Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۸۹، جلد ۴۹، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۸، صفحه ۱۹-۲۵

تحلیل خواص کششی نانو کامپوزیت هیبریدی پایه رزین اپوکسی/ الیاف شیشه/ نانو ذرات سیلیکا

محمد صادق باقری کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران، ایران
فرامرز آشنای قاسمی* دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، تهران، ایران
اسماعیل قاسمی استاد، گروه مهندسی پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران

چکیده

در این تحقیق، مواد مرکب بر پایه رزین اپوکسی/ نانو ذرات سیلیکا/ الیاف کوتاه شیشه به روش قالب‌گیری دستی تهیه شده‌اند. رزین استفاده شده شامل اپوکسی و یک نوع پلی آمین به عنوان سخت‌کننده بودند. نانوذرات سیلیکا و الیاف شیشه (با طول متوسط ۶ میلی‌متر) به ترتیب در سه مقدار ۰، ۰/۷۵ و ۱/۵ درصد وزنی برای نانوذرات و ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی برای الیاف شیشه به ماتریس پلیمری اپوکسی افزوده شدند. پس از تهیه نمونه‌ها، آزمون مکانیکی کشش برای بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت انجام شده و نتایج حاصل از این آزمون تحلیل و مقایسه شدند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که به طور کلی با اضافه کردن ۰/۷۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا استحکام کششی، مدول الاستیک و ازدیاد طول تا پارگی افزایش و در حضور ۱/۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا خواص مکانیکی مذکور دچار کاهش شدند. این درحالی است که با اضافه کردن الیاف شیشه به تنهایی، مدول الاستیک به صورت پیوسته افزایش یافته اما استحکام کششی کاهش می‌یابد. نتایج حاصل همچنین نشان داد که حضور همزمان الیاف شیشه و نانو سیلیکا باعث افزایش مدول الاستیک و کاهش استحکام کششی و ازدیاد طول می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: خواص کششی؛ اپوکسی؛ مواد مرکب؛ الیاف شیشه؛ نانوسیلیکا.

Analysis of tensile properties of hybrid nanocomposite based on epoxy/ glass fibers/ nano-silica

M. S. Bagheri Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
F. Ashenai Ghasemi Faculty of Mechanical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
I. Ghasemi Department of Materials Science and Engineering, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

Abstract

In this study, nanocomposites based on epoxy, nano-silica and short glass fibers were prepared with hand molding method. The resin material consisted of epoxy resin and polyamine. Nano-silica and glass fibers, with average length of 6 mm, were added to epoxy polymer matrix in three levels 0, 0.75 and 1.5 wt.% for nano-silica and 5, 10 and 15 wt.% for glass fibers, respectively. After sample preparation, tensile tests are performed to study tensile properties of composites and results were compared and analyzed. Results showed that by adding 0.75 wt.% nano-silica, tensile strength, elastic modulus and elongation increased and by addition 1.5 wt.% of nano-silica the mentioned properties decreased. On the other hand, adding just glass fibers enhanced elastic modulus continuously and declined tensile strength of the nanocomposite. Furthermore, simultaneous presence of glass fibers and nano-silica caused an enhancement in elastic modulus and a reduction in tensile strength and elongation at break.

Keywords: Tensile properties; Epoxy; Composite; Glass fibers; Nano-silica.

۱- مقدمه

در چند دهۀ اخیر، مواد مرکب به دلیل خواص عالی از جمله استحکام بالا نسبت به وزن، مقاومت شیمیایی بالا و قابلیت بهبود خاصیت مورد نظر با توجه به کاربرد آنها، به صورت گسترده در صنایع هوافضا، دریایی، صنایع خودرو و . . . مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. رزین اپوکسی به دلیل خواص مکانیکی بی‌نظیر دارای بالاترین میزان کاربرد در بین رزین‌های موجود در صنعت بوده و از این رو بهبود خواص ترکیبات بر پایه رزین اپوکسی اجتناب ناپذیر است. نانومواد می‌توانند در درصدهای وزنی بسیار کم، خواص مکانیکی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش دهند. ترکیب رزین اپوکسی با انواع مختلف نانوذرات به صورت گسترده توسط محققان انجام شده است [۱-۳]. نانوذرات سیلیکا به دلیل خواص بسیار عالی از جمله مدول الاستیسیته بالا، مساحت سطح مؤثر بالا، پایداری حرارتی خوب و هزینه پایین توجه زیادی به خود جلب کرده‌اند [۴]. خواص رزین اپوکسی مخلوط شده با نانوذرات سیلیکا با قطر متوسط ۲۵ نانومتر، توسط ژانگ و همکاران [۵] مورد مطالعه قرار گرفته است. مدول الاستیک (استاتیک و دینامیک) و چقرمگی شکست، با بالا بردن میزان نانو سیلیکا تا ۱۴ درصد حجمی (۲۳ درصد وزنی)، افزایش پیدا کرد. نتایج آنها نشان داد که توزیع یکنواخت نانو ذرات سیلیکا میتواند سفتی و چقرمگی رزین اپوکسی را به طور همزمان بهبود بخشد. بهبود بیشتر این خواص زمانی مشاهده شد که فاصله بین نانو ذرات سیلیکا کوچکتر از قطر نانو ذرات بودند.

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: f.a.ghasemi@srttu.edu

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۸/۲۹
تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۳/۰۱

www.SID.ir

Archive of SID

کنرادی و همکاران [۶] تأثیر افزودن ۰/۵ درصد حجمی نانوسیلیکا با دو قطر متفاوت، درون رزین اپوکسی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش‌های آنها نشان داد که افزودن نانو سیلیکا باعث زبری سطح شکست نمونه می‌شود. برای در هر دو قطر از نانو سیلیکا، مدول الاستیک به میزان ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش، ازدیاد طول تا پارگی ۵ تا ۱۰ درصد کاهش و چقرمگی شکست ۲۵ تا ۳۰ درصد بهبود را نشان داد. آنها همچنین مشاهده نمودند که میزان جذب انرژی ضربه در نمونه حاوی نانو سیلیکا با قطر ۳۰ نانومتر، ۶۰ درصد و در نمونه حاوی ذرات ۱۳۰ نانومتری، به میزان ۳۰ درصد افزایش پیدا می‌کند.

بررسی تأثیر نانو ذرات سیلیکا بر خواص ماده مرکب کربن- فنولیک توسط میرزاپور و همکارانش [۷] نشان داد که استحکام خمشی با افزودن ۳ درصد وزنی نانو سیلیکا، به میزان ۱۳ درصد افزایش می‌یابد، اما در ۵ درصد وزنی نانو سیلیکا، استحکام خمشی کاهش پیدا می‌کند. تأثیر اضافه کردن نانو سیلیکا به آلیاژ نایلون-پلی پروپیلن توسط جاکوب و همکارانش [۸] انجام شد. نتایج آنها نشان داد که نمونه با ۱ درصد وزنی نانو سیلیکا و ۳۰ درصد وزنی الیاف نایلون، بالاترین استحکام کششی، مدول الاستیک و استحکام و مدول خمشی را دارد. همچنین، آنها بیشترین استحکام ضربه‌ای را در نمونه با ۱ درصد وزنی نانو سیلیکا و ۱۰ درصد وزنی الیاف نایلون مشاهده نمودند.

الیاف شیشه از جمله تقویت‌کننده‌هایی هستند که به دلیل استفاده آسان، هزینه‌های پایین و خواص مکانیکی بالا به صورت متناوب در رزین‌های اپوکسی استفاده می‌شوند[۹]. فرشته و همکاران [۱۰] مقاومت ضربه‌ای مواد مرکب تک جهتی رزین اپوکسی/ الیاف شیشه با درصد حجمی الیاف ۵۰ درصد را برای شش جهت‌گیری مختلف الیاف (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه) بررسی کرده‌اند. نتایج، افزایش استحکام را برای جهت‌گیری‌های مختلف با افزایش سرعت کرنش نشان داده است. به طوری که در بیشترین سرعت کرنش، افزایشی به مقدار ۲/۴ و ۲۴/۷ درصد به ترتیب در مدول و استحکام کششی طولی گزارش شده است. مطهری وهمکاران [۱۱] برای بررسی تاثیر تنش به کار رفته در الیاف روی مقاومت ضربه‌ای ماده مرکب اپوکسی/ الیاف شیشه، الیاف را با تنشهای ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و۸۰ MPa (بر اساس سطح مقطع الیاف) ساخته و با انجام آزمون ضربه روی آنها به این نتیجه رسیدند که بیشترین افزایش مقاومت ضربه تا ۵۰ درصد با اعمال ۶۰ MPa کشش در الیاف رخ می‌دهد درحالی که بدون کشش الیاف ۳۳ درصد رشد مقاومت ضربه حاصل شده است.

لیفشیتز و همکاران [۱۲] اثر سرعت کرنش بر خواص کششی مواد مرکب تک جهتی با الیاف شیشه و زمینه اپوکسی با درصدحجمی الیاف ۶۰ درصد را بررسی کردند. آنها در تحقیق خود، افزایش سه برابری را در استحکام کششی و افزایش ۵۰ درصدی را درمدول الاستیک با افزایش سرعت کرنش در مقایسه با مقادیر ایستا مشاهده کردند. مواد مرکب سه‌تایی تقویت شده با نانوذرات سیلیکا و الیاف شیشه نیز توسط محققین مطالعه شده است. تأثیر نانوسیلیکا بر ماده مرکب الیاف شیشه (تک جهته) رزین اپوکسی توسط یودین و سان [۱۳] بررسی شده است. آنها نشان دادند افزودن ۱۵ درصد وزنی نانوسیلیکا، مدول الاستیک را به شکل قابل توجهی افزایش می‌دهد. چن و همکاران [۱۴] بهبود مدول و چقرمگی نانوماده مرکب اپوکسی/ نانوسیلیکا را شاهد بودند، بدون اینکه افزودن نانوذرات سیلیکا تأثیری بر دمای کاری رزین داشته باشد. نتایج آزمایش خواص مکانیکی حاکی از بهبود ۳۰ درصدی چقرمگی در درصدهای پایین نانوسیلیکا بوده است.

هوگو و همکاران [۱۵] با افزودن ۱ درصد وزنی نانوسیلیکات به ماده مرکب شیشه/اپوکسی، شاهد افزایش ۴۴ درصدی استحکام برشی بین لایه‌ای بوده‌اند. مقاومت خمشی و چقرمگی شکست نیز به ترتیب، ۲۴ و ۲۳ درصد افزایش را نشان داده‌اند. این افزایش در خواص مکانیکی، عمدتاً ناشی از افزایش ناحیه‌ی تماس بین سطحی و بهبود خصوصیات پیوند بوده است. پل و همکاران [۱۶] تغییر خواص کششی ماده مرکب چندلایه شیشه/ اپوکسی با الیاف بافته شده، بر اثر افزودن دو نوع نانو ذره مختلف، مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. نانومواد مرکب با ۱۲ لایه الیاف شیشه بافته شده با کسر حجمی الیاف ۴۰ درصد و به روش لایه چینی دستی تولید شده و نانو رس با نسبت‌های وزنی ۰، ۳، ۵، ۷ و ۱۰ درصد وزنی و نانوسیلیکا نیز با نسبتهای وزنی ۰، ۰/۵، ۱ و ۳ درصد ، درون رزین پخش شدند. بررسی نتایج نشان داد که افزودن نانوسیلیکا به ماده مرکب، خواص را در درصدهای پایین بهبود می‌بخشد. به طوری که بیشترین افزایش خواص مکانیکی را می‌توان در نانوماده مرکب با ۰/۵ درصد وزنی نانوسیلیکا مشاهده نمود. در این حالت استحکام کششی ٪ ۱۰، کرنش شکست ٪ ۱۴ و چقرمگی ماده ٪ ۲۷ افزایش پیدا می‌کند.

در تحقیق حاضر نانوذرات سیلیکا در سه سطح ۰، ۰/۷۵ و ۱/۵ درصد وزنی به ماتریس اپوکسی و همچنین رزین اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه اضافه شده است. همان طور که از تحقیقات پیشین مشاهده می‌شود، بیشترین توجه معطوف به الیاف شیشه به صورت پارچه یا با طول بلند بوده است. لذا، با توجه به خواص الیاف کوتاه شیشه و کاربرد گسترده آنها در رزین اپوکسی، دراین پژوهش به بررسی خواص مکانیکی الیاف کوتاه شیشه در حضور نانوسیلیکا پرداخته شده است. در این تحقیق از الیاف کوتاه شیشه از نوع آ با طول متوسط ۶ میلی‌متر در سه سطح ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی استفاده شده است که به صورت تصادفی در ماتریس پراکنده شده‌اند. سپس تأثیر افزودن نانوذرات سیلیکا و الیاف شیشه به ماتریس اپوکسی به صورت منفرد و همزمان روی خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی، مدول الاستیک و ازدیاد طول تا شکست بررسی شده است.

۲- آزمایش

۲-۱- مواد

در این تحقیق از رزین اپوکسی با نام تجاری ایپونات ۵۰۳ (رزین بر پایه بیسفنول نوع آ) و عامل سخت‌کننده، پلی‌آمینی با نام تجاری ایپونات ۵۶۵ محصول شرکت بیتکس ترکیه استفاده شده است [۱۷]. مدت ژل شدن این نوع رزین و سخت کننده حدود ۶۰ دقیقه می‌باشد که مدت مطلوبی برای خروج حباب‌های هوا از آن است. برای تقویت‌کردن رزین اپوکسی از الیاف شیشه کوتاه نوع آ با قطر ۱۷ تا ۲۵ میکرومتر و طول متوسط ۶ میلی‌متر محصول شرکت بلورین تار و از پودر نانو سیلیکا با کد تجاری k-۲۰۰ محصول شرکت کی‌سوکره جنوبی، باشکل هندسی کروی با قطر ۷ تا ۴۰ نانو متر و مساحت سطح ۲۰۰ m^2/g و چگالی ۱۰۰-۵۰g/l استفاده شد.

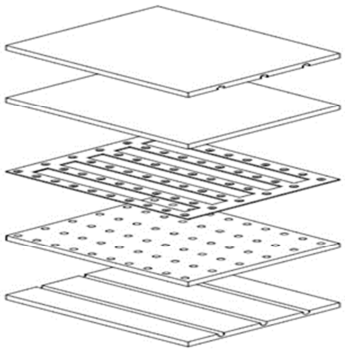
www.SID.ir

Archive of SID

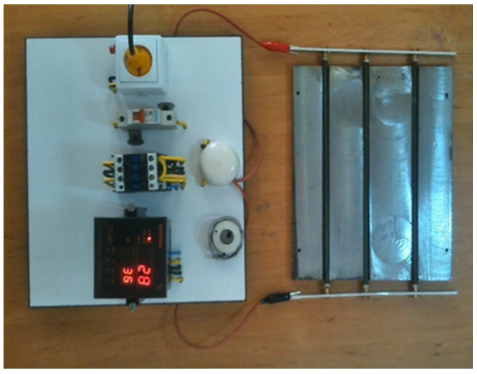
۲-۲- نمونه سازی

برای تولید مواد مرکب رزین اپوکسی-الیاف شیشه ابتدا الیاف با رزین اپوکسی ترکیب شدند و به صورت دستی به مدت ۵ دقیقه مخلوط گردیدند و سپس سخت‌کننده به ترکیب اضافه گردید. برای خارج کردن حباب هوای ایجاد شده در ترکیب، نمونه‌ها به مدت۲۰ دقیقه تحت خلاء قرار گرفتند. در نمونه‌هایی که شامل نانوسیلیکا بودند بعد از مخلوط کردن پودر نانوسیلیکا با رزین اپوکسی، ترکیب به وسیله همزن برقی با سرعت ۳۰۰۰ rpm به مدت ۱۵ دقیقه هم زده شدند. سپس مخلوط در دستگاه فراصوت با توان ۱۵۰ kw/cm^2 به مدت ۲۰ دقیقه تحت امواج فراصوت قرار گرفت تا نانوذرات به خوبی در ترکیب پراکنده شده و ترکیبی همگن حاصل شود.

به منظور جلوگیری از افزایش دمای رزین هنگام امواج دهی فراصوت از حمام آب سرد استفاده شد. سپس ترکیب مذکور با سخت‌کننده مخلوط شد و جهت حباب زدایی به مدت ۲۰ دقیقه در محیط خلاء قرار گرفت. برای ساخت نمونه‌های شامل الیاف شیشه و نانوذرات، ابتدا نانوذرات به زمینه اضافه شدند و پس از پراکنده شدن توسط همزن برقی، به مدت ۲۰ دقیقه تحت فراصوت قرار گرفتند. سپس الیاف شیشه اضافه شدند و به صورت دستی هم زده شدند. پس از افزودن سخت‌کننده، ترکیب حاصل به مدت ۲۰ دقیقه تحت خلاء قرار گرفت. مدت زمان فراصوت شدن نمونه‌ها با توجه به سعی و خطا به دست آمده‌است. برای پخت نمونه‌ها، هر نمونه پس از قالب‌گیری دستی ۲۴ ساعت در دمای حدود ^{o}C ۳۰ باقی مانده و سپس ۴ ساعت در دمای ^{o}C ۶۰ پخته شد.



شکل ۱- طرح قالب کشش



شکل ۲- قالب فولادی استفاده شده برای ساخت نمونه‌های کشش

۳- آزمون‌ها

برای تعیین خواص کششی نمونه‌های ساخته شده از آزمون مکانیکی کشش تک محوری استفاده شده است. این آزمون به طور گسترده برای ارزیابی خواص مکانیکی مواد مرکب از جمله استحکام کششی، مدول الاستیک و ازدیاد طول تا پارگی استفاده می‌شود. برای ساخت نمونه‌های کشش ابتدا قالب فلزی مطابق استاندارد۳۰۳۹ ASTM D طراحی و ساخته شده است. این قالب فلزی از جنس فولاد بوده و همان‌طور که از طرح قالب در شکل ۱ مشاهده می‌شود، قالب از دو کفشک زیر و رو به منظور نگهداری صفحه قالب و دو صفحه دیگر مشابه با کفشک‌ها که در آنها سه شیار جهت قرار گرفتن گرم کننده‌های حرارتی جهت تامین حرارت پخت نمونه‌ها تعبیه شده، تشکیل شده است. این قالب دارای ۵ حفره مستطیل شکل در ابعاد ۲/۵ سانتی متردر ۲۵ سانتی متر و ضخامت ۲/۵ میلیمتر می‌باشد. جهت کنترل حرارت گرم کننده‌ها در این قالب از یک ترموکوپل الکتریکی و کلید قطع وصل خودکار جهت کنترل برق آن استفاده شده است که قابلیت تنظیم دما تا ^{o}C ۴۰۰ را دارا می‌باشد. قالب مذکور به همراه بُرد مربوطه در شکل ۲ نمایش داده شده است. برای انجام آزمون کشش از ماشین آلمانی زونیک‌روئل مدل Z۱۰۰ دانشگاه شهید رجایی استفاده شده است. سرعت حرکت فک متحرک ۲ میلیمتر بر دقیقه تنظیم گردید. همچنین جهت جلوگیری از لیز خوردن احتمالی نمونه‌ها، در ابتدای کشش مقدار پیش‌بار به اندازه ۱نیوتن به دستگاه داده شد. تعداد نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمون کشش در درصدهای متفاوت الیاف و نانوذرات، ۵ عدد بوده که متوسط آن گزارش شده است. تصاویر سطح شکست نمونه‌ها جهت مشاهده پراکندگی نانوذرات سیلیکا در ماتریس اپوکسی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با نام VEGA-II TESCAN در دانشگاه امیرکبیر تهیه شد (سطح شکست نمونه‌ها ابتدا با ضخامت حدود ۱۰ میکرومتر از طلا روکش‌دهی شدند و تصاویر SEM از سطح روکش داده شده گرفته شده است).

۴- نتایج و بحث

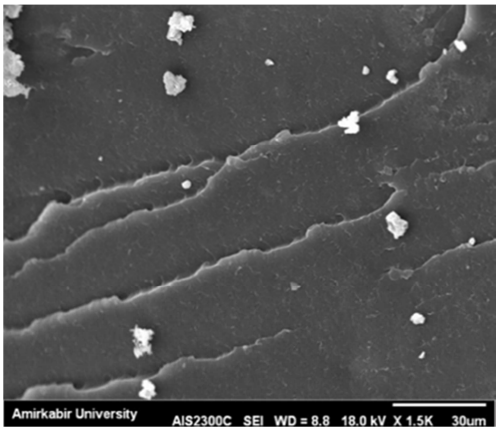
۴-۱- استحکام کششی

همان طور که از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نانوذرات سیلیکا پراکندگی مناسبی در زمینه دارند.

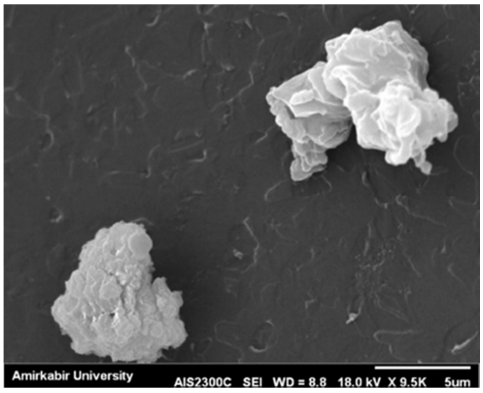
www.SID.ir

Archive of SID

این توزیع یکنواخت و همچنین پر کردن منافذ حاصل از نقص های مولکولی توسط این نانوذرات باعث افزایش استحکام کششی شده است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۴ حاکی از آن است که با افزایش درصد وزنی نانوذرات سیلیکا به ۱/۵ درصد وزنی، تمایل نانوذرات به کلوخگی باعث ایجاد خوشه‌ها می‌شوند. این خوشه‌ها می‌توانند به عنوان یک نقص عمل کنند. ایجاد تمرکز تنش در اثر حضور خوشه‌ها می‌تواند باعث کاهش استحکام کششی شود. این در حالی است که الیاف شیشه به دلیل چسبندگی کم با زمینه تمایل به خارج شدن از زمینه را دارند و به صورت پیوسته باعث کاهش استحکام کششی می‌شوند.

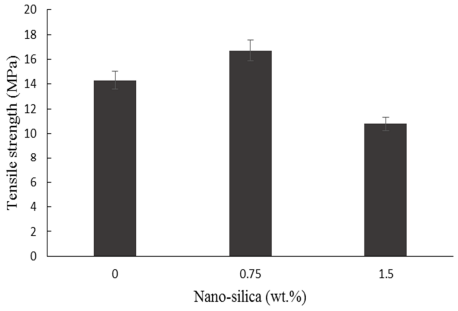


شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونهٔ شامل ۰/۷۵ درصد وزنی نانوسیلیکا

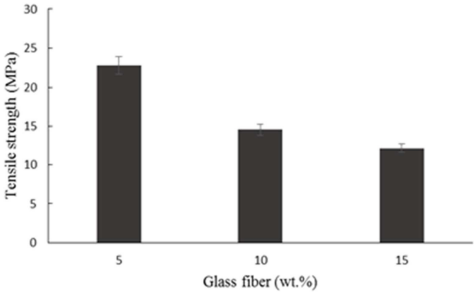


شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونهٔ شامل ۱/۵ درصد وزنی نانوسیلیکا

شکل‌های ۵ و ۶ نتایج حاصل از آزمون کشش برای استحکام کششی را نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، برای نانومواد مرکب سیلیکا/ اپوکسی حضور ۰/۷۵ درصد وزنی نانو سیلیکا در ماتریس اپوکسی استحکام کششی را ۱۶درصد افزایش می‌دهد. در حضور ۰/۷۵ درصد وزنی نانوذرات، الیاف بیشترین چسبندگی و برهم کنش را با زمینه دارند. نتایج حاصل از افزودن الیاف شیشه در درصدهای مختلف در شکل ۶ قابل مشاهده است.



شکل ۵ - استحکام کششی بر حسب درصد وزنی نانو سیلیکا



شکل ۶ - استحکام کششی بر حسب درصد وزنی الیاف شیشه

۴-۲- مدول الاستیک

پراکندگی نانوذرات در زمینه تاثیر به‌سزایی در مدول الاستیک ترکیب دارد. با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانوذرات در ۰/۷۵ درصد وزنی پراکندگی مناسبی در زمینه دارند (شکل ۳ و ۷) . همان طور که مشاهده می‌شود، افزودن نانوذرات سیلیکا تا ۰/۷۵ درصد وزنی باعث افزایش ۵ درصد مدول الاستیک شده است. نانو ذرات به دلیل دارا بودن مدول یانگ بالا می‌توانند مدول الاستیک ترکیب را افزایش دهند. البته نانوذرات سیلیکا در ۱/۵ درصد وزنی به دلیل ایجاد کلوخه باعث ناپیوستگی در زمینه شده و مدول الاستیک را کاهش می‌دهند(شکل۸). انتقال بار از ماتریس پلیمری به الیاف شیشه می‌تواند مدول الاستیک را افزایش دهد. مدول الاستیک نانومواد مرکب سیلیکا/ اپوکسی در شکل ۹ با ثابت نگه داشتن درصد وزنی الیاف شیشه گزارش شده است. بدیهی است که با توجه به بیشتر بودن مدول الیاف شیشه نسبت به رزین اپوکسی، با افزایش درصد وزنی الیاف شیشه، مدول الاستیک ترکیب پیوسته افزایش پیدا می‌کند [۱۸]. نتایج تاثیر حضور الیاف شیشه در درصدهای مختلف بر مدول الاستیک در شکل ۱۰ گزارش شده است.

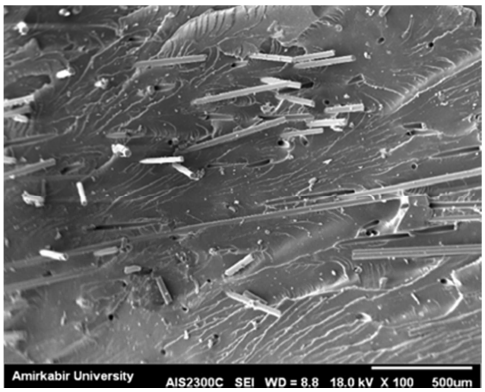
۴-۳- ازدیاد طول تا شکست

نتایج حاصل از نمونه‌ها در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات سیلیکا به ماتریس پلیمری باعث افزایش ازدیاد طول تا شکست شده است. افزودن نانوذرات تا ۰/۷۵ درصد وزنی پراکندگی مناسبی در زمینه دارند و با حضور در نقص‌ها و شکاف‌های ماتریس

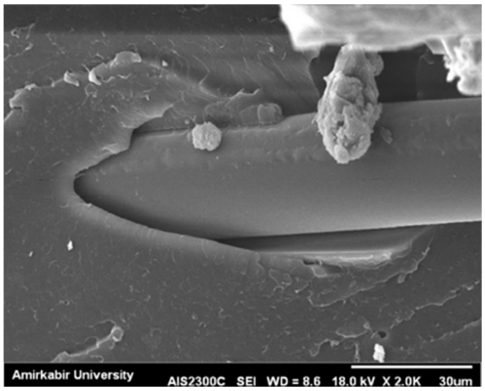
www.SID.ir

Archive of SID

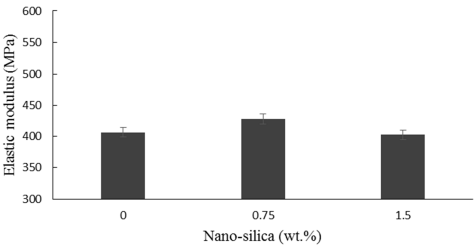
پلیمری و ایجاد پیوستگی مناسب ازدیاد طول تا شکست را ۸ درصد بهبود می‌دهند. با توجه به تمایل نانوذرات به کلوخه‌ای شدن در ۱/۵ درصد وزنی و تفکیک کمتر ساختار توده‌ای نانوذرات، ازدیاد طول تا شکست کاهش می‌یابد. در شکل ۱۱ با ثابت نگه داشتن درصد وزنی الیاف شیشه این تغییرات بیان شده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، افزایش درصد وزنی الیاف شیشه به طور پیوسته باعث کاهش ازدیاد طول تا شکست نمونه‌ها شده است. افزودن الیاف شیشه، باعث افزایش مدول و سفتی ماده می شود و در نتیجه حتی در درصدهای کم، ماتریس پلیمری را در برابر تغییر شکل مقاوم کرده و ازدیاد طول را کاهش می دهد.



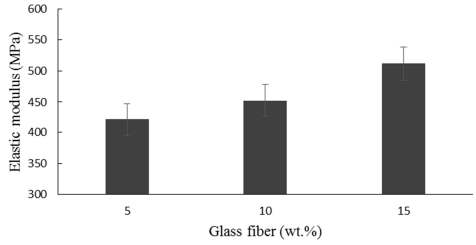
شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونهٔ شامل ۰/۷۵ درصد وزنی نانوسیلیکا و ۱۵ درصد وزنی الیاف شیشه



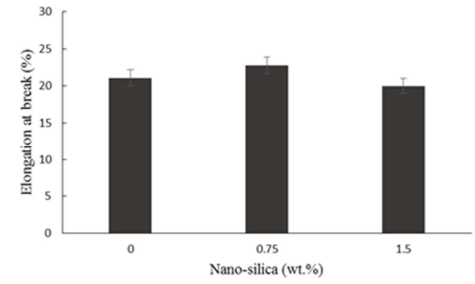
شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونهٔ شامل ۱/۵ درصد وزنی نانوسیلیکا و ۱۰ درصد وزنی الیاف شیشه



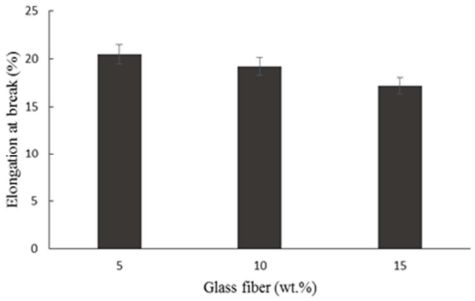
شکل ۹- مدول الاستیک بر حسب درصد وزنی نانوذرات سیلیکا



شکل ۱۰- مدول الاستیک بر حسب درصد وزنی الیاف شیشه



شکل ۱۱- ازدیاد طول تا شکست بر حسب درصد وزنی نانو سیلیکا



شکل ۱۲- ازدیاد طول تا شکست بر حسب درصد وزنی الیاف شیشه

www.SID.ir

Archive of SID

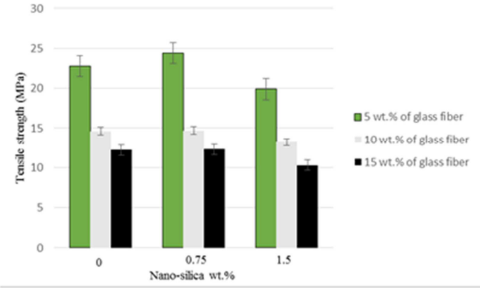
۴-۴- بررسی تأثیر همزمان نانوذرات سیلیکا و الیاف شیشه بر استحکام کششی، مدول الاستیک و ازدیاد طول تا شکست

از جمله خواص دیگری که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است اثر همزمان نانوذرات سیلیکا و الیاف شیشه بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی است. نتایج استحکام کششی برای نانومواد مرکب سه‌تایی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش درصد وزنی الیاف شیشه، استحکام کششی کاهش می‌یابد که علت این است که الیاف شیشه چسبندگی خیلی خوب با زمینه نداشته و موقع اعمال بار کششی، تمایل به خارج شدن از زمینه پلیمری دارند و این رفتار در مواد مرکب حاوی الیاف شیشه دور از انتظار نیست [۱۹].

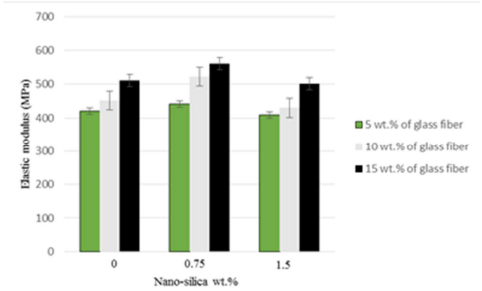
حضور نانوذرات سیلیکا تا ۰/۷۵ درصد وزنی باعث ثابت ماندن استحکام کششی ترکیبات رزین اپوکسی/ الیاف شیشه شده است، به نظر می رسد که به علت سطح ویژه بسیار بالا برهم کنش خوبی بین این ذرات و ماتریس ایجاد شده است که باعث افزایش استحکام کششی شده است. علاوه بر آن این ذرات می توانند منافذ بین الیاف و ماتریس را پرکرده و نقایص را کم کنند (شکل ۸). در ۱/۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا، افت استحکام کششی مشاهده می‌شود که علت آن می‌تواند کلوخه شدن نانوذرات در ترکیبات باشد. کلوخه شدن نانوذرات باعث کاهش اثر آن‌ها در خواص کشش شده و این مطلب در نتایج کار محققان دیگر نیز ذکر گردیده است [۱۵].

با توجه به شکل ۱۴، الیاف شیشه در همه درصدهای وزنی نانوذرات، مدول الاستیک را افزایش می‌دهند. حضور نانوذرات سیلیکا تا ۰/۷۵ درصد وزنی در ترکیبات باعث چسبندگی بیشتر الیاف شیشه به زمینه پلمیری و تشکیل پیوندهای قوی‌تر شده است که افزایش سفتی یا مدول الاستیک را در پی داشته است [۲۰]. لازم به ذکر است که در درصدهای بالاتر نانوذرات سیلیکا، به دلیل کلوخه‌های ایجاد شده در زمینه مدول الاستیک کاهش می‌یابد.

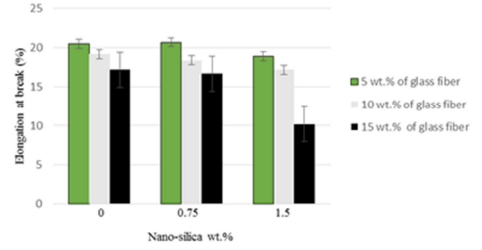
همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، افزایش ۱۵ درصد وزنی الیاف شیشه باعث کاهش ازدیاد طول نمونه‌ها شده است. مطابق با آنچه در قسمت‌های قبل بحث شد، این رفتار مورد انتظار بود. حضور ۰/۷۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا در ترکیب نمونه‌ها باعث تغییر محسوس ازدیاد طول تا شکست در نمونه‌ها نشده است، اما کلوخه شدن نانوسیلیکا در نمونه‌های با ۱/۵ درصد وزنی ، منجر به پایین آمدن درصد ازدیاد طول تا شکست نسبت به نمونه‌های با ۰/۷۵ درصد وزنی نانوسیلیکا شده است.



شکل ۱۳- اثر همزمان نانوذرات سیلیکا و الیاف شیشه بر استحکام کششی



شکل ۱۴ - اثر همزمان نانوذرات سیلیکا و الیاف شیشه بر مدول الاستیک



شکل ۱۵ - اثر همزمان نانوذرات سیلیکا و الیاف شیشه بر ازدیاد طول تا شکست

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر افزودن منفرد و همزمان الیاف شیشه نوع آ و نانوذرات سیلیکا بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. خواص مکانیکی ترکیبات با استفاده از آزمون استاندارد کشش تک محوره در دمای محیط مشخص شده اند. نتایج حاصل از این آزمون به صورت خلاصه در زیر بیان آمده است:

۱- افزودن نانوذرات سیلیکا تا ۰/۷۵ درصد وزنی باعث افزایش ۱۷ درصدی استحکام کششی اپوکسی خالص می‌شود، اما تغییر چندانی در استحکام کششی موادمرکب اپوکسی/ الیاف شیشه ایجاد نمی‌کند. این در حالی است که افزایش درصد وزنی نانوذرات تا ۱/۵ درصد وزنی باعث کاهش استحکام کششی در ترکیبات می‌شود.

۲- افزودن ۱۵ درصد وزنی الیاف شیشه، افزایش ۲۶ درصدی مدول الاستیک اپوکسی خالص را به دنبال داشته است. به طور کلی حضور الیاف شیشه در ترکیبات، مدول الاستیک را پیوسته افزایش می‌دهند. حضور ۰/۷۵ درصدی نانوذرات سیلیکا باعث افزایش مدول الاستیک

www.SID.ir

Archive of SID

ترکیبات می‌شود و با افزایش تا ۱/۵ درصد وزنی، مدول الاستیک ترکیبات را کاهش می‌دهند.

۳- ازدیاد طول تا شکست رزین اپوکسی خالص با افزودن ۰/۷۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا به میزان ۸/۵ درصد افزایش می‌یابد و درصد های بالاتر نانوذرات سیلیکا ازدیاد طول تا شکست را کاهش می‌دهند. اضافه کردن الیاف شیشه به رزین اپوکسی خالص و ترکیبات اپوکسی/ نانوذرات سیلیکا، به صورت پیوسته ازدیاد طول تا شکست را کاهش می‌دهد.

۶- مراجع

[1] Kumar K, Ghosh P K., Improving mechanical and thermal properties of TiO2-epoxy nanocomposite. Composites Part B: Engineering, pp. 353-360, 2016.

[2] Yue L, Pircheraghi, G., Epoxy composites with carbon nanotubes and graphene nanoplatelets – Dispersion and synergy effects. Carbon, Vol. 78, pp. 268-278, 2014.

[3] Ying Z, Xianggao L., Highly exfoliated epoxy/clay nanocomposites: Mechanism of exfoliation and thermal/mechanical properties. Composite Structures, Vol. 132, pp. 44-49, 2015.

[4] Jumahat A, Soutis C., Tensile Properties of Nanosilica/Epoxy nanocomposites. Procedia Engineering, Vol. 41, pp. 1634-1640, 2012.

[5] Zhang H, Zhang Z K, Friedrich Eger C., Property improvements of in situ epoxy nanocomposites with reduced interparticle distance at high nanosilica content. Acta Materialia, Vol. 54, pp. 1833-1842, 2006.

[6] Conradi M, Zorko M, Kocijan A, Verpoest I., Mechanical properties of epoxy composites reinforced with a low volume fraction of nanosilica fillers. Materials Chemistry and Physics, Vol. 137, pp. 910-915, 2013.

[7] Mirzapour A, Asadollahi M H, Baghshaei S, Akbari M., Effect of nanosilica on the microstructure, thermal properties and bending strength of nanosilica modified carbon fiber/phenolic nanocomposite. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 63, pp. 159-167,2014.

[8] Jacob S, Suma K K, Mendez J M, George K E., Reinforcing effect of nanosilica on polypropylene–nylon fiber composite. Materials Science and Engineering: B, Vol. 168, pp. 245-249, 2010.

[9] Halder S, Ahemad S., Epoxy/Glass Fiber Laminated Composites Integrated with Amino Functionalized ZrO2 for Advanced Structural Applications. ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 8, No.3, pp. 1695-1706, 2016.

[10] Fereshteh-Saniee F, Majzoobi GH, Bahrami M., An Experimental Study on the Behavior of Glass-Epoxy Composite at Low Strain Rates. J. Mater. Proc. Technol., pp. 162-163, 39-45, 2005.

[11] Motahari S, Naderi far A., Strengthening of Composites Used in Marine Structures. 5th National Conference of Iran Marine Industries, Kish Island, Iran Marine Engineering Society, https://www.civilica.com/Paper-NSMI05-NSMI05_005.html, 382, 2005. (In Persian فارسی)

[12] Rotem A, Lifshitz JM., Longitudinal Strength of Unidirectional Fibrous Composite under High Rate of Loading. Proceeding of 26th Annual Technology Conference, Society for Plastics Industry, Reinforced Plastics/Composites Division, Washington DC, Section 10-G, pp. 1-10, 1971.

[13] Uddin M F, Sun C T., Strength of unidirectional glass/epoxy composite with silica nanoparticle-enhanced matrix. Composites Science and Technology, Vol. 68, pp. 1637-1643,2008.

[14] Chen C, Justice R S, Schaefer D W, Baur J W., Highly dispersed nanosilica–epoxy resins with enhanced mechanical properties. Polymer, Vol. 49, pp. 3805-3815, 2008.

[15] Haque A, Shamsuzzoha M, Hussain F, Dean D., S2-Glass/Epoxy polymer nanocomposites: manufacturing, structures, thermal and mechanical properties. J. Compos. Mater. Vol. 37, pp. 1821-1837, 2003.

[16] Pol M H, Liaghat Gh H, Mehrabani Yeganeh E, Afrouzian A., Experimental investigation of nanoclay and nanosilica particles effects on mechanical properties of glass epoxy composites. Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 16, pp. 76-82, 2015. (In Persian فارسی)

[17] http://www.bitexcomposite.com/index.php/products/resin

[18] Thomason G L, Valug MA., Influence of fiber length and concentration on the properties of glass fiber-reinforced polypropylene: 4. Impact properties. Composites, part A, Vol. 28, pp. 277-288, 1997.

[19] Hoseini SAV, Pol MH., Investigation of the tensile and the flexural properties of the glass/epoxy composites reinforced with nanoclay particles. Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 7, pp. 103-108, 2014. (In Persian فارسی)

[20] Rahman N A, Hassan A, Yahya R, Lafia-Araga R A, Hornsby P R., Microstructural, thermal, and mechanical properties of injection-molded glass fiber/nanoclay/polypropylene composites. J. Reinf. Plast. Compos. Vol. 31, No. 4, pp. 269-281, 2012.

www.SID.ir