نشریه صنعت لاستیک ایران
سال۲۹/شماره ۱۱۸/ ۱۴۰۴

علمی - فنی

تحلیل نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده: پیشرفت‌های جدید در مورفولوژی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی

Analysis of Recent Advances in Epoxy Nanocomposites Reinforced with Modified Graphene Oxide Nanoparticles: A Review of Morphology, Mechanical Properties, Thermal Stability, and Thermal Degradation Behavior

چکیده

رزین‌های اپوکسی به‌عنوان پلیمرهایی گرماسخت، به دلیل ویژگی‌هایی همچون استحکام بالا، چسبندگی مناسب و مقاومت شیمیایی، در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، الکترونیک و ساختمان‌سازی کاربرد گسترده‌ای دارند. بااین‌حال، شکنندگی ذاتی آن‌ها، به‌ویژه تحت تنش‌های مکانیکی، محدودیتی در عملکرد این مواد ایجاد می‌کند. در سال‌های اخیر، استفاده از نانوذرات به‌ویژه نانوذرات گرافن اکساید (GO) به‌منظور بهبود خواص مکانیکی و حرارتی این رزین‌ها مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش به بررسی تأثیر نانوذرات گرافن اکساید اصلاح‌شده با پلیمرهایی مانند پلی‌اتیلن گلیکول، پلی‌وینیل پیرولیدون و عوامل عامل‌دار کننده حاوی گروه‌های آمینی، سیلانی، فسفردار و نیتروژنه بر خواص رزین اپوکسی می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که اصلاح سطح نانوذرات منجر به بهبود پراکنش، کاهش کلوخه‌ای شدن، افزایش چقرمگی، تقویت مدول الاستیک و افزایش استحکام خمشی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی می‌شود. همچنین مشخص شد که وجود برهم‌کنش‌های قوی بین نانوذرات و زنجیره‌های پلیمری، نقش کلیدی در جلوگیری از رشد ترک و افزایش دوام حرارتی ایفا می‌کند. بااین‌حال، افزایش بیش از حد غلظت نانوذرات می‌تواند موجب تجمع ذرات و تضعیف خواص شود. در نهایت، مروری بر تازه‌ترین دستاوردها و پیشرفت‌های تحقیقاتی در زمینه نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با گرافن اکساید اصلاح‌شده، پتانسیل بالای این مواد را در کاربردهای صنعتی و مهندسی نوید می‌دهد.

کلمات کلیدی: رزین اپوکسی، نانوذرات، گرافن اکساید اصلاح شده، مورفولوژی، خواص مکانیکی، تخریب گرمایی

نوع مقاله: پژوهشی

محمد حسین کرمی[۱]، امید معینی جزنی[۲] محمد علی اطمینانی اصفهانی[۳]

۱-پژوهشگر پسا دکتری، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
۲-گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
۳- گروه صنایع شیمیایی ، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

ایمیل نویسندگان و عهده‌دار مکاتبات: .o.moini@eng.ui.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۸/ ۰۵/ ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۵/ ۰۸/ ۱۴۰۴

۱- مقدمه

رزین اپوکسی یکی از پلیمرهای حرارتی مهم است که به دلیل ویژگی‌های برجسته‌اش از جمله استحکام در برابر کشش و فشار، دمای تغییر شکل و مقاومت شیمیایی مناسب، در صنایع مختلفی مانند چسب‌ها، پوشش‌ها، الکترونیک، مواد کامپوزیت با کارایی بالا، توربین‌های بادی و قالب‌گیری مورداستفاده قرار می‌گیرد[۱].

رزین‌های اپوکسی دارای پیوندهای عرضی بالا هستند که برای ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی مناسب ضروری‌اند. بااین‌حال، ترک‌های ایجادشده پس از پخت با سخت‌کننده می‌توانند باعث کاهش مقاومت در برابر شکست و ضربه و افزایش شکنندگی شوند[۲].

برای بهبود نقاط ضعف و ارتقای ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی، می‌توان از ترکیب‌های مختلف مواد پلیمری یا نانوذرات آلی و معدنی استفاده کرد. نانو گرافن به دلیل هدایت الکتریکی و حرارتی بالا و ویژگی‌های خاص سطحی، موردتوجه قرار گرفته است. بااین‌حال، گرافن به دلیل پیوندهای واندروالس و ویژگی‌های آب‌گریز خود، با محدودیت‌هایی مواجه است[۳].

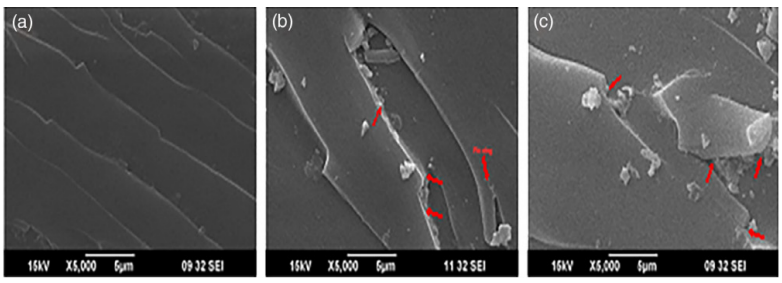
گرافن به دلیل ویژگی‌های مکانیکی، مقاومت در برابر حرارت و هدایت الکتریکی عالی، در میان خانواده مواد کربنی موردتوجه ویژه‌ای قرار گرفته است. همچنین، گرافن اکسید، که ساختاری مشابه گرافن دارد، به‌عنوان نانومواده‌ای برای تقویت بَسپارها و رزین‌های اپوکسی استفاده می‌شود. نانو گرافن‌ها در زمینه‌های مختلفی از جمله تجهیزات الکتریکی، باتری‌ها و حسگرهای انرژی کاربرد دارند[۶-۴]. همچنین، این نانوماده در محیط‌زیست برای حذف آلاینده‌های آب‌وهوا و در زیست‌پزشکی به‌عنوان حامل نانوداروها استفاده می‌شود. گرافن اکسید نیز به‌عنوان یک عایق الکتریکی شناخته می‌شود. روش اصلاح شده هامر، به‌عنوان یک روش مهم برای تولید گرافن اکسید شناخته می‌شود[۷].

تولید گرافن به روش‌های مختلفی انجام می‌شود که شامل لایه‌گذاری میکرو، رسوب‌دهی شیمیایی، رشد اپیتاکسیال و سوسپانسیون‌های کلوئیدی است. وجود گروه‌های هیدروکسیل و کربوکسیل در ساختار گرافن، به‌ویژه در گرافن اکسید و گرافن اکسید کاهش‌یافته، به ایجاد نانوکامپوزیت‌هایی با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاص کمک می‌کند. همچنین، گرافن اکسید به‌عنوان یک منبع ابرمولکولی غیراستوکیومتری در شرایط محیطی با رطوبت بالا شناخته می‌شود [۱۰-۸].

در این پژوهش، تأثیر نانوذرات گرافن اکساید بر مورفولوژی، خواص مکانیکی، پایداری حرارتی و رفتار تخریب حرارتی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، در ادامه پژوهش به تحلیل نتایج کلیدی و مروری بر پیشرفت‌های اخیر در زمینه نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات گرافن اکساید اصلاح‌شده پرداخته شده است.

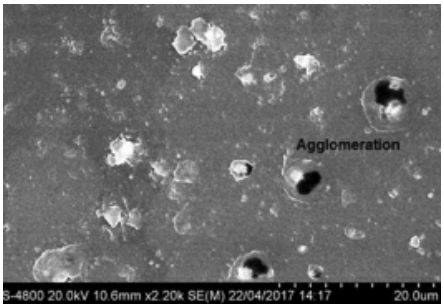
۲- مورفولوژی

اثر نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با پلی‌اتیلن گلیکول بر مورفولوژی رزین اپوکسی بررسی شد (شکل ۱). نتایج نشان داد که، این افزودنی منجر به چقرمگی رزین اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص می‌شود. این افزایش در چقرمگی به دلیل، پیوند هیدروژنی بین پلی‌اتیلن گلیکول و رزین اپوکسی است. همچنین مکانیزم رشد ترک بسیار کم دیده شد[۱۱].



شکل ۱.تصاویرآزمون سطح شکست (a). رزین اپوکسی (b). اپوکسی و نانوذرات گرافن اکساید (c). اپوکسی حاوی پلی اتیلن گلیکول و نانوذرات گرافن اکساید

مورفولوژی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با گروه آمینی بررسی شد (شکل۲). نتایج نشان داد که در مقادیر ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ درصد وزنی از نانوذرات گرافن اکساید، کلوخه ای شدن دیده نشد و پراکنش ذرات در ماتریس اپوکسی بسیار مناسب است، که این پراکنش مناسب به دلیل بر همکنش وچسبندگی مناسب بین نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده و رزین اپوکسی است[۱۲]. همچنین با افزایش درصد وزنی به ۰/۴ و ۰/۵ درصدوزنی از نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده، کلوخه ای شدن مشاهده شد. افزایش مقدار نانوذرات منجر به افزایش زبری سطح می‌شود و در نتیجه کلوخه ای شدن اتفاق می‌افتد[۱۳].

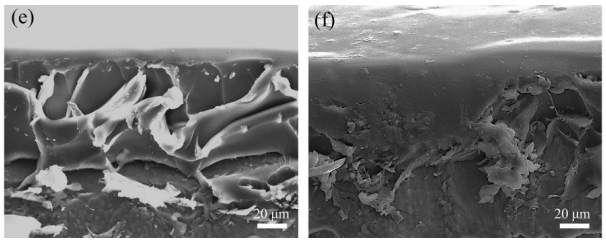


شکل۲. تصاویر آزمون میکروسکوپ الکترونی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی۰/۵ درصد وزنی نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با گروه آمینی

در پژوهشی دیگر، مورفولوژی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با گروه سیلانی، و نانوذرات گرافن اکساید با گروه‌های شبکه‌ای سیلیکونی بررسی شد. نتایج نشان داد که اصلاح سطح نانوذرات گرافن اکساید با گروه سیلانی می‌تواند تعامل بین لایه‌ای و نیروی وان‌دروالس بین نانوذرات گرافن اکساید را کاهش دهد و سازگاری و تعامل با رزین اپوکسی را افزایش دهد. همچنین اصلاح سطح با گروه‌های سیلیکونی هم می‌تواند منجر به توزیع خوب ذرات در ماتریس اپوکسی شود[۱۴].

اثر دو نوع اصلاح‌کننده سطح آمینو تیازول و آمینو نفتیل تیازول بر مورفولوژی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که حضور نانوذرات گرفن اکساید در رزین اپوکسی منجر به کلوخه‌ای شدن می‌شود. پس از اصلاح سطح با اصلاح‌کننده آمینو تیازول، مقدار کلوخه‌ای شدن کاهش پیدا کرد. همچنین اصلاح‌کننده سطح نانوذرات گرافن اکساید از نوع آمینو نفتیل تیازول در مقایسه با دیگر نمونه‌ها، منجر به بهبود پراکنش در ماتریس اپوکسی شده است[۱۵].

در پژوهشی دیگر اثر نانوذرات گرافن اکساید، و گرافن اکساید اصلاح شده با نانوذرات سریوم اکساید بر مورفولوژی رزین اپوکسی بررسی شد (شکل۳). نتایج نشان داد که حضور نانوذرات گرافن اکساید در ماتریس رزین اپوکسی، منجر به کلوخه‌ای شدن می‌شود. پس از اصلاح سطح نانوذرات گرافن اکساید با نانوذرات سریوم اکساید، پراکنش هیبرید نانوذرات در ماتریس اپوکسی بهبود می‌یابد. ممانعت فضایی نانوذرات سریوم اکساید، فاصله بین لایه‌های نانوذرات گرافن اکساید را افزایش داده و از جذب متقابل آنها جلوگیری می‌کند، ازاین‌رو از تجمع نانوصفحات جلوگیری می‌کند[۱۶].



شکل۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (الف) شکل چپ نانوکامپوزیت اپوکسی و شکل راست نانوکامپوزیت اپوکسی با دو نوع نانوذره

مورفولوژی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با گروه‌های آمینو سیلان (APTES)، بررسی شد. نتایج نشان داد که نانوصفحات اصلاح شده به‌خوبی در ماتریس اپوکسی پراکنده شده‌اند و ساختار شبیه مو شکل دارند. این رفتار نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح شده را می‌توان به تعاملات بین سطحی قوی از طریق پیوندهای کووالانسی بین گروه‌های انتهایی آمینی نانوصفحات و زنجیره‌های مولکولی پلیمری در طول واکنش‌های سخت‌شدن نسبت داد [۱۷]. بنابراین، APTES به‌عنوان یک پل عمل کرده و سازگاری بین صفحات نانو صفحات گرافن اکساید و زنجیره‌های پلیمری را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، اگرچه تجمع ذرات با افزایش غلظت نانوذرات اصلاح شده

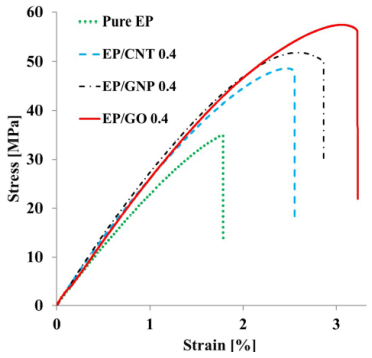
در نانوکامپوزیت اپوکسی مشاهده می‌شود، اما آنها هنوز ساختار صفحه‌ای خود را درون ماتریس حفظ می‌کنند[۱۸].

اثر اصلاح سطح نانوذرات گرافن اکساید با گروه سیلانی (ETEO)، بر مورفولوژی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که رزین اپوکسی خالص دارای سطح یکنواخت صاف و بدون وجود ناخالصی است. حضور نانوذرات اصلاح شده منجر به کلوخه‌ای شدن نانوکامپوزیت می‌شود و بنابراین فشردگی نانوکامپوزیت کاهش می‌یابد. با افزایش مقدار درصد وزنی نانوذرات به ۰/۷، مورفولوژی نانوکامپوزیت از ساختار صاف به ساختار زیر تغییر کرد و همچنین فشردگی نانوکامپوزیت افزایش می یابد[۱۹]

در پژوهشی دیگر، اثر نانوذرات گرافن اکساید بر مورفولوژی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که به طور قابل‌توجهی ورقه‌ورقه شده و در سراسر ماتریس اپوکسی پراکنده شده‌اند، اگرچه هنوز برخی از تجمعات کوچک وجود دارد. نتایج آزمون نشان داد که تعداد لایه‌های نانو گرافن بین ۷ الی ۱۲ عدد بوده است. همچنین نانوذرات به صورت مناسبی در ماتریس اپوکسی پراکنده شده اند. با افزایش مقدار درصد وزنی نانوذرات، کلوخه ای شدن ذرات دیده شد. همچنین اثر نانوذرات در ماتریس اپوکسی منجر به عدم تحرک مناسب زنجیره های اپوکسی است و درنتیجه دمای انتقال شیشه ای نانوکامپوزیت های اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص، کاهش می یابد[۲۰].

۳- خواص مکانیکی

پژوهشگران خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربن (EP/CNT 0.4)، نانوصفحات گرافن (EP/GNP 0.4)و نانوذرات گرافن اکساید (EP/GO 0.4) را بررسی کردند (شکل۴). نتایج آزمون تنش- کرنش نشان داد که، اپوکسی خالص یک رابطه تنش-کرنش خطی را نشان داد که در نهایت به یک شکست ناگهانی منجر شد، که این ویژگی به خوبی شناخته شده‌ای از مواد ترد است. اگرچه نانوکامپوزیت‌ها به‌ویژه EP/GNP و EP/GO، رفتار نسبتاً الاستیک‌تری داشتند، اما به نقطه تسلیم رسیدند که این امر توضیح‌دهنده تغییر شکل پلاستیک قبل از شکست است [۲۱]. برخی از محققان تغییر شکل پلاستیک رزین اپوکسی را ناشی از ادغام گرافن اصلاح‌شده سطحی گزارش کرده‌اند. از سوی دیگر، ژانگ و همکارانش تأثیر نانولوله‌های کربنی و گرافن را بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی مطالعه کردند و دریافتند که افزودن ذرات کربنی اصلاح‌شده سطحی، استحکام کششی ماتریس را بهبود می‌بخشد. بااین‌حال، نانوکامپوزیت تهیه‌شده هنوز هم رفتار تردی مشابه اپوکسی خالص را نشان داد [۲۲].

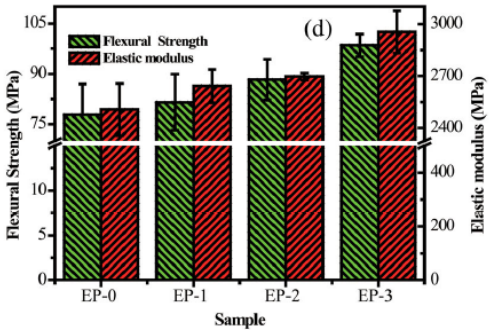


شکل۴. نمودار تنش- کرنش رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی

تأثیر نانوذرات گرافن اکساید کاهش‌یافته اصلاح شده با ذرات آهن بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی شد و با نمونه رزین اپوکسی خالص مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس نمودارهای تنش-کرنش، استحکام کششی و مدول کامپوزیت رزین اپوکسی خالص به ترتیب ۴۲/۶ مگاپاسکال و ۱/۸ گیگاپاسکال بود. افزودن یک درصد از نانوذرات اصلاح شده، به‌وضوح استحکام کششی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی افزایش داد. بااین‌حال، افزایش بیشتر نانوذرات گرافن اکساید (۲ درصد وزنی) بهبود بیشتری در عملکردهای کششی نسبت به دیگر نمونه حاوی یک درصد وزنی نداشت. همچنین، بالاترین مقاومت به ضربه را نمونه حاوی یک درصد وزنی نانو گرافن اکساید اصلاح شده داشت[۲۳].

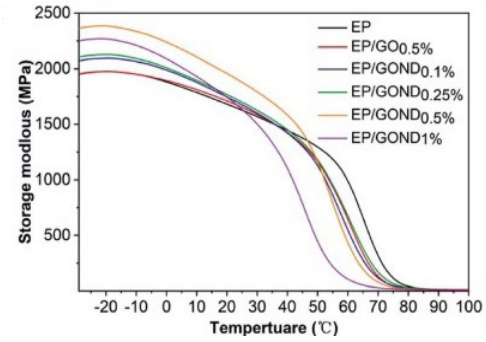
پژوهشگران، اثر نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با فسفر و نیتروژن بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی کردند (شکل۵). نتایج نشان داد که مدول الاستیک و استحکام خمشی با افزایش محتوای نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده، افزایش می‌یابد.

مدول الاستیک و استحکام خمشی در دمای اتاق به ترتیب ۱۷/۹ و ۲۶/۷ درصد نسبت به رزین اپوکسی خالص افزایش یافت. وجود گروه‌های هیدروکسیل در نانوذرات می‌تواند در طول فرایند پخت با ماتریس اپوکسی پیوند کووالانسی تشکیل دهد، و منجر به تعامل بین اپوکسی و نانوذرات گرافن اکساید را بیشتر تقویت کرده و باعث بهبود عملکرد مکانیکی شده است[۲۴].



شکل۵. نمودار استحکام خمشی و مدول الاستیک رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت های اپوکسی

در پژوهشی دیگر، اثر نانوذرات گرافن اکساید و نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با اپوکسی حاوی کاردانول بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی شد (شکل۶). نتایج نشان داد که نانوذرات گرافن اکساید در محدوده دمایی منفی ۳۰ تا ۳۶ درجه سانتیگراد منجر به بهبود مدول ذخیره نانوکامپوزیت اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص شده است. پس از اصلاح سطح نانوذرات گرافن اکساید برای تمام نمونه‌ها، خواص مکانیکی افزایش پیدا می‌کند. همچنین مقادیر زیاد از نانوذرات اصلاح شده هم منجر به کلوخه‌ای شدن ذرات می‌شود و مدول ذخیره را کاهش می‌دهد[۲۵].

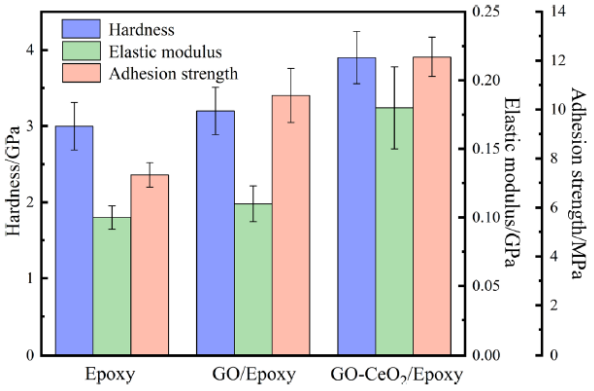


شکل۶. نمودار مدول ذخیره رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی

خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات گرافن اکساید، و نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با پلی اتر آمین بررسی شد. نتایج نشان داد که اصلاح سطح نانوذرات گرافن اکساید منجر به بهبود خواص استحکام و مدول نانوکامپوزیت اصلاح شده در مقایسه با رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت شده است. این اصلاح سطح منجر به بهبود سازگاری و اصلاح بین سطح بین رزین اپوکسی و نانوذرات شده است. بنابراین نانوکامپوزیت منجر به انتقال تنش شده است و می‌تواند خواص مکانیکی را افزایش دهد. همچنین، حضور گروه آمینی در نانوذرات گرافن اکساید، باعث کمترشدن رشد ترک در نانوکامپوزیت می‌شود[۲۶].

در پژوهشی دیگر اثر نانوذرات گرافن اکساید، و گرافن اکساید اصلاح شده با نانوذرات سریوم اکساید بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی شد (شکل۷). نتایج نشان داد که پس از افزودن نانوذرات گرافن اکساید به رزین اپوکسی، مقدار سختی و مدول الاستیک به ترتیب برابر با ۳/۲ گیگا پاسکال و ۰/۱۱ گیگا پاسکال می‌شود [۲۷]. همچنین اصلاح سطح نانوذرات گرافن اکساید با نانوذرات سریوم اکساید می‌تواند مقدار سختی و مدول الاستیک نانوکامپوزیت برابر با ۳/۷ گیگا پاسکال و ۰/۱۸ گیگا پاسکال می‌شود. پرکننده ها نقاط خالی یا حفره های ماتریس را پر کرده وچگالی پیوند عرضی رزین اپوکسی بهبود یافته و حجم آزاد پوشش کاهش می‌یابد[۲۸]. بنابراین اصلاح سطح نانوذرات می‌تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی شود. در مورد استحکام چسبندگی، پوشش اپوکسی اولیه مقدار چسبندگی کمی کمتر از ۷/۳ مگاپاسکال داشت. پس از اصلاح سطح با نانوذرات گرافن اکساید و نانوذرات گرافن اکساید حاوی نانوذرات سریوم اکساید، استحکام چسبندگی به طور قابل توجهی افزایش یافت و به ترتیب برابر با ۱۰/۶ و ۱۲/۲ مگاپاسکال رسید. نانوذرات گرافن اکساید می‌تواند تنش پسماند داخل نانوکامپوزیت اپوکسی را آزاد کند و منجر به خاصیت چسبندگی بهتر شود. همچنین نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح شده، با پراکندگی بهینه پرکننده،

استحکام چسبندگی را بیشتر افزایش داد [۲۹].



شکل۷. نمودار سختی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی

اثر نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با پلی‌وینیل پیرولیدون و نانوذرات گرافن اکساید بر مدول ذخیره رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که اصلاح سطح منجر به ایجاد پیوند هیدروژنی بین رزین اپوکسی و پلی‌وینیل پیرولیدون به واسطه گروه کربونیل می‌شود؛ بنابراین مدول ذخیره ۷۴ درصد افزایش می‌یابد. مقدار استحکام کششی برای نمونه رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت اپوکسی، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی پلی‌وینیل پیرولیدون به ترتیب برابر با ۴۲/۳، ۵۱/۴۳، و ۴۷ /۵۶ است. همچنین، کاهش در مقدار استحکام کششی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی پلی‌وینیل پیرولیدون به دلیل اثر نرم‌کنندگی پلی‌وینیل پیرولیدون در ماتریس اپوکسی است[۳۰].

۴- پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی

در پژوهشی دیگر، اثر نانوذرات گرافن اکساید و نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با گروه‌های سیلیکا و نیتروژن و حاوی تأخیرانداز شعله بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد (جدول۱). نتایج نشان داد که برای تمام نمونه‌ها، رفتار تخریب گرمایی یک‌مرحله‌ای مشابهی را در دمای ۳۰۰ تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد که به تخریب گرمایی، شبکه زنجیرهای اپوکسی نسبت داده می‌شود[۳۱]. همچنین، افزودن نانوذرات گرافن اکساید و نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده، دمای تخریب اولیه را به تأخیر انداخته و پایداری حرارتی کامپوزیت‌ها را افزایش داد. بااین‌حال، با افزودن مقدار کمی از نانوذرات گرافن اکساید و نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده، دمای کاهش وزن ۵۰ درصد را به دماهای پایین‌تری منتقل کرد که ناشی از تخریب زودهنگام گروه‌های عاملی در دماهای پایین بود. ذغال باقیمانده نمونه ۱ درصد وزنی از دیگر نمونه‌ها بیشتر بود؛ بنابراین این نمونه پایداری گرمایی را افزایش داده است. این بهبود به دلیل حضور نانوذرات گرافن اکساید است که می‌تواند به‌عنوان مانع فیزیکی عمل کرده و از تخریب گرمایی ماتریس اپوکسی محافظت کند و همچنین می‌تواند، با ایجاد زنجیره‌های مولکولی شعله‌زا به بهبود پایداری گرمایی کمک کند[۳۲].

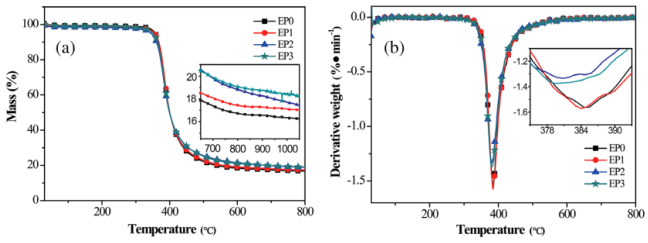
جدول ۱. داده‌های آنالیزگرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی

نمونه	دمای ۵ دردصد کاهش وزن (C^O)	دمای ۵۰ دردصد کاهش وزن (C^O)	بیشینه دمای تخریب گرمایی (C^O)	درصد ذغال باقیمانده در دمای ۷۰۰(C^O)
رزین اپوکسی	۳۶۴/۷	۴۰۲/۱	۳۸۴/۷	۱۳/۹
نانوکامپوزیت اپوکسی ۰/۵ درصد	۳۶۸/۲	۳۶۸/۲	۳۸۵/۷	۱۵/۲
نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح شده حاوی تأخیرانداز شعله (۱درصد)	۳۶۵/۶	۴۰۵/۸	۳۸۷	۱۷/۸

اثر نانوذرات گرافن اکساید و نانوذرات تیتانیوم اکساید بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد (شکل ۱) نتایج نشان داد که ازآنجاکه نانوذرات گرافن اکساید دارای پایداری حرارتی بهتری است، نمونه حاوی ۱/۵ درصد وزنی گرافن اکساید و ۲ درصد وزنی نانو تیتانیوم برای تحلیل حرارتی در نظر گرفته شدند. تخریب گرمایی نمونه در سه مرحله بر اساس دامنه دمایی افزایشی رخ می‌دهد. در

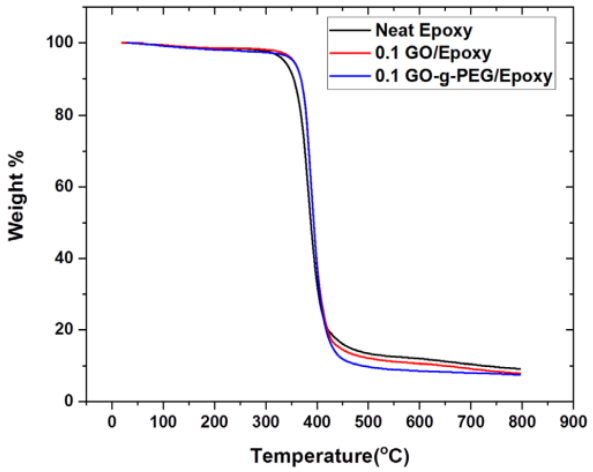
مرحله اولیه، تخریب از ۳۰ درجه سانتی‌گراد تا ۳۷۰ درجه سانتی‌گراد با ۲۳/۳ درصد، کاهش وزن اتفاق می‌افتد[۳۳]. مرحله دوم تخریب حرارتی از ۳۷۳ درجه سانتی‌گراد آغاز می‌شود و به‌سرعت با ۶۳/۳ درصد کاهش جرم ادامه می‌یابد. مرحله نهایی تخریب در ۴۷۰ درجه سانتی‌گراد به پایان می‌رسد که آن هم با ۹۱/۴ درصد کاهش جرم همراه است. همچنین ذغال باقیمانده این نانوکامپوزیت در دمای ۴۷۰ درجه سانتیگراد، ۸/۷۵ درصد است[۳۴].

پژوهشگران، اثر نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با فسفر و نیتروژن بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی کردند (شکل۸). نتایج آنالیز گرما وزن سنجی نشان داد که، رفتار تخریب گرمایی برای تمام نمونه‌ها مشابه یکدیگر است. به‌طور کلی حضور نانوذرات گرافن اکساید در ماتریس اپوکسی، به بهبود پایداری گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی کمک خواهد کرد. همچنین نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده، باعث افزایش ذغال باقیمانده رزین اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص شده است، و در نتیجه پایداری گرمایی را افزایش و سرعت تخریب گرمایی را کاهش داده است[۳۵].



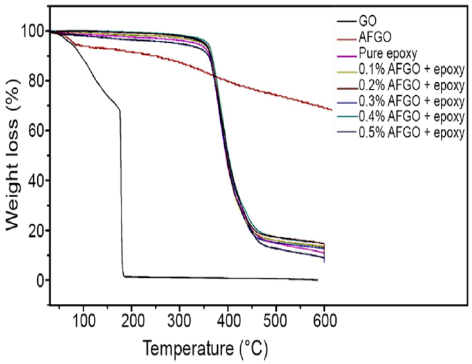
شکل ۸. نمودار های تخریب گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت های اپوکسی

اثر نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با پلی‌اتیلن گلیکول بر رفتار خواص حرارتی رزین اپوکسی بررسی شد (شکل ۹). نتایج نشان داد که، نانوذرات اصلاح شده می‌تواند منجر به بهود پایداری گرمایی شود. شروع دمای تخریب برای رزین اپوکسی در دمای ۳۲۰ درجه سانتیگراد است ولی با اصلاح سطح نانوذرات گرافن اکساید، دمای اولیه تخریب رزین اپوکسی برابر با ۳۷۰ درجه سانتیگراد است[۳۶]



شکل ۹. نمودار تخریب گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی

به‌طور کلی نانوذرات گرافن اکساید از نظر حرارتی ناپایدار است (شکل ۱۰). پیک اصلی کاهش وزن که در حدود ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد نمایان شد، به تجزیه حرارتی گروه‌های عاملی اکسیژن ناپایدار نسبت داده می‌شود که منجر به تولید CO و بخار می‌شود. پایداری حرارتی نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده، پس از اصلاح سطح با گروه آمینی افزایش می‌یابد. دماهای تخریب گرمایی اولیه رزین اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های آن به ترتیب ۳۵۱ درجه سانتی‌گراد و ۳۴۸–۳۵۸ درجه سانتی‌گراد گزارش شدند. بالاترین دمای تخریب گرمایی در دمای ۳۵۸ درجه سانتی‌گراد برای نانوکامپوزیت حاوی ۰/۴ درصد وزنی از نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده بود[۳۷]. بااین‌حال، هنگامی که غلظت پرکننده به بیش از ۰/۵ درصد وزنی رسید، دمای تخریب گرمایی اولیه کامپوزیت شروع به کاهش کرد، زیرا ذرات پس از عبور از سطح بحرانی غلظت، شروع به کلوخه ای شدن می‌کند. این نتایج نشان می‌دهد که وجود پرکننده اصلاح شده (نانوذرات گرافن اکساید)، پایداری حرارتی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی را افزایش می‌دهد[۳۸].

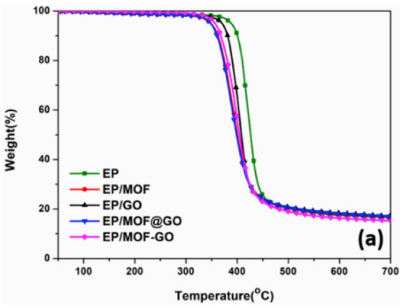


شکل ۱۰. نمودار گرما وزن سنجی ریزن اپوکسی و نانوکامپوزیت های اپوکسی اصلاح شده با گروه آمینی

تخریب گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با گروه سیلانی، و نانوذرات گرافن اکساید با گروه‌های شبکه‌ای سیلیکونی بررسی شد. نتایج نشان داد که دمای ۵۰ درصد کاهش وزن رای تمام نمونه تغییرات چشمگیری ندارد و رفتار یکسانی را دارند. مقدار ذغال باقیمانده در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد، برای نمونه رزین اپوکسی، کامپوزیت اپوکسی حاوی سیلیکون، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با گروه سیلانی، و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی ذرات سیلیکونی به ترتیب برابر با ۷/۶، ۱۰/۹، ۵/۲۷ و ۱۲/۱ است. در نتیجه نمونه اصلاح شده با گروه سیلانی پایداری گرمایی رزین اپوکسی در مقایسه با دیگر نمونه‌ها ، افزایش داده است. این افزایش به دلیل اثر هم افزایش گروه سیلانی و نانوذرات گرافن اکساید است که منجر به افزایش پایداری گرمایی شده است[۳۹].

در پژوهشی دیگر، اثر نانوذرات گرافن اکساید، نانوصفحات فسفر سیاه و نانوذرات گرافن اکساید کاهش‌یافته اصلاح شده با نانوصفحات فسفر سیاه بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که باتوجه‌به فراوانی گروه‌های اکسیژنی در نانوذرات گرافن اکساید، کاهش وزن در ۲۰۰ درجه سانتیگراد شروع می‌شود. همچنین مقدار ذغال باقیمانده برای این نانوذره در دمای ۷۵۰ درجه سانتیگراد، برابر با ۴۴/۷ درصد است. همچنین نانوسیستم حاوی نانوذرات گرافن اکساید کاهش‌یافته اصلاح شده با نانوصفحات فسفر سیاه، دارای دو مرحله تخریب گرمایی در محدوده ۱۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد و ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتیگراد است. ذغال باقیمانده برای این نانوسیستم هم برابر با ۴۸ درصد است؛ بنابراین این نانوسیستم می‌تواند پایداری گرمایی رزین اپوکسی در مقایسه با دیگر نمونه‌ها، بهبود دهد[۴۰].

اثر نانوذرات گرافن اکساید و نانوذرات چارچوب‌های آلی فلزی بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که (شکل ۱۱)، تمام نمونه‌ها (رزین اپوکسی خالص، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات چارچوب‌های آلی‌فلزی، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات گرافن اکساید، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات چارچوب آلی فلزی و نانوذرات گرافن اکساید و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات چارچوب آلی فلزی بارگذاری شده در نانوصفحات گرافن اکساید)، دارای سازوکار تخریب گرمایی تک‌مرحله‌ای هستند. دمای اولیه تخریب گرمایی تمام نمونه‌ها در مقایسه با رزین اپوکسی خالص، کاهش یافته است. این کاهش به دلیل اثر کاتالیزوری نانوصفحات گرافن اکساید و حضور ذرات فلزی در ترکیب با رزین اپوکسی است [۴۱]. همچنین نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات چارچوب آلی فلزی بارگذاری شده در نانوصفحات گرافن اکساید به طور قابل‌توجهی حداکثر نرخ تخریب را کاهش داد که ناشی از کاهش تولید گرما و محصولات فرار در طول فرایند تخریب است. ذغال باقیمانده برای نمونه نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات گرافن اکساید، در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد بیشتر از بقیه نمونه‌ها است. این بدان معناست که این نمونه در مقایسه با دیگر نمونه‌ها می‌تواند پایداری گرمایی رزین اپوکسی را افزایش دهد[۴۲].



شکل ۱۱. نمودار آنالیز گرما ورن سنجی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت های اپوکسی

در پژوهشی دیگر، اثر نانوذرات گرافن اکساید کاهش‌یافته حاوی ذرات آهن اصلاح شده با پلی آنیلینی بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که حضور هم‌زمان چند ذره منجر به کاهش ذغال باقیمانده نانوکامپوزیت اپوکسی می‌شود. بنابراین در ساخت نانوکامپوزیت اپوکسی باید توزیع ذرات را در نظر گرفت. زیرا عدم توزیع مناسب، باعث کاهش پایداری گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی می‌شود[۴۳].

پژوهشگران، اثر نانوذرات گرافن اکساید، نانوذرات گرافن اکسید اصلاح شده با نانوذرات پلی پیرول و نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با پلی پیرول حاوی ذرات روی بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد که نانوکامپوزیت‌ها دارای سازوکار تخریب گرمایی سه‌مرحله‌ای است، زیرا نانوصفحات گرافن اکساید دارای پایداری گرمایی زیادی هستند. مرحله اول تخریب گرمایی در محدوده دمایی ۱۰۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد اتفاق می‌افتد. مرحله دوم تخریب گرمایی در ۴۰۰ درجه سانتیگراد اتفاق می‌افتد؛ زیرا زنجیره‌های پلیمری به‌صورت کامل تخریب می‌شود[۴۴]. حضور نانوذرات پلی پیرول اصلاح شده با روی می‌تواند ذغال باقیمانده را در مقایسه با دیگر نمونه‌ها، افزایش دهد و منجر به بهبود پایداری گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی شود. در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مقدار ذغال باقیمانده برای رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح شده با ذرات روی به ترتیب برابر با ۰/۷۶، ۰/۶۱ و ۲/۵۳ است[۴۵].

اثر نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با نانوذرات سریوم اکساید بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که، تخریب گرمایی نانوکامپوزیت ساخته شده در مقایسه با رزین اپوکسی خالص افزایش داشته است و به دماهای بالاتر منتقل شده است. همچنین اتلاف وزن تمام نمونه‌ها در محدوده دمایی ۵۴۹ تا ۵۸۱ درجه کلوین اتفاق می‌افتد. نرخ سرعت کاهش وزن در دمای ۶۲۳ درجه کلوین افت پیدا میکند. ذغال باقیمانده در سرعت های تخریب گرمایی متفاوت ، برابر با یکدیگر است. بنابراین سرعت تخریب گرمایی، تاثیری بر مقدار ذغال باقیمانده ندارد. مقدار ذغال باقیمانده برای رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی به ترتیب برابر با ۶۴۷/۸۹۹ و ۹۸۰/۸۱۴ درجه سانتی‌گراد است. [۴۶].

پژوهشگران اثر اصلاح سطح نانوذرات گرافن اکساید را با پلی‌وینیل پیرولیدون بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد که حضور نانوذرات گرافن اکساید و نانوذرات گرافن اکساید شده می‌تواند مقداری پایداری گرمایی بهبود بخشد. تخریب گرمایی رزین اپوکسی در دمای ۳۲۰ درجه سانتیگراد آغاز می‌شود و با حضور نانوذرات این دما به مقدار ۳۷۰ درجه سانتیگراد افزایش می‌یابد[۴۷].

۵- پیشرفت های اخیر

نتایج پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات گرافن اکساید و ترکیبات دورگه‌ای آن در رزین‌های اپوکسی نقش بسیار مؤثری در بهبود طیف گسترده‌ای از خواص دارد. اصلاح سطح گرافن اکساید و ترکیب آن با پرکننده‌ها و نانوذرات مختلف موجب ارتقای چشمگیر خواص مکانیکی، حرارتی، ضدخوردگی، ضد شعله و عملکردهای ویژه در کامپوزیت‌های اپوکسی شده است [۴۸]. به‌عنوان‌مثال، استفاده از گرافن اکساید اصلاح‌شده بر روی الیاف شیشه یا کربن سبب افزایش عمر خستگی، مقاومت به خزش و جلوگیری از آغاز و گسترش ترک‌ها گردیده و درعین‌حال استحکام کششی، مدول یانگ، سختی و چقرمگی را به طور قابل‌توجهی بهبود داده است. همچنین افزایش پراکندگی یکنواخت ذرات در ماتریس پلیمری و ایجاد ساختارهای بین‌سطحی انعطاف‌پذیر با کمک نانوذراتی مانند سیلیکا یا پلی‌اترآمین باعث افزایش مقاومت مکانیکی و تافنس اپوکسی‌ها شده است[۴۹].

از نظر حرارتی، افزایش اندازه صفحات گرافن اکساید یا اصلاح سطح آن با ترکیباتی مانند هپتان دی کربوکسیلات منجر به بهبود مدول یانگ، افزایش دمای انتقال شیشه‌ای و پایداری اتمی

شده است. ترکیب گرافن اکساید با نانوساختارهایی مانند سیلیکا نیز پراکندگی بهتر و بهبود خواص ترمومکانیکی را به دنبال داشته است. افزون بر این، اصلاح سطح با پلی‌آمیدوآمین و اسید فیتیک موجب ارتقای هم‌زمان خواص مکانیکی و ضد شعله شده و کاهش نرخ تولید حرارت، دود و گازهای مضر را در پی داشته است[۵۰] در زمینه بهبود خواص ضدخوردگی، گرافن اکساید اصلاح‌شده با گوگرد توانسته است خاصیت آب‌گریزی و مقاومت در برابر زنگ‌زدگی را افزایش دهد و فعالیت ضدباکتری پوشش‌های پلیمری را تقویت کند. همچنین ترکیب گرافن اکساید با نانوذراتی مانند اکسید روی، مولیبدن دی سولفید و اکسید مس اصلاح‌شده، مقاومت در برابر خوردگی، خاصیت آنتی‌میکروبیال و کاهش نفوذپذیری اکسیژن را ارتقا داده است. این ویژگی‌ها پوشش‌های اپوکسی را برای کاربردهایی چون خطوط لوله هیدروژن، سیستم‌های خنک‌کننده و محیط‌های خورنده پیچیده بسیار مناسب ساخته است[۵۱].

خواص ویژه دیگری همچون جذب امواج مغناطیسی، بهبود رسانایی الکتریکی و حرارتی، ایجاد خاصیت ضد الکتریسیته ساکن و جذب پرتو فرابنفش نیز با استفاده از گرافن اکساید و ترکیبات دورگه‌ای آن به‌دست‌آمده است[۵۲]. به‌عنوان نمونه، استفاده از کامپوزیت‌های دورگه‌ای حاوی گرافن اکساید و اکسید سریم فلورینه‌شده منجر به افزایش چشمگیر ظرفیت جذب UV شده و آن‌ها را برای استفاده در فضای باز ایدئال کرده است. همچنین ترکیب گرافن اکساید با پلی‌پیرول یا پلی دوپامین قابلیت استفاده از این مواد را در کاربردهای حفاظتی در برابر امواج الکترومغناطیسی یا محیط‌های خورنده افزایش داده است[۵۳].

در مجموع می‌توان گفت که گرافن اکساید و مشتقات آن به دلیل قابلیت اصلاح‌پذیری بالا و امکان ترکیب با سایر نانوذرات، رویکردی بسیار کارآمد برای توسعه نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با عملکرد چندگانه محسوب می‌شوند. این پیشرفت‌ها می‌تواند کاربردهای صنعتی متنوعی از جمله در صنایع هوافضا، خودرو، دریایی، نفت و گاز، الکترونیک، ساخت‌وساز و پوشش‌های حفاظتی ایجاد کند، درحالی‌که مسائل مربوط به پایداری زیست‌محیطی و کاهش هزینه‌ها نیز موردتوجه قرار گرفته است[۵۵-۵۴].

در جدول۲، مهم‌ترین نتایج مهم نانوکامپوزیت‌های اپوکسی اصلاح شده جمع‌آوری‌شده است.

جدول ۲. مهمترین نکات در پیشرفت های اخیر در نانوکامپوزیت های اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده[۵۵-۳۰].

نام نمونه	سال	نتایج مهم
اپوکسی- نانوذرات گرافن اکساید- گلوکز	۲۰۲۵	بهبود خواص خوردگی
اپوکسی- نانوالیاف شیشه – نانوذرات گرافن اکساید	۲۰۲۵	بهبود خواص ضد آب و افزایش پایداری حرارتی
اپوکسی کاردانول- نانوذرات گرافن اکساید- انیدرید- گروه آمینی	۲۰۲۵	افزایش خواص مکانیکی
اپوکسی نانوذرات چارچوب‌های آلی‌فلزی - نانوذرات گرافن اکساید - بنزوتریازول	۲۰۲۵	بهبود خواص خوردگی
اپوکسی- نانوذرات گرافن اکساید- نانوذرات هالوسیت	۲۰۲۵	بهبود خواص مکانیکی
اپوکسی- نانوذرات گرافن اکساید کاهش‌یافته- نانوذرات مکسن- ذرات آهن نیکل-	۲۰۲۵	افزایش پایداری حرارتی و خواص مکانیکی
اپوکسی- نانوذرات مس- نانوذرات گرافن اکساید- نانولوله‌های کربنی-	۲۰۲۵	بهبود خواص هدایت حرارتی و افزایش خواص مکانیکی
اپوکسی- نانوذرات ایتریوم اکساید- نانوذرات گرافن اکساید	۲۰۲۵	بهبود خواص مکانیکی
اپوکسی- نانوذرات گرافن اکساید- پلی آنیلین سولفونه شده- ذرات مولیبدات	۲۰۲۵	بهبود خواص خوردگی
اپوکسی- نانوذرات گرافن اکساید اصلاح‌شده با لومینسانس مغناطیسی (Fe_3O_4)	۲۰۲۵	بهبود عملکرد، بهبود دوام، افزایش خواص مکانیکی
اپوکسی- نانوذرات گرافن اکساید کاهش‌یافته – نانوالیاف پلی آنیلین	۲۰۲۵	بهبود خواص ضد استاتیک

اپوکسی- نانوذرات گرافن اکساید کاهش‌یافته	۲۰۲۵	جاذب میکرو امواج
اپوکسی- گرافن- نانولوله‌های کربنی- الیاف شیشه	۲۰۲۴	بهبود قابل‌توجهی در کیفیت و کمیت ترکیبات فرار تولید شده
اپوکسی- نانوذرات گرافن اکساید- نانولوله‌های کربنی چند دیواره اصلاح شده با گروه آمینی	۲۰۲۴	بهبود خواص حرارتی
اپوکسی- نانوذرات گرافن اکساید- نانوذرات سیلیکون دی اکساید	۲۰۲۴	کاربردهای صنعتی و الکتریکی
اپوکسی- نانوذرات گرافن اکساید- سلولز	۲۰۲۴	دوستدار محیط‌زیست- افزایش چسبندگی- بهبود خواص حرارتی
اپوکسی- نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با گروه‌های کربوکسیل - سلولز	۲۰۲۴	خواص مکانیکی بهبودیافته، پایداری حرارتی و هدایت الکتریکی
اپوکسی- نانوذرات گرافن اکساید- الیاف شیشه	۲۰۲۴	افزایش خواص مکانیکی
اپوکسی- پلی آمیدو آمین- فیتیک اسید- نانوذرات گرافن اکساید	۲۰۲۴	افزایش خواص ضد شعله
اپوکسی –نانوذرات گرافن اکساید	۲۰۲۴	شبیه‌سازی دینامیکی کمک به بهبود فرایند- افزایش خواص مکانیکی و حرارتی
اپوکسی- هپتان دی کربکسیلات – نانوذرات گرافن اکساید	۲۰۲۴	بهبود خواص مکانیکی و حرارتی
اپوکسی- الیاف شیشه- نانوذرات گرافن اکساید	۲۰۲۴	افزایش خواص مکانیکی
پلی پیرول – نانوذرات گرافن اکساید مغناطیسی- رزین اپوکسی – الیاف کربن	۲۰۲۴	محافظ امواج الکترومغناطیس
اپوکسی- نانوذرات سیلیکا- نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با سولفور	۲۰۲۴	بهبود خواص ضدخوردگی
اپوکسی – نانوذرات گرافن اکساید	۲۰۲۴	بهبود خواص مکانیکی
اپوکسی- نانوذرات سیلیکا- گرافن اکساید- پلی اتر آمین	۲۰۲۴	بهبود خواص مکانیکی
اپوکسی- بنزیل دی سولفید سولفور – نانوذرات گرافن اکساید	۲۰۲۴	بهبود خواص ضدباکتری
اپوکسی- نانوذرات اکسید روی- نانوذرات گرافن اکساید- دوپامین- پلی‌اتیلن ایمین	۲۰۲۴	افزایش خواص ضدخوردگی – خواص ضد میکروب
اپوکسی- نانو سیلیکای اصلاح شده با آمین- نانوذرات گرافن اکساید	۲۰۲۴	بهبود خواص مکانیکی
اپوکسی – کربوکسی‌متیل کیتوسان- نانوذرات گرافن اکساید	۲۰۲۴	بهبود خواص خوردگی – کاربرد در خطوط لوله هیدروژن
اپوکسی- الیاف کربن- نانوذرات گرافن اکساید	۲۰۲۴	بهبود در مقادیر هدایت الکتریکی و مقاومت برشی بین لایه‌ای
اپوکسی- نانوذرات گرافن اکساید- تیتانیوم دی سولفید- آمینو متیل تیو تریازول	۲۰۲۴	بهبود خواص خوردگی در تماس با آب دریا
اپوکسی – نانوذرات گرافن اکساید فلورینه شده- نانوذرات سریم اکساید	۲۰۲۴	جاذب UV
اپوکسی- نانوذرات مولیبدن دی سولفید- نانوذرات گرافن اکساید- پلی دوپامین	۲۰۲۴	افزایش مقاومت خوردگی
اپوکسی- نانوذرات گرافن اکساید- نانوذرات اکسید مس اصلاح شده با آمینو متاکسی فنیل تیا دیازول	۲۰۲۳	پوشش در سیستم‌های خنک‌کننده، افزایش خواص مکانیکی

نتیجه‌گیری

نتایج بررسی‌های انجام شده بر روی نانوذرات گرافن اکساید اصلاح شده با پلی‌اتیلن گلیکول و دیگر اصلاح‌کننده‌ها نشان می‌دهد که این نانوذرات تأثیر قابل‌توجهی بر ریختشناسی و خواص مکانیکی رزین اپوکسی دارند. به‌ویژه، اصلاح سطح نانوذرات با گروه‌های مختلف، مانند آمینی و سیلانی، منجر به بهبود پراکنش و کاهش کلوخه‌ای شدن در ماتریس اپوکسی شده است. این بهبودها به دلیل تعاملات قوی بین نانوذرات و زنجیره‌های پلیمری رزین اپوکسی

است که در نهایت منجر به افزایش چقرمگی و کاهش مکانیزم رشد ترک می‌شود. بااین‌حال، افزایش غلظت نانوذرات می‌تواند به تجمع و کلوخه‌ای شدن منجر شود که باید در طراحی نانوکامپوزیت‌ها مد نظر قرار گیرد. به‌طور کلی، این پژوهش‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای نانوذرات گرافن اکساید در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی رزین‌های اپوکسی هستند و می‌توانند به توسعه مواد جدید با عملکرد بهتر کمک کنند. نتایج بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات گرافن اکساید و اصلاح‌شده با مواد مختلف نشان می‌دهد که اصلاح سطح نانوذرات می‌تواند به‌طور قابل توجهی خواص مکانیکی این نانوکامپوزیت‌ها را بهبود بخشد. به‌ویژه، افزودن نانوذرات گرافن اکساید اصلاح‌شده با فسفر و نیتروژن، پلی‌وینیل پیرولیدون و نانوذرات سریوم اکساید منجر به افزایش مدول الاستیک و استحکام خمشی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص شده است. همچنین، وجود گروه‌های هیدروکسیل و کربونیل در نانوذرات اصلاح‌شده، پیوندهای قوی‌تری با ماتریس اپوکسی ایجاد کرده و در نتیجه، انتقال تنش و خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد. بااین‌حال، افزایش بیش از حد نانوذرات اصلاح‌شده می‌تواند منجر به کلوخه‌ای شدن و کاهش خواص مکانیکی شود. بنابراین، بهینه‌سازی نسبت و نوع نانوذرات در ترکیب با رزین اپوکسی برای دستیابی به بهترین عملکرد مکانیکی ضروری است. در نهایت، این تحقیقات نشان‌دهنده پتانسیل بالای نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در کاربردهای صنعتی و مهندسی است. نتایج تحقیقات اخیر در زمینه نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات گرافن اکساید نشان‌دهنده پیشرفت‌های قابل توجهی در بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و ضد خوردگی این مواد است. استفاده از نانوذرات گرافن اکساید به‌عنوان پرکننده‌های تقویت‌کننده، به ویژه در ترکیب با دیگر نانو مواد، منجر به افزایش استحکام کششی، مدول یانگ و پایداری حرارتی شده است. تحقیقات نشان می‌دهد که اصلاح سطح نانوذرات گرافن اکساید با مواد مختلف، از جمله گلوکز، نانو الیاف شیشه، و نانوذرات اکسید فلزی، می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و عملکرد کلی کامپوزیت‌ها کمک کند. همچنین، این نانوکامپوزیت‌ها به‌عنوان گزینه‌های دوستدار محیط زیست برای کاربردهای صنعتی و حفاظتی در برابر خوردگی و آتش‌سوزی شناخته می‌شوند. به‌طورکلی، این پیشرفت‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات گرافن اکساید در صنایع مختلف، از جمله خودروسازی، هوافضا و پوشش‌های حفاظتی است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان انتظار داشت که این مواد در آینده نزدیک به‌عنوان راهکارهای مؤثر و اقتصادی در بهبود عملکرد و دوام زیرساخت‌ها و محصولات صنعتی مورداستفاده قرار گیرند.

منابع

1. Karami, M. H., Kalaee, M. R. (2022). Investigation of curing kinetics modeling of epoxy nanocomposites in the presence of nano graphene oxide: A review study. Iranian Chemical Engineering Journal, 21(124), 71-83.

2. ehdizadeh, H., & Moradi, G. R. (2024). Investigation and Optimization of Effective Parameters in the Process of Desalination of Crude Oil by Electrostatic Method. Iranian Chemical Engineering Journal, 23(136), 22–34

3. Abbasi, H., Hashemizadeh, A., Navaie, F. (2023). Evaluation of the efficiency of polymers, polymeric nanoparticles, and surfactant additives in improving the rheology and loss control of drilling fluids: A review. Iranian Chemical Engineering Journal, 22(129), 7-25.

4. Mousavi, S. A., Khademzadeh Yeganeh, J. (2023). Effect of nanoclay and its hybrid with carbon black on physical and mechanical properties of styrene-butadiene rubber. Iranian Chemical Engineering Journal, 22(126), 66-81.

5. Masoudi, M., Salem, S. (2025). Simultaneous removal of chromium (VI) and methylene blue by nano titanium dioxide/graphene oxide/carbon nanotube photocatalyst and P25. Iranian Chemical Engineering Journal, 23(137), 75-87.

6. Karami, M. H., Moeini Jazni, O., & Bagheri, A. (2025). Epoxy nanocomposites reinforced with metal-organic framework nanoparticles: Study and analysis of morphology, mechanical properties, and thermal degradation. Iran Polymer Technology, Research and Development, 9(4),51-64.

7. Karthik, A., Bhuvaneshwaran, M., Senthil Kumar, M. S., Palanisamy, S., Palaniappan, M., & Ayrilmis, N. (2024). A review on surface modification of plant fibers for enhancing properties of biocomposites. ChemistrySelect, 9(21), e202400650.

8. Kini, A. U., Shettar, M., Gowrishankar, M. C., & Sharma, S. (2023). A technical review on epoxy-nanoclay nanocomposites: Mechanical, hygrothermal and wear properties. Cogent Engineering, 10(2),1-21.

9. Xu, J., Jia, L., Lan, Q., & Wu, D. (2024). Enhanced thermal and mechanical properties of cardanol epoxy/clay-based nanocomposite through Girard's reagent. Polymers, 16(11), 1528.

10. Nasution, D. Y., & Delfis, M. (2024). Effect of clay composition and human haircut waste on mechanical properties of epoxy resin composites. Journal of Chemical Natural Resources, 6(1), 45-54.

11. Zaccone, M., Kociolek, I., Frache, A., Bellini, C., Di Cocco, V., & Monti, M. (2023). Abrasion resistance of a carbon fiber reinforced composite based on a nanoclay epoxy nanocomposite matrix. Polymer Composites, 45(4), 2919-2926.

12. Örçen, G., & Bayram, D. (2024). Effect of nanoclay on the mechanical and thermal properties of glass

fiber-reinforced epoxy composites. Journal of Materials Science, 59, 3467–3487.

13. Naik, N., Bhat, R., Shivamurthy, B., Thimmappa, B. H. S., Shetty, N., & Kaushik, Y. (2023). Biodegradability of Musa acuminata (banana)-fiber-reinforced bio-based epoxy composites: The influence of montmorillonite clay. Engineering Proceedings, 59, 6.

14. Ramakrishnan, S., Krishnamurthy, K., Rajasekar, R., & Rajeshkumar, G. (2019). An experimental study on the effect of nano-clay addition on mechanical and water absorption behaviour of jute fibre reinforced epoxy composites. Journal of Industrial Textiles, 49(5), 597–620.

15. Ng, L. F., Yahya, M. Y., & Muthukumar, C. (2022). Mechanical characterization and water absorption behaviors of pineapple leaf/glass fiber-reinforced polypropylene hybrid composites. Polymer Composites, 43(1), 203–214.

16. Khorshidi, G. H., Zhang, C., & Najafi, E. (2023). Fresh, mechanical and microstructural properties of alkali-activated composites incorporating nanomaterials: A comprehensive review. Journal of Cleaner Production, 384, 135390.

17. Shi, M., Zhu, H., Chen, C., Jiang, J., Zhao, L., & Yan, C. (2023). Synergistically coupling of graphene quantum dots with Zn-intercalated MnO2 cathode for high-performance aqueous Zn-ion batteries. International Journal of Mineral Metallurgy and Materials, 30, 25–32.

18. Merzah, Z. F., Fakhry, S., Allami, T. G., Yuhana, N. Y., & Alamiery, A. (2022). Enhancement of the properties of hybridizing epoxy and nanoclay for mechanical, industrial, and biomedical applications. Polymers, 14(3), 526.

19. Ramakrishnan, S., Krishnamurthy, K., Rajeshkumar, G., et al. (2021). Dynamic mechanical properties and free vibration characteristics of surface modified jute fiber/nano-clay reinforced epoxy composites. Journal of Polymers and the Environment, 29, 1076–1088.

20. Xu, Y., & Hoa, S. V. (2008). Mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy/clay nanocomposites. Composites Science and Technology, 68(3-4), 854-861.

21. Kaushik, Y., Sooriyaperakasam, N., Rathee, U., & Naik, N. (2023). A mini review of natural cellulosic fibers: Extraction, treatment and characterization methods. Journal of Computational Mechanics and Management, 2, 23057.

22. Khandelwal, S., Han, G. H., Kim, S., & Rhee, K. Y. (2023). Effect of dehydroxylation/amorphization degree of bentonite on the microstructure, thermal stability, and mechanical strength of basalt epoxy composites. Journal of Materials Research and Technology, 23, 3249-3256.

23. Hosseini, S. M., Abdouss, M., Mazinani, S., Soltanabadi, A., & Kalaee, M. R. (2022). Modified nanofiber containing chitosan and graphene oxide-magnetite nanoparticles as effective materials for smart wound dressing. Composites Part B: Engineering, 231, 109557.

24. Ahmad, S. M., & Shettar, M. (2024). Water-soaking effect and influence of nanoclay on mechanical properties of bamboo/glass fiber reinforced epoxy hybrid composites. Cogent Engineering, 11(1).

25. Muralishwara, K., Sudhakar, Y. N., Kini, U. A., et al. (2022). Moisture absorption and spectroscopic studies of epoxy clay nanocomposite. Polymer Bulletin, 79, 5587–5611.

26. Su, L., Fang, C., & Luo, H. (2024). Functionalized montmorillonite/epoxy resin nanocomposites with enhanced thermal and mechanical properties. RSC Advances, 14, 31251.

27. Shaheen, S., Saeed, Z., Ahmad, A., Pervaiz, M., Younas, U., Mahmood Khan, R. R., & Luque, R. (2023). Green synthesis of graphene-based metal nanocomposite for electro and photocatalytic activity: Recent advancement and future prospective. Chemosphere, 311, 136982.

28. Chee, S. S., Jawaid, M., Sultan, M. T. H., Alothman, O. Y., & Abdullah, L. C. (2020). Effects of nanoclay on physical and dimensional stability of Bamboo/Kenaf/nanoclay reinforced epoxy hybrid nanocomposites. Journal of Materials Research and Technology, 9(3), 5871–5880.

29. Dallaev, R., Pisarenko, T., Papež, N., Sadovský, P., & Holcman, V. (2023). A brief overview on epoxies in electronics: Properties, applications, and modifications. Polymers, 15(19), 4321.

30. Surendran, A., Geethamma, V. G., Kalarikkal, N., & Thomas, S. (2019). Mechanical and thermal properties of epoxy/poly(styrene-co-acrylonitrile) (SAN)/organoclay nanocomposites. Macromolecular Symposia, 398(1), 2000184.

31. Drakopoulos, S. X., Loukelis, K., Triantafyllou-Rundell, M. E., et al. (2024). Epoxy/clay nanodielectrics: From relaxation dynamics to capacitive energy storage. Advanced Composites and Hybrid Materials, 7, 118.

32. Khosravi, M., & Khosravi, M. (2023). Anti-corrosion/weathering properties of epoxy-siloxane structure via Cloisite 30B/polyaniline inclusion as new hybrid nanocomposite coatings. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 666, 131297.

33. Sharif, M., & Tavakoli, S. (2023). Biodegradable chitosan-graphene oxide as an effective green filler for improving properties in epoxy nanocomposites. International Journal of Biological Macromolecules, 233, 123550.

34. George, J. S., Vijayan, P. P., Ponçot, M., Paduvilan, J. K., & Thomas, S. (2024). Viscoelastic and rheokinetic behaviour of cellulose nanofiber/Cloisite 30B hybrid nanofiller reinforced epoxy nanocomposites. Chemical Engineering Journal, 498, 155170.

35. Ganjaee Sari, M., Ramezanzadeh, B., & Pakdel, A. S. (2016). A physico-mechanical investigation of a novel hyperbranched polymer-modified clay/epoxy nanocomposite coating. Progress in Organic Coatings, 99, 1.
36. Rudawska, A. (2024). The effects of temperature on mechanical properties of neat and montmorillonite reinforced epoxy compounds. The Journal of Adhesion, 101(1), 265–298.
37. Ganvir, V. Y., & Ganvir, H. V. (2025). Moisture absorption behavior of epoxy-kenaf composites enhanced with surface-modified nano-clay. Interactions, 246, 3,42-55.
38. Al-kawaz, A. E., Al-Mutairi, N. H., & Alobad, Z. K. M. (2024). Tribological behavior of epoxy/nano-clay nanocomposites used as a floor coating. Journal of Adhesion Science and Technology, 38(23), 4299–4315.
39. Shahrajabian, H., & Vaezzadeh, H. (2024). The nano-clay effect on the improvement of the thermal, flammability, and mechanical behavior of epoxy/glass fiber/ATH hybrid composites. Journal of Composite Materials, 58(23), 2545-2554.
40. Zaccone, M., Kociolek, I., Frache, A., Bellini, C., Di Cocco, V., & Monti, M. (2023). Abrasion resistance of a carbon fiber reinforced composite based on a nanoclay epoxy nanocomposite matrix. Polymer Composite, 45(4), 2919-2926.
41. Kangishwar, S., Radhika, N., Sheik, A. A., Chavali, A., & Hariharan, S. (2023). A comprehensive review on polymer matrix composites: Material selection, fabrication, and application. Polymer Bulletin., 80, 47–87.
42. Chandraraj, S. S., & Xavier, J. R. (2023). CuO-anchored graphene oxide for enhancing mechanical and anticorrosion properties of epoxy coatings in cooling water systems. Materials Chemistry and Physics, 305, 127953.
43. Fan, H., Yang, L., Zhang, D., Wu, H., Yang, Y., Wei, Z., Huang, X., Wang, Y., & Liu, S. (2024). Enhancing epoxy coating corrosion resistance with a novel MoS_2-modified polydopamine functionalized graphene oxide nanocomposite. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 683, 133080.
44. Du, B., Chen, N., Zhang, G., Chen, Y., Gao, B., Liu, L., & Zhao, Y. (2024). Enhanced ultraviolet aging resistance of epoxy resins through surface enrichment achieved by fluorinated graphene oxide@CeO_2. Composites Science and Technology, 253, 110655.
45. Pramodkumar, B., & Budhe, S. (2024). The effect of graphene oxide on thermal, electrical, and mechanical properties of carbon/epoxy composites: Towards multifunctional composite material. Journal Name, 45(7), 6374–6384.
46. Wan, H., Cheng, Z. L., Song, D., & Chen, C. (2024). Preparation and performance study of waterborne epoxy resin/non-covalent modified graphene oxide hydrogen barrier coatings. International Journal of Hydrogen Energy, 53, 218–228.

47. George, J. S., Vijayan, P., Ponçot, M., Vahabi, H., Maria, H. J., & Thomas, S. (2024). Insights into the synergistic effect of graphene oxide/silica hybrid nanofiller for advancing the properties of epoxy resin. ACS Applied Polymer Materials, 6(10), 5932–5944.

48. Zhan, Y., Chen, Y., Dong, H., Li, Y., Sun, A., Chen, X., Yang, X., Zhu, F., & Jia, H. (2024). In situ growth of flower-like ZnO onto graphene oxide for the synergistically enhanced anti-corrosion ability of epoxy coating. Ceramics International, 50(4), 5914–5926.

49. Amanian, S., Tafreshi Nejad, S. A., Amoozadeh, S., Ramezanzadeh, B., Haddadi, S. A., Etezad, S. M., Nahavandi, A. M., & Mahdavian, M. (2024). Corrosion protective and antibacterial epoxy coating via benzyldisulfidesulfur-doped graphene oxide with machine-learning simulation support. Progress in Organic Coatings, 194, 108604.

50. Shi, G., Song, J., Tian, X., Liu, T., & Wu, Z. (2024). High-performance epoxy nanocomposites via constructing a rigid-flexible interface with graphene oxide functionalized by polyetheramine and f-SiO_2. Carbon, 216, 118591.

51. Mirzapour, M., Robert, M., & Benmokrane, B. (2024). In situ processing to achieve high-performance epoxy nanocomposites with low graphene oxide loading. C, 10, 52.

52. Kanwal, R., Maqsood, M. F., Raza, M. A., Inam, A., Waris, M., Rehman, Z. U., Mehdi, S. M. Z., Abbas, N., & Lee, N. (2024). Polypyrrole coated carbon fiber/magnetite/graphene oxide reinforced hybrid epoxy composites for high strength and electromagnetic interference shielding. Materials Today Communications, 38, 107684.

53. Garg, A., Basu, S., Mehta, R., & Mahajan, R. L. (2023). Enhancing the mechanical performance of E-glass fiber epoxy composites using coal-derived graphene oxide. Polymer Composites, 45(3), 2444–2461.

54. Xue, G., Xing, J., Sun, M., Zhang, X., Liu, C., Xue, S., Yuan, Z., & Zhang, B. (2024). In situ exfoliation and surface functionalization of graphene oxide for epoxy composites with improved thermal and mechanical properties. Polymer Composites, 45(2), 1826–1838.

55. Hu, P., Alizadeh, A., Jasim, D. J., Nasajpour-Esfahani, N., Shamsborhan, M., & Sabetvand, R. (2024). The effect of graphene oxide nanosheet size and initial temperature on the mechanical and thermal properties of epoxy/graphene oxide structure using molecular dynamics simulation. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 184, 111713.

Iranian Rubber Magazine
Vol.29, NO.118, 2025
Science & Technology

Analysis of Recent Advances in Epoxy Nanocomposites Reinforced with Modified Graphene Oxide Nanoparticles: A Review of Morphology, Mechanical Properties, Thermal Stability, and Thermal Degradation Behavior

MohammadHossein Karami[1], Omid Moini Jazani *[2] , Mohammad Ali Etminani Isfahane[3]

1. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, P.O. Box 81746-73441, Isfahan, Iran

2. Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, P.O. Box 81746-73441, Isfahan, Iran

3.Department of Chemical Industry, National University of Skills, Tehran, Iran

***Corresponding author Email: o.moini@eng.ui.ac.ir.**

Abstract

Epoxy resins, as thermosetting polymers, are widely used in various industries such as automotive, electronics, and construction due to their high strength, good adhesion, and chemical resistance. However, their inherently brittle nature, especially under mechanical stress, limits their performance. In recent years, the incorporation of nanoparticles, particularly graphene oxide (GO) nanoparticles, has gained significant attention for enhancing the mechanical and thermal properties of epoxy resins. This study investigates the effect of surface modified graphene oxide nanoparticles, functionalized with polymers such as polyethylene glycol (PEG), polyvinylpyrrolidone (PVP), and other modifiers containing amine, silane, phosphorus, and nitrogen groups, on the properties of epoxy resin. The results indicate that surface modification improves nanoparticle dispersion, reduces agglomeration, increases toughness, enhances elastic modulus, and significantly improves flexural strength of epoxy nanocomposites. Furthermore, strong interfacial interactions between the nanoparticles and polymer chains play a key role in preventing crack propagation and enhancing thermal stability. However, excessive nanoparticle loading may lead to aggregation and diminished performance, emphasizing the need for optimal nanoparticle content. Finally, a review of recent advancements in epoxy nanocomposites reinforced with functionalized graphene oxide highlights the high potential of these materials for industrial and engineering applications, particularly in the automotive, aerospace, and protective coatings sectors.

Keywords: Epoxy Resin, Modified Graphene Oxide Nanoparticles, Morphology, Mechanical properties, Thermal Degradation.

IRM