب روش‌های ساخت اصلی را خلاصه می‌کند [۱۷].

اختلاط فیزیکی به دو روش اختلاط به کمک حلال و اختلاط مکانیکی تقسیم می‌شود. اختلاط به کمک حلال روشی همه‌کاره و ساده برای ترکیب نانوصفحات مکسین و سایر مواد افزودنی در رزین‌های اپوکسی است. اول، پرکننده‌ها در حلال مناسب پراکنده می‌شود و سپس رزین اپوکسی مایع به مخلوط اضافه

جدول ۱ روش‌های ساخت نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات مکسین [۱۱-۵].

معایب	مزایا	روش سنتز
خطر آسیب به محیط زیست به دلیل استفاده از حلال آلی پراکنش نامناسب در غلظت‌های زیاد	پراکنش مناسب در رزین روش آسان	مخلوط کردن به کمک حلال
مقدار پرکننده زیاد، باعث عدم پراکنش مناسب می‌شود کاهش نسبت طول به قطر گرانروی زیاد	عدم استفاده از حلال پراکنش مناسب	اختلاط مکانیکی
اتلاف زمان ایراد محاسباتی	توانایی تولید زیاد و قطعات پیچیده حفظ شدن ساختار پرکننده	اشباع به روش خلا (Vacuum-Assisted Impregnation)
خواص مکانیکی نامرغوب	فرایند آسان - هزینه کم - کمترین ضایعات	قالب‌گیری نفوذی (Infiltration Molding)



شکل ۴ تصاویر آزمون میکروسکوپ الکترونی عبوری نمونه نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات مکسین [۲۸].

پراکندگی مناسب ذرات مکسین در ماتریس استفاده کردند. چن و همکاران (Chen et al)، با استفاده از ۵ درصد از نانومکسین در رزین اپوکسی، خواص مناسب را در مدول و سختی کامپوزیت مشاهده کردند [۲۶].

در پژوهشی دیگر، کامپوزیت اپوکسی ساخته شده حاوی پرکننده اصلاح شده نانومکسین با کربونیتريد (۱۰ تا ۹۰ درصد)، منجر به افزایش خواص مکانیکی شده است [۲۷].

با استفاده از تصاویر شکل ۴، پراکندگی پرکننده های نانومکسین در سراسر کامپوزیت پس از پخت فاصله بین ورق های نانومکسین از ۱۷-۲۳ Å متغیر بود که نشان می دهد اپوکسی بین صفحات نانومکسین قرار گرفته است و باعث ایجاد فاصله تصادفی بین صفحات مکسین می شود. با این حال، کلوخه ای شدن در ماتریس پلیمری مشاهده شده است. به احتمال زیاد به دلیل توزیع نامناسب مکسین ها در محلول استون است [۲۸].

در پژوهشی دیگر مشخص شد، با افزایش محتوای نانومکسین، سفتی زنجیره های اپوکسی نیز می تواند از طریق اتصال به نانوصفحات افزایش یابد. با این وجود، درجات پراکندگی مختلف منجر به نتایج متفاوتی شد. افزودن بیش از حد نانوپرکننده خواص مکانیکی را کاهش داد، زیرا باعث نقص بیشتر ساختار شبکه ای می شود. [۲۹].

یینگ و همکاران (Ying et al) بر روی عامل دار کردن سطح مکسین ها برای بهبود عملکرد متمرکز شدند. در این پژوهش پیوند شیمیایی با سخت کننده متیل تتراهیدروفتالیک انیدرید (MTHPA)، منجر به کاهش کلوخه ای شدن شد. بررسی خواص مکانیکی نشان داد که با افزودن ۲ درصد نانومکسین به رزین اپوکسی، استحکام کششی و استحکام خمشی به ترتیب ۱۰۶/۴ و ۱۵۷ مگاپاسکال افزایش یافته، همچنین مدول ذخیره تا ۳۵ درصد افزایش می یابد. با افزودن نانومیله های آتاپولژیت (Atta-pulgite Nanorods)، به سخت کننده و مکسین، مدول ذخیره افزایش می یابد؛ زیرا گروه OH در هر دو ماده باعث پیوند هیدروژنی می شود [۳۰].

ترکیب نانومیله های آتاپولژیت، مدول ذخیره سازی را افزایش

۴ بررسی خواص مکانیکی

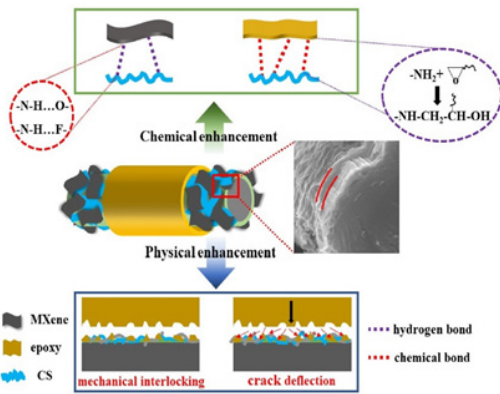
استفاده از مواد دوبعدی، به ویژه گرافن، برای تقویت رزین اپوکسی به طور گسترده مستند شده است. بهبودهای مهمی در مدول، استحکام مکانیکی، چقرمگی و سختی گزارش شده است. به طور کلی، نانومواد دوبعدی به طور عمیق مورد مطالعه قرار گرفته است. با این حال، مطالعه اپوکسی رزین های اصلاح شده با نانومکسین ها هنوز در آغاز است. نتایج بسته به نحوه به دست آوردن و پراکندگی نانومکسین بسیار متفاوت است و شیمی سطح نانوصفحات مکسین نیز بسیار مرتبط است. چندین کار اولیه بر چگونگی تأثیر نانومکسین ها بر عملکرد مکانیکی ماتریس اپوکسی متمرکز شده اند. وانگ و همکاران (Wang et al) نشان داد که خود مونومر اپوکسی می تواند به صورت درونی و کووالانسی به هیدروکسیل های سطح لایه لایه Ti2CTx متصل شود و عملکرد مکانیکی بهبود یافته را از طریق پیوند سطحی قوی ارائه دهد [۲۲].

تحلیل آزمون میکروسکوپ الکترونی، نشان داد که نانومکسین ها به صورت دسته های منبسط شده و تک لایه ها در ماتریس اپوکسی مخلوط شدند و افزایش قابل توجهی در استحکام ضربه و استحکام خمشی برای کامپوزیت های ساخته شده در غلظت ۱ درصد مشاهده شد. این امر با سفتی (Stiffness) بالای نانوصفحات مکسین، افزایش انرژی جذب و سپس افزایش چقرمگی آن ها توضیح داده می شود. علاوه بر این، انحراف ترک و تسلیم برشی توسط نانو مکسین ها تسهیل می شود و در نتیجه سطح شکست ناهموار تر می شود. غلظت های بالاتر اثر معکوس دارند زیرا Ti2CTx اضافی باعث ایجاد عیوب بسیار زیادی در شبکه گرماسخت می شود [۲۳].

مطالعات بعدی تأثیر ماهیت و غلظت شیمیایی نانومکسین (۵/۰ تا ۹۰ درصد)، روش های لایه برداری آن و روش معرفی و پراکندگی (استفاده از حلال و اختلاط با فراصوت، برش بالا، یا ترکیبی از هر دو) را در رزین اپوکسی بررسی کردند. به طور کلی، تمام تحقیقات تکمیل شده نشان می دهد که خواص مکانیکی معمولاً به مقادیر متفاوتی افزایش می یابد و سطوح شکست همیشه ناهموارتر از سطوح شکننده و شکسته رزین اپوکسی هستند و ساز و کار ترک-انحراف (Crack-deflection Mechanism) را نشان می دهند [۲۴].

بارسوم و همکاران (Barsoum et al)، کامپوزیت ساخته شده با نانومکسین را با ترکیب MXene با پیش ساز اپوکسی تهیه کرد و نتایج نشان داد که خواص مکانیکی مناسبی دارد ولی پراکندگی ذرات نامناسب است [۲۵].

سایر محققان از روش های کمک حلال برای دستیابی به



شکل ۵ بهبود خواص فصل مشترک نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانومکسین و کیتوسان [۳۴].

شوند تا عملکرد کامپوزیت‌ها را بیشتر تقویت کنند. افزایش زبری ناشی از ساختار لایه‌ای دوبعدی مکسین، باعث بهبود قفل شدن (Interlocking)، مکانیکی بین الیاف و ماتریس شد و به انحراف ترک‌ها انجامید [۳۴].

در پژوهشی دیگر، لایه‌های مکسین به صورت الکترواستاتیکی در الیاف کربن که قبلاً با پلی‌اتیلن ایمین کاتیونیزه شده بود، رسوب کردند و سپس به سیلیکای اصلاح شده اضافه شدند. این روش باعث افزایش قابل توجهی در انرژی سطحی الیاف کربن شد و همچنین زبری و ترشوندگی را افزایش می‌دهد [۳۵].

محققان نانومکسین را به الیاف پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بالا حاوی آلبومین اضافه کردند. نتایج نشان داد که شکست در فصل مشترک کمتر و ریزترک‌های ماتریس بیشتری در کامپوزیت‌ها ایجاد شد که چسبندگی رابط خوبی را نشان داد و انتقال بار بین الیاف و ماتریس را بهبود بخشید [۳۶].

برای بهبود خواص مکانیکی از نظریه چگالی استفاده شد. در این پژوهش نانومکسین به رزین اپوکسی اضافه شد. نتایج نشان داد که نسبت طول به قطر اهمیت زیادی بر خواص مکانیکی دارد. همچنین در مقادیر ۴ درصد وزنی، کلوخه‌ای شدن دیده می‌شود [۳۷].

۵ بررسی خواص گرمایی

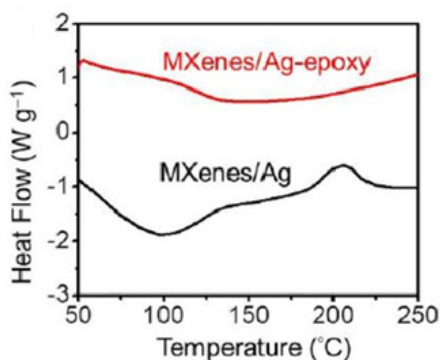
با توسعه سریع فناوری، علاقه فزاینده‌ای به کامپوزیت‌های پلیمری با رسانایی گرمایی بالا و گذردهی دی‌الکتریک برای میکروالکترونیک، ذخیره انرژی و سایر کاربردهایی که در آنها عملکرد اتلاف گرما مطلوب است، وجود دارد. با توجه به خواص الکتریکی پایین رزین اپوکسی، افزودن نانومکسین‌ها برای بهبود این خواص در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۳۸].

داد، اما با افزودن بیش از حد آتاپولزیت، رفتار مکانیکی کاهش پیدا کرد. این کاهش به دلیل ضعیف بودن فصل مشترک آتاپولزیت و مکسین در مقایسه با فصل مشترک رزین اپوکسی و آتاپولزیت است [۳۱].

در پژوهشی دیگر، یینگ و همکاران (Ying et al)، با افزودن الیاف کربن اصلاح شده با اسید به نانومکسین، از طریق برهم‌کنش‌های هیدروژنی با گروه‌های کربوکسیل، اصلاح سطحی نانومکسین انجام شد. الیاف کربن تقویت شده به نانومکسین اضافه شد و به وسیله دستگاه فراصوت به رزین اپوکسی اضافه شد. نتایج نشان داد که کامپوزیت با ۲ درصد وزنی، خواص مکانیکی بهتری نسبت به رزین اپوکسی خالص دارد. برهم‌کنش قوی بین سطحی الیاف کربن با نانومکسین، منجر به ایجاد پیوند هیدروژنی قوی می‌شود [۳۲].

شور و همکاران (Shur et al)، کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن در حضور، ۳-آمینوپروپیل تری‌اتوکسی سیلان (APTES) و نانوصفحات مکسین ساختند. نتایج نشان داد که گروه‌های آمین باقی‌مانده از مکسین نیز می‌توانند با رزین اپوکسی واکنش دهند، بنابراین نقش پل (Bridge) را در ایجاد ماده شیمیایی قوی ایفا می‌کنند. هنگامی که الیاف به واحدهای کوتاه‌تر شکسته می‌شود، انتقال تنش بهبود می‌یابد و از انتشار ترک جلوگیری می‌کند [۳۳].

در پژوهشی دیگر یوهی و همکاران (Yuhui et al)، کامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف کربن و نانومکسین و کیتوسان، به منظور افزایش خواص مکانیکی رزین اپوکسی ساخته شد (شکل ۵). نتایج نشان داد که مکسین به دلیل ساختار لایه‌ای دوبعدی خود، سطح ویژه بزرگ‌تری دارد و به عنوان لنگر در ناحیه رابط عمل می‌کند تا قفل مکانیکی بین الیاف و ماتریس را تسهیل کند. ساختار سلسله‌مراتبی "الی-غیرالی" نه تنها از طریق تعاملات الکترواستاتیک تشکیل می‌شود، بلکه ممکن است از طریق پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های آمینو و هیدروکسیل مکسین با پلی‌اتیلن‌ایمین یا مکسین با کیتوسان نیز تشکیل شود. این ساختار باعث می‌شود که آن‌ها به طور محکم‌تری به الیاف کربن متصل شوند و ساختار رابط قوی ایجاد کنند. همچنین، این ساختار می‌تواند به عنوان ناحیه بافر عمل کند که با همکاری اجزای سخت و نرم، تمرکز تنش را کاهش داده، جهت گسیختگی ترک را تغییر دهد. گروه‌های فعال فراوان OH و O می‌توانند فعالیت سطحی و قابلیت تر شدن الیاف کربن را بهبود بخشند که منجر به افزایش سازگاری و تعامل بین الیاف و ماتریس می‌شود. از طرف دیگر، پیوندهای شیمیایی و پیوندهای هیدروژنی ممکن است بین تقویت‌کننده و اپوکسی تشکیل



شکل ۶ نمودار گرماسنج روبشی تفاضلی کامپوزیت‌های اپوکسی و مکسین [۲۵].

در ساختار است. این پدیده بر اثر برهم‌کنش قوی بین ذرات است. همچنین حضور نانوذرات گرافن در این تحقیق برای ساخت کامپوزیت دوتایی، منجر به عدم ساختار مناسب و برهم‌کنش ضعیف شد [۲۸].

برای بررسی اثر ضدشعله‌بودن کامپوزیت اپوکسی حاوی مکسین فسفر قرمز اضافه شد. حضور مکسین در کنار فسفر قرمز باعث هم‌افزایی در خواص گرمایی شد و خواص حرارتی ضدشعله‌بودن این کامپوزیت افزایش یافت [۳۰].

بررسی خواص حرارتی و تأثیر نانوپرکننده‌های مکسین بر دماهای انتقال شیشه‌ای (T_g) و تجزیه حرارتی رزین‌های اپوکسی می‌پردازد. افزودن نانوپرکننده‌های مکسین می‌تواند دمای انتقال شیشه‌ای را تحت تأثیر قرار دهد، زیرا این نانوپرکننده‌ها شبکه اپوکسی را مختل کرده، ممکن است تحرک در سطح بین‌فاز را افزایش دهند که می‌تواند منجر به کاهش دمای انتقال شیشه‌ای شود. با این حال، تعاملات بین نانوپرکننده و ماتریس رزین اپوکسی نیز می‌تواند باعث افزایش دمای انتقال شیشه‌ای شود. به‌طور کلی، افزایش مقدار مکسین در ترکیب معمولاً منجر به افزایش دمای انتقال شیشه‌ای می‌شود، اما این افزایش معمولاً متوسط و حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد است [۳۱]. در مورد تجزیه حرارتی، نتایج متناقضی وجود دارد. برخی مطالعات نشان می‌دهند که افزودن MXene مانع از تجزیه رزین اپوکسی نمی‌شود، اما مرحله شروع تجزیه را به تأخیر می‌اندازد و دمای تجزیه با افزایش مقدار مکسین افزایش می‌یابد. در عوض، نمونه‌هایی با محتوای بالای مکسین دمای تجزیه را کاهش می‌دهند که این کاهش به وضعیت پراکندگی مکسین در ماتریس نسبت داده می‌شود. به‌طور کلی، بارگذاری ۵ درصد وزنی از مکسین بهبود جزئی را نشان می‌دهد، اما محتوای بالاتر مکسین منجر به کاهش دمای تجزیه می‌شود [۳۲-۳۵].

در پژوهشی، افزودن مقادیر کمی از مکسین، بین ۰/۲ و یک درصد وزنی، رسانایی گرمایی را تا مقدار ۱۴۱/۳ درصد برای رزین اپوکسی خالص بهبود بخشید. این کار همچنین نشان داد که چگونه نانوپرکننده مکسین بر رسانایی گرمایی رزین با دما تأثیر می‌گذارد. با افزایش دما، تحرک قطعه‌های زنجیره‌های مولکولی اپوکسی افزایش و در نتیجه میانگین مسیر آزاد و فونون‌ها افزایش یافت. زنجیره‌های اطراف پرکننده مکسین با افزایش دما مرتب‌تر شد و به افزایش آن کمک کردند. ورق‌های مکسین همچنین به کاهش ضریب انبساط گرمایی کمک کردند [۳۹].

لین و همکاران (Lin et al)، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات مکسین را برای بهبود خواص رسانایی گرمایی غیریکساخت (Anisotropic) را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش رسانایی گرمایی به نسبت ابعاد بزرگ‌شده پرکننده نسبت داده شد که عمدتاً ناشی از کاهش ضخامت به دلیل لایه‌برداری و افزایش اندازه جانبی به دلیل اتصال در طول آماده‌سازی کامپوزیت‌ها بود [۴۰].

در پژوهشی دیگر، نانو مکسین به کامپوزیت اپوکسی و الیاف کربن برای بهبود رسانایی گرمایی اضافه شد و همچنین برای سنتز از روش خشک انجمادی استفاده کردند. نتایج نشان داد که این روش باعث افزایش خواص گرمایی کامپوزیت مکسین/الیاف کربن/رزین اپوکسی در مقایسه با نمونه الیاف کربن حاوی اپوکسی و مکسین شد. همچنین کامپوزیت مکسین/الیاف کربن/رزین اپوکسی دارای ضریب انبساط گرمایی کمتری است. هنگامی که دما افزایش یافت، تحرک بخش اپوکسی افزایش یافت و مسیر فونون در کامپوزیت را بهبود بخشید. در مقابل، ضریب انبساط گرمایی با افزایش نانوپرکننده کاهش یافت. جهت‌گیری طولی نانو مکسین و الیاف میزان انبساط حجم رزین اپوکسی را کاهش داد [۴۰].

در پژوهشی دیگر کامپوزیت اپوکسی حاوی ذرات نقره و مکسین بررسی شد (شکل ۶). نتایج آزمون گرماسنج روبشی تفاضلی نشان داد که کامپوزیت نقره و مکسین بدون حضور اپوکسی در 217°C قله گرمازا دارد که به دلیل برهم‌کنش مناسب بین ذرات است. با افزودن نانوذرات به رزین اپوکسی، قله جدیدی مشاهده نشد که به دلیل پدیده به هم پیوستگی ذرات نقره با مکسین است که باعث کاهش مقاومت گرمایی لایه و پرکننده می‌شود و باعث بهبود خواص مکانیکی می‌شود [۲۷-۲۵].

محققان کامپوزیت اپوکسی حاوی مکسین و ذرات نقره را سنتز کردند. نتایج نشان داد مقاومت گرمایی این نانوکامپوزیت بهبود پیدا می‌کند که به دلیل اثر پل زدن (Bridging Effect)، بین ذرات

جدول ۲ بررسی درصد زغال نانوکامپوزیت اپوکسی با مکسین در حضور فیتیک اسید [۳۶].

درصد زغال باقی مانده	نمونه
۱۳/۴	اپوکسی خالص
۱۴/۵	اپوکسی - مکسین ۲ phr
۱۳/۶	اپوکسی - مکسین با فیتیک اسید ۰/۵ phr
۱۴/۳	اپوکسی - مکسین با فیتیک اسید ۱ phr
۱۶/۶	اپوکسی - مکسین با فیتیک اسید ۲ phr

نانو کامپوزیت اپوکسی با مکسین در حضور فیتیک اسید سنتز شد. نتایج زغال باقی مانده در جدول با درصد های نانوذرات مشخص است. نتایج نشان داد که حضور ۲ phr، می تواند خواص گرمایی را بهبود ببخشد. این خواص به دلیل اثر سدکنندگی فیزیکی، اثر کربن دار کردن کاتالیزور و تخریب حرارتی اکسایشی است (جدول ۲) [۳۶].

۶ تحقیقات اخیر در مورد کامپوزیت های اپوکسی حاوی نانوذرات مکسین

نانو مکسین های با ساختار دوفلزی به طور قابل توجهی عملکرد آتش سوزی را در کامپوزیت های اپوکسی بهبود می بخشد. نتایج نشان می دهند که افزودن ۱ درصد وزنی نانو مکسین به کامپوزیت های اپوکسی، منجر به کاهش قابل توجهی در کاهش خطر آتش سوزی می شود. این بهبودها به دلیل اثرات کاتالیزوری قوی و اثر کربن سازی عناصر فلزی انتقالی Mo و Ti و همچنین ساختار نانورقه ای مکسین است. این تحقیق بینش های جدیدی را در زمینه کاربرد مکسین های دوفلزی در کامپوزیت های پلیمری مقاوم در برابر آتش ارائه می دهد و نشان می دهد که این مواد می توانند به عنوان گزینه های مؤثری برای بهبود ایمنی در برابر آتش در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرند [۳۱-۳۳]. افزودن پرکننده های مکسین به پلیمرهای اپوکسی به طور قابل توجهی خواص مکانیکی آنها، به ویژه سختی و استحکام را بهبود می بخشد. تحقیقات نشان می دهد که انرژی پیوند بین مکسین و اپوکسی تحت تأثیر ویژگی های سطحی مکسین قرار دارد و مدول یانگ کامپوزیت ها با افزودن مکسین تا حد معینی افزایش می یابد. با این حال، در غلظت های بالاتر پرکننده، مزایا ممکن است به دلیل تجمع کاهش یابد. به طور کلی، انتظار می رود که ادغام مکسین ها، سختی اپوکسی را بهبود بخشد و آن را برای کاربردهای مختلف مناسب تر کند [۳۴].

محققان نشان دادند که انرژی های سطحی نانوپرکننده های مکسین، به ویژه Ti_3C_2Tx ، تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی و دوام کامپوزیت های پایه پلیمری دارند. با ارزیابی مقادیر انرژی سطحی و خواص ترشوندگی، مشخص شد که این خواص به تعداد لایه های پوشش و نوع مایعات بستگی دارد. همچنین، نتایج نشان دهنده چسبندگی بالای مکسین به رزین اپوکسی است که با استفاده از میکروسکوپ الکترونی و تصاویر سطح شکسته تأیید شده است. این یافته ها می توانند به بهبود عملکرد و دوام کامپوزیت های پلیمری کمک کنند [۳۵].

تیتانیوم کاربید (Ti_3C_2Tx) چند لایه با دمای متوسط-پایین حرارت داده شد. نانوکامپوزیت ها / اپوکسی با استفاده از روش ریختن محلول به دست آمدند. نتایج XRD، SEM، AFM و TEM نشان دهنده موفقیت در تهیه Ti_3C_2Tx چند لایه بود. آزمون XPS، FTIR و XRD نشان داد که حرارت دهی بخشی از گروه های قطبی روی سطح Ti_3C_2Tx را حذف کرده است بدون اینکه محصول جانبی ایجاد شود [۳۶].

اصلاح الیاف کربن با مکسین و استفاده از ۳-آمین پروپیل تری اتوکسی سیلان، به طور قابل توجهی خواص بین سطحی کامپوزیت های اپوکسی را بهبود بخشیده است. پیوند زنی موفق Ti_2C بر روی سطح الیاف کربن نه تنها زبری سطح را افزایش داده، بلکه گروه های عملکردی قطبی زیادی را نیز معرفی کرده است که منجر به افزایش انرژی سطحی شده است. این بهبود باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت برشی بین سطحی (IFSS) به میزان حدود ۷۸ درصد و مقاومت برشی بین لایه ای (ILSS) به میزان حدود ۲۸ درصد در مقایسه با کامپوزیت های الیاف کربن بدون پوشش شده است. این یافته ها نشان می دهد که اصلاح Ti_2C رویکردی امیدوارکننده برای بهینه سازی عملکرد کامپوزیت های اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن است [۳۷].

سنتز نانو کامپوزیت اپوکسی با مکسین، با هدف افزودنی مؤثر در پوشش های اپوکسی برای افزایش مقاومت در برابر خوردگی بررسی شد. سنتز موفق این نانولایه های چند لایه و ارزیابی آنها از طریق آزمایش های مختلف، توانایی آنها را در عمل به عنوان مانع فیزیکی در برابر محیط های خوردنده نشان می دهد. این تحقیق نه تنها خواص ذاتی مواد دوبعدی مانند Ti_3C_2 را به نمایش می گذارد، بلکه راه را برای کاربردهای نوآورانه در پوشش های حفاظتی هموار می کند و در نهایت به طول عمر و دوام مواد در شرایط چالش برانگیز کمک می کند [۳۴-۳۵].

با توجه به افزایش چگالی توان الکترونیک ها، بهبود عملکرد انتقال حرارت مواد بسته بندی الکترونیکی نقش مثبتی در ارتقای عملکرد الکترونیک های نوین ایفا خواهد کرد. محققان، فوم

اپوکسی را بهبود بخشد [۳۵]. پودر نانومکسین اصلاح شده با اسیدفیتیک از طریق ترکیب روش های حکاکی انتخابی و مونتاژ تهیه شد و با رزین اپوکسی مخلوط شد تا خواص هدایت گرمایی، هدایت الکتریکی و خواص مکانیکی آن بررسی شود. مکسین دارای ساختار لایه ای دو بعدی و خاصیت خوب تشکیل زغال با ۸۶/۷ درصد زغال باقی مانده، در دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد بود. نتایج آزمایش گرماسنجی مخروطی نشان داد که P-MXene به EP خاصیت ضدشعله می دهد. این تحقیق روش امیدوارکننده ای برای طراحی پلیمرهای چندمنظوره ارائه می دهد [۳۶].

نانوکامپوزیت اپوکسی با مکسین در حضور فیتیک اسید سنتز شد. نتایج آزمایش نشان داد که افزودن ۲phr مکسین و فیتیک اسید به رزین اپوکسی، منجر به بهبودی در خواص گرمایی می شود که به دلیل اثر کربونیزه شدن این کامپوزیت است [۳۷-۴۰].

در جدول ۳، به صورت خلاصه پیشرفت های اخیر در سنتز نانوکامپوزیت های اپوکسی حاوی نانوذرات مکسین و مهم ترین دستاوردهای آن، به صورت خلاصه جمع بندی شده است.

۷ چالش ها و محدودیت ها

نانوذرات مکسین به دلیل تمایل به تجمع، نیاز به پراکندگی یکنواخت در ماتریس اپوکسی دارند تا خواص مکانیکی بهبود یابد. چسبندگی بین نانوذرات و ماتریس اپوکسی برای افزایش کارایی انتقال بار و عملکرد مکانیکی اهمیت دارد. همچنین،

سه بعدی الیاف کربن و مکسین با استفاده از روش ساده انجماد-خشک کردن تهیه کردند. نتایج نشان داد که هدایت گرمایی کامپوزیت های اپوکسی به سطح فوق العاده ای در ۳۰/۲ درصد وزنی افزایش یافته و این افزایش ۴۵/۹ درصدی نسبت به اپوکسی خالص بوده است. همچنین، خواص گرمایی کامپوزیت ها مانند دمای انتقال شیشه ای و ضریب انبساط گرمایی مورد بررسی قرار گرفت. تمامی نتایج نشان می دهد که کامپوزیت اپوکسی به عنوان ماده ای امیدوارکننده برای انتقال حرارت در زمینه کاربردهای الکترونیکی به شمار می آید [۳۶].

سنتز کامپوزیت اپوکسی و پلی آکریلو نیتریل در حضور نانومکسین، با بهبود قابل توجهی در مقاومت در برابر خوردگی پوشش اپوکسی آبی برای فولاد Q۲۳۵ همراه هستند. این بهبود ناشی از اثر هم افزایی بین اثر پلی آکریلو نیتریل و مکسین است که باعث می شود این کامپوزیت ها با وجود هدایت الکتریکی پایین تر، حفاظت مؤثری در برابر خوردگی ارائه دهند [۳۲-۳۴]. پژوهشگران به منظور بهبود خواص گرمایی و مکانیکی رزین اپوکسی سیلیکا و مکسین را در حین سنتز به رزین اپوکسی اضافه کردند. ذرات به خوبی در زمینه پراکنده و باعث افزایش پایداری گرمایی و کاهش نرخ حداکثر انتشار حرارت شد. همچنین، این ترکیب به افزایش مدول ذخیره سازی و بهبود استحکام کششی و کشش در نقطه شکست کمک می کند. اثرات دوگانه تشکیل زغال باقی مانده و اثرات مانع لایه ای مکسین با سیلیکا، در این بهبودها نقش دارند. به طور کلی، این تحقیق نشان می دهد که نانو سازه تهیه شده می تواند به طور مؤثری خواص

جدول ۳ تحقیقات اخیر در مورد کامپوزیت های اپوکسی حاوی نانوذرات مکسین [۳۰-۴۰].

نمونه	سال	نتایج مهم
اپوکسی-مکسین با ساختار دوفلزی	۲۰۲۲	بهبود ایمنی در برابر آتش
اپوکسی-مکسین	۲۰۲۰	بهبود خواص مکانیکی
اپوکسی-مکسین	۲۰۲۱	بهبود خواص چسبندگی بین سطحی
اپوکسی با پوسته تداخل الکترو مغنظیسی-مکسین	۲۰۱۹	خواص مکانیکی مناسب در ۵ درصد وزن
اپوکسی-الیاف کربن-مکسین	۲۰۲۱	اصلاح سطح مناسب با پیوند زنی
اپوکسی-مکسین	۲۰۱۹	خواص ضد خوردگی مناسب
اپوکسی-الیاف کربن-نانو مکسین	۲۰۲۰	روش سنتز با خشک کن انجمادی و خواص الکترونیکی مناسب
اپوکسی-پلی آکریلو نیتریل-مکسین	۲۰۲۲	خواص خوردگی مناسب به عنوان پوشش سطح
اپوکسی-مکسین-سیلیکا	۲۰۲۳	بهبود خواص مکانیکی
اپوکسی-فیتیک اسید-مکسین	۲۰۲۲	بهبود خواص حرارتی

می‌دهد که با توسعه مستمر این مواد، می‌توان به کاربردهای جدید و پیشرفته‌تری در صنایع مختلف دست یافت. به‌ویژه، نانومکسین‌های با ساختار دوفلزی به‌طور قابل‌توجهی عملکرد آتش‌سوزی و خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی را بهبود می‌بخشند. افزودن ۱ درصد وزنی نانومکسین به این کامپوزیت‌ها منجر به کاهش خطر آتش‌سوزی می‌شود که این بهبودها ناشی از اثرات کاتالیزوری عناصر فلزی انتقالی و ساختار نانورقه‌ای مکسین است. همچنین، اصلاح الیاف کربن با مکسین و استفاده از ۳-آمین پروپیل تری‌اتوکسی‌سیلان، خواص بین‌سطحی کامپوزیت‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نانومکسین‌ها می‌توانند به‌عنوان افزودنی مؤثر در پوشش‌های اپوکسی برای افزایش مقاومت در برابر خوردگی و بهبود عملکرد گرمایی در بسته‌بندی‌های الکترونیکی عمل کنند. ترکیب مکسین با سیلیکا و پلی‌آکریلونیتریل نیز به بهبود خواص گرمایی و مکانیکی رزین اپوکسی کمک می‌کند. در نهایت، این تحقیق به‌طور کلی نشان می‌دهد که نانومکسین‌ها می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های مؤثری برای بهبود ایمنی در برابر آتش و افزایش دوام و عملکرد کامپوزیت‌های پلیمری در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرند. این یافته‌ها می‌توانند به توسعه فناوری‌های جدید و بهبود کیفیت محصولات در زمینه‌های مختلف منجر شوند.

پایداری گرمایی ماتریس اپوکسی می‌تواند تحت تأثیر وجود مکسین‌ها قرار گیرد و نیاز به بررسی دقیق‌تری دارد. شرایط پردازش، از جمله دمای پخت و زمان، بر ویژگی‌های نهایی نانوکامپوزیت‌ها تأثیرگذار است و بهینه‌سازی این پارامترها ضروری است. شناسایی خواص مکانیکی و گرمایی نانوکامپوزیت‌ها ممکن است چالش‌برانگیز باشد و نیاز به توسعه فنون جدید دارد. همچنین، هزینه و مقیاس‌پذیری تولید نانوکامپوزیت‌ها می‌تواند چالش‌هایی را به همراه داشته باشد. به‌طور کلی، برای موفقیت در کاربرد نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با نانوذرات مکسین در صنایع مختلف، پرداختن به این چالش‌ها ضروری است.

۸ نتیجه‌گیری

این پژوهش به وضوح نشان می‌دهد که نانومکسین‌ها به‌عنوان پرکننده‌های دوبعدی، تأثیر قابل‌توجهی بر بهبود خواص مکانیکی، گرمایی و الکتریکی رزین‌های اپوکسی دارند. ویژگی‌های منحصربه‌فرد این نانومواد، از جمله رسانایی الکتریکی بالا و زیست‌سازگاری، آن‌ها را به گزینه‌ای نوآورانه برای حل چالش‌های موجود در این نوع رزین‌ها تبدیل کرده است. تحقیق حاضر همچنین بر اهمیت نانومکسین‌ها در بهینه‌سازی عملکرد رزین‌های اپوکسی تأکید می‌کند و نشان

مراجع

- Blanco, I. and Oliveri, L., Effects of Novel Reactive Toughening Agent on Thermal Stability of Epoxy Resin, *J. Therm. Anal. Calorim.*, 108, 685–693, **2012**.
- Capricho, J.C. and Fox, B., Multifunctionality in Epoxy Resins, *Polym. Rev.*, 60, 1–41, **2020**.
- Jin, F.L. and Li, X., Synthesis and Application of Epoxy Resins: A Review, *J. Ind. Eng. Chem.*, 29, 1–11, **2015**.
- Taloub, N. and Henniche, A., Improving the Mechanical Properties, UV and Hydrothermal Aging Resistance of PIPD Fiber Using MXene (Ti₃C₂(OH)₂) Nanosheets, *Compos. Part B: Eng.*, 163, 260–271, **2019**.
- Wazalwar, R. and Sahu, M., Mechanical Properties of Aerospace Epoxy Composites Reinforced with 2D Nano-Fillers: Current Status and Road to Industrialization, *Nanoscale Adv.*, 3, 2741–2776, **2021**.
- Govindaraj, P. and Sokolova, A., Distribution States of Graphene in Polymer Nanocomposites: A Review, *Compos. Part B: Eng.*, 226, 109353, **2021**.
- Rasul, M.G. and Kiziltas, A., 2D Boron Nitride Nanosheets for Polymer Composite Materials, *npj 2d Mater. Appl.*, 5, 56, **2021**.
- Huo, S. and Song, P., Phosphorus-Containing Flame Retardant Epoxy Thermosets: Recent Advances and Future Perspectives, *Prog. Polym. Sci.*, 114, 101366, **2021**.
- Naguib, M. and Kurtoglu, M., Two-Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti₃AlC₂, *Adv. Mater.*, 23, 4248–4253, **2011**.
- Naguib, M. and Barsoum, M.W., Ten Years of Progress in the Synthesis and Development of MXenes, *Adv. Mater.*, 33, 2103393, **2021**.
- Sun, S. and Liao, C., Two-Dimensional MXenes for Energy Storage, *Chem. Eng. J.*, 338, 27–45, **2018**.
- Sun, Y. and Li, Y., Potential Environmental Applications of MXenes: A Critical Review, *Chemosphere*, 271, 129578, **2021**.
- Song, P. and Liu, B., MXenes for Polymer Matrix Electromagnetic Interference Shielding Composites: A Review, *Compos. Commun.*, 24, 100653, **2021**.
- Naguib, M. and Mochalin, V.N., 25th Anniversary Article: MXenes: A New Family of Two-Dimensional Materials, *Adv. Mater.*, 26, 992–1005, **2014**.
- Naguib, M. and Mashtalir, O., Two-Dimensional Transition Metal Carbides, *ACS Nano*, 6, 1322–1331, 2012.
- Dong, M. and Zhang, H., Multifunctional Epoxy Nanocomposites Reinforced by Two-Dimensional Materials: A Review, *Carbon*, 185, 57–81, **2021**.
- Yuan, S. and Linas, S., Pure & Crystallized 2D Boron Nitride Sheets Synthesized via a Novel Process Coupling Both PDCs and SPS Methods, *Sci. Rep.*, 6, 20388, 2016.
- Krishnan, U. and Kaur, M., A Synoptic Review of MoS₂: Synthesis to Applications, *Superlattices Microstruct.*, 128, 274–297, **2019**.
- Verger, L. and Xu, C., Overview of the Synthesis of MXenes and Other Ultrathin 2D Transition Metal Carbides and Nitrides, *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, 23, 149–163, **2019**.
- Shekhirev, M. and Shuck, C.E., Characterization of MXenes at Every Step, from Their Precursors to Single Flakes and Assembled Films, *Prog. Mater. Sci.*, 120, 100757, **2021**.
- Meshkian, R. and Näslund, L.-Å., Synthesis of Two-Dimensional Molybdenum Carbide, Mo₂C, from the Gallium Based Atomic Laminate Mo₂Ga₂C, *Scr. Mater.*, 108, 147–150, **2015**.
- Yang, S. and Zhang, P., Fluoride-Free Synthesis of Two-Dimensional Titanium Carbide (MXene) Using A Binary Aqueous System, *Angew. Chem.*, 130, 15717–15721, **2018**.
- Zhou, J. and Zha, X., A Two-Dimensional Zirconium Carbide by Selective Etching of Al₃C₃ from Nanolaminated Zr₃Al₃C₅, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 55, 5008–5013, **2016**.
- Sun, W. and Shah, S.A., Electrochemical Etching of Ti₂AlC to Ti₂CT_x (MXene) in Low-Concentration Hydrochloric Acid Solution, *J. Mater. Chem. A*, 5, 21663–21668, **2017**.
- Wang, L. and Chen, L., Fabrication on the Annealed Ti₃C₂T_x MXene/Epoxy Nanocomposites for Electromagnetic Interference Shielding Application, *Compos. Part B: Eng.*, 171, 111–118, **2019**.
- Mashtalir, O. and Naguib, M., Intercalation and Delamination of Layered Carbides and Carbonitrides, *Nat. Commun.*, 4, 1716, **2013**.
- Lv, G. and Wang, J., Intercalation and Delamination of Two-Dimensional MXene (Ti₃C₂T_x) and Application in Sodium-Ion Batteries, *Mater. Lett.*, 219, 45–50, **2018**.
- Kang, R. and Zhang, Z., Enhanced Thermal Conductivity of Epoxy Composites Filled with 2D Transition Metal Carbides (MXenes) with Ultralow Loading, *Sci. Rep.*, 9, 9135, **2019**.
- Liu, L. and Ying, G., Functionalization with MXene (Ti₃C₂) Enhances the Wettability and Shear Strength of Carbon Fiber-Epoxy Composites, *ACS Appl. Nano Mater.*, 2, 5553–5562, **2019**.

30. Seyedin, S. and Zhang, J., Facile Solution Processing of Stable MXene Dispersions towards Conductive Composite Fibers, *Glob. Chall.*, 3, 1900037, **2019**.
31. Szeluga, U. and Pusz, S., Effect of Graphene Filler Structure on Electrical, Thermal, Mechanical, and Fire Retardant Properties of Epoxy-Graphene Nanocomposites—A Review, *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, 46, 152–187, **2021**.
32. Ji, Z.J. and Zhang, L., Mechanical and tribological properties of nanocomposites incorporated with two-dimensional materials, *Friction*, 8, 813–846, **2020**.
33. Zhang, H. and Wang, L., Effects of 2-D Transition Metal Carbide Ti₂CT:X on Properties of Epoxy Composites, *RSC Adv.*, 6, 87341–87352, **2016**.
34. Carey, M.S. and Sokol, M., Water Transport and Thermo-mechanical Properties of Ti₃C₂T_z MXene Epoxy Nanocomposites, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, 39143–39149, **2019**.
35. Hatter, C.B. and Shah, J., Micromechanical Response of Two-Dimensional Transition Metal Carbonitride (MXene) Reinforced Epoxy Composites, *Compos. Part B Eng.*, 182, 107603, **2020**.
36. Feng, A. and Hou, T., Preparation and Characterization of Epoxy Resin Filled with Ti₃C₂T_x MXene Nanosheets with Excellent Electric Conductivity, *Nanomaterials*, 10, 162, **2020**.
37. Liu, L. and Ying, G., Aqueous Solution-Processed MXene (Ti₃C₂T_x) for Non-Hydrophilic Epoxy Resin-Based Composites with Enhanced Mechanical and Physical Properties, *Mater. Des.*, 197, 109276, **2021**.
38. Liu, L. and Ying, G., Attapulgit-Mxene Hybrids with Ti₃c₂tx Lamellae Surface Modified by Attapulgit as a Mechanical Reinforcement for Epoxy Composites, *Polymers*, 13, 1820, **2021**.
39. Zhao, X. and Qi, S., Preparation and Mechanical Performances of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites by Mxene Nanosheets Coating, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 30, 10516–10523, **2019**.
40. Ding, R. and Sun, Y., Enhancing Interfacial Properties of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites by Grafting MXene Sheets (Ti₂C), *Compos. Part B: Eng.*, 207, 108580, **2021**.