Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۸۶، جلد ۴۹، شماره ۱، بهار ۱۳۹۸، صفحه ۲۲۹-۲۳۴

رفتار کامپوزیت‌های چندمقیاسی اپوکسی-الیاف کربن حاوی نانوصفحات گرافن تحت بارگذاری عرضی

زهرا قهرمانی دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

سید محمدحسین سیادتی استادیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

علیرضاشهرابی فراهانی دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

حامد خسروی* استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده

مواد کامپوزیتی به دلیل ویژگی‌های منحصربه فردی مانندااستحکام ویژه و سفتی ویژه بالاکاربردهای زیادی درصنایع خودروسازی،هوافضا،حمل ونقل وهمچنین دیگر صنایع دارند.در تحقیق حاضر، به بررسی اثر افزودن نانوگرافن در مقادیر مختلف(صفر، ۰/۱، ۰/۰،۳/۲، ۰/۴ و ۰/۵ درصد وزنی نسبت به زمینه) بر رفتارمکانیکی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی حاوی الیاف کربن تحت بارگذاری عرضی پرداخته شده است.برای پخش نانوصفحات گرافن درون زمینه پلیمری از دو روش همزدن با سرعت بالا و اعمال امواج اولتراسونیک استفاده شد.برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از روش لایه‌گذاری دستی استفاده شد و در ادامه آزمون خمش سه‌نقطه‌ای بر روی نمونه‌هاصورت پذیرفت.نتایج به دست آمده نشان داد که بیشترین میزان بهبود در رفتار خمشی به ازای افزودن ۰/۴ درصد وزنی نانوگرافن حاصل شد که در این حالت استحکام خمشی، مدول خمشی، انرژی جذب شده به ترتیب به میزان ۳۹، ۱۳۵ و۴۷درصد نسبت به کامپوزیت‌های فاقد نانوگرافن، افزایش یافت. همچنین مطالعات میکروسکوپ الکترونی نشان داد که افزودن نانوصفحات گرافن تاثیر بسزایی در بهبود فصل‌مشترک بین الیاف کربن و زمینه اپوکسی داشته است.

واژه های کلیدی: نانوکامپوزیت زمینه پلیمری، الیاف کربن،نانوصفحات گرافن،خواص خمشی،بررسی ریزساختاری.

On the behavior of multiscale carbon fiber-epoxy composites containing graphene nanoplatelets under transverse loading

Z.Ghahremani Materials Science and Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

S.M.H. Siadati Materials Science and Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

A. Shahrabi-Farahani Materials Science and Engineering Faculty, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

H. Khosravi Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan

Abstract

Composite materials due to their unique properties such as high specific strength and stiffness have gained many applications in automotive, aerospace, transportation and other industries. In this study, the effects of addinggraphene nanoplatelets (GNPs)in various weight percentages (0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 and 0.5 with respect to matrix) on the flexuralbehaviorof carbon-fiber reinforced epoxy compositeswereassessed. For dispersion of GNPs into the polymer matrix, high speed mechanical stirrer andultrasonic waves were used. Hand lay-up method was used for fabricating the composites, and three-point bendtest for assessing their flexural behavior.Results demonstrated that the maximum improvement in flexural properties was obtained with the optimal amount of 0.4 wt.% of GNPs.The percent enhancements in flexural strength, flexural modulus,and energy absorptionwere 39, 135,and 47, respectively. Also, electron microscopy studies revealed that the addition ofGNPs had a great influence in improving the interfacial characteristics between the matrix and the carbon fibers.

Keywords: Polymer nanocomposites, Carbon fibers, Graphene nanoplatelets, Flexural properties, Microscopic studies.

۱- مقدمه

پرمصرف‌ترین زمینه برای موادکامپوزیتی ، انواع زمینه‌های پلیمری می‌باشد. درارتباط با پلیمرها، به علت وزن مخصوص کم و استحکام پایین،استفاده ازموادتقویت‌کننده با استحکام و مدول بالاسبب افزایش شدید استحکام ویژه وسفتی ویژه آن‌ها شده که اهدا ف اصلی مواد کامپوزیتی است [۱-۶].

الیاف کربن از دسته الیاف پیشرفته می‌باشد که به علت خصوصیات و مشخصه‌های منحصر به فردش در صنایع مختلف و البته در قسمت-های حساس و پراهمیت کاربرد دارد. چگالی پایین،خواص مکانیکی بالا خصوصا سفتی بالا،مقاومت دربرابراصطکاک ودمای بالا، دوام وعمرطولانی دربرابرموادشیمیایی ونفوذ ناپذیری دربرابراشعه ایکس از بارزترین خصوصیات الیاف کربن به شمارمی‌روند. به همین دلیل الیاف کربن درتکنولوژی نوین پیشتازمی‌باشد[۷و۸].

دردهه‌ی آخرقرن بیستم زمینه جدیدی تحت عنوان نانوکامپوزیت‌ها وارد عرصه علم وفناوری کامپوزیت‌ها شد. نانوکامپوزیت ماده مرکبی استکه حداقل یکی ازفازهای تشکیل‌دهنده آن دارای ابعاد

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hkhosravi@eng.usb.ac.ir

تاریخ وصول: ۹۶/۰۱/۲۳
تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۰۲

www.SID.ir

Archive of SID

نانو باشد [۹-۱۱]. یکی از مهم‌ترین تقویت‌کننده‌های نانومتری مورد استفاده در نانوکامپوزیت‌ها، نانوصفحات گرافن[1] است.گرافنی کنانوماده جدیددوبعدی متشکل ازاتم‌های کربن خالص است که آن را دگرشکل یا آلوتروپ دو بعدی کربن می‌دانند. این ترکیب دارای خواص الکترونیکی ، نوری ، حرارتی ومکانیکی فوق‌العاده‌ای است. درگرافن اتم‌های کربن تنها با سه اتم پیوند شده‌اند،ولی توانایی اتصال به چهار اتم کربن نیز در آن‌ها وجود دارد. این توانایی به همراه استحکام کششی بالاو نسبت سطح به حجم بالا،نانوگرافن را به یک ماده عالی برای ساخت کامپوزیت‌هاتبدیل کرده است[۱۲-۱۵].

شکریه وهمکارانش[۱۶]، به بررسی اثرافزودن نانوذرات گرافن بررفتار خمشی کامپوزیت اپوکسی/ نانوگراف نپرداختند. بیشترین میزان بهبود در خواص به ازای افزودن۰/۲۵درصدوزنین انوگرافن حاصل شدکه در طی آن استحکام خمشی به میزان ۱۲ درصد نسبت به اپوکسی خالص افزایش یافت. اما افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانوگرافن منجر به کاهش استحکام خمشی کامپوزیت شد.

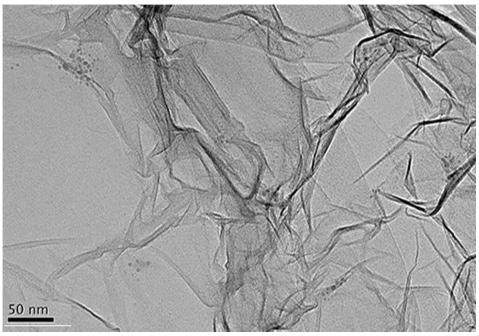
نورالدین و همکارانش [۱۷] نشان دادند که به ازای افزودن ۰/۲ درصد وزنی نانوگرافن به زمینه اپوکسی، استحکام خمشی به میزان ۲۳ درصد افزایش می‌یابد. همچنین در این تحقیق به بررسی افزودن همزمان نانوذرات رس و نانوگرافن نیز پرداخته شد که بیشترین افزایش در استحکام خمشی کامپوزیت زمینه اپوکسی را به ازای افزودن ۳ درصد وزنی نانورس و ۰/۱ درصد وزنی نانوگرافن گزارش نمودند. در این وضعیت استحکام خمشی کامپوزیت به میزان ۳۲ درصد نسبت به اپوکسی خالص افزایش یافت.کامار و همکارش[۱۸] خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی/ الیاف شیشه/ نانوگرافن را تحت بارگذاری خمشی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن تحقیق حاکی از آن بود که بیشترین میزان بهبود در خواص خمشی به ازای افزودن ۰/۲۵ درصد وزنی نانوگرافن حاصل می‌شود. فان و همکارانش [۱۹]تأثیرنانوگرافن بررفتارکششیکامپوزیت الیافکیتوسان[2]/اپوکسیرابهطورتجربیموردبررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که به ازای افزودن ۰/۳ درصد وزنی نانوگرافنمدول کششی کامپوزیت به میزان ۲۰۰درصد نسبت به کامپوزیت فاقد نانوگرافن افزایش یافت. ولی با افزودن مقادیر بیشتر نانوگرافن مدول کششی کامپوزیت تنزل پیدا نمود که ناشی از توزیع ناهمگن این نانوذرات درون زمینه پلیمری بود.شنو همکارانش [۲۰]نشان دادند که به ازای افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانوگرافن بیشترین بهبود در استحکام کششی کامپوزیت اپوکسی/نانوگرافن حاصل می‌شود.

طبقبررسی‌های صورت گرفته،و با وجود تنوع گسترده مواد ترکیبی، تحقیقات کمی در ارتباط با تاثیر نانوصفحات گرافن بر خواص مکانیکی مواد کامپوزتی تقویت‌شده با الیاف منتشر شده است. لذا رویکرد اصلی در این پژوهش بررسی اثر افزودن نانوصفحات گرافن در درصدهای وزنی مختلف نسبت به زمینه بر رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن تحت بارگذاری عرضی است.

۲- روش آزمایش

۲-۱- مواد اولیه

رزین اپوکسی با نام تجاریKER -828همراه با سخت کننده پلی آمینی به عنوان زمینه پلیمری نانوکامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت.پارچه الیاف کربن نوع Eبا چگالی سطحی۲۰۰ گرم بر مترمربع به عنوان تقویت‌کننده الیافی کامپوزیت استفاده شد. نانوصفحات گرافن با خلوص بیش از ۹۵٪، ضخامت ۱۸-۲ نانومتر و قطر ۱۲-۴ میکرومتر (از محصولات شرکت یواس نانومتریال امریکا) به عنوان تقویت‌کننده نانومتری مورد استفاده قرار گرفتند.در شکل ۱ تصویر میکروسکوپی الکترونی عبوری نانوگرافن مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل ۱- تصویر میکروسکوپی الکترونی عبوری از نانوصفحات گرافن

۲-۲- ساخت نمونه‌های کامپوزیتی حاوی نانوذرات گرافن

برای توزیع نانوصفحات گرافن درون زمینه اپوکسی،ذرات نانوگرافن در درصدهای وزنی مختلف به رزین اضافه شدند و اختلاط نانوذرات درون زمینه با استفاده از همزن مکانیکی دور بالا (شرکت فاینتک کره)تحت سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه صورت پذیرفت. در ادامه به منظور دست‌یابی به پخش مناسب نانوذرات به درون زمینه،امواج مافوق صوت با استفاده از دستگاه التراسونیک پروبی (توان ۱۲۰ وات) به مخلوط حاصله اعمال شد. سپس برای ازبین رفتن حباب‌های ایجادشده، مخلوط حاصله در محیط خلا قرار گرفت[۲۱-۲۳].در مرحله آخر سخت کننده پلی‌آمینی به رزین(با نسبت وزنی ۱ به ۱۰)حاوی ذرات نانوگرافن اضافه شد و مخلوط به مدت ۵ دقیقه به صورت دستی همزده شد. برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از روش لایه‌گذاری دستی استفاده شد که در طی آن از ۴ لایه پارچه الیاف کربن با نسبت حجمی الیاف به زمینه ۵۰ درصداستفاده شد. پس از اتمام فرآیند ساخت، پخت نمونه‌ها در دمای محیط صورت پذیرفت. لازم به ذکر است که به منظور مقایسه نتایج به دست آمده و بررسی اثر نانوصفحات گرافن، نمونه‌های فاقد نانوگرافن نیز ساخته شدند.

۲-۳- آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

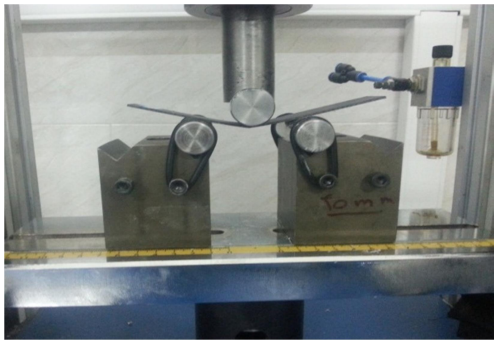
آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از دستگاه آزمون ساخت شرکت کوپا مطابق با استاندارد ASTM-D790صورت پذیرفت[۲۴].نمونه‌ها در ابعاد ۲۰×۱۲۵ میلی‌متر مربع روی فیکسچر دستگاه قرار داده شدند. پس از آن بار خمشی با سرعت مشخص(محاسبه شده با توجه به استاندارد) بر روی نمونه‌ها اعمال شد

[1] Graphene nanoplatelets
[2] Chitostan

www.SID.ir

Archive of SID

که در شکل ۲ نمایی از نحوه انجام آزمون نشان داده شده است. به منظور اطمینان از نتایج به دست آمده هر آزمون حداقل سه مرتبه برای همه نمونه‌ها تکرار شد.



شکل۲- نمونه کامپوزیتی تحت بارگذاری خمش سه‌نقطه‌ای

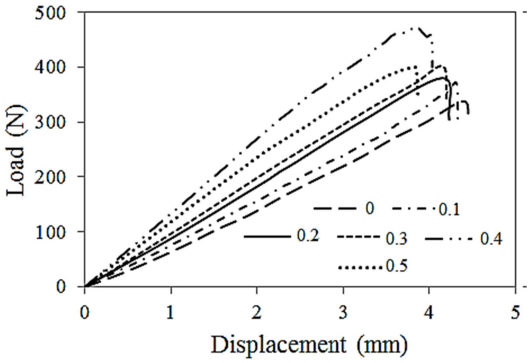
۲-۴- بررسی میکروسکوپی

برای بررسی سطح شکست نمونه‌های کامپوزیتی پس از آزمون خمش ، میکروسکوپ الکترونی میدانی مدلهی تاچی S-4160 تحت ولتاژ شتابی ۲۵ kV استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی رفتار خمشی

منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از آزمون خمش برروی نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با درصدهای وزنی مختلف نانوگرافن در شکل۳نمایش داده شده است . درادامه به منظورتحلیل بهتر نتایج و بررسی اثربخشی نانو صفحات گرافن، مقادیر استحکام کششی ، مدول کششی و انرژی شکست از منحنی‌های حاصله استخراج شد که در جدول ۱خلاصه نتایج به دست آمده نشان داده شده است.



شکل ۳- منحنی‌های نیرو-جابجایی به دست آمده از آزمون خمش بر حسب درصدهای وزنی مختلف نانوگرافن

جدول ۱- نتایج مربوط به آزمون خمش سه نقطه‌ای

درصد وزنی نانوگرافن	استحکام خمشی (MPa)	مدول خمشی (GPa)	جذب انرژی (N.mm)
صفر	۴۸۰	۳۰/۲۴	۷۱۷
۰/۱	۵۲۶	۳۹/۴۲	۷۵۲
۰/۲	۵۴۰	۴۶/۹۸	۸۱۹
۰/۳	۵۷۱	۵۱/۸۴	۸۶۱
۰/۴	۶۶۶	۷۱/۲۸	۱۰۵۷
۰/۵	۵۶۸	۶۳/۱۸	۸۴۹

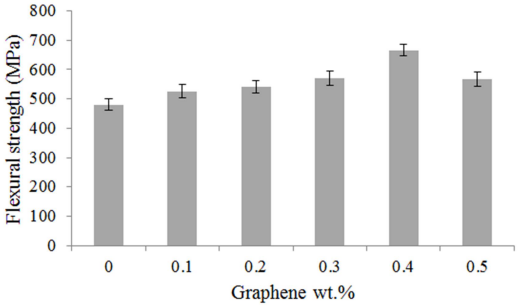
اثرافزودن نانو صفحات گرافن برتغییرات استحکام خمشی کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن درشکل۴نمایش داده شده است. روندتغییرات بدین صورت است که باافزودن نانوگرافن درابتدا استحکام خمشی افزایش وسپس کاهش یافت. به ازای افزودن ۰/۱ درصدوزنی نانوگرافن استحکام خمشی کامپوزیت تنها۳ درصدنسبت به کامپوزیت فاقدنانوگرافن افزایش یافته و این درحالی است که افزودن۰/۴درصد وزنی نانوگرافن منجربه افزایش۳۹درصدی استحکام خمشی کامپوزیت شده است. افزودن مقادیربالاتر (۰/۵ درصدوزنی) نانوگرافن منجربه کاهش استحکام خمشی کامپوزیت نسبت به نمونه حاوی۰/۴ درصد وزنی نانوگرافن شده است.

افزایش استحکام خمشی کامپوزیت درنتیجه افزودن نانوذرات گرافن احتمالاً ناشی ازدوعامل بوده است. بهبودخواص فصل‌مشترک زمینه-الیاف و همچنین نقش تقویت‌کنندگی نانوگرافن در زمینه که درنتیجه باعث می‌شود انتقال باربه خوبی اززمینه بهت قویت‌کننده الیافی صورت پذیردکه این امرمنجربه بهبود استحکام خمشی کامپوزیت می‌شود[۲۵].فصل‌مشترک درموادکامپوزیتی ازاهمیت بسزایی برخورداراست، زیراکه انتقال باراززمینه به الیاف تقویت‌کننده ازطریق فصل‌مشترک الیاف وزمینه صورت می‌پذیرد. بنابراین عملکرد مواد کامپوزیتی دربارگذاری‌های مختلف تحت تأثیرفصل‌مشترک قراردارد. اگرفصل مشترک بین زمینه و الیاف ضعیف باشد یا زمینه و الیاف چسبندگی مناسبی نداشته باشند،منجرمی‌شودکه انتقال باربه خوبی صورت نپذیرد وخواص مکانیکی کامپوزیت کاهش یابد[۲۶].ازطرفی هنگامی‌که زمینه نانوکامپوزیتی درکامپوزیت مورداستفاده قرارمی‌گیرد،لغزش اصطکاکی بین زمینه والیاف محدودشده واین بدان معناست که انتقال باراززمینه به الیاف به خوبی صورت می‌پذیرد وخواص مکانیکی کامپوزیت افزایش می‌یابد[۲۷]. درموادکامپوزیتی الیافی،الیاف به عنوان جزء اصلی تحمل‌کننده بارتلقی می‌شود و بخش عمده بار بر روی الیاف متمرکزمی‌شود. تقویت زمینه پلیمری توسط نانوگرافن منجربه کاهش تمرکزتنش برروی سطح الیاف وهمچنین فصل‌مشترک بین زمینه وتقویت‌کننده الیافی شده که در ادامه منجربه افزایش تنش موردنیازبرای پارگی الیاف و جدایش فصل-مشترک بین زمینه والیاف شده وبه تبع آن استحکام نمونه کامپوزیتی افزایش می‌یابد[۱۶]. افزودنمقادیربالاتر (۰/۵ درصدوزنی) نانوگرافن منجربه افت استحکام خمشی کامپوزیت نسبت به نمونه‌های کامپوزیتیحاوی۰/۴ درصد وزنی نانوگرافن شده که دلیل این امرمی‌تواند ناشی ازتوزیع نامطلوب نانوگرافن درون زمینه اپوکسی وآگلومره شدن

www.SID.ir

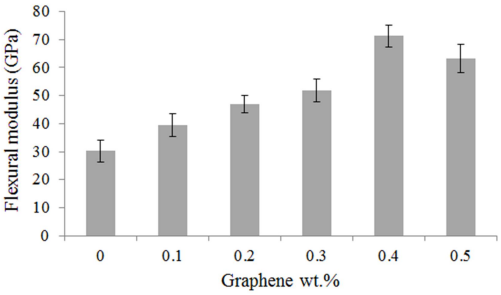
Archive of SID

آن‌ها در درصدها یوزنی بالا باشد که منجربه کاهش چسبندگی بین زمینه والیاف شده و محلی برای جوانه‌زنی ترک به شمار می‌رود[۱۷].



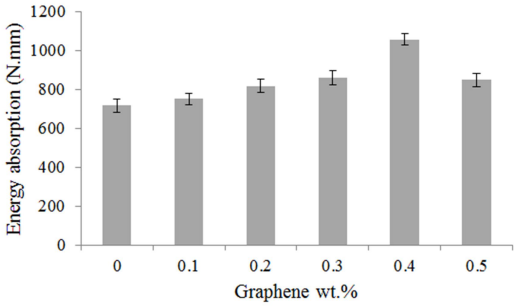
شکل ۴- اثر درصد وزنینانوگرافن بر استحکام خمشی کامپوزیت اپوکسی- الیاف کربن

اثرافزودن نانوگرافن برمدول خمشی در شکل ۵نشان داده شده است. به ازای افزودن نانوگرافن،مدول خمشی کامپوزیت به طورپیوسته ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته به طوری که به ازای افزودن۰/۴ درصد وزنی نانوگرافن مدول خمشی به میزان۱۳۵درصد نسبت به کامپوزیت فاقد نانوگرافن،افزایش یافته است. افزایش مدول خمشی دراثرافزودن نانوگرافن،به دلیل توزیع نانوگرافن درون زمینه اپوکسی است. توزیع مناسب نانوگرافن درون زمینه اپوکسی منجربه افزایش چسبندگی بین‌سطحی نانوگرافن وزمینه اپوکسی می‌شودکه موجب محدودشدن جنبش وتحرک زنجیره‌های پلیمری هنگام بارگذاری شده که نتیجه این امرافزایش مدول خمشی کامپوزیت است. همچنین به دلیل سفتی بالاترنانو صفحات گرافن درمقایسه با اپوکسی افزایش مدول خمشی قابل انتظاراست[۲۸].نکته قابل توجه اینکه مدول خمشی کامپوزیت حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانوگرافن۱۱ درصدکمتر ازکامپوزیت حاوی۰/۴ درصد وزنی نانوگرافن است که علت این امر احتمالاً مربوط به اندرکنش ضعیف بین زمینه ونانوگرافن درمقادیربالای نانوگرافن است.



شکل ۵- اثر درصد وزنی نانوگرافن بر مدول خمشی کامپوزیت اپوکسی- الیاف کربن

در شکل ۶میزان انرژی شکست کامپوزیت اپوکسی- الیاف کربن بر حسب مقادیر مختلف نانوگرافن نشان داده شده است.میزان انرژی شکست نمونه‌ها از سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی نشان داده شده در شکل ۲ محاسبه شد. بیشترین میزان افزایش مربوط به کامپوزیت حاوی۰/۴درصدوزنی نانوگرافن است. درکامپوزیت فاقدنانوگرافن میزان انرژی شکست۷۱۷ نیوتن میلیمتراست و درحالیکه با افزودن۰/۴درصدوزنی نانوگرافن به عدد۱۰۵۷ نیوتن میلیمتر افزایش یافته است.افزایش انرژی شکست دراثربارگذاری خمشی به علت انحراف ترک درزمینه به وسیله نانوذرات گرافن باعث بهبود جذب انرژی درکامپوزیت می‌شود،زیرا هنگامی که ترک به نانوذرات می‌رسد،برای اشاعه ترک نیاز به تغییرمسیررشدترک است [۲۹و۳۰].افت جذب انرژی درکامپوزیت حاوی ۰/۵ درصدوزنی نانوگرافن در مقایسه باکامپوزیت حاوی۰/۴ درصد وزنی نانوگرافن احتمالا مربوط به تشکیل آگلومره‌های نانوگرافن در درصدهای وزنی بالاست. آگلومره شدن نانوگرافن می‌تواندبه عنوان نقاط تمرکزتنش برای جوانه‌زنی ریزترک عمل نماید که نتیجه آن افت جذب انرژی کامپوزیت است.



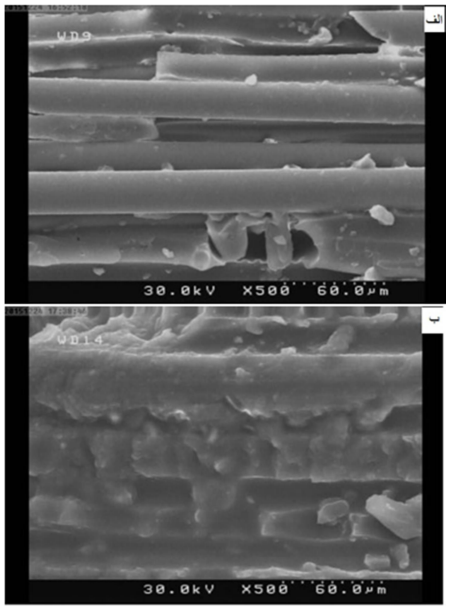
شکل ۶- اثر درصد وزنی نانوگرافن بر انرژی شکست کامپوزیت اپوکسی- الیاف کربن

۳-۲- بررسی سطوح شکست

سطح شکست مربوط به نمونه‌های کامپوزیتی فاقد نانوگرافن و نمونه تقویت‌شده با نانوگرافن درشکل۷ نمایش داده شده است. برای نمونه بدون نانوگرافن (شکل۷- الف) سطح شکست الیاف صاف و هموار است که مویدچسبندگی ضعیف بین زمینه و الیاف است. اما در ارتباط بانمونه‌های نانوکامپوزیتی تقویت شده با نانوگرافن (شکل۷-ب) پس ازشکست کامپوزیت تحت بارگذاری خمشی سطح شکست الیاف ناهمواراست و مقداری ازفاز زمینه به سطح الیاف چسبیده است که نشان‌دهنده فصل مشترک مناسب بین زمینه والیاف است. به طورکلی بابررسی تصاویرمیکروسکوپی می‌توان نتیجه گرفت که درنمونه‌های کامپوزیتی بدون نانوگرافن،جدایش فصل مشترک زمینه والیاف مکانیزم اصلی شکست می‌باشد و درنمونه‌های کامپوزیتی حاوی نانوگرافن مکانیزم اصلی، شکست ترک خوردن زمینه است[۳۱].

www.SID.ir

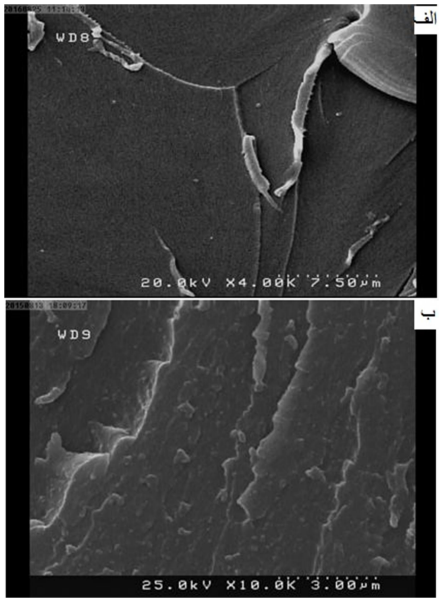
Archive of SID



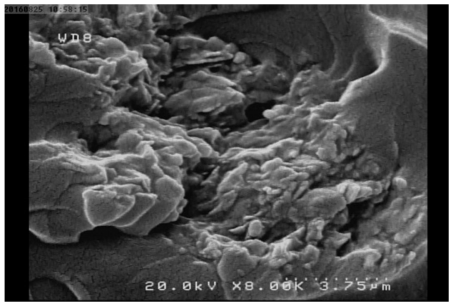
شکل ۷-تصاویر میکروسکوپ الکترونی الف) کامپوزیت فاقد نانوگرافن و ب) حاوی ۰/۴ درصد وزنی نانوگرافن

شکل ۸سطح شکست زمینه اپوکسی و نانوکامپوزیتی حاوی ۰/۴ درصدوزنی نانوگرافن رانشان می‌دهد. درارتباط بانمونه فاقد نانوگرافن (شکل ۸-الف) سطح شکست صاف بوده که نشان‌دهنده شکست تردمی‌باشد. این در حالی است که سطحشکست زمینه نانوکامپوزیتی (شکل ۸-ب)به صورت لایه لایه وناهموار است و انحراف مسیرترک به خوبی قابل مشاهده است. انحراف ترک درنتیجه حضورنانو ذرات گرافن منجربه افزایش فاکتورتشدید تنش و یا به عبارتی منجربه افزایش چقرمگی شکست می‌شود. به همین دلیل نمونه‌های نانوکامپوزیتی دارای جذب انرژی بالاتری نسبت به نمونه‌های فاقد نانوگرافن هستند.

شکل ۹ آگلومره شدن نانوگرافن را در زمینه کامپوزیت حاوی ۰/۵ درصد وزنی گرافن را نشان می‌دهد که عامل اصلی در افت خواص خمشی این نمونه در مقایسه با نمونه حاوی ۰/۴ درصد وزنی گرافن است.



شکل ۸-سطح شکست زمینه کامپوزیت الف) فاقد نانوگرافن و ب) تقویت‌شده با ۰/۴ درصد وزنی نانوگرافن



شکل ۹- آگلومره شدن نانوگرافن را در زمینه کامپوزیت حاوی ۰/۵ درصد وزنی گرافن

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، تأثیرافزودن نانوگرافن در درصدهای وزنی مختلف (۰، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳،۰/۴ و ۰/۵ درصد نسبت به زمینه) بررفتار مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف کربن تحت بارگذاری خمشی موردبررسی قرارگرفت که نتایج نهایی به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

۱-آزمون خمش نشان دادکه افزودن۰/۴ درصد وزنی نانوگرافن مقدار بهینه است.در این حالت استحکام خمشی،مدول خمشی وانرژی شکست به ترتیب به میزان۳۹، ۱۳۵ و ۴۷ درصد نسبت به نمونه فاقد نانوگرافن افزایش یافتند.

۲- به ازای افزودن مقادیر بالاتر نانوگرافن (۰/۵ درصد وزنی) خواص خمشی کامپوزیت افت پیدا نمود.

۳- بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان دادکه یکی از عوامل اصلی بهبودخواص خمشی کامپوزیت اپوکسی-الیاف کربن دراثرافزودن نانوگرافن ناشی ازبهبود فصل مشترک بین الیاف تقویت‌کننده وزمینه بوده است.

www.SID.ir

Archive of SID

۴-درمجموع نتایج این پژوهش نشان دادکه افزودن نانوگرافن به زمینه کامپوزیت اپوکسی- الیاف کربن تاثیر بسزایی در بهبود خواص مکانیکی آن‌ها تحت بارگذاری خمشی دارد.

۵- مراجع

[۱] مجتبی صدیقی، سازه‌های مرکب (مکانیک موادوطراحی) ،انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر،چاپ دوم،تابستان۱۳۸۹.

[2] Mallick P.K., Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing, and Design, Taylor & Francis, 2007

[3] Taljera R., and Singh C. V., Damage and Failure of Composite Materials Cambridge university press, 2012.

[4] Koide R. M., Zeska G. V., and LauresenM. A., An ant colony algorithm applied to lay-up optimization of laminated composite plates, Latin American Journal of solids and Structures, Vol. 10, pp. 491-504, 2013.

[5] Hyer M. W., Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials, WCB/McGraw-Hill, New York, 1998

[6] Kumar K. P., andSekaran A. S. J., Some natural fibers used in polymer compositesand their extraction processes: a review, Journal of Reinforced Plasticsand Composites, Vol. 33, PP. 1879-1892, 2014.

[7] WangP., YangJ., LiuW., Tang X. Z., Zhao K., Lu X., and XuS., Tunable crack propagation behavior in carbon fiber reinforced plastic laminates with polydopamine and graphene oxide treated fibers, Materials and Design, Vol. 113, pp. 68-75, 2017.

[8] ZhuH., Li X., Dong Z., Ma G., Han F, Cong Y., Yuan G., Cui Z., and WestwoodA., Effect of carbon fiber crystallite size on the formation of hafnium carbide coating and the mechanism of the reaction of hafnium with carbon fibers, Carbon, Vol. 115, pp. 640-648, 2017.

[9] Paul D. R., and Robeson L. M., Polymer nanotechnology: Nan composites, Polymer, Vol. 49, pp. 3187-3204, 2008.

[10] Kumar S. M. S., RajuN. M. S., Sympathy. S., and *JayakumariL.* S., Effects of Nan materials on Polymer Composites: an expatriate view, Review Advanced Materials Science, Vol. 38, pp. 40–54, 2014.

[11] Hussain F., and Hojjati M, Review article: Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview, Journal of Composite Materials, Vol. 40, pp. 1511-1574, 2006.

[12] HuK., KulkarniD. D., ChoiI., and TsukrukV. V., Grapheme-polymer nano composites for structural and functional applications, Progress in Polymer Science, Vol. 39, pp. 1934-1972, 2014.

[13] MittalG., DhandV., RheeK. Y., Park S. J., and LeeW. R., " A review on carbon nanotubes and graphene as fillers in reinforced polymer nanocomposites", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 21, pp. 11-25, 2015.

[14] BafanaA. P., YanX., Patel M., Guo Z., Wei S., Wujcik E. K., Polypropylene nanocomposites reinforced with low weight percent graphene nanoplatelets, Composites Part B: Engineering, Vol. 109, pp. 101-107, 2017.

[15] CuiY., KundalwalS. I., Kumar S., Gas barrier performance of graphene/polymer nanocomposites", Carbon, Vol. 98, pp. 313-333, 2016.

[16] ShokriehM. M., Esmkhani M., and HaghighatkhahA. R., Mechanical Properties of Graphene/Epoxy Nanocomposites under Static and Flexural Fatigue Loadings, Mechanics of Advanced Composite Structures, Vol. 1, pp. 1-7, 2014.

[17] Nudism., Guitar., Narthex A. D., Hour M., and JeelaniS., Synergistic Effect of Grapheme Nan platelets and Nan clay on Epoxy Polymer Nan composites, Advanced Materials Research, Vol. 1119, pp. 155-159. 2015.

[18] KamarN. T., Hossain M. M., Khomenko A., Haq M., Drzal L. T., and LoosA., "Interlaminar Reinforcement of Glass Fiber/Epoxy Composites with Graphene Nanoplatelets, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 70, pp. 82–92, 2015.

[19] FanH., WangL., ZhaoK., LiN., Shi Z., Ge Z., and Jin Z.,Fabrication, Mechanical Properties, and Biocompatibility of Graphene-Reinforced Chitosan Composites", Biomacromolecules, Vol. 11, pp. 2345-2351, 2010.

[20] Shen X.J., LiuY., Xiao H. M., Feng Q. P., Yu Z. Z., and Fu S. Y., The Reinforcing Effect of Graphene Nanosheets on the Cryogenic Mechanical Properties of Epoxy Resins, Composites Science and Technology, Vol. 72, pp. 1581-1587, 2012.

[21] Khosravi H., and Eslami-Farsani R., On the flexural properties of multiscale nanosilica/E-glass/epoxy anisogrid-stiffened composite panels, Journal of Computational & Applied Research in Mechanical Engineering, Vol. 7(1), pp. 99-108, 2017.

[22] Abdi A., Eslami-Farsani R., and Khosravi H., Evaluating the Mechanical Behavior of Basalt Fibers/Epoxy Composites Containing Surface-modified $CaCO_3$ Nanoparticles, Fibers and Polymers, Vol. 19(3), pp. 635-640, 2018.

[23] Khosravi H., and Eslami-Farsani, R., An experimental investigation into the effect of surface-modified silica nanoparticles on the mechanical behavior of E-glass/epoxy grid composite panels under transverse loading, In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3(1), pp. 11-20, 2016.

[24] ASTM D790: Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, 2003.

[25] MaricheR., Sanchez M., Suarez A.J., Prolongo S.G., and UrenaA., Electrically Conductive Functionalized-GNP/Epoxy Based Composites: From Nanocomposite to Multiscale Glass Fibre Composite Material, Composites Part B, Vol. 98, pp. 49-55, 2016.

[26] AvilaA. F., PeixotoL. G. Z, Silva NetoA., De avila J., and Carvalho M. G.R., Bending Investigation on Carbon Fiber/Epoxy Composites Nano- Modified by Graphene, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering , Vol. 35, pp. 269-275, 2012.

[27] Khosravi H., Eslami-Farsani, R., Enhanced Mechanical Properties of Unidirectional Basalt Fiber/Epoxy Composites Using Silane-Modified Na+-Montmorillonite Nanoclay, Polymer Testing, Vol. 55, pp. 135-142, 2016.

[28] Chouhan D. K., Rath S. K., Kumar A., Alegaonkar P. S., Kumar S., Harikrishnan G., and Patro T. U., "Structure-Reinforcement Correlation and Chain Dynamics in Graphene Oxide and Laponite- Filled Epoxy Nanocomposites", Journal of Materials Science, Vol. 50, pp. 7458-7472, 2015.

[29] Wang F., Drzal L. T., Qin Y., and Huang Z., Enhancement of Fracture Toughness, Mechanical and Thermal Properties of Rubber/Epoxy Composites by Incorporation of Graphene Nanoplatelets, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 87, pp. 10-22, 2016.

[30] Qin Q., and Ye J., Toughening mechanism in composite materials, Elsevier, 2015.

[31] Khosravi H., Eslami-Farsani R., On the Mechanical Characterizations of Unidirectional Basalt Fiber/ Epoxy Laminated Composites with 3-glycidoxy propyltrime thoxysilane Functionalized Multi-Walled Carbon Nano tubes–Enhanced Matrix, Journal of Reinforced Plastics and composites, Vol. 35, No. 5, pp. 421-434, 2016.

www.SID.ir