

NCNTA2014-1081

مکانیزم سفت شونده‌گی نانوکامپوزیت‌های پایه اپوکسی تقویت شده با ترکیبات مختلف از نانوذرات سیلیکا

محمود شریعتی^۱، غلامعلی فرزی^۲، علی دادرسی^۳، محمد امیری محمود حق

^۱استاد، دانشگاه فردوسی مشهد، mshariati44@gmail.com

^۲استادیار - دانشگاه حکیم سبزواری، Alifarzi@yahoo.com

^۳دانشجوی دکتری - دانشگاه صنعتی شاهرود، Ali.dadrasi@gmail.com

^۴کارشناس ارشد - دانشگاه حکیم سبزواری، Mohammad.amiri2012@yahoo.com

چکیده

در این مقاله، مکانیزم سفت شونده‌گی نانوکامپوزیت‌های پایه اپوکسی تقویت شده با نانوذرات سیلیس مورد توجه قرار گرفته است. از دو نوع نانوذره با قطرهای متوسط ۱۷ و ۶۵ نانومتر در سه سری نانوکامپوزیت استفاده شده است. سری اول نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانوذرات با قطر متوسط ۱۷ نانومتر، سری دوم نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانوذرات با قطر متوسط ۶۵ نانومتر و سری سوم نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با ترکیبی از نانوذرات با قطر متوسط ۱۷ و ۶۵ نانومتر است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات سیلیس باعث افزایش مدول یانگ در هر سه سری شده و هرچه محتوای ذرات افزایش می‌یابد، بر مقدار مدول یانگ نیز افزوده می‌گردد. همچنین مشاهده شد که اندازه ذرات تأثیر قابل توجهی بر مدول یانگ نداشته و حتی حالت استفاده ترکیبی از هر دو نوع نانوذره نیز هم‌افزایی خاصی را نشان نمی‌دهد. سطح شکست نمونه‌ها توسط یک میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شده و مشاهده شده است که در هر سه سری نانوکامپوزیت‌ها، انحراف مسیر ترک و چند شاخه شدن ترک و همچنین شکسته شدن پیوند نانوذرات، اصلی‌ترین مکانیزم مؤثر در افزایش سفتی کامپوزیت نسبت به اپوکسی خالص است. همچنین در مورد سایر مکانیزم‌های موجود در مورد نانوذرات صلبی چون سیلیس بحث شده و نتایج با پژوهش‌های سایر محققین مقایسه شده است.

واژه های کلیدی: مکانیزم سفت شونده‌گی، نانوکامپوزیت، نانوذرات سیلیس، ترک.

مقدمه

کارایی نانوذرات مربوط به نوع مکانیزم سفت شوندگی^۱ است که آنها مسبب بوجود آمدنش هستند. مکانیزم‌های سفتی مختلفی وجود دارد که توضیحی را برای افزایش سفتی اپوکسی‌های تقویت شده با ذراتی در اندازه‌ی میکرون و نانو ارائه می‌دهد. پژوهشگران بسیاری مشاهده کردند که افزودن نانوذرات به مواد شکننده باعث افزایش انرژی شکست می‌شود. جانسون و همکاران [۱] ادعا کردند که انرژی شکست پلیمر تقویت شده با نانو ذرات را می‌توان با عبارت زیر بیان کرد:

$$G_{IC} = G_{ICU} + \Psi \quad (1)$$

که G_{ICU} انرژی شکست اپوکسی خالص و Ψ توزیع سفتی کلی (حاصل از افزودن تقویت کننده‌ها به اپوکسی) را نشان می‌دهد. این توزیع سفتی می‌تواند به دو دسته‌ی فرآیندهای درون صفحه‌ای (نظیر بستن و خم شدن نوک ترک^۲ [۲ و ۳] و انحراف ترک^۳ [۴]) و خارج از صفحه (نظیر شکسته شدن پیوند^۴ [۵]) تقسیم شود که به اختصار در زیر به برخی از آنها اشاره شده است.

بستن و خم شدن نوک ترک

مکانیزم بسته شدن ترک، در نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با ذرات در حد میکرومتر [۸-۶] و همچنین در نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با برخی از ذرات در حد نانومتر [۹] مشاهده شده است. این مکانیزم به گونه‌ای عمل می‌کند که از طریق ذرات جلو رشد ترک را گرفته و باعث توزیع سفتی می‌گردد [۱۰]، بدین ترتیب که ترک بین ذرات دچار خم می‌شود (کمانه می‌کند) و مسیر بیشتری را باید طی کند و از آنجا که انرژی ترک متناسب با طول آنهاست، بنابراین برای رشد به انرژی بیشتری نیاز دارند. کاهش فضای بین ذرات و اندازه‌ی آنها باعث افزایش اثرات سفتی خواهد شد [۱۱].

مکانیزم بسته شدن ترک با دیدن خطوط منحنی در سطح شکست قابل توجه است. لانگ [۱۲] پدیده بسته شدن ترک را با خطوط منحنی جلو ترک، در مواد کاملاً شکننده مثل شیشه و اکسید منیزیم معرفی کرد. کینلوچ و همکاران [۱۳] نیز این پدیده را در ماتریس اپوکسی شامل ذرات کروی شیشه با قطر ۵۰ میکرومتر مشاهده کردند. اما پدیده‌ی بسته شدن ترک وقتی رخ می‌دهد که اندازه ذرات بزرگتر از باز شدن دهانه‌ی ترک^۵ باشد. برای این منظور می‌توان باز شدن دهانه‌ی ترک را اندازه‌گیری کرده و با اندازه‌ی ذره مقایسه نمود. تحت شرایط کرنش صفحه‌ای، باز شدن دهانه‌ی ترک، δ_{ic} ، را می‌توان از معادله‌ی ۲ محاسبه کرد [۱۴]:

$$\delta_{ic} = \frac{k_{IC}^2}{E \sigma_y} (1 - \nu^2) = \frac{G_{IC}}{\sigma_y} \quad (2)$$

گرین و همکارانش [۱۵] در تحلیلی نشان دادند که برای اینکه بسته شدن و خم شدن ترک اتفاق بیفتد، لازم است که اندازه‌ی ذرات خیلی بزرگتر از اندازه‌ی ناحیه‌ی پلاستیک نوک ترک باشد.

بر اساس مدل اروین [۱۶]، اندازه‌ی شعاع ناحیه‌ی پلاستیک نوک ترک را می‌توان با فرض رفتار شکست الاستیک خطی (LEFM) و تحت شرایط کرنش کنترل و این فرض که این ناحیه دایره‌ای باشد، با معادله‌ی ۳ بیان کرد:

¹ Toughening mechanism

² Crack-tip pinning and bowing

³ Crack path deflection

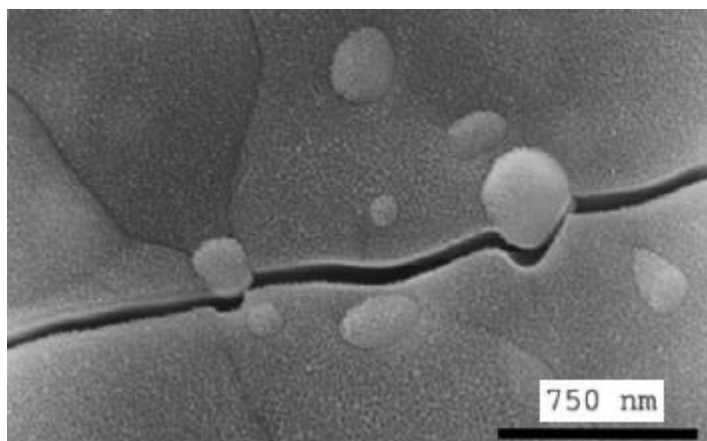
⁴ Debonding

⁵ Crack-opening displacement

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2$$

انحراف مسیر ترک

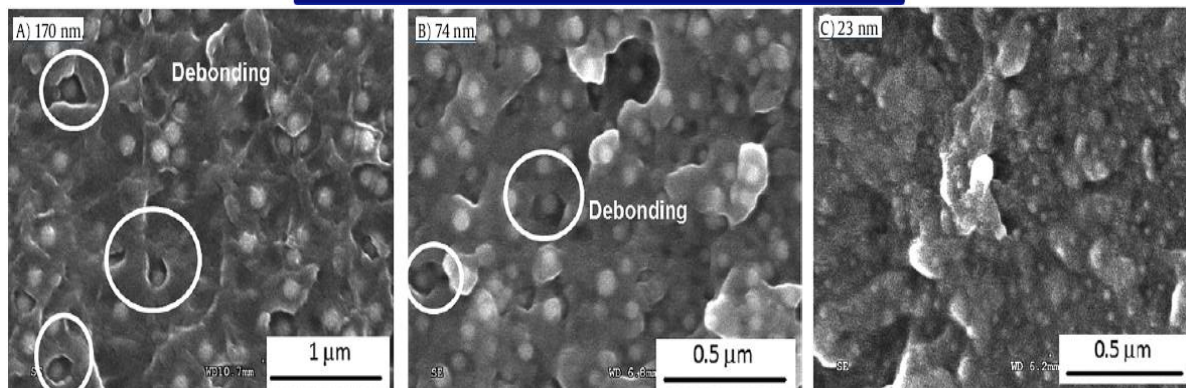
سفت شوندگی می تواند به خاطر انحراف مسیر ترک نیز باشد. هنگامی که ترک به یک نانوذره صلب مثل سیلیس برخورد می کند، کج شده و می پیچد و حول آن دور می زند [۱۷ و ۱۸]. این امر باعث افزایش سطح شکست شده و بنابراین انرژی بیشتری را جذب می کند، همچنین باعث می شود که ترک تحت مود ترکیبی I/II رشد کند. این پدیده را می توان در شکل ۱ بخوبی ملاحظه کرد.



شکل ۱- انحراف مسیر ترک [۱۹].

شکسته شدن پیوند و رشد فضای خالی پلاستیک

محققین در بررسی سطح شکست برخی از نانوکامپوزیت ها دریافتند که برخی از نانوذرات دچار شکستگی پیوند شده اند. این مکانیزم که جزء فرآیندهای خارج صفحه ای است، در شکستگی پیوند نانوذرات مختلف به شکل های گوناگونی اتفاق می افتد. دیتانت و پی پرسون [۲۰] تصاویری از سطح شکست کامپوزیت تقویت شده با ۱۰ درصد وزنی با نانوذراتی با اندازه ۲۳، ۷۴ و ۱۷۰ نانومتر منتشر کردند که در شکل (۲) نشان داده شده است. یک توزیع تصادفی در ماتریس اپوکسی برای اندازه ذرات ۷۴ و ۱۷۰ مشاهده می شود. برای ذرات ۲۳ نانومتری، شناسایی ذرات توسط SEM مشکل است. شکل ۲ (A و B) فضاهای خالی اطراف برخی نانوذرات را نشان می دهد که با دایره سفید مشخص شده است و بدین معناست که پیوند شکسته شده است. نتایج نشان می دهد که فقط بخش کوچکی از نانوذرات در طی شکست، پیوندشان از بین می رود. مشاهدات مشابه از شکستن پیوند نانوذرات سیلیکا در تحقیقات گزارش شده است [۲۱]. مشهود است که شکست پیوند به اندازه ی ذرات وابسته است. هرچه اندازه ی ذرات کاهش می یابد، تعداد ذراتی که دچار شکستگی پیوند می شوند می تواند بر اثر برقراری پیوند قویتر بین ماتریس و نانوذرات ریزتر باشد.



شکل ۲- تصاویر SEM از سطح شکست DGEBA با ۱۰ درصد حجمی نانوذره سیلیکا. (A) ۱۷۰nm، (B) ۷۴ nm، (C) ۲۳nm. (ذراتی که دچار شکستگی پیوند شده‌اند با دایره مشخص شده‌اند) [۲۰].

جزئیات آزمایش

مواد

رزین اپوکسی آزمایش شده، بر پایه‌ی بیسفنول A و با نام تجاری ML-504 بوده که از شرکت مواد مهندسی مکرر تهیه شده است. همچنین نانوذرات کروی سیلیکا (SiO₂) با اندازه ذرات متوسط ۱۷ و ۶۵ نانومتر از شرکت US-nano تهیه شده که دارای خلوص بالای ۹۹/۵ درصد است و به شکل پودر سفید رنگ می‌باشد. لازم به ذکر است که بازه اندازه ذرات با اندازه متوسط ۱۷، ۲۰-۱۵ nm و بازه ذرات با اندازه متوسط ۶۵ nm، ۷۰-۶۰ nm می‌باشد. هاردنر پلی آمینی HA-12 است. چگالی رزین بکار رفته ۱۱۱۰ kg/m³ و چگالی نانوذرات سیلیکا ۲۴۰۰ kg/m³ است.

آماده سازی نانوکامپوزیت

در این تحقیق، پلیمر ترموست بر پایه‌ی بیسفنول A، با افزودن صفر تا ۶ درصد وزنی نانوذرات کروی SiO₂ تقویت شده است. رزین اپوکسی از نوع ML-504 بوده که از شرکت مواد مهندسی مکرر تهیه شده است. علت انتخاب این رزین، پایین بودن نسبی ویسکوزیته‌ی آن نسبت به سایر موارد موجود است که این امر به محققین این امکان را داد تا به راحتی بتوانند از آن در سیستم‌های قالبگیری حساس و ظریف استفاده نموده بدون آنکه در مدل بدست آمده اشکال و ضعفی به جای بماند. همچنین با توجه به غلظت پایین محصول، امکان استفاده‌ی آن به همراه انواع پرکننده‌های معدنی فراهم است.

رزین و نانوذرات سیلیکا با درصد وزنی مورد نظر، توسط یک همزن مکانیکی به مدت حدوداً یک ساعت با یکدیگر ترکیب شده است. در ضمن ترکیب مواد، جهت توزیع بهتر ذرات در زمینه پلیمری، از سویالسیترین^۱ به عنوان عامل توزیع به میزان یک درصد وزنی نانوذرات استفاده شده است. سپس ترکیب به مدت دو ساعت درون پمپ خلاء دسیکاتور قرار گرفته تا گازهای احتمالی که در مرحله هم‌زدن مواد وارد ترکیب شده، خارج گردد. در ادامه، هاردنر پلی آمینی HA-12 را به ترکیب اضافه کرده و اجازه داده شد تا ترکیب بصورت مکانیکی تحت خلأ به مدت پنج دقیقه هم زده شود. سرانجام، ترکیب را در قالب‌های

فلزی که از پیش ساخته شده و واکس قالب نیز به عنوان عامل رهاساز به آن زده شده بود، قالب‌گیری کردیم. مدت زمان پخت

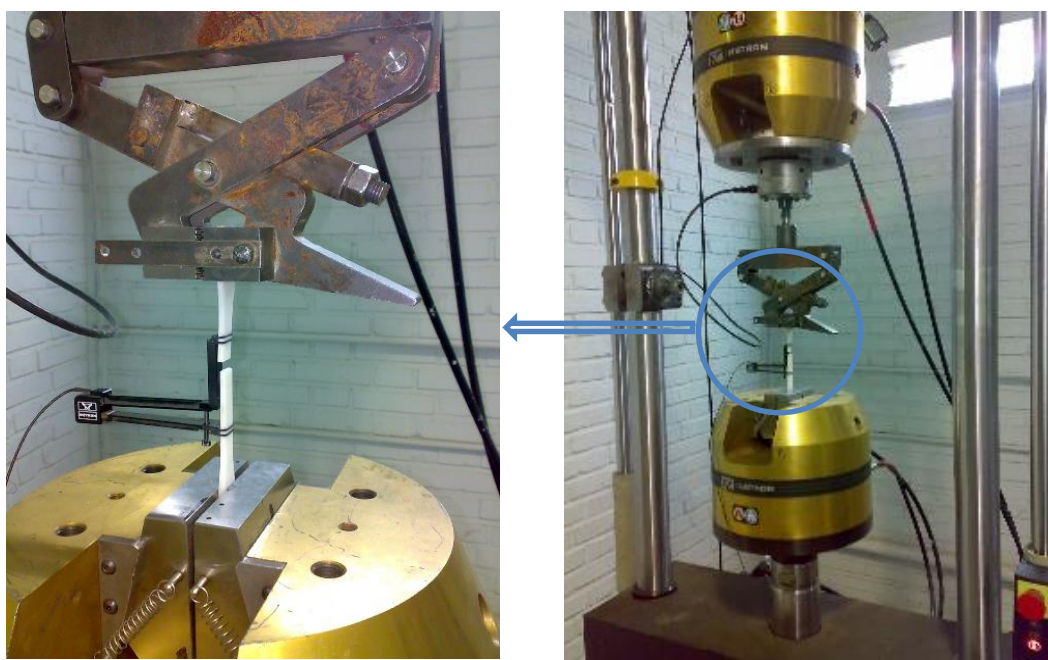
¹ Soya Lecithin

اولیه نمونه‌ها در دمای محیط ۲۴ ساعت است که بعد از آن می‌توان آنها را از قالب خارج کرده و جهت پخت نهایی محصول، می‌بایست به آنها هفت روز فرصت داد.

کدگذاری نمونه‌ها به این ترتیب است که کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات با اندازه متوسط ۱۷ nm، با حرف S و کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات با اندازه متوسط ۶۵ nm، با حرف L نشان داده شده‌اند؛ همچنین، عدد نشان داده شده در پشت این حروف، مبین درصد وزنی نانوذرات سیلیس بکار رفته در ترکیب است. کد NE نیز معرف اپوکسی خالص است.

آزمایش کشش

مدول یانگ کامپوزیت‌ها با استفاده از آزمایش کشش که در آن نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D638 تهیه شده‌اند، اندازه‌گیری می‌شود. تمام نمونه‌های مربوط به این آزمایش به شکل استخوان سگ با ابعاد ۱۸۵ میلی‌متر طول، ۱۹ میلی‌متر عرض در قسمت ثابت و ضخامت ۳ میلی‌متر، قالب‌گیری شده‌اند. این آزمایش با استفاده از یک دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ و با نرخ جابجایی ۵ mm/min تحت فشار شبه استاتیکی در دمای اتاق انجام شده است. کرنش طولی با استفاده از یک کرنش سنج با طول گیج ۵۰ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. تکرارپذیری برای هر نمونه چهار عدد است.



شکل ۳- آزمایش کشش توسط دستگاه اینسترون ۸۸۰۲

بحث و نتیجه گیری

در جدول ۱ مقادیر مدول یانگ، بدست آمده از آزمایش کشش، برای هر سه سری از نانوکامپوزیت‌ها نشان داده شده است. سری اول، اپوکسی‌های تقویت شده با نانوذرات سیلیس به قطر متوسط ۱۷ نانومتر هستند که با حرف اختصاری S نشان داده شده‌اند و عدد پشت سر آنها مبین درصد وزنی به کار رفته است. سری دوم، اپوکسی‌های تقویت شده با نانوذرات سیلیس به قطر متوسط ۶۵ نانومتر هستند که با حرف اختصاری L نشان داده شده‌اند و نهایتاً سری سوم نانوذراتی هستند که بصورت ترکیبی از سری اول و سری دوم به اپوکسی اضافه شده‌اند، و اثر هم‌افزایی احتمالی این دو نوع نانوذرات بر یکدیگر و بر مدول یانگ بررسی شده است.

مدول یانگ بدست آمده برای اپوکسی خالص ۱۴۷۰ Mpa است. نتایج موجود در جدول ۱ نشان می‌دهد که با افزایش محتوای نانوذرات، مدول یانگ نیز افزایش یافته که این امر به خاطر بالاتر بودن مدول یانگ ذرات سیلیکا نسبت به اپوکسی خالص، قابل پیش‌بینی بود. افزایش مدول یانگ اپوکسی با افزودن نانوذرات سیلیکا را می‌توان به تعامل بین این دو فاز نیز نسبت داد. انتظار می‌رود اندازه‌ی نانوذرات نیز نقش اساسی در نوع مکانیزم سفتی عمل کننده در نانوکامپوزیت‌های پایه اپوکسی ایفا کنند. برای مثال، مطالعه‌ی انجام شده توسط ژیانگ [۲۲]. نشان می‌دهد که نانوذرات کوچکتر خواص کامپوزیت‌ها را بخاطر افزایش سطح مشترک بین سطح ذرات سیلیکا و ماتریکس پلیمری، بهبود می‌بخشند.

هرچند که تحقیقی از لیانگ [۲۳] درباره‌ی تأثیر اندازه ذرات در بازه‌ی ۲۰ تا ۸۰ نانومتر بروی مکانیزم سفتی نشان می‌دهد که این امر، نه بروی چقرمگی شکست و نه بروی مدول یانگ، تأثیری ندارد. دیتانت [۲۰] نیز در گزارش خود آورده است که اندازه ذرات مختلف سیلیکا تأثیری بر مدول یانگ ندارد. این تفاوت نشان می‌دهد که تأثیر اندازه ذرات پرکننده، به ویژه در مقیاس نانو، هنوز خوب فهمیده نشده است. بنابراین، تحقیقات بیشتری نیاز است تا نقش اندازه ذرات روی مکانیزم سفتی در نانو کامپوزیت‌های پلیمری مشخص شود. این بررسی ادبیات نشان می‌دهد که توافق و تفاهم اندکی در مورد تأثیر اندازه ذرات روی مکانیزم‌های سفتی سیستم‌های اپوکسی پر شده با نانو سیلیکا وجود دارد. اما تاکنون تحقیقی در مورد تأثیر استفاده ترکیبی از نانوذرات سیلیس با قطرهای متفاوت گزارش نشده است. نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که اندازه نانوذرات تأثیری در مدول یانگ ندارد که این موضوع با گزارشات اکثر محققین [۲۰، ۲۳، ۲۴ و ۲۵] همخوانی دارد.

نتایج نشان می‌دهد که ترکیب نانوذرات با قطر ۱۷ نانومتر و نانوذرات با قطر ۶۵ نانومتر، تأثیر هم‌افزایی قابل توجهی بر مدول یانگ ندارد.

اما آن چیزی که بیشتر اهمیت دارد، مکانیزمی است که از طریق آن، نانوذرات سیلیکا باعث افزایش مدول یانگ نانوکامپوزیت شده است. این موضوع را می‌توان به کمک تصاویری که از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده است، بررسی کرد.

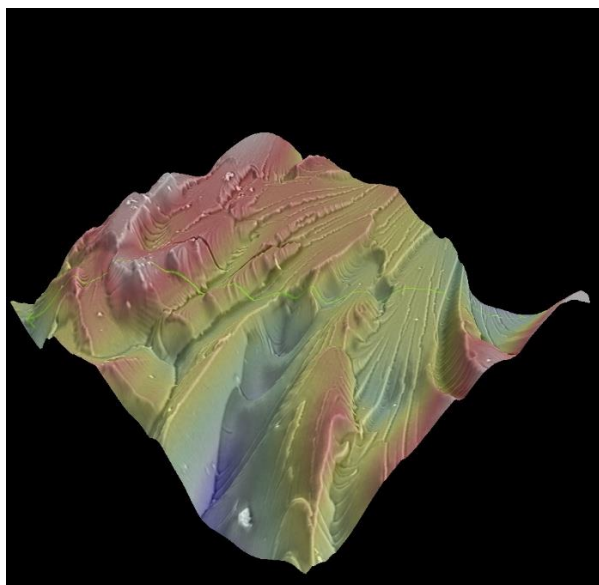
جدول ۱ - مدول یانگ نمونه‌های کامپوزیتی با ترکیب مختلفی از تقویت کننده‌ها

کد نمونه	۱/۵٪ S	۳٪ S	۴/۵٪ S	۶٪ S
مدول یانگ (Mpa)	۱۶۳۳	۱۷۰۲	۱۷۸۴	۱۸۳۵
کد نمونه	۱/۵٪ L	۳٪ L	۴/۵٪ L	۶٪ L
مدول یانگ (Mpa)	۱۵۸۶	۱۶۷۳	۱۷۶۰	۱۸۵۰
کد نمونه	۱/۵٪ L-۱/۵٪ S	۱/۵٪ L-۳٪ S	۱/۵٪ L-۴/۵٪ S	۳٪ L-۳٪ S
مدول یانگ (Mpa)	۱۷۱۴	۱۷۹۲	۱۸۷۵	۱۸۳۵

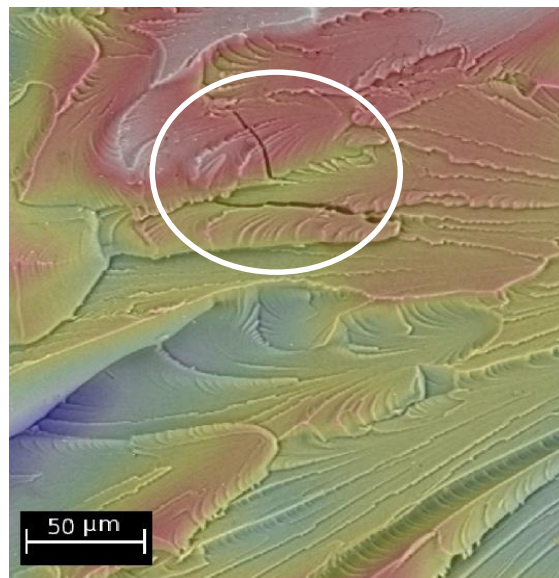
بررسی ریزساختار

سطح شکست نمونه توسط یک میکروسکوپ الکترونی روبشی به نام Phenom pro X ساخت کشور هلند، مورد بررسی گرفته است. مدل دستگاه Prp X 811 و ساخت سال ۲۰۱۳ است. تمام نمونه‌ها پیش از تحلیل توسط یک لایه نازک طلا به ضخامت حدوداً ۵ نانومتر، روکش داده شده‌اند تا امکان تصویربرداری بهتر فراهم شود. ولتاژ به کار رفته ۱۵ kV است. شکل ۴ که از سطح شکست نانوکامپوزیت تقویت شده با ۶ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا به قطر ۶۵ نانومتر گرفته شده، نشان می‌دهد که نانوذرات باعث انحراف مسیر ترک شده و سطح پیشروی ترک را تغییر می‌دهند؛ بدین ترتیب که پیشانی ترک پس از برخورد به نانوذرات مجبور می‌شود آن را به سمت بالا و یا پایین نانوذره دور بزند، لذا سطح شکست لایه لایه شده و باعث بالا رفتن زبری سطح می‌شود. همچنین در این شکل ملاحظه می‌شود که ترک در مسیر رشد خود، چند شاخه شده است ولی به علت اینکه انرژی ترک به حدی نبوده که سطح جدیدی ایجاد کند، پس از مقداری رشد، گسترش آن متوقف شده است. این ترک در شکل ۴- الف، با دایره سفید رنگ مشخص شده است.

همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود ترک در این تصویر دارای مسیر منحنی است و این خود گواهی بر این موضوع است که پیشانی ترک در اثر برخورد با نانوذرات دچار انحراف شده و مسیر مستقیم آن تغییر کرده و لذا برای رشد نیاز به انرژی بیشتری داشته است.



(ب) - توپوگرافی سطح



(الف) - نمای دوبعدی سطح شکست

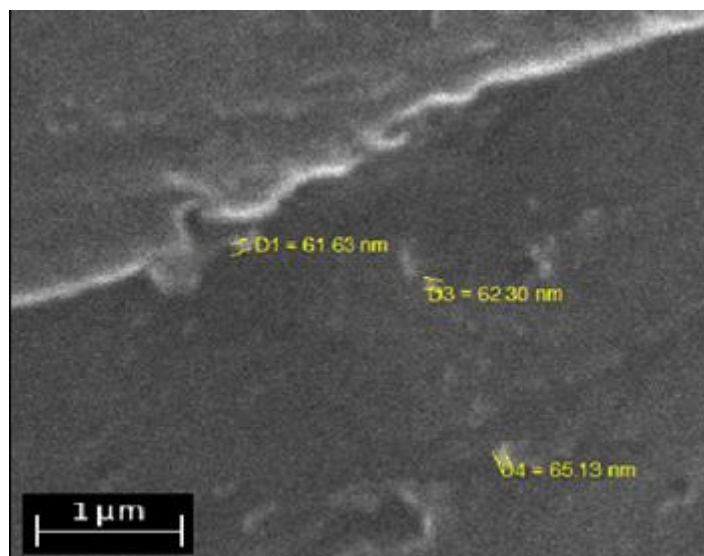
شکل ۴ - تصویر SEM از سطح شکست نانوکامپوزیت تقویت شده با ۶ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا به قطر ۶۵ نانومتر

همچنین در شکل ۵-ب می‌توان توپوگرافی این سطح را که با نشان دادن قله‌ها و دره‌ها به نوعی زبری سطح را نمایش می‌دهد، مشاهده کرد. در مسیر سبزرنگ نشان داده شده در این شکل، اختلاف زبری بین بالاترین نقطه و پایین‌ترین نقطه ۰/۱۲۸ میکرومتر است.

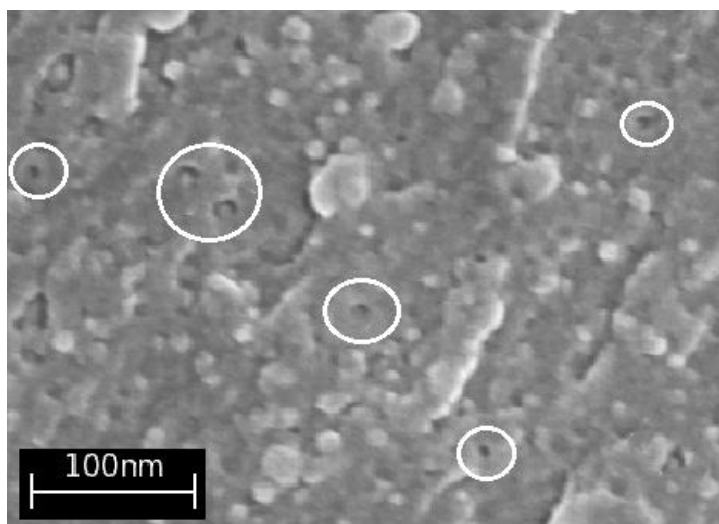
تأثیر نانوذرات را می‌توان در بزرگنمایی‌های بیشتر نیز که لایه‌های سطح کوچکتر هستند، بخوبی مشاهده کرد. شکل ۵، که از سطح شکست نانوکامپوزیت تقویت شده با ۱/۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا به قطر ۶۵ نانومتر گرفته شده است بخوبی نشان می‌دهد که چگونه نانوذرات باعث می‌شود که پیشانی ترک از یک لایه به لایه دیگر منتقل شود.

شکل ۶ نشان می‌دهد که یکی دیگر از مکانیزم‌های مؤثر در سفت شونده‌گی، شکست شدن پیوند نانوذرات است که در این شکل دوایر سفید رنگ حفره‌هایی را نشان می‌دهد که نانوذره بر اثر شکسته شدن پیوند، از آن بیرون زده و احتمالاً در سطح دیگر شکست باقیمانده است.

علت افزایش سفتی به این خاطر است که با قرار گرفتن نانوذرات درون ماتریس، اطراف آنها تمرکز تنش بوجود می‌آید که برای شکسته شدن پیوند نانوذرات از ماتریس، به یک تنش خارجی نیاز است تا بر انرژی پیوند و تمرکز تنش غلبه کند لذا این موضوع باعث افزایش سفتی نهایی نانوکامپوزیت‌ها می‌گردد [۲۶].



شکل ۵ - تصویر SEM از سطح شکست نانوکامپوزیت تقویت شده با ۱/۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا به قطر ۶۵ نانومتر که نشان می‌دهد نانوذرات باعث انحراف مسیر ترک ولایه لایه شده سطح شده‌اند.



شکل ۶ - تصویر SEM از سطح شکست نانوکامپوزیت تقویت شده با ۴/۵ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا به قطر ۶۵ نانومتر که نشان می‌دهد شکسته شدن پیوند نانوذرات نیز یکی از مکانیزم‌های مؤثر سفت شونده‌گی است.

نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر تقویت اپوکسی با نانوذرات سیلیس با دو قطر متفاوت و ترکیب‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات سیلیس باعث افزایش مدول یانگ شده و هرچه محتوای ذرات افزایش می‌یابد، بر مقدار مدول یانگ نیز افزوده می‌گردد. همچنین مشاهده شد که اندازه ذرات تأثیر قابل توجهی بر مدول یانگ نداشته و حتی حالت استفاده ترکیبی از هر دو نوع نانوذره نیز هم‌افزایی خاصی را نشان نمی‌دهد. بررسی سطح شکست نمونه‌ها نیز نشان می‌دهد که در هر سه سری نانوکامپوزیت‌ها، انحراف مسیر ترک و چند شاخه شدن ترک و همچنین شکسته شدن پیوند نانوذرات، اصلی‌ترین مکانیزم مؤثر در افزایش سفتی کامپوزیت‌ها نسبت به اپوکسی خالص است.

مراجع

- [1] Johnson B.B., Kinloch A.J., Mohammed R.D., Sprenger, S., 2007, "Toughening mechanisms of nanoparticle-modified epoxy polymers", *Polymer*, 48(10):530-41.
- [2] Lange F.F, Radford K.C., 1971, "Fracture Energy and Strength Behavior of a Sodium Borosilicate Glass- Al_2O_3 Composite System", *Journal of Materials Science* :6(9): 1197-203.
- [3] Lange FF., 1970, "The Interaction of a Crack Front with a Second-Phase Dispersion", *Philosophical Magazine*:22(179):983-92.
- [4] Faber K.T., Evans A.G., 1983, "Crack Deflection Processes", *Acta Materialia*:31:565-76.
- [5] Rose L.R.F., 1987, "Effective Spring Constant for Planar Arrays of Circular Cracks", *Materials Letters*:8:11.
- [6] Spanoudakis J., Young R.J., 1984, "Propagation in a glass particle-filled epoxy resin. Part 2: Effect of particle-matrix adhesion", *J Mater Sci*:19(2):473-86.
- [7] Kinloch A.J., Maxwell D.L., Young R.J., 1985, "The fracture of hybrid particulate composites", *J Mater Sci*:20(11):4169-84.
- [8] Lange F.F., Radford K.C., 1971, "Fracture energy of an epoxy composite system", *J Mater Sci*:6(9):1197-203.
- [9] Zhang H, Zhang Z, Friedrich K, Eger C. "Property improvements of in situ epoxy nanocomposites with reduced interparticle distance at high nanosilica content", *Acta Materialia* 2006:54(7):1833-42.
- [10] Caddell R.M., 1980, "Deformation and fracture of solids". Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- [11] Pascoe K.J., 1978, "An introduction to the properties of engineering materials". 3rd ed. London: Van Nostrand Reinhold.
- [12] Lange F.F, Radford K.C., 1971, "Fracture Energy and Strength Behavior of a Sodium Borosilicate Glass- Al_2O_3 Composite System", *Journal of Materials Science* :5(3): 126-133.
- [13] Kinloch A.J., Maxwell D.L., Young R.J., 1985, "The fracture of hybrid particulate composites", *J Mater Sci*: 20(11):4169-84.

- [14] Kinloch A.J, Young R.J., 1983, "Fracture behaviour of polymers". London: Applied Science Publishers,
- [15] Green D.J, Nicholson P.S, Embury J.D., 1979, "Fracture of a brittle particulate composite. Part 2 – theoretical aspects", J Mater Sci: 14(7):1657-61.
- [16] Irwin G.R., 1958, 'Fracture in Handbook of physics", Vol. 6, Springer-Verlage, Heidelberg, 551-590.
- [17] Kinloch A.J, Taylor A.C., 2002, "The Toughening of Cyanate-ester Polymers - Part I – Physical Modification using Particles, Fibres and Woven-mats", J Mater Sci:37(3):433-60.
- [18] Arakawa K., Takahashi K., 1991, "Relationships between fracture parameters and fracture surface roughness of brittle polymers". Int J Frac: 48:103-14.
- [19] Vasconcelos H.C., Barreto M.C., 2011, "Tailoring the Microstructure of Sol–Gel Derived Hydroxyapatite/Zirconia Nanocrystalline Composites", Nanoscale research letters, 6(20).
- [20] Dittanet P., Pearson R.A., 2012, "Effect of silica nanoparticle size on toughening mechanisms of filled epoxy", Polymer. 53: 1890-1905.
- [21] Johnsen B.B., Kinloch A.J., Mohammed R.D., Taylor A.C., Sprenger S., 2007, "Toughening mechanisms of nanoparticle-modified epoxy polymers", Polymer:48:530-541.
- [22] Zhang H, Zhang Z, Friedrich K, Eger C, 2006, "Property improvements of in situ epoxy nanocomposites with reduced interparticle", Acta Materialia;54(7):1833-42.
- [23] Liang YL, Pearson RA., 2009, "Toughening mechanisms in epoxy-silica nanocomposites (ESNs)", Polymer; 50:4895-905.
- [24] Vinayak A., Dhumale P., Shah V., Rishi B., Sharma B., and Katsuaki T., 2012, "Effects of particle size and surrounding media on optical radiation efficiencies of spherical plasmonic metal nanoparticles", Bull. Mater. Sci.:35(2):143–149.
- [25] Choi J.T., Kim D.H., Ryu K.S., Lee H., Jeong H.M., Shin C.M, Kim J.H., and Kim B.K., 2011, "Functionalized Graphene Sheet/Polyurethane Nanocomposites: Effect of Particle Size on Physical Properties", Macromolecular Research.:19(8):809-814.
- [26] Liang YL, Pearson RA., 2010, "The toughening mechanism in hybrid epoxy-silica-rubber nanocomposites (HESRN)", Polymer; 51:4880-4890.