



بررسی خواص کششی و خمشی مواد مرکب شیشه / اپوکسی تقویت شده با نانوذرات رسی

سید عبدالوهاب حسینی^۱، محمد حسین پل^{۲*}

۱- مربی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد شوشتر، شوشتر
 ۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش
 * tafreshu.ac.ir@m_h_pol، ۱۴۱۱۵-۱۴۳، صندوق پستی

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله، تأثیر نانوذرات رسی بر رفتار کششی و خمشی مواد مرکب چند لایه شیشه/ اپوکسی با بافت دوبعدی به طور تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نانو مواد مرکب دارای ۱۲ لایه الیاف شیشه با بافت دوبعدی با دانسیته ۲۰۰gr/m² و با کسر حجمی الیاف ۶۰ درصد بوده و با روش انتقال رزین به کمک خلا ساخته شده است. سیستم رزین نیز از یک دیکیلسیدیل اتر بیسفنول نوع A (DGEBA) با نام تجاری ایپون ۸۲۸ به عنوان پایه اپوکسی و یک پلی اکسیپروپیلن دیامین با وزن مولکولی ۴۰۰gr/mol با نام تجاری جفامین دی ۴۰۰ به عنوان سخت کننده ساخته شده است. نانورس کلوئیدیسی بی درون سیستم اپوکسی با درصد وزنی نسبت به مجموعه رزین (اپوکسی- نانورس) ۰، ۱، ۲، ۳، ۵ و ۷ درصد پخش می‌شود. بررسی نتایج نشان می‌دهد بیشترین افزایش خواص مکانیک و خمشی در ۳٪ و ۷٪ نانورس به دست می‌آید. بیشترین افزایش مقاومت نهایی، کرنش شکست و چقرمگی در ۷٪ وزنی نانورس به ترتیب به مقدار ۱۳٪، ۷٪ و ۲۷٪ و بیشترین افزایش مدول در ۳٪ وزنی نانورس به مقدار ۹٪ به دست می‌آید. همچنین بیشترین افزایش مقاومت خمشی به مقدار ۱۱٪ در ۳٪ وزنی نانورس و بیشترین مدول خمشی به مقدار ۴۸٪ در ۵٪ وزنی نانورس به دست می‌آید.

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: ۱۲ شهریور ۱۳۹۲
 پذیرش: ۰۶ مهر ۱۳۹۲
 ارائه در سایت: ۲۳ مرداد ۱۳۹۳
 کلید واژگان:
 نانومواد مرکب پلیمری
 خواص کششی
 خواص خمشی
 خواص مکانیکی
 نانورس
 الیاف شیشه

Investigation of the tensile and the flexural properties of the glass/epoxy composites reinforced with nanoclay particles

Seyed Abdolvahab Hoseini¹, Mohammad Hossein Pol^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University- Shoshtar Branch, Shoshtar, Iran.
 2- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.
 * P.O.B. 14115-143, Tafresh, Iran, m_h_pol@tafreshu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 03 September 2013
 Accepted 28 September 2013
 Available Online 14 August 2014

Keywords:
 Polymer-matrix nano composites
 Tensile properties
 Bending Properties
 Mechanical properties
 Nanoclay
 Glass fiber

ABSTRACT

In this paper, the influence of nanoclay Cloisite 30B on the tensile and the flexural properties of 2D woven Glass/Epoxy laminated composite have been investigated experimentally. The glass/epoxy/nanoclay laminate have 12 layers and 60% fiber volume fraction is manufactured by VRTM method. Fibers have a plain-weave configuration with density of 200gr/m², while the nano-epoxy resin system is made of diglycidyl ether of bisphenol A (epon 828) resin with jeffamine D400 as the curing agent and an organically modified MMT in a platelet form, namely Cloisite 30B. The nanoclay is dispersed into the epoxy system in a 0%, 1%, 2%, 3%, 5% and 7% ratio in weight with respect to the nano-matrix. The results have shown that Maximum to increase in the tensile and the flexural properties are in 3% and 7% nanoclay content. The maximum to increase in the tensile strength, the failure strain and the toughness are 13%, 7% and 27% respectively in 7% nanoclay content and in the modulus is 9% in 3% nanoclay content. Moreover, the maximum to increase in the flexural strength is 11% in 3% nanoclay content and in flexural modulus is 48% in 5% nanoclay content.

۱- مقدمه

تقویت شده با الیاف در راستای بهبود خواص مکانیکی، حرارتی، نوری و الکتریکی است. نانوذرات رسی به دلیل قیمت پایین و سهولت در به کارگیری در مواد مرکب پلیمری دارای پتانسیل خوبی جهت استفاده است [۲،۱]. از طرفی محققین نشان داده‌اند که امکان اصلاح سطح نانورس‌ها برای سازگاری آن‌ها با رزین‌های پلیمری وجود دارد [۴،۳]. گیلبرت و همکارانش [۶،۵] و تیمرمن و همکارانش [۷] نشان دادند که چقرمگی شکست با افزودن نانوذرات فلزی و رسی بهبود می‌یابد. یاسمین و همکارانش [۸] افزایش حدود ۸۰ درصدی در مدول الاستیک را هنگام افزودن ۱ تا ۱۰ درصد وزنی

مواد مرکب به دلیل داشتن مقاومت ویژه (مقاومت به وزن) و سفتی ویژه (سفتی به وزن) بالا نسبت به مواد سنتی مثل فلزات، در صنایعی همچون صنایع نظامی، هوافضا و کاربردهای بالستیکی که در آن‌ها وزن دارای اهمیت ویژه‌ای است، به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرند. گسترش علم نانو تکنولوژی و استفاده از آن در مواد مرکب پلیمری، پیشرفت‌های امیدبخشی در راستای تولید مواد جدید برای کاربردهای سازه‌ای ایجاد شد. بیشتر تحقیقات انجام شده در نانومواد مرکب پلیمری و نانو مواد مرکب هیبریدی

Please cite this article using:

S.A.V. Hoseini, M.H. Pol, 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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

نانورس، بالا بودن نسبت مشارکت خواص مکانیکی نانوکلی به دلیل پایین بودن خواص مکانیکی ماتریس لاستیکی در مقایسه با نوع شیشه‌ای و در نهایت قابلیت صف آرای ناورس هنگام اعمال تنش (به سبب ساختار آزادتر اپوکسی لاستیکی) عنوان کردند. میاگو و همکارانش [۱۹] تأثیر ناورس را بر خواص مواد مرکب اپوکسی/الیاف کربن بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند مقاومت خمشی و مدول خمشی تغییر معنی‌داری نمی‌کند ولی مقاومت برشی درون صفحه‌ای افزایش می‌یابد. هوگو و همکارانش [۱۲] اثر نانوسیلیکات را بر مواد مرکب اپوکسی/الیاف شیشه بررسی و مشاهده کردند با افزودن یک درصد ناورس مقاومت برشی درون صفحه‌ای، مقاومت خمشی و چقرمگی شکست به ترتیب ۴۴، ۲۴ و ۲۳ درصد افزایش می‌یابد. سایرمانیان و همکارانش [۲۰] مشاهده کردند با افزودن ۵ درصد ناورس، مدول الاستیک فشاری رزین ۲۰ درصد و مقاومت فشاری نانو ماده مرکب تقویت شده با الیاف شیشه، ساخته شده به روش لایه‌چینی دستی، ۲۰ تا ۲۵ درصد افزایش می‌یابد. پل و همکارانش [۲۱] تأثیر نانوذرات رسی کلوسیدیسی بی بر ماده مرکب الیاف شیشه/اپوکسی ساخته شده با روش لایه چینی دستی و پخت تحت فشار را بر خواص بالستیکی در درصد‌های وزنی ۰، ۳، ۷ و ۱۰ ناورس کلوسیدیسی بی بررسی کردند. براساس نتایج این بررسی، بیشترین افزایش خواص بالستیکی در سرعت برخورد نزدیک حد بالستیک در ۳ درصد وزنی ناورس به مقدار ۱۰ درصد و در سرعت‌های به نسبت بالاتر، در ۱۰ درصد وزنی ناورس به مقدار ۲۰ درصد به دست می‌آید. خواص یک نانو ماده مرکب هیبریدی به نوع مولفه‌های آن یعنی الیاف، رزین و نانو ذرات و خواص میان آن‌ها، نسبت وزنی ذرات، درصد حجمی الیاف و کیفیت و روش پخش نانوذرات بستگی دارد [۲۲].

در این تحقیق، تأثیر افزودن ۰ تا ۷ درصد نانوذرات رسی بر خواص کششی و خمشی ماده مرکب شیشه/اپوکسی با بافت دوبعدی ساخته شده به وسیله تزریق تحت خلا با استفاده از آزمایش کشش و خمش سه نقطه‌ای بررسی می‌شود.

۲- آزمایش

۲-۱- مواد

نانوساختار استفاده شده در این تحقیق شیشه/اپوکسی تقویت شده با ناورس است. رزین پلیمری انتخاب شده از دو بخش تشکیل شده است. قسمت نخست یک دی‌کلیسی‌دی‌ل‌اتر بی‌سفنول نوع آ (DGEBA) با نام تجاری ایپون ۸۲۸ تولید شده توسط شرکت شل به‌عنوان پایه اپوکسی و قسمت دوم یک پلی‌اکسی‌پروپیلن دی‌امین با وزن مولکولی ۴۰۰ gr/mol با نام تجاری جف‌امین دی ۴۰۰ به‌عنوان سخت‌کننده ساخته شده توسط شرکت هانسن است که با نسبت وزنی ۱۰۰:۵۵ نسبت به پایه اپوکسی (قسمت نخست) با آن مخلوط می‌شود. در این تحقیق از یک ناورس معدنی (MMT) اصلاح شده به شکل صفحه‌ای با نام تجاری (مونتوریللیت اصلاح شده با نمک آمونیوم) تولید شده توسط شرکت راکوود امریکا استفاده می‌شود. الیاف شیشه استفاده شده نیز از جنس شیشه با بافت دوبعدی و وزن واحد سطح 200 gr/m^2 است.

۲-۲- ساخت نمونه‌های نانومواد مرکب اپوکسی/نانورس

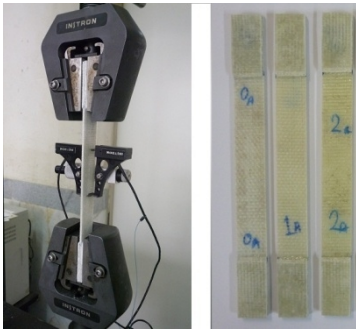
برای ساخت نمونه‌ها، نخست نانوذرات رس با درصد‌های وزنی ۰، ۱، ۲، ۳، ۵ و ۷ نسبت به وزن کل رزین با سخت‌کننده به طور مکانیکی مخلوط شده و سپس مخلوط حاصل با استفاده از دستگاه آلتراسونیک به مدت ۲۰ دقیقه در

کلوسیدیسی بی^۱ در اپوکسی گزارش می‌دهند. در همین حال هو و همکارانش [۹] افزایش سختی و چقرمگی را هنگام استفاده از نانوذرات گزارش می‌دهند. لین و همکارانش [۱۰] نیز یک افزایش ۳۰ درصدی در مقاومت برخورد را هنگام استفاده از کلوسیدیسی بی در ۵۰ درصد وزنی در رزین اپوکسی گزارش می‌دهند. رایس و همکارانش [۱۱] از سیلیکات آلی برای تقویت اپوکسی/الیاف کربن استفاده و با اضافه کردن ۲٪ وزنی نانوفیلر، بهبود ۱۲٪ در سختی، نسبت به اپوکسی خالص مشاهده کردند. هوگو و دیگران [۱۲] برای ساخت ماده مرکب از روش تزریق به کمک خلا^۲ استفاده کردند. آن‌ها با اضافه کردن تنها ۱٪ وزنی نانوسیلیکات، استحکام برشی بین لایه‌های را ۴۴٪، استحکام خمشی را تا ۲۴٪ و چقرمگی شکست را تا ۲۳٪ بهبود و دمای تجزیه را 260°C افزایش دادند. کودهاری و همکارانش [۱۳] به بررسی خواص مکانیکی و حرارتی برای کامپوزیت پلیمری با الیاف بافته شده کربن به روش انتقال رزین به کمک خلا (VARTM) پرداختند. آن‌ها مونت‌موریلونیت معدنی اصلاح‌شده با درصد‌های وزنی مختلف به اپوکسی افزودند. اپوکسی با فاز نانو برای ساخت مواد مرکب با الیاف کربن مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایش خمشی برای نمونه با پخت در دمای بالا بیشترین بهبود را در استحکام و سختی به ترتیب ۱۴٪ و ۹٪ را نشان داد. برانر و همکارانش [۱۴] با توجه به نتیجه تست شکست برای نمونه بدون الیاف و بررسی عکس‌های SEM برای نمونه با الیاف نتیجه گرفتند که مقاومت به ورقه‌ورقه‌شدن در مواد مرکب با رزین اصلاح شده با ناورس، افزایش یافته است. کاراکی و همکارانش [۱۵] ناورس لایه‌ای، آلومینا و اکسید تیتانیوم را درون ماتریس اپوکسی اضافه کردند و رفتار خستگی کشش-کشش ماده مرکب هیبریدی الیاف کربن را بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تعداد میکروترک‌ها در هر لایه به نوع ذره پرنکننده و غلظت آن بستگی دارد. ونگ و همکارانش [۱۶] نشان دادند که چقرمگی شکست به طور چشم‌گیری برای ناورس ورقه‌ورقه شده درون اپوکسی افزایش می‌یابد و نتیجه گرفتند که افزایش در میکروترک‌ها و سطح شکست به دلیل انحراف ترک، دلیل افزایش چقرمگی است.

سدیکو و همکارانش [۱۷] به بررسی تأثیر ناورس در خواص شکست در حالت‌های شبه‌استاتیکی و ضربه‌ای نانوماده مرکب کربن/اپوکسی پرداختند. نتایج آزمایش کشش رزین نشان داد چقرمگی شکست کرنش صفحه‌ای با افزودن ۳ درصد وزنی ناورس، ۶۰ درصد افزایش می‌یابد؛ ولی در مقابل نتایج آزمایش ضربه ای‌زود، کاهش ۴۵ درصدی در چقرمگی شکست ضربه‌ای را نشان داد. نگو و همکارانش [۱۸] به بررسی اثر ناورس بر خواص مکانیکی برای دو نوع مختلف رزین اپوکسی پرداختند. در هر دو رزین از ایپون ۸۲۸ به‌عنوان پلیمر نخستین استفاده شد. لیکن در نوع شیشه‌ای از سخت‌کننده جف‌امین دی ۲۳۰ که دارای دمای انتقال شیشه‌ای پایین‌تر از دمای محیط و در نوع لاستیکی از سخت‌کننده جف‌امین دی ۲۰۰۰ که دارای دمای انتقال شیشه‌ای بالاتر از دمای محیط است، استفاده شد. نتایج پراش پرتو ایکس و TEM نشان داد که پخش‌شدگی و ورقه‌ورقه‌شدگی اپوکسی لاستیکی به دلیل سرعت پخت پایین و ملکول‌های بلندتر سخت‌کننده، بهتر از اپوکسی شیشه‌ای است. آن‌ها تغییر چندانی در دمای انتقال شیشه مشاهده نکردند؛ ولی استحکام کششی، مدول و چقرمگی برای نمونه اپوکسی لاستیکی به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است. آن‌ها اثر تقویت‌کنندگی بهتر اپوکسی لاستیکی را به دلیل پخش‌شدگی بهتر، لایه‌لایه‌شدگی/ورقه‌ورقه‌شدگی بهتر

1- Closite 30B
2- Vacuum resin Transfer molding (VRTM)

ارائه شده است. در همه نمونه‌های نانومواد مرکب، جدایش لایه‌ها بیش از دو برابر نانورس خالص است. همچنان که در شکل ۱ دیده می‌شود، نانورس یک قله در زاویه جدایش $2\theta = 4/75^\circ$ که متناظر با فاصله d برابر با $18/61 \text{ \AA}$ است، نشان می‌دهد.



شکل ۱ نمونه تحت آزمایش کشش



شکل ۲ نمونه تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای

جدول ۱ زاویه جدایش و فاصله d نانومواد مرکب برحسب درصد نانورس

$2\theta^\circ$	$d (\text{\AA})$
۱/۱	۴۰/۷۶
۲/۲	۴۳/۶۳
۳/۳	۴۰/۳۶
۵/۵	۴۲/۲۳
۷/۷	۴۰/۶۹

دمای 40°C با توان 150 kW/cm^2 دامنه $5 \mu\text{m}$ سونیکت می‌شود. سپس مخلوط به دست آمده به مدت ۱۰ دقیقه در دمای 80°C به مکانیکی با سرعت 1800 rpm با اپیون ۸۲۸ مخلوط و هم‌زده می‌شود.

۲-۳- ساخت نانومواد مرکب هیبریدی با بافت دوبعدی شیشه/اپوکسی/نانورس

نمونه‌های نانو مواد مرکب هیبریدی با ۱۲ لایه شیشه با بافت دوبعدی و وزن سطحی 200 gr/m^2 با استفاده از روش تزریق رزین به کمک خلا ساخته می‌شوند. نانو مواد مرکب ساخته شده دارای درصد حجمی الیاف ۶۰ درصد و ضخامت متوسط $2/6 \text{ mm}$ است. به این منظور یک قالب تخت مربعی از الیاف شیشه با ۱۲ لایه به ابعاد $200 \times 300 \text{ mm}^2$ آماده شده و رزین اپوکسی/نانورس با استفاده از روش انتقال رزین به کمک خلا به آن تزریق می‌شود. برای داشتن کمینه لزجت در طی فرآیند تزریق سعی می‌شود قالب و نانورزین در دمای 40°C ثابت نگهداشته شوند. پس از تزریق، پخت نانو مواد مرکب در دمای 80°C به مدت ۱۵۰ دقیقه و در پی آن در دمای 120°C به مدت ۱۵۰ دقیقه صورت می‌گیرد. در نهایت نمونه‌ها با استفاده از واترجت در ابعاد استاندارد بریده می‌شوند.

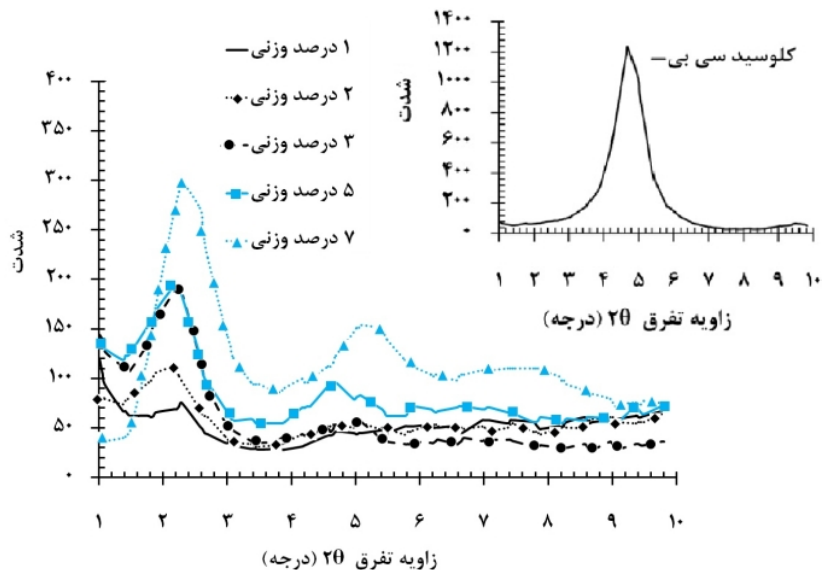
۲-۴- انجام آزمایش

آزمایش کشش طبق استاندارد ایزو ۵۲۷ و آزمایش خمش سه نقطه‌ای براساس استاندارد ایزو ۱۷۸ با استفاده از دستگاه کشش در دانشگاه تربیت مدرس و با سرعت بارگذاری 2 mm/min انجام شد. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب نمونه‌های آزمایش کشش و خمش را در حین آزمایش نشان می‌دهد.

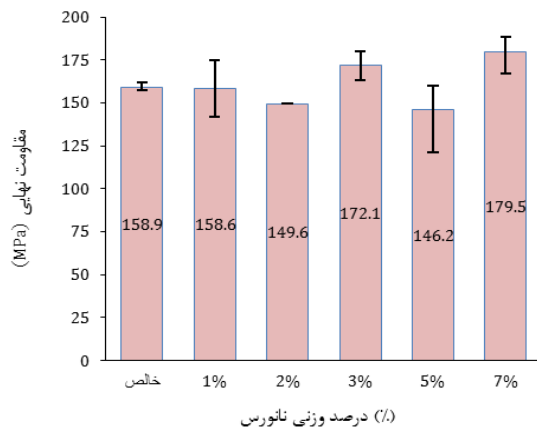
۳- نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری فاصله پایه d با استفاده از روش پراش اشعه ایکس (انجام شده دانشگاه تربیت مدرس) نشان می‌دهد (شکل ۳)، نانوذرات درون رزین اپوکسی بیش از این که به صورت کیفیت اکسفولیت باشند، به شکل اینترکت هستند. کیفیت اکسفولیت نانوذرات درون رزین با معیار فاصله پایه d بین صفحات بیش از 10 nm تعریف می‌شود [۲۳].

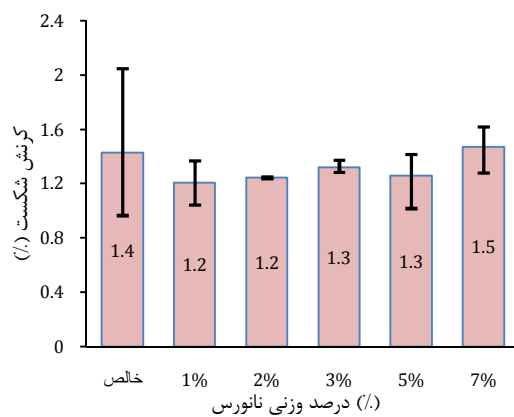
خلاصه نتایج شکل ۳ به دست آمده از پراش اشعه ایکس در جدول ۱



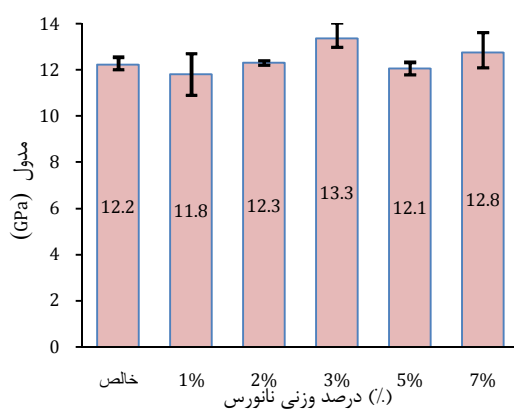
شکل ۳ منحنی‌های پراش اشعه ایکس اپوکسی/نانورس در درصد‌های مختلف نانورس



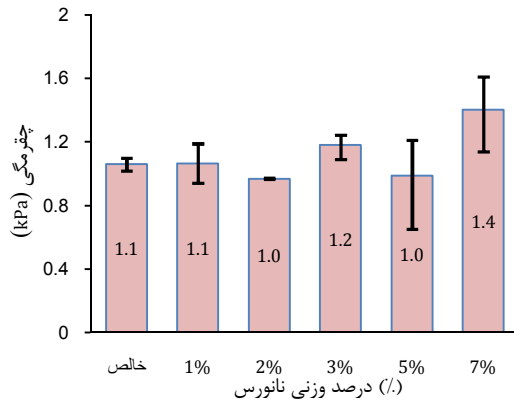
الف) تغییرات مقاومت نهایی بر حسب درصد وزنی نانوس



ب) تغییرات کرنش شکست بر حسب درصد وزنی نانوس

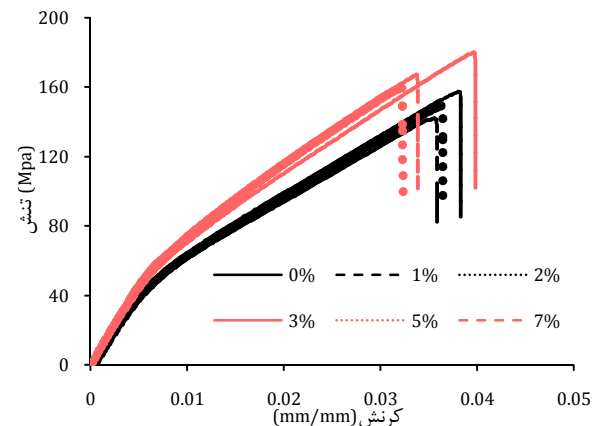


ج) تغییرات مدول بر حسب درصد وزنی نانوس



د) تغییرات چقرمگی بر حسب درصد وزنی نانوس

شکل ۵ تغییرات خواص کششی بر حسب درصدهای وزنی مختلف نانوس



شکل ۴ نمودار تنش-کرنش برای درصدهای وزنی مختلف نانوس

شکل ۴ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های نانومواد مرکب هیبریدی محتوی درصدهای مختلف نانوس را نشان می‌دهد. خلاصه این نتایج را در شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد.

همان‌طور که در شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد بیشترین بهبود خواص کششی در درصدهای وزنی ۳ و ۷ درصد به دست می‌آید. در این میان بیشترین افزایش مدول در ۳ درصد وزنی و بیشترین افزایش مقاومت نهایی، کرنش شکست و چقرمگی در ۷ درصد وزنی نانوس به دست می‌آید. کاهش کرنش شکست و افزایش مدول نشان‌دهنده بهبود اتصال میان ماتریس و الیاف در نانومواد مرکب هیبریدی در حضور ۳ درصد وزنی نانوس است. علاوه بر بهبود اتصالات میان ماتریس و الیاف، اتصالات صلب نانوس سبب افزایش تردی سیستم می‌شود با این وجود به دلیل افزایش مدول و مقاومت شکست در نهایت چقرمگی سیستم نیز افزایش می‌یابد. در ۷ درصد وزنی نانوس نیز به دلیل بهبود اتصالات بین ماتریس و الیاف و افزایش زیاد مقاومت شکست و مدول، کرنش شکست و چقرمگی نیز با وجود افزایش تردی، افزایش می‌یابد.

استحکام خمشی و مدول خمشی نانومواد مرکب هیبریدی بر حسب درصد وزنی نانوس حاصل از آزمایش خمش سه نقطه‌ای در شکل ۶ نشان داده شده است. استحکام خمشی و مدول خمشی برابرند با [۲۴]:

$$S = \frac{3Pl}{2bh^2} \quad (1)$$

$$E = \frac{ml^3}{4bh^3} \quad (2)$$

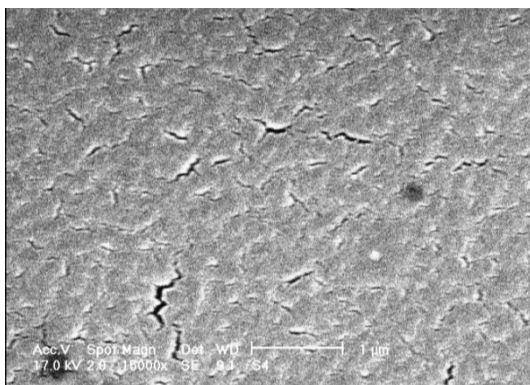
که در آن S ، E ، l ، b ، h ، P و m به ترتیب استحکام خمشی، مدول خمشی، فاصله دو تکیه‌گاه، عرض نمونه، ضخامت نمونه، بیشینه نیرو و شیب نمودار نیرو-خیز است.

به نظر می‌رسد چندین عامل سبب تغییر خواص کششی و خمشی مواد مرکب و بهبود آنان به‌ویژه در ۳ و ۷ درصد با افزودن نانوذرات رسی می‌شود. اول، یک اثر چقرمگی در رزین اپوکسی به وجود می‌آید. صفحات نانوس اصلاح شده کلوسیدسی‌بی، همان‌طور که در طی فرآیند آلتراسونیک (که با انتقال انرژی و گرم کردن موضعی نانورزین همراه است) قابل مشاهده است، سبب تغییر شرایط پخت و اصلاح تردی (و چقرمگی) رزین اپوکسی در طی فرآیند پلیمراسون و پیوند رادیکال‌های آزاد می‌شوند. این موضوع می‌تواند سبب کاهش شکل‌پذیری و افزایش مقاومت و مدول الاستیک شود [۱۳].

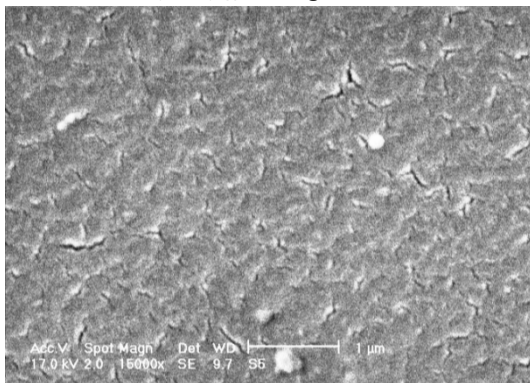
دوم، نانوذرات رسی و دسته‌های تجمع شده آن‌ها به صورت اینترکت در رزین اپوکسی می‌توانند مانند یک پرکننده صلب در رزین عمل کرده و مانع گسترش میکروترک‌ها در یک مسیر مستقیم شوند.

برعکس در نمونه‌های ۳ و به‌ویژه ۷ درصد نانورس، نانورزین هنوز به‌طور کامل به الیاف در سطح شکست چسبیده است که نشان‌دهنده بهبود چسبندگی خوب بین نانورزین و الیاف با حضور نانوذرات است. این موضوع می‌تواند سبب بهبود چقرمگی و افزایش مقاومت بیرون آمدگی الیاف از رزین شود. از سوی دیگر با توجه به ماهیت ترد رزین، می‌تواند سبب کاهش شکل‌پذیری مجموعه و از جهتی افزایش مدول و مقاومت شکست شود.

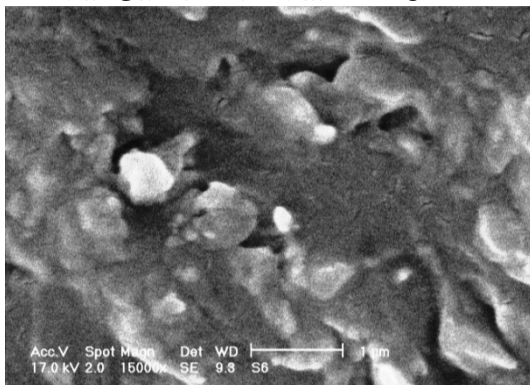
پنجم، چسبندگی بهتر مجموعه سه‌تایی الیاف/ رزین/ نانورس و از سویی وجود اتصالات صلب میان الیاف و رزین سبب انتقال بهتر نیرو درون سیستم می‌شود. این انتقال بهتر تنش و وجود مواد صلب مقاوم، سبب کاهش شکل‌پذیری و در نتیجه افزایش تنش در برابر تغییر شکل در نمودار تنش- کرنش می‌شود. این امر می‌تواند سبب افزایش مقاومت و مدول شود. از جهتی این افزایش مدول و مقاومت شکست با وجود کاهش شکل‌پذیری، سبب افزایش چقرمگی می‌شود.



الف) سطح شکست رزین خالص

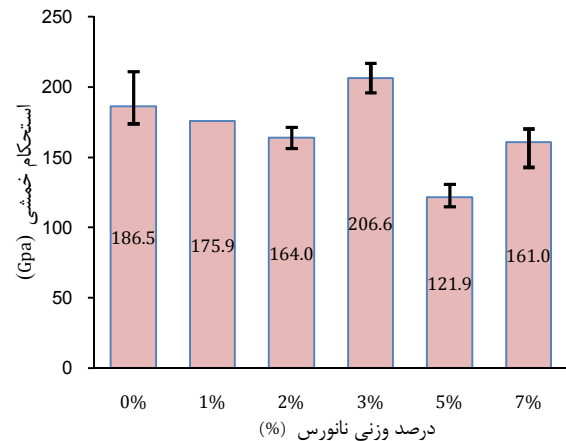


ب) سطح شکست نانورزین محتوی ۳ درصد وزنی نانورس

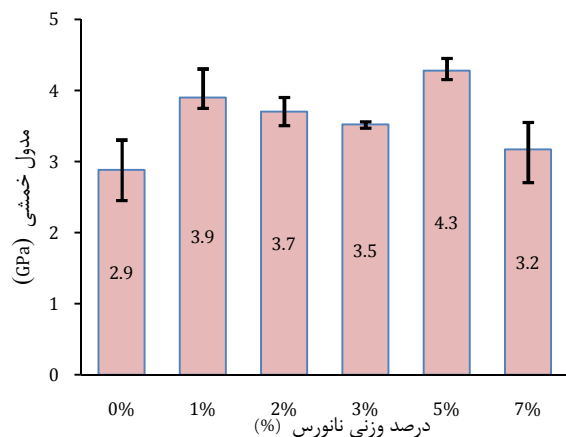


ج) سطح شکست آزمایش کشش نانورزین محتوی ۱۰ درصد وزنی نانورس

شکل ۷ تصویر SEM از سطح شکست نانورزین اپوکسی/ نانورس آزمایش کشش در درصد‌های مختلف نانورس



الف) استحکام خمشی برحسب درصد نانورس



ب) مدول خمشی برحسب درصد نانورس

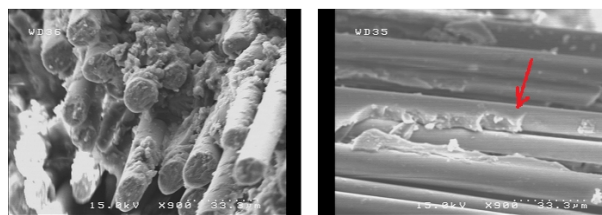
شکل ۶ تغییرات خواص خمشی برحسب درصد‌های وزنی مختلف نانورس

این موضوع با بررسی تصاویر SEM از سطح شکست نانورزین در نمونه محتوی ۳ درصد نانورس قابل مشاهده است. همان‌طور که شکل ۷ می‌توان دید در نمونه ۳ درصد نانورس، سطح شکست دارای تورفتگی و برآمدگی بیشتری نسبت به نمونه خالص داشته و سطح زبرتری دارد. همچنین تعداد ترک‌ها بیشتر، ولی کوچک‌تر و در مسیرهایی با پیچ و خم‌های بیشتری نسبت به نمونه خالص است. این مسئله نشان‌دهنده چقرمگی بیشتر نانورزین با ۳ درصد وزنی نانورس نسبت به نمونه خالص است؛ ولی از سویی دیگر، خود این ذرات به‌ویژه در تجمع در ابعاد بزرگ‌تر می‌تواند سبب تمرکز تنش و در نتیجه افزایش تنش و جوانه زدن ترک شوند. این موضوع می‌تواند سبب کاهش استحکام شود. در تصویر SEM از نمونه ۳ درصد این موضوع به روشنی قابل تشخیص است.

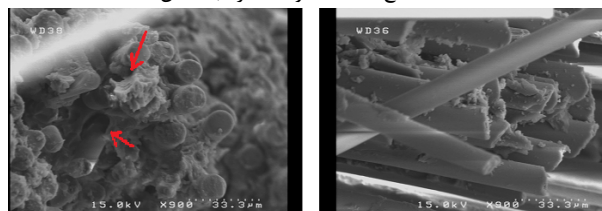
سوم، گروه‌های نانوذرات رسی با ابعادی با چند مرتبه کوچک‌تر از الیاف شیشه می‌توانند به‌عنوان یک تقویت‌کننده فرعی ماتریس و سطح مشترک عمل کنند. این نانوذرات کوچک می‌توانند سبب کاهش تمرکز تنش درون صفحه‌ای با خش‌دار کردن عیوب میان صفحات مجاور هم شوند. این موضوع می‌تواند سبب افزایش چقرمگی و کاهش شکل‌پذیری و در نتیجه افزایش مدول شود.

چهارم، نانورس‌های صفحه‌ای می‌توانند چسبندگی بین لایه‌ای و درون لایه‌ای بین الیاف مجاور هم را در ماده مرکب بهبود دهند. همان‌طور که در تصویر SEM شکل ۸ به روشنی می‌توان مشاهده کرد، برای ماده مرکب چندلایه‌ای بدون نانوذرات، ماتریس به‌طور کامل از سطح شکست جدا می‌شود که نشان‌دهنده چسبندگی ضعیف بین الیاف شیشه و ماتریس است.

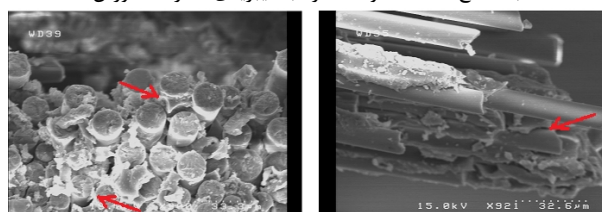
- [4] A. Usuki, Y. Kojima, M. Kawasumi, A. Okada, Y. Fukushima, T. Kurauchi, Synthesis of nylon 6-clay hybrid, *Journal of Materials Research*, Vol. 8, No. 5, p.1179-1184, 1993.
- [5] E.N. Gilbert, B.S. Hayes, J.C. Seferis, Variable Density Composite Systems Constructed by Metal Particle Modified Prepregs, *Journal of Composite Materials*, Vol. 36, No. 17, pp.2045-2060, 2002.
- [6] E.N. Gilbert, B.S. Hayes, J.C. Seferis, Metal particle modification of composite matrices for customized density applications, *Polymer Composites*, Vol. 23, No. 1, pp.132-140, 2002.
- [7] J.F. Timmerman, B.S. Hayes, J.C. Seferis, Nanoclay reinforcement effects on the cryogenic microcracking of carbon fiber/epoxy composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 62, No. 9, pp.1249-1258, 2002.
- [8] A. Yasmin, J.L. Abot, I.M. Daniel, Processing of clay-epoxy nanocomposites by shear mixing, *Scripta Materialia*; Vol. 49, No. 1, pp. 81-86, 2003.
- [9] M.V. Ho, C.K. Lam, K.T. Kau, D.H.L. Ng, D. Hui, Mechanical properties of epoxy based composites using nanoclays, *Composites Structures*, Vol. 75, No. 3, pp. 415-421, 2006.
- [10] J.C. Lin, L.C. Chang, M.H. Nien, H.L. Ho, Mechanical behavior of various nanoparticle filled composites at low-velocity impact, *Composite Structures*, Vol. 74, No. 1, pp. 30-36, 2006.
- [11] C.C.B.P. Rice, L. Cloos, D. Curliss, Carbon Fiber Composites Prepared from Organoclay-Aerospace Epoxy Nanocomposites, *46th International Sample Symposium and Exhibition*, pp. 355-361, 2001.
- [12] A. Haque, M. Shamsuzzoha, F. Hussain, D. Dean, S2-Glass/Epoxy Polymer Nanocomposites: Manufacturing, Structures, Thermal and Mechanical Properties, *Journal of Composite Materials*, Vol. 37, No. 20, pp.1821-1837, 2003.
- [13] F.H. Chowdhury, M.V. Hosur, S. Jeelani, Studies on the flexural and thermomechanical properties of woven carbon/ nanoclay-epoxy laminates, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 421, No. 1-2, pp.298-306, 2006.
- [14] A.J. Brunner, A. Necola, M. Rees, P.H. Gasser, X. Kornmann, R. Thomann, M. Barbezat, The influence of silicate-based nano-filler on the fracture toughness of epoxy resin, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, No. 16, pp. 2336-2345, 2006.
- [15] T. Karaki, J.P. Killgore, J.C. Seferis, Characterization of fatigue behavior of polyanomeric matrix composites, *CD proceeding of 49th International Sample Symposium and Exhibition*, paper 263, 2004.
- [16] K. Wang, L. Chen, J. Wu, M.L. Toh, C. He, A.F. Yee, Epoxy Nanocomposites with Highly Exfoliated Clay: Mechanical Properties and Fracture Mechanisms, *Macromolecules*, Vol. 38, No. 3, pp788-800, 2005.
- [17] N.A. Siddiqui, R.S.C. Woo, J.K. Kim, C.C.K. Leung, Mode I interlaminar fracture behavior and mechanical properties of CFRPs with nanoclay-filled epoxy matrix, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, No. 2, pp449-460, 2007.
- [18] T.D. Ngo, M.T. Ton-That, S.V. Hoa, K.C. Cole, Reinforcing effect of organoclay in rubbery and glassy epoxy resins, part 1: Dispersion and properties, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 107, No. 2, pp 1154-1162, 2008.
- [19] H. Miyagawa H, R.J. Jurek, A.K. Mohanty, M. Misra, L.T. Drzal, Biobased epoxy/clay nanocomposites as a new matrix for CFRP, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, No. 1, pp 54-62, 2006.
- [20] A.K. Subramaniyan, Q. Bing, D. Nakima, C.T. Sun, Effect of Nanoclay on Compressive Strength of Glass Fiber Composites, *CD Proceedings of the 18th Annual Technical Conference of American Society for Composites*, paper 194, 2003.
- [21] M.H. Pol, G.H. Liaghat, F. Hajjarazi, Experimental Investigation of Effect of nanoclay on Ballistic Properties of Composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 11-20, 2012. (In Persian)
- [22] L. Sun, R.F. Gibson, F. Gordaninejad, J. Suhr, Energy absorption capability of nanocomposites: A review, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 14, pp. 2392-2409, 2009.
- [23] T.B. Tolle, D.P. Anderson, Morphology development in layered silicate thermoset nanocomposites, *Composites Science and Technology*, 62, 1033-1041, 2002.
- [24] D.F. Adams, L.A. Carlsson, R.B. Pipes, *Experimental Characterization of Advanced Composite Materials*, Third Edition, 2003.



الف) سطح شکست نانو ماده مرکب خالص



ب) سطح شکست نانو ماده مرکب هیبریدی ۳ درصد نانورس



ج) سطح شکست آزمایش کشش نانو ماده مرکب هیبریدی ۱۰ درصد نانورس

شکل ۸ تصویر SEM از سطح شکست نانومواد مرکب هیبریدی شیشه/ اپوکسی / نانورس در درصدهای مختلف نانورس

در مجموع رفتار و کیفیت تاثیرگذاری نانوذرات رسی آمیخته‌ای از تأثیر چندین پدیده مثل چسبندگی بین الیاف، رزین و نانوذرات رسی و همچنین کیفیت پخش‌شدگی نانوذرات رسی است. به هر حال می‌توان گفت به طور کلی نانوذرات رسی پتانسیل بهبود خواص مکانیکی مواد مرکب شیشه/ اپوکسی را دارا است.

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر اثر نانورس کلوسیدسی‌بی بر خواص کششی و خمشی نانومواد مرکب هیبریدی شیشه/ اپوکسی/ نانورس به طور تجربی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهند بیشترین افزایش خواص کششی و خمشی در حضور ۳ و ۷ درصد وزنی نانورس به‌دست می‌آید.

۵- قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی- واحد شوستر انجام شده است. بدین‌وسیله نویسندگان از این پشتیبانی، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

۶- مراجع

- [1] P.C. LeBaron, Z. Wang, T.J. Pinnavaia, Polymer-layered silicate nanocomposites: an overview, *Applied Clay Science*; Vol. 15. No. 1-2, pp.11-29, 1999.
- [2] M. Alexandre, P. Dubois, Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials, *Materials Science and Engineering*; No. 28, pp.1-63, 2000.
- [3] Y. Fukushima, S. Inagaki, Synthesis of an Intercalated Compound of Montmorillonite and 6-Polyamide, *Journal of Inclusion Phenomena*; No. 5, pp.473-482, 1987.