مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۷، ص‌ص ۱۰۳-۱۰۸

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

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

* تفرش، صندوق‌پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، tafreshu.ac.ir@m_h_pol

اطلاعات مقاله

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

چکیده

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 دیکلیسیدیل‌اتر بیسفنول نوع آ (DGEBA) با نام تجاری ایپون ۸۲۸ به‌عنوان پایه اپوکسی و یک پلی‌اکسیپروپیلن‌دیامین با وزن مولکولی ۴۰۰gr/mol با نام تجاری جف‌امین‌دی ۴۰۰ به‌عنوان سخت کننده ساخته شده است. نانورس کلوسیدسی‌بی 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 به‌دست می‌آید. بیشترین افزایش مقاومت نهایی، کرنش شکست و چقرمگی در ۷٪ وزنی نانورس به‌ترتیب به مقدار ۱۳٪، ۷٪ و ۲۷٪ و بیشترین افزایش مدول در ۳٪ وزنی نانورس به مقدار ۹٪ به‌دست می‌آید. همچنین بیشترین افزایش مقاومت خمشی به مقدار ۱۱٪ در ۳٪ وزنی نانورس و بیشترین مدول خمشی به مقدار ۴۸٪ در ۵٪ وزنی نانورس به‌دست می‌آید.

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

Seyed Abdolvahab Hoseini[1], 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 Closite 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 Closite 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

مواد مرکب به‌دلیل 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 نانوتکنولوژی 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 تقویت شده با الیاف در راستای بهبود خواص مکانیکی، حرارتی، نوری و الکتریکی است. نانوذرات رسی به دلیل قیمت پایین و سهولت در به‌کارگیری 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

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.7.26.7]

کلوسیدسی‌بی[1] 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 ازکلوسیدسی‌بی در ۵۰ درصد وزنی در رزین اپوکسی گزارش می‌دهند. رایس و همکارانش [۱۱] از سیلیکات آلی برای تقویت اپوکسی/ الیاف‌کربن 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[2] استفاده کردند. آن‌ها با اضافه کردن تنها ۱٪ وزنی نانوسیلیکات، استحکام برشی بین لایه‌ای را ۴۴٪، استحکام خمشی را تا ۲۴٪ و چقرمگی شکست را تا ۲۳٪ بهبود و دمای تجزیه را $26C^{\circ}$ افزایش دادند. کودهاری و همکارانش [۱۳] به بررسی خواص مکانیکی وحرارتی 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 به‌ترتیب 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 نانورس، افزایش یافته است. کاراکی و همکارانش [۱۵] نانورس 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 پرکننده و غلظت آن بستگی دارد. ونگ و همکارانش[۱۶] نشان دادند که چقرمگی شکست به طور چشم‌گیری برای نانورس 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 نانورس 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 نانورس، 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 نانورس 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 جف‌آمین‌دی ۲۳۰ که دارای دمای انتقال شیشه‌ای پایین‌تر از دمای محیط و در نوع لاستیکی از سخت‌کننده جف‌آمین‌دی ۲۰۰۰ که دارای دمای انتقال شیشه‌ای بالاتر از دمای محیط است، استفاده شد. نتایج پراش پرتو ایکس و TEM نشان داد که پخش‌شدگی و وقه‌ورقه‌شدگی 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 ملاحظه‌ایی بهبود یافته است. آن‌ها اثر تقویت‌کنندگی بهتر اپوکسی لاستیکی را به دلیل پخش‌شدگی بهتر، لایه‌لایه‌شدگی/ ورقه‌ورقه‌شدگی بهتر 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 آرایی نانورس هنگام اعمال تنش (به سبب ساختار آزادتر اپوکسی لاستیکی) عنوان کردند. میاگوا و همکارانش [۱۹] تأثیر نانورس 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 نانورس مقاومت برشی درون صفحه‌ای، مقاومت خمشی و چقرمگی شکست به ترتیب ۴۴، ۲۴ و ۲۳ درصد افزایش می‌یابد. سابرامانیان و همکارانش [۲۰] مشاهده کردند با افزودن ۵ درصد نانورس، 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 کلوسیدسی‌بی 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 نانورس کلوسیدسی‌بی بررسی کردند. براساس نتایج این بررسی، بیشترین افزایش خواص بالستیکی در سرعت برخورد نزدیک حد بالستیک در ۳ درصد وزنی نانورس به مقدار ۱۰ درصد و در سرعت‌های به نسبت بالاتر، در ۱۰ درصد وزنی نانورس به مقدار ۲۰ درصد به‌دست 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 به‌وسیله 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 نانورس 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 ۴۰۰gr/mol با نام تجاری جف‌امین‌دی ۴۰۰ به‌عنوان سخت‌کننده ساخته شده توسط شرکت هانسمن است که با نسبت وزنی ۵۵:۱۰۰ نسبت به پایه اپوکسی (قسمت نخست) با آن مخلوط می‌شود. در این تحقیق از یک نانورس معدنی (MMT) اصلاح شده به شکل صفحه‌ای با نام تجاری (مونتموریللیت 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 $200gr/m^2$ 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

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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.7.26.7]

دمای ۴۰C° با توان ۱۵۰kW/cm² دامنه ۵μm سونیکت می‌شود. سپس مخلوط به‌دست آمده به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۸۰C° به مکانیکی با سرعت ۱۸۰۰rpm با ایپون 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 الیاف شیشه با بافت دوبعدی و وزن سطحی ۲۰۰gr/m² با استفاده از روش تزریق رزین به کمک خلا ساخته می‌شوند. نانو مواد مرکب ساخته‌شده دارای درصد حجمی الیاف ۶۰ درصد و ضخامت متوسط ۲/۶mm است. به این منظور یک قالب تخت مربع‌ای از الیاف شیشه با ۱۲ لایه به ابعاد ۲۰۰×۳۰۰mm² 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 ۴۰C° ثابت نگهداشته شوند. پس از تزریق، پخت نانو مواد مرکب در دمای ۸۰C° به مدت ۱۵۰ دقیقه و در پی آن در دمای ۱۲۰C° به مدت ۱۵۰ دقیقه صورت می‌گیرد. در نهایت نمونه‌ها با استفاده از واترجت در ابعاد استاندارد بریده می‌شوند.

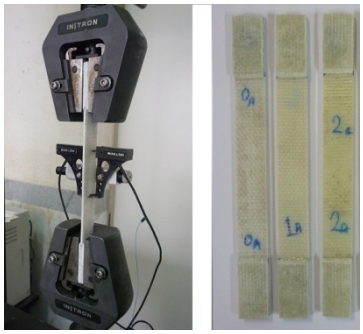
۲-۴- انجام آزمایش

آزمایش کشش طبق استاندارد ایزو ۵۲۷ و آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای براساس استاندارد ایزو ۱۷۸ با استفاده از دستگاه کشش در دانشگاه تربیت‌مدرس و با سرعت بارگذاری ۲mm/min انجام شد. شکل‌های ۱ و ۲ به‌ترتیب نمونه‌های آزمایش کشش و خمش را در حین آزمایش نشان می‌دهد.

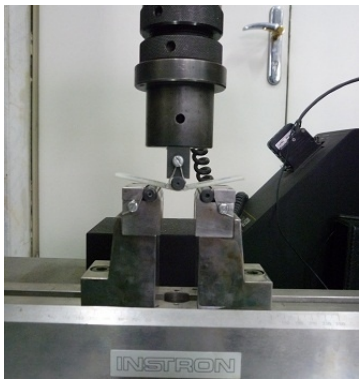
۳- نتایج و بحث

نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری فاصله پایه d با استفاده از روش پراش اشعه ایکس (انجام شده دانشگاه تربیت‌مدرس) نشان می‌دهد (شکل ۳)، نانوذرات درون رزین اپوکسی بیش از این‌که به صورت کیفیت اکسفولیت باشند، به شکل اینترکلت هستند. کیفیت اکسفولیت نانوذرات درون رزین با معیار فاصله پایه d بین صفحات بیش از ۱۰nm تعریف می‌شود [۲۳].

خلاصه نتایج شکل ۳ به‌دست آمده از پراش اشعه ایکس در جدول ۱ 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 ۲θ=۴/۷۵° که متناظر با فاصله d برابر با ۱۸/۶۱Å است، نشان می‌دهد.



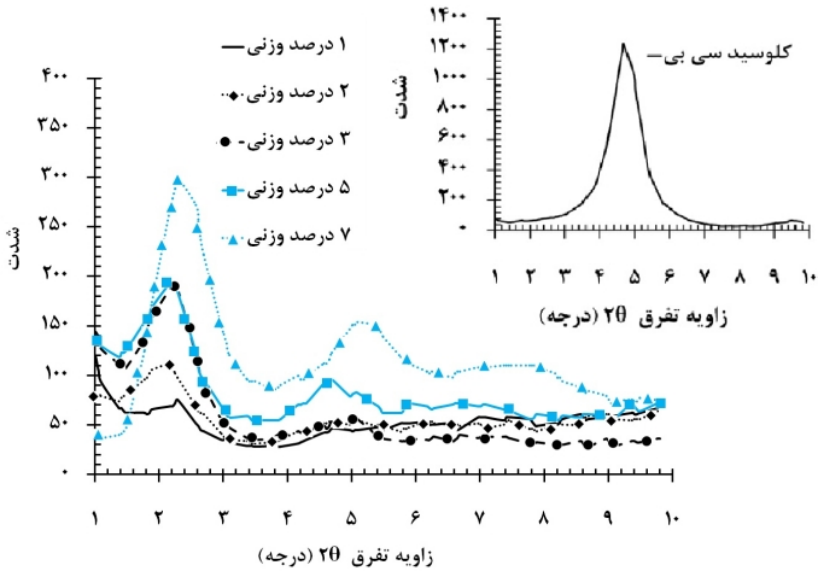
شکل ۱ نمونه تحت آزمایش کشش



شکل ۲ نمونه تحت آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای

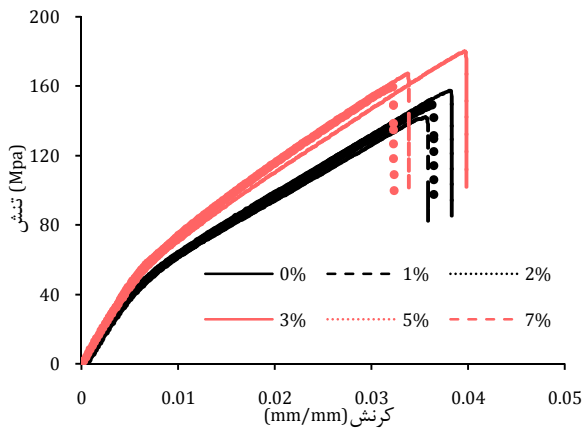
جدول ۱ زاویه جدایش و فاصله d نانومواد مرکب برحسب درصد نانورس

	$2\theta^{\circ}$	d (Å)
٪۱	۲/۱۶	۴۰/۷۶
٪۲	۲/۰۲	۴۳/۶۳
٪۳	۲/۱۹	۴۰/۳۶
٪۵	۲/۰۹	۴۲/۲۳
٪۷	۲/۱۷	۴۰/۶۹



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

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.7.26.7]



شکل ۴ نمودار تنش- کرنش برای درصدهای وزنی مختلف نانورس

شکل ۴ نمودار تنش- کرنش نمونه‌های نانومواد مرکب هیبریدی محتوی درصدهای مختلف نانورس 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 به‌دست می‌آید. در این میان بیشترین افزایش مدول در ۳ درصد وزنی و بیشترین افزایش مقاومت نهایی، کرنش شکست و چقرمگی در ۷ درصد وزنی نانورس به‌دست می‌آید. کاهش کرنش شکست و افزایش مدول نشان‌دهنده بهبود اتصال میان ماتریس و الیاف در نانومواد مرکب هیبریدی در حضور ۳ درصد وزنی نانورس است. علاوه‌بر بهبود اتصالات میان ماتریس و الیاف، اتصالات صلب نانورس سبب افزایش تردی سیستم می‌شود با این وجود به دلیل افزایش مدول و مقامت شکست در نهایت چقرمگی سیستم نیز افزایش می‌یابد. در ۷ درصد وزنی نانورس 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 برحسب درصد وزنی نانورس حاصل از آزمایش خمش سه‌نقطه‌ای در شکل ۶ نشان داده شده است. استحکام خمشی و مدول خمشی برابرند با [۲۴]:

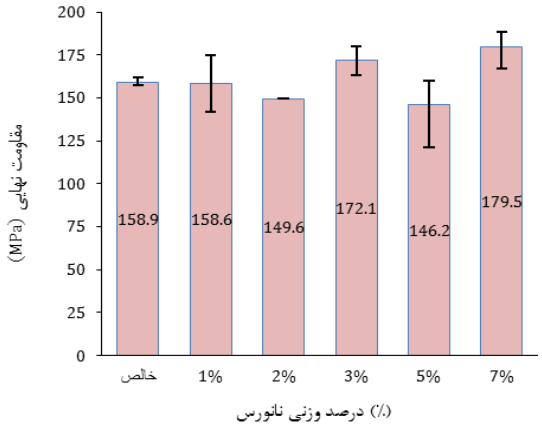
$$S = \frac{3Pl}{2bh^2} \quad (۱)$$

$$E = \frac{ml^3}{4bh^3} \quad (۲)$$

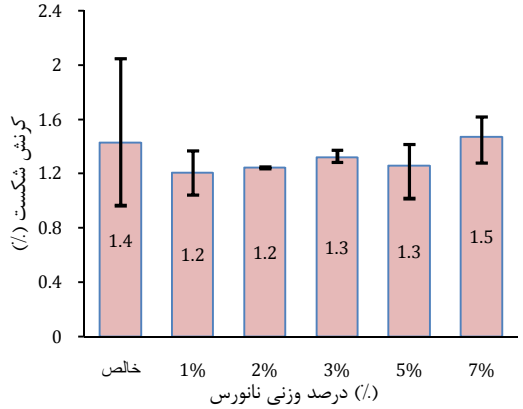
که در آن S، E، l، b، h، P و m به‌ترتیب استحکام خمشی، مدول خمشی، فاصله دو تکیه‌گاه، عرض نمونه، ضخامت نمونه، بیشینه نیرو و شیب نمودار نیرو- خیز است.

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 به‌وجود می‌آید. صفحات نانورس 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].

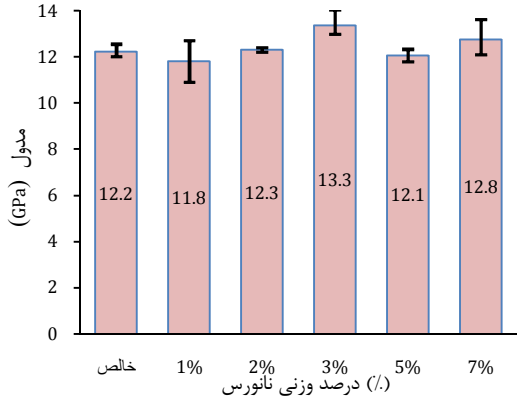
دوم، نانوذرات رسی و دسته‌های تجمع شده آن‌ها به صورت اینترکلت در رزین اپوکسی می‌توانند مانند یک پرکننده صلب در رزین عمل کرده و مانع گسترش میکروترک‌ها در یک مسیر مستقیم شوند.



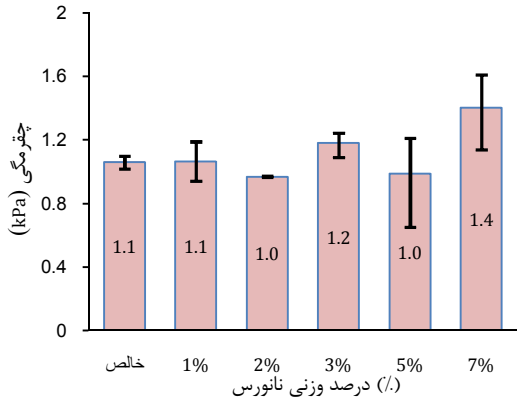
الف) تغییرات مقاومت نهایی برحسب درصد وزنی نانورس



ب) تغییرات کرنش شکست برحسب درصد وزنی نانورس



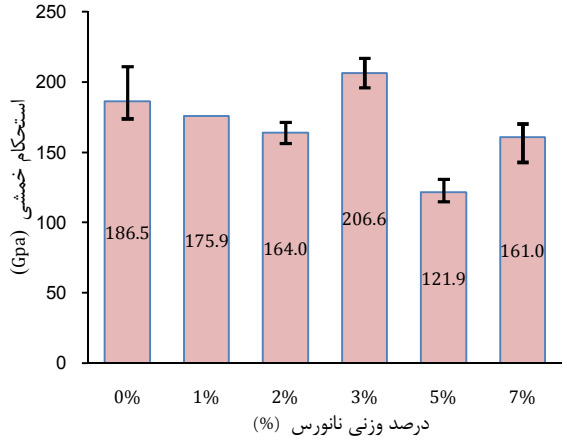
ج) تغییرات مدول برحسب درصد وزنی نانورس



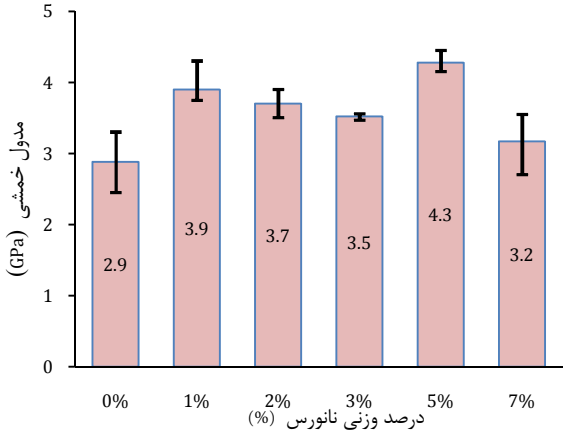
د) تغییرات چقرمگی برحسب درصد وزنی نانورس

شکل ۵ تغییرات خواص کششی برحسب درصدهای وزنی مختلف نانورس

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.7.26.7]



الف) استحکام خمشی برحسب درصد نانورس



ب) مدول خمشی برحسب درصد نانورس

شکل ۶ تغییرات خواص خمشی برحسب درصدهای وزنی مختلف نانورس

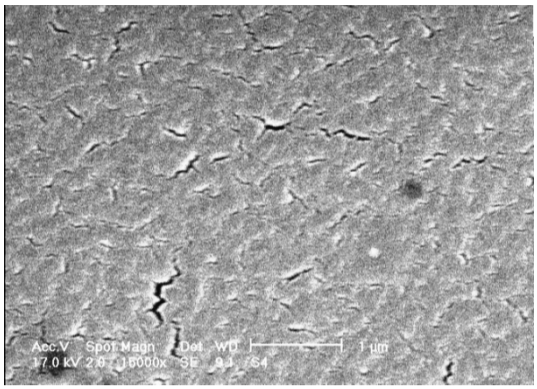
این موضوع با بررسی تصاویر SEM از سطح شکست نانورزین در نمونه محتوی ۳ درصد نانورس قابل مشاهده است. همان‌طور که شکل ۷ می‌توان دید در نمونه ۳ درصد نانورس، سطح شکست دارای تورفتگی و برآمدگی بیشتری نسبت به نمونه خالص داشته و سطح زبرتری دارد. همچنین تعداد ترک‌ها بیشتر، ولی کوچک‌تر و در مسیرهایی با پیچ و خم‌های 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 می‌توانند سبب افزایش چقرمگی و کاهش شکل‌پذیری و در نتیجه افزایش مدول شود.

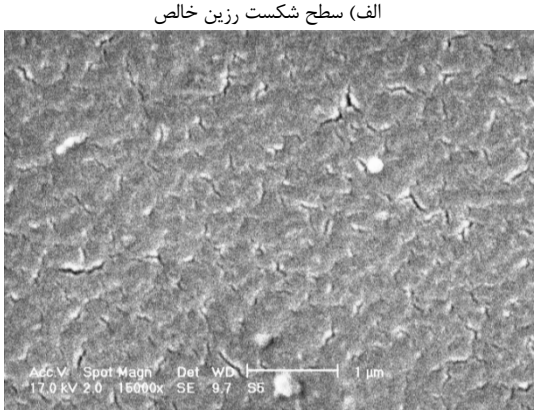
چهارم، نانورس‌های صفحه‌ای می‌توانند چسبندگی بین لایه‌ای و درون لایه‌ای بین الیاف مجاور هم را در ماده مرکب بهبود دهند. همان‌طور که در تصویر SEM شکل ۸ به روشنی می‌توان مشاهده کرد، برای ماده مرکب چندلایه‌ای بدون نانوذرات، ماتریس به طور کامل از سطح شکست جدا می‌شود که نشان‌دهنده چسبندگی ضعیف بین الیاف شیشه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

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 ار 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.

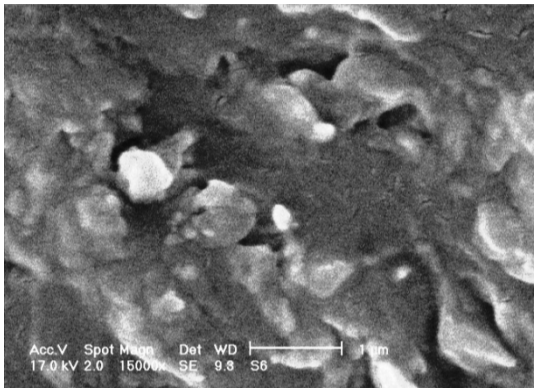
پنجم، چسبندگی بهتر مجموعه سه‌تایی الیاف/ رزین/ نانورس و از سویی وجود اتصالات صلب میان الیاف و رزین سبب انتقال بهتر نیرو درون سیستم می‌شود. این انتقال بهتر تنش و وجود مواد صلب مقاوم، سبب کاهش شکل‌پذیری و در نتیجه افزایش تنش در برابر تغییر شکل در نمودار تنش-کرنش می‌شود. این امر می‌تواند سبب افزایش مقاومت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



الف) سطح شکست رزین خالص



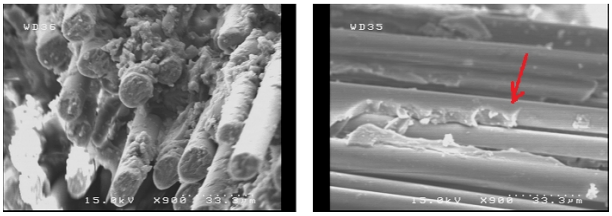
ب) سطح شکست نانورزین محتوی ۳ درصد وزنی نانورس



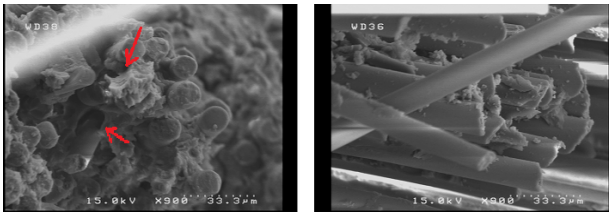
ج) سطح شکست آزمایش کشش نانورزین محتوی ۱۰ درصد وزنی نانورس

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

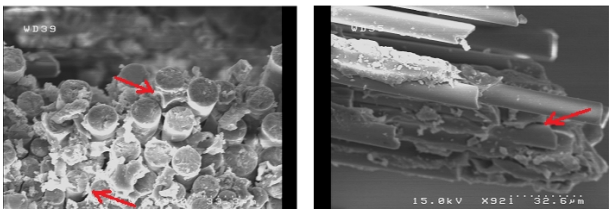
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.7.26.7]



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 شوشتر 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.

[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 polynanomeric 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. Hajiarazi, 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.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.7.26.7]