مقاله مروری

فصلنامه علمی
سال نهم، شماره ۳، شماره پیاپی ۳۵، پاییز ۱۴۰۳
Vol. 9, No. 3 Issue No. 35
Atumn 2024, Quarterly
صفحه ۴۷-۵۷

Iran Polymer Technology: Research and Development

بررسی خواص مکانیکی و خواص گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات مکسین

محمد حسین کرمی*، امید معینی جزنی*
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، کاملا شناخته شده‌اند و آن‌ها را برای کاربردهای مهندسی پیشرفته پیشنهاد می‌کند. 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

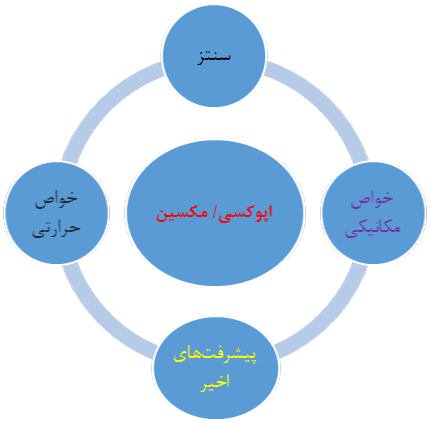
۱ مقدمه

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. پیش پلیمر 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 نارسانا 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 به‌دلیل 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 به‌دلیل 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_2X، M_3X_2، M_4X_3) و گروه‌های انتهایی سطحی (-O، -OH 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 ضدخوردگی/مقاوم در برابر سایش گزارش شده است. برای افزایش استفاده واقعی از آن‌ها برخی از مشکلات مکسین‌ها باید برطرف شوند[۱۱]. دراین 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].

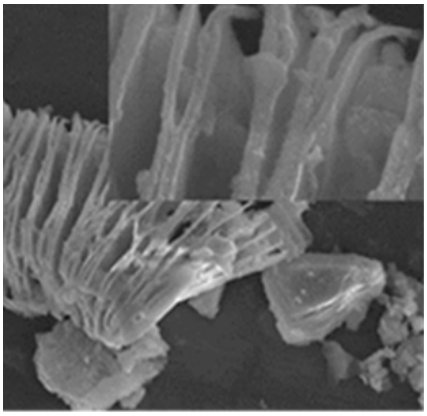


شکل ۱ خواص مهم در ارزیابی کاربردهای کامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات مکسین.

گرافن از گرافیت و ورقه‌های نیتریدبور شش‌ضلعی یا دی‌سولفیدمولیبدن به دست می‌آید. به همین ترتیب، ورق‌های مکسین را می‌توان از فازهای ماکس به دست آورد. روش‌های پایین به بالا نیز برای سنتز مکسین‌ها با رسوب بخار شیمیایی با روش‌های الگو در دسترس هستند، اما تاکنون، روش‌های بالا به پایین معمول‌تر است.

روش بالا به پایین شامل دو مرحله، حکاکی(Etching) و لایه‌برداری است. فازهای MAX کاربیدها و نیتریدهای سه‌تایی لایه‌ای با خواص فلزی و سرامیکی هستند. فازهای MAX همان‌طور که در بالا گفته شد دارای ساختار Mn+1AXn هستند. برای به‌دست آوردن صفحات MXene، اتم‌های لایه میانی "A" باید حذف شوند. متداول‌ترین فازهای MAX از Ti، Al و C تشکیل شده‌اند که در آن‌ها آلومینیوم عنصری است که باید با حکاکی حذف شود. لایه حک‌شده با چندین گروه پایانی Tx جایگزین می‌شود که ممکن است -O، -OH یا -F باشد. بنابراین، این ماده از لایه‌های Mn+1AXn تشکیل شده است که توسط پیوندهای هیدروژنی یا دیگر برهم‌کنش‌های واندروالس به هم متصل شده‌اند. Ti3AlC2 تا حد زیادی پراستفاده‌ترین فاز MAX است که Ti3C2TX را تولید می‌کند، اما بسیاری دیگر نیز ممکن است برای به‌دست آوردن MXen های مختلف حکاکی شوند [۱۲]. به‌منظور حذف لایه A، محلول‌های اسیدفلوئوردار ترجیح داده می‌شوند. محلول HF مستقیماً اضافه می‌شود [۱۵،۲۱،۲۲] یا به‌صورت پلیمری‌شدن از طریق واکنش اسیدکلریدریک با نمک فلورید (LiF) [۲۳-۲۵] تشکیل می‌شود. فاز MAX در محلول‌های اسیدی هم زده می‌شود. غلظت، زمان واکنش و دما بر بازده و ساختار مکسین تأثیر می‌گذارند [۱۳].

پس از شستشو برای حذف لایه A حک‌شده و اسیدهای



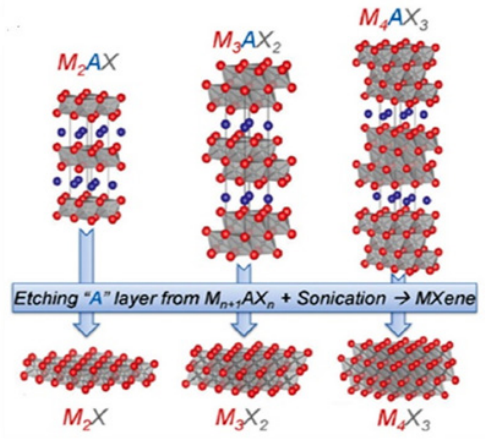
شکل ۲ مکسین اصلاح‌شده با محلول اسید[۱۴].

استفاده‌شده، لازم است اطمینان حاصل شود که ورق‌های Mn+1Xn به اندازه کافی از چند لایه به دست آمده جدا شده‌اند، که معمولاً Li+ در آن‌ها وارد می‌شود و فضای بین لایه را افزایش می‌دهد (شکل ۲).

برای کامل‌کردن لایه‌برداری، چندین روش در دسترس است. فراصوت مستقیم یا هم زدن برای مدت طولانی روش‌های مناسبی هستند. فراصوت به جداسازی نانوصفحات در زمان کوتاه‌تر کمک می‌کند. گزینه دیگر این است که از حلالی استفاده شود که به جدایی بین ورق‌ها به‌وسیله میان‌افشانی کمک می‌کند. مانند دی‌متیل‌سولفوکسید (DMSO) یا هیدروکسیدتترابوتیل‌آمونیوم .(TBAOH) محلول‌های MXene را می‌توان به‌طور مستقیم یا با حذف حلال از طریق صافش یا خشک‌کردن انجمادی استفاده کرد[۱۵]. فیلم‌هایی که با صافش خلأ یا پوشش‌دهی دورانی به دست می‌آیند، روش‌های رایج برای تهیه جاذب‌ها یا الکترودها هستند، اما برای رزین‌های اپوکسی مفید نیستند. در هر صورت، تعلیق‌های کلوئیدی 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 می‌گیرد و MXen های لایه‌لایه‌شده مستعد اکسایش در آب هستند و TiO2 تولید می‌کنند. در شکل ۳، ساختارهای متفاوت مکسین نشان داده شده است[۱۶].

۳ روش سنتز کامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات مکسین

روش‌های فراوری نانوکامپوزیت‌های رزین اپوکسی با نانوصفحات مکسین، نقش اساسی در خواص نهایی مواد دارند. روش ساخت انتخاب‌شده به ترکیب پرکننده‌ها در نانومکسین‌ها یا به عدم حضور افزودنی‌ها بستگی دارد. برای انتخاب بهترین



شکل ۳ ساختارهای متفاوت مکسین.

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 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 به‌دست‌آوردن پراکندگی‌های نانومکسین غیر اکسیده‌شده 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، باقی‌ماندن 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. به‌طورکلی، 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].

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

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

۴ بررسی خواص مکانیکی

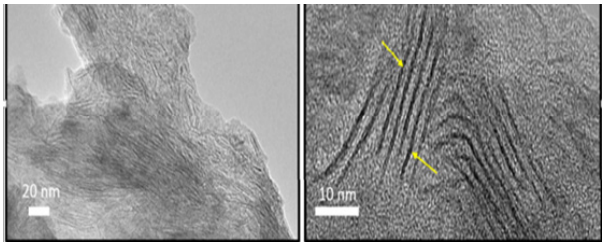
استفاده از مواد دوبعدی، به‌ویژه گرافن، برای تقویت رزین اپوکسی به‌طور گسترده مستند شده است. بهبودهای مهمی در مدول، استحکام مکانیکی، چقرمگی و سختی گزارش شده است. به‌طور کلی، نانومواد دوبعدی به‌طور عمیق مورد مطالعه قرار گرفته است. با این حال، مطالعه اپوکسی رزین‌های اصلاح‌شده با نانومکسین‌ها هنوز در آغاز است. نتایج بسته به نحوه به‌دست آوردن و پراکندگی نانومکسین بسیار متفاوت است و شیمی سطح نانوصفحات مکسین نیز بسیار مرتبط است. چندین کار اولیه بر چگونگی تأثیر نانومکسین‌ها بر عملکرد مکانیکی ماتریس اپوکسی متمرکز شده‌اند. وانگ و همکاران (Wang Etal) نشان داد که خود مونومر اپوکسی می‌تواند به صورت درونی و کووالانسی به هیدروکسیل‌های سطح لایه‌لایه Ti2CTx متصل شود و عملکرد مکانیکی بهبودیافته را از طریق پیوند سطحی قوی ارائه دهد[۲۲].

تحلیل آزمون میکروسکوپ الکترونی، نشان داد که نانومکسین‌ها به‌صورت دسته‌های منبسط‌شده و تک‌لایه‌ها در ماتریس اپوکسی مخلوط شدند و افزایش قابل توجهی در استحکام ضربه و استحکام خمشی برای کامپوزیت‌های ساخته‌شده در غلظت ۱ درصد مشاهده شد. این امر با سفتی(Stiffness) بالای نانوصفحات مکسین، افزایش انرژی جذب و سپس افزایش چقرمگی آن‌ها توضیح داده می‌شود. علاوه بر این، انحراف ترک و تسلیم برشی توسط نانو مکسین‌ها تسهیل می‌شود و در نتیجه سطح شکست ناهموارتر می‌شود. غلظت‌های بالاتر اثر معکوس دارند زیرا Ti2CTx اضافی باعث ایجاد عیوب بسیار زیادی در شبکه گرماسخت می‌شود[۲۳].

مطالعات بعدی تأثیر ماهیت و غلظت شیمیایی نانومکسین (۰/۵ تا ۹۰درصد)، روش‌های لایه‌برداری 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. به‌طورکلی، تمام تحقیقات تکمیل‌شده نشان می‌دهد که خواص مکانیکی معمولاً به مقادیر متفاوتی افزایش می‌یابد و سطوح شکست همیشه ناهموارتر از سطوح شکننده و شکسته رزین اپوکسی هستند و مکانیزم ترک–انحراف(Crack-deflection Mecha-nism) را نشان می‌دهند[۲۴].

بارسوم و همکاران (Barsoum etal)، کامپوزیت ساخته‌شده با نانومکسین را با ترکیب MXene با پیش‌ساز اپوکسی تهیه کرد و نتایج نشان داد که خواص مکانیکی مناسبی دارد ولی پراکندگی ذرات نامناسب است[۲۵].

سایر محققان از روش‌های کمک حلال برای دستیابی به



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 Etal.)، با استفاده از ۵ درصد از نانومکسین در رزین اپوکسی، خواص مناسب را در مدول و سختی کامپوزیت مشاهده کردند [۲۶].

درپژوهشی دیگر، کامپوزیت اپوکسی ساخته‌شده حاوی پرکننده اصلاح‌شده نانومکسین با کربونیترید(۱۰ تا ۹۰ درصد)، منجر به افزایش خواص مکانیکی شده است[۲۷].

با استفاده از تصاویر شکل ۴، پراکندگی پرکننده‌های نانومکسین در سراسر کامپوزیت پس از پخت فاصله بین ورق‌های نانومکسین از ۲۳–۱۷ Å متغیر بود که نشان می‌دهد اپوکسی بین صفحات نانومکسین قرار گرفته است و باعث ایجاد فاصله تصادفی بین صفحات مکسین می‌شود. با این حال، کلوخه‌ای‌شدن در ماتریس پلیمری مشاهده شده است. به احتمال زیاد به‌دلیل توزیع نامناسب مکسین‌ها در محلول استون است[۲۸].

در پژوهشی دیگر مشخص شد، با افزایش محتوای نانومکسین، سفتی زنجیره‌های اپوکسی نیز می‌تواند 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 شبکه‌ای می‌شود. [۲۹].

ینگ و همکاران (Ying etal) بر روی عامل‌دار کردن سطح مکسین‌ها برای بهبود عملکرد متمرکز شدند. در این پژوهش پیوند شیمیایی با سخت‌کننده متیل‌تتراهیدروفتالیک‌انیدرید (MTHPA)، منجر به کاهش کلوخه‌ای‌شدن شد. بررسی خواص مکانیکی نشان داد که با افزودن ۲ درصد نانومکسین به رزین اپوکسی، استحکام کششی و استحکام خمشی به‌ترتیب ۱۰۶/۴ و ۱۵۷ مگاپاسکال افزایش یافته، همچنین مدول ذخیره تا ۳۵ درصد افزایش می‌یابد. با افزودن نانومیله‌های آتاپولژیت (Atta-pulgite Nanorods)، به سخت‌کننده و مکسین، مدول ذخیره افزایش می‌یابد؛ زیرا گروه OH در هر دو ماده باعث پیوند هیدروژنی می‌شود[۳۰].

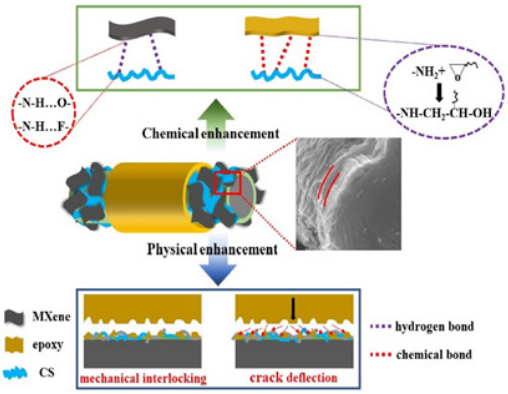
ترکیب نانومیله‌های آتاپولژیت، مدول ذخیره‌سازی را افزایش

داد، اما با افزودن بیش از حد آتاپولژیت، رفتار مکانیکی کاهش پیدا کرد. این کاهش به‌دلیل ضعیف‌بودن فصل مشترک آتاپولژیت و مکسین در مقایسه با فصل مشترک رزین اپوکسی و آتاپولژیت است[۳۱].

در پژوهشی دیگر، ینگ و همکاران (Ying etal)، با افزودن الیاف کربن اصلاح‌شده با اسید به نانومکسین، از طریق برهم‌کنش‌های هیدروژنی با گروه‌های کربوکسیل، اصلاح سطحی نانومکسین انجام شد. الیاف کربن تقویت‌شده به نانومکسین اضافه شد و به‌وسیله 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 بین‌سطحی الیاف کربن با نانومکسین، منجر به ایجاد پیوند هیدروژنی قوی می‌شود[۳۲].

شور و همکاران (Shur etal)، کامپوزیت اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن در حضور، ۳-آمینوپروپیل‌تری‌اتوکسی‌سیلان (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 etal)، کامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف کربن و نانومکسین و کیتوسان، به‌منظور افزایش خواص مکانیکی رزین اپوکسی ساخته شد (شکل۵). نتایج نشان داد که مکسین به‌دلیل ساختار لایه‌ای دوبعدی خود، سطح ویژه بزرگ‌تری دارد و به‌عنوان لنگر در ناحیه رابط عمل می‌کند تا قفل مکانیکی بین الیاف و ماتریس را تسهیل کند. ساختار سلسله‌مراتبی "آلی-غیرآلی" نه‌تنها 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 به‌طور محکم‌تری به الیاف کربن متصل شوند و ساختار رابط قوی ایجاد کنند. همچنین، این ساختار می‌تواند به‌عنوان 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 O، OH و NH2 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 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 به‌صورت الکترواستاتیکی در الیاف کربن که قبلاً با پلی‌اتیلن ایمین کاتیونیزه شده بود، رسوب کردند و سپس به سیلیکای اصلاح‌شده اضافه شدند. این روش باعث افزایش قابل‌توجهی 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 ریزترک های ماتریس بیشتری در کامپوزیت ها 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].

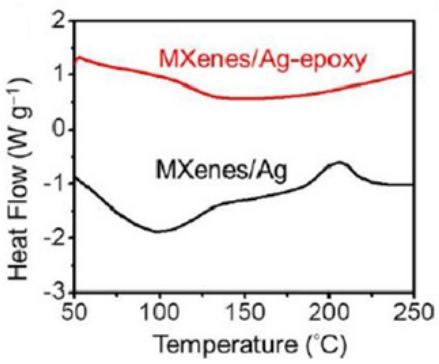
در پژوهشی، افزودن مقادیر کمی از مکسین، بین ۰/۲ و یک درصد وزنی، رسانایی گرمایی را تا مقدار ۱۴۱/۳ درصد برای رزین اپوکسی خالص بهبود بخشید. این کار همچنین نشان داد که چگونه نانوپرکننده مکسین بر رسانایی گرمایی رزین با دما تأثیر می‌گذارد. با افزایش دما، تحرک قطعه‌ای زنجیره‌های مولکولی اپوکسی افزایش و در نتیجه 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 etal.)، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات مکسین را برای بهبود خواص رسانایی گرمایی غیریکنواخت(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 به‌دلیل لایه‌برداری و افزایش اندازه جانبی به‌دلیل 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 نانومکسین و الیاف میزان انبساط حجم رزین اپوکسی را کاهش داد[۴۰].

در پژوهشی دیگر کامپوزیت اپوکسی حاوی ذرات نقره و مکسین بررسی شد (شکل۶). نتایج آزمون گرماسنج روبشی تفاضلی نشان داد که کامپوزیت نقره و مکسین بدون حضور اپوکسی در ۲۱۷ °C قله گرمازا دارد که به‌دلیل برهم‌کنش مناسب بین ذرات است. با افزودن نانوذرات به رزین اپوکسی، قله جدیدی مشاهده نشد که به‌دلیل پدیده به‌هم‌پیوستگی 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 به‌دلیل اثر پل زدن (Bridging Effect)، بین ذرات



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 (Tg) 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. به‌طورکلی، 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. به‌طورکلی، بارگذاری ۵ درصد وزنی از مکسین بهبود جزئی را نشان می‌دهد، اما محتوای بالاتر مکسین منجر به کاهش دمای تجزیه می‌شود[۳۵-۳۲].

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

نمونه	درصد زغال باقی‌مانده
اپوکسی خالص	۱۳/۴
اپوکسی – مکسین ۲ phr	۱۴/۵
اپوکسی– مکسین با فیتیک‌اسید ۰/۵ phr	۱۳/۶
اپوکسی– مکسین با فیتیک‌اسید ۱ phr	۱۴/۳
اپوکسی– مکسین با فیتیک‌اسید ۲ phr	۱۶/۶

نانو کامپوزیت اپوکسی با مکسین در حضور فیتیک‌اسید سنتز شد. نتایج زغال باقی‌مانده در جدول با درصدهای نانوذرات مشخص است. نتایج نشان داد که حضور ۲phr، می‌تواند خواص گرمایی را بهبود ببخشد. این خواص به‌دلیل اثر سدکنندگی فیزیکی، اثر کربن‌دارکردن کاتالیزور و تخریب حرارتی اکسایشی است (جدول۲) [۳۶].

۶ تحقیقات اخیر در مورد کامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات مکسین

نانومکسین‌های با ساختار دوفلزی به‌طور قابل‌توجهی عملکرد آتش‌سوزی را در کامپوزیت‌های اپوکسی بهبود می‌بخشند. نتایج نشان می‌دهند که افزودن ۱ درصد وزنی نانومکسین به کامپوزیت‌های اپوکسی، منجر به کاهش قابل‌توجهی در کاهش خطر آتش‌سوزی می‌شود. این بهبودها به‌دلیل اثرات کاتالیزوری قوی و اثر کربن‌سازی عناصر فلزی انتقالی Mo و Ti و همچنین ساختار نانوورقه‌ای مکسین است. این تحقیق بینش‌های جدیدی را در زمینه کاربرد مکسین‌های دوفلزی در کامپوزیت‌های پلیمری مقاوم در برابر آتش ارائه می‌دهد و نشان می‌دهد که این مواد می‌توانند به‌عنوان گزینه‌های مؤثری برای بهبود ایمنی در برابر آتش در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرند[۳۳-۳۱].
افزودن پرکننده‌های مکسین به پلیمرهای اپوکسی به‌طور قابل‌توجهی خواص مکانیکی آن‌ها، به‌ویژه سختی و استحکام را بهبود می‌بخشد. تحقیقات نشان می‌دهد که انرژی پیوند بین مکسین و اپوکسی تحت تأثیر ویژگی‌های سطحی مکسین قرار دارد و مدول یانگ کامپوزیت‌ها با افزودن مکسین تا حد معینی افزایش می‌یابد. با این حال، در غلظت‌های بالاتر پرکننده، مزایا ممکن است به‌دلیل تجمع کاهش یابد. به‌طور کلی، انتظار می‌رود که ادغام مکسین‌ها، سختی اپوکسی را بهبود بخشد و آن را برای کاربردهای مختلف مناسب‌تر کند[۳۴].

محققان نشان دادند که انرژی‌های سطحی نانوپرکننده‌های مکسین، به‌ویژه Ti3C2Tz، تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی و دوام کامپوزیت‌های پایه پلیمری دارند. با ارزیابی مقادیر انرژی سطحی و خواص ترشوندگی، مشخص شد که این خواص به تعداد لایه‌های پوشش و نوع مایعات بستگی دارد. همچنین، نتایج نشان‌دهنده چسبندگی بالای مکسین به رزین اپوکسی است که با استفاده از میکروسکوپ الکترونی و تصاویر سطح شکسته تأیید شده است. این یافته‌ها می‌توانند به بهبود عملکرد و دوام کامپوزیت‌های پلیمری کمک کنند [۳۵].
تیتانیوم کاربید (Ti3C2Tx) چند لایه با دمای متوسط–پایین حرارت داده شد. نانوکامپوزیت‌ها /اپوکسی با استفاده از روش ریختن محلول به دست آمدند. نتایج AFM، SEM، XRD و TEM نشان‌دهنده موفقیت در تهیه Ti3C2Tx چندلایه بود. آزمون XPS، FTIR و XRD نشان داد که حرارت‌دهی بخشی از گروه‌های قطبی روی سطح Ti3C2Tx را حذف کرده است بدون اینکه محصول جانبی ایجاد شود[۳۶].
اصلاح الیاف کربن با مکسین و استفاده از ۳–آمین‌پروپیل تری‌اتوکسی‌سیلان، به‌طور قابل‌توجهی خواص بین‌سطحی کامپوزیت‌های اپوکسی را بهبود بخشیده است. پیوندزنی موفق Ti2C بر روی سطح الیاف کربن نه‌تنها زبری سطح را افزایش داده، بلکه گروه‌های عملکردی قطبی زیادی را نیز معرفی کرده است که منجر به افزایش انرژی سطحی شده است. این بهبود باعث افزایش قابل‌توجهی در مقاومت برشی بین‌سطحی (IFSS) به میزان حدود ۷۸ درصد و مقاومت برشی بین‌لایه‌ای (ILSS) به میزان حدود ۲۸درصد در مقایسه با کامپوزیت‌های الیاف کربن بدون پوشش شده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که اصلاح Ti2C رویکردی امیدوارکننده برای بهینه‌سازی عملکرد کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن است[۳۷].
سنتز نانو کامپوزیت اپوکسی با مکسین، با هدف افزودنی مؤثر در پوشش‌های اپوکسی برای افزایش مقاومت در برابر خوردگی بررسی شد. سنتز موفق این نانولایه‌های چندلایه و ارزیابی آن‌ها از طریق آزمایش‌های مختلف، توانایی آن‌ها را در عمل به‌عنوان مانع فیزیکی در برابر محیط‌های خورنده نشان می‌دهد. این تحقیق نه‌تنها خواص ذاتی مواد دوبعدی مانند Ti3C2 را به نمایش می‌گذارد، بلکه راه را برای کاربردهای نوآورانه در پوشش‌های حفاظتی هموار می‌کند و در نهایت به طول عمر و دوام مواد در شرایط چالش‌برانگیز کمک می‌کند[۳۵-۳۴].
با توجه به افزایش چگالی توان الکترونیک‌ها، بهبود عملکرد انتقال حرارت مواد بسته‌بندی الکترونیکی نقش مثبتی در ارتقای عملکرد الکترونیک‌های نوین ایفا خواهد کرد. محققان، فوم

سه‌بعدی الیاف کربن و مکسین با استفاده از روش ساده انجماد-خشک‌کردن تهیه کردند. نتایج نشان داد که هدایت گرمایی کامپوزیت‌های اپوکسی به سطح فوق‌العاده‌ای در ۳۰/۲ درصد وزنی افزایش یافته و این افزایش ۴۵/۹ درصدی نسبت به اپوکسی خالص بوده است. همچنین، خواص گرمایی کامپوزیت‌ها مانند دمای انتقال شیشه‌ای و ضریب انبساط گرمایی مورد بررسی قرار گرفت. تمامی نتایج نشان می‌دهد که کامپوزیت اپوکسی به‌عنوان ماده‌ای امیدوارکننده برای انتقال حرارت در زمینه کاربردهای الکترونیکی به شمار می‌آید[۳۶].

سنتز کامپوزیت اپوکسی و پلی‌آکریلو نیتریل در حضور نانومکسین، با بهبود قابل‌توجهی در مقاومت در برابر خوردگی پوشش اپوکسی آبی برای فولاد Q۲۳۵ همراه هستند. این بهبود ناشی از اثر هم‌افزایی بین اثر پلی‌آکریلو نیتریل و مکسین است که باعث می‌شود این کامپوزیت‌ها با وجود هدایت الکتریکی پایین‌تر، حفاظت مؤثری در برابر خوردگی ارائه دهند[۳۲-۳۴].

پژوهشگران به‌منظور بهبود خواص گرمایی و مکانیکی رزین اپوکسی سیلیکا و مکسین را در حین سنتز به رزین اپوکسی اضافه کردند. ذرات به‌خوبی در ماتریس پراکنده شده، باعث افزایش پایداری گرمایی و کاهش نرخ حداکثر انتشار حرارت شد. همچنین، این ترکیب به افزایش مدول ذخیره‌سازی و بهبود استحکام کششی و کشش در نقطه شکست کمک می‌کند. اثرات دوگانه تشکیل زغال باقی‌مانده و اثرات مانع لایه‌ای مکسین با سیلیکا، در این بهبودها نقش دارند. به‌طور کلی، این تحقیق نشان می‌دهد که نانوسازه تهیه‌شده می‌تواند به‌طور مؤثری خواص اپوکسی را بهبود بخشد[۳۵].

پودر نانومکسین اصلاح‌شده با اسیدفیتیک از طریق ترکیب روش‌های 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 لایه‌ای دو بعدی و خاصیت خوب تشکیل زغال با ۸۶/۷ درصد زغال باقی‌مانده، در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد بود. نتایج آزمایش گرماسنجی مخروطی نشان داد که P-MXene به EP خاصیت ضدشعله می‌دهد. این تحقیق روش امیدوارکننده‌ای برای طراحی پلیمرهای چندمنظوره ارائه می‌دهد[۳۶].

نانوکامپوزیت اپوکسی با مکسین در حضور فیتیک‌اسید سنتز شد. نتایج آزمایش نشان داد که افزودن ۲phr مکسین و فیتیک‌اسید به رزین اپوکسی، منجر به بهبودی در خواص گرمایی می‌شود که به‌دلیل اثر کربونیزه‌شدن این کامپوزیت است[۴۰-۳۷].

در جدول ۳، به‌صورت خلاصه پیشرفت‌های اخیر در سنتز نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات مکسین و مهم‌ترین دستاوردهای آن، به‌صورت خلاصه جمع‌بندی شده است.

۷ چالش‌ها و محدودیت‌ها

نانوذرات مکسین به‌دلیل 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،

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

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 مغنطیسی- 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-پلی‌آکریلو نیتریل-مکسین	۲۰۲۲	خواص خوردگی مناسب به‌عنوان پوشش سطح
اپوکسی-مکسین-سیلیکا	۲۰۲۳	بهبود خواص مکانیکی
اپوکسی-فیتیک‌اسید-مکسین	۲۰۲۲	بهبود خواص حرارتی

پایداری گرمایی ماتریس اپوکسی می‌تواند تحت تأثیر وجود مکسین ها 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 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 نانوورقه‌ای مکسین است. همچنین، اصلاح الیاف کربن با مکسین و استفاده از ۳-آمین‌پروپیل 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.

مراجع

1. 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**.
2. Capricho, J.C. and Fox, B., Multifunctionality in Epoxy Resins, *Polym. Rev*., 60, 1–41, **2020**.
3. Jin, F.L. and Li, X., Synthesis and Application of Epoxy Resins: A Review, *J. Ind. Eng. Chem*., 29, 1–11, **2015**.
4. 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**.
5. 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**.
6. Govindaraj, P. and Sokolova, A., Distribution States of Graphene in Polymer Nanocomposites: A Review, *Compos. Part B: Eng.*, 226, 109353, **2021**.
7. Rasul, M.G. and Kiziltas, A., 2D Boron Nitride Nanosheets for Polymer Composite Materials, npj 2d Mater. *Appl*., 5, 56, **2021**.
8. Huo, S. and Song, P., Phosphorus-Containing Flame Retardant Epoxy Thermosets: Recent Advances and Future Perspectives, Prog. *Polym. Sci*., 114, 101366, **2021**.
9. Naguib, M. and Kurtoglu, M., Two-Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti3AlC2, Adv. *Mater*., 23, 4248–4253, **2011**.
10. Naguib, M. and Barsoum, M.W., Ten Years of Progress in the Synthesis and Development of MXenes, Adv. *Mater*., 33, 2103393, **2021**.
11. Sun, S. and Liao, C., Two-Dimensional MXenes for Energy Storage, *Chem. Eng. J*., 338, 27–45, **2018**.
12. Sun, Y. and Li, Y., Potential Environmental Applications of MXenes: A Critical Review, *Chemosphere*, 271, 129578, **2021**.
13. Song, P. and Liu, B., MXenes for Polymer Matrix Electromagnetic Interference Shielding Composites: A Review, Compos. *Commun*., 24, 100653, **2021**.
14. Naguib, M. and Mochalin, V.N., 25th Anniversary Article: MXenes: A New Family of Two-Dimensional Materials, *Adv. Mater*., 26, 992–1005, **2014**.
15. Naguib, M. and Mashtalir, O., Two-Dimensional Transition Metal Carbides, ACS Nano, 6, 1322–1331, 2012. 16. Dong, M. and Zhang, H., Multifunctional Epoxy Nanocomposites Reinforced by Two-Dimensional Materials: A Review, *Carbon*, 185, 57–81, **2021**.
17. 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.
18. Krishnan, U. and Kaur, M., A Synoptic Review of MoS2: Synthesis to Applications, Superlattices Microstruct., 128, 274–297, **2019**.
19. 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**.
20. 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**.
21. 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**.
22. 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**.
23. 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**.
24. Sun, W. and Shah, S.A., Electrochemical Etching of Ti2AlC to Ti2CTx (MXene) in Low-Concentration Hydrochloric Acid Solution, J. Mater. *Chem. A*, 5, 21663–21668, **2017**.
25. Wang, L. and Chen, L., Fabrication on the Annealed Ti3C2Tx MXene/Epoxy Nanocomposites for Electromagnetic Interference Shielding Application, *Compos*. *Part B: Eng*., 171, 111–118, **2019**.
26. Mashtalir, O. and Naguib, M., Intercalation and Delamination of Layered Carbides and Carbonitrides, Nat. *Commun*., 4, 1716, **2013**.
27. Lv, G. and Wang, J., Intercalation and Delamination of Two-Dimensional MXene (Ti3C2Tx) and Application in Sodium-Ion Batteries, *Mater*. **Lett**., 219, 45–50, **2018**.
28. 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**.
29. 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 Thermomechanical 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 Ti3C2Tx MXene Nanosheets with Excellent Electric Conductivity, *Nanomaterials*, 10, 162, **2020**.
37. Liu, L. and Ying, G., Aqueous Solution-Processed MXene (Ti3C2Tx) for Non-Hydrophilic Epoxy Resin-Based Composites with Enhanced Mechanical and Physical Properties, *Mater. Des*., 197, 109276, **2021**.
38. Liu, L. and Ying, G., Attapulgite–Mxene Hybrids with Ti3c2tx Lamellae Surface Modified by Attapulgite 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**.