



ارزیابی اثر حضور نانورس‌ها بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی پوشش‌های نانوکامپوزیت پایه پلیمری

داود جعفری^۱، محمدرضا شیشه‌ساز^{۲*}، داود زارعی^۳، ایمان دانایی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی بازرسی فنی، دانشکده مهندسی نفت شهید تندگویان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران، صندوق پستی: ۶۱۹

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی نفت شهید تندگویان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران، صندوق پستی: ۶۱۹

۳- استادیار، گروه مهندسی پلیمر دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۳۵-۱۱۳۶۵

۴- استادیار، دانشکده مهندسی نفت شهید تندگویان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران، صندوق پستی: ۶۱۹

تاریخ دریافت: ۹۳/۱/۲۰ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۳/۱۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۴/۲/۸ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۴/۲/۸

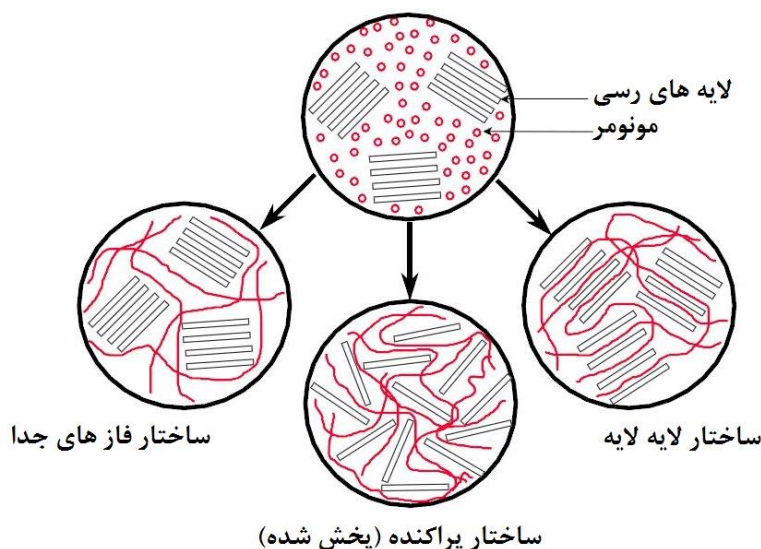
چکیده

نانوکامپوزیت‌های پلیمری دسته جدیدی از مواد هستند که در آنها، اضافه کردن مقدار کمی نانوذره در پلیمر خواص ویژه‌ای ایجاد می‌شود. شناسایی و به دست آوردن مقدار بهینه این نانومواد پرکننده به منظور دستیابی به بهترین خواص، امر بسیار مهمی است. مواد پرکننده بایستی از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشند و به راحتی با پلیمر ترکیب شوند. مواد پرکننده نباید کاهش چشمگیری در دیگر خواص پلیمر ایجاد کنند و از لحاظ زیست‌محیطی نیز بی‌خطر باشند. در میان نانو پرکننده‌های مورد استفاده، بدون شک نانورس‌ها نقش مهمی را ایفا می‌کنند. نانورس‌ها ارزان قیمت، در دسترس، غیرسمی و دوست‌دار طبیعت هستند. نانورس‌ها به دلیل ایجاد خواص بسیار خوب فیزیکی، مکانیکی، ضد خوردگی و همچنین مقاومت در برابر نفوذپذیری، حرارت و آتش در پلیمرها، بسیار کاربردی هستند. در این مقاله به معرفی نانوکامپوزیت‌های پلیمر- خاک رس و بررسی اثر نانورس‌ها بر خواص فیزیکی و مکانیکی پوشش‌های نانوکامپوزیتی پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی

نانوکامپوزیت‌های پلیمری، خاک رس، خواص فیزیکی و مکانیکی.

چکیده تصویری





Evaluation of nanoclays effect on the physical and mechanical properties of polymer-based nanocomposite coating

Davod Jafari¹, Mohammad Reza Shishesaz^{1,*}, Davod Zaarei², Iman Danaee¹

1- Abadan Faculty of Petroleum Engineering, Petroleum University of Technology, P. O. Box: 619, Abadan, Iran.

2- Technical Faculty, South Tehran Branch, Islamic Azad University, P. O. Box: 4435-11365, Tehran, Iran.

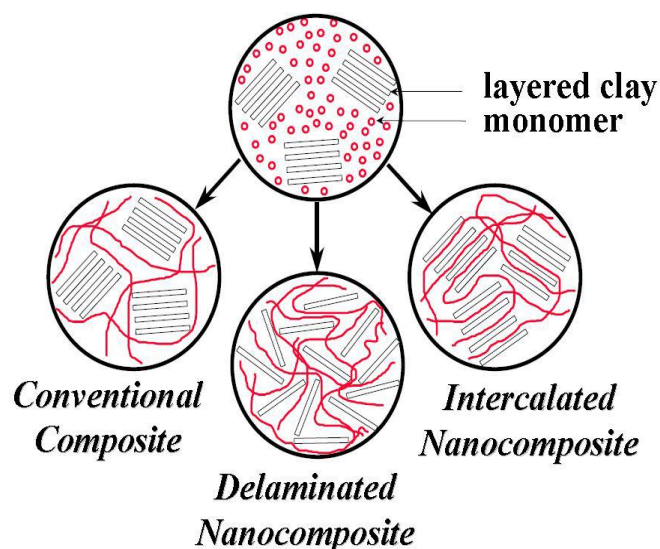
Abstract

Polymeric nanocomposites are a new class of materials which obtain specific properties by adding small amounts of nanoparticles in polymer. In order to reach the best properties, Identification and achievement of optimum amounts of nano-filler materials is a very important problem. These filling material must be economical and compatible with the polymer. The nano-filler materials must be environmental friendly and don't cause a significant reduction in other properties of polymer. Among existing nano-fillers, nanoclay particles due to their appropriate properties has an abundant usage. Nanoclays are inexpensive, accessible, non-toxic and environmental friendly. They have good physical, mechanical and anticorrosion properties and also showing acceptable permeability, thermal and also flame resistance in polymer matrix. In this paper the polymer-clay nanocomposites have been described and the effect of nanoclay filler on physical and mechanical properties of resultant nanocomposites have been investigated.

Keywords

Polymer nanocomposites, Clay, Physical and Mechanical Properties.

Graphical abstract



*Corresponding author: mr.shishesaz1990@gmail.com

۱- مقدمه

کنترل کرد. پرکاربردترین خاک رس طبیعی مورد استفاده در پلیمرها مونت موریلونیت نام دارد. مونت موریلونیت به دلیل چگالی بار مناسب، ساختار صفحه‌ای شکل و همچنین لایه‌لایه شدن آن در پلیمر از همه معروفتر و پرکاربردتر است. مونت موریلونیت در سال ۱۸۴۷ در فرانسه کشف شد [۴]. پیشگام اصلی در بررسی خواص نانوکامپوزیت حاوی ذرات نانورس شرکت توپوتا^۸ بوده است که با سنتز نانورس/ پلی آمید و بررسی نانوکامپوزیت ساخته‌شده، بهبود چشمگیری در خواص مکانیکی و حرارتی مشاهده کردند [۶، ۷]. خاک رس‌ها دو ساختار کلی دارند.

۱. لایه‌های سیلیکاتی چهاروجهی متصل به لایه‌های آلومینیمی هشت‌وجهی، از اتصال این دولایه یک واحد به وجود می‌آید که به سیلیکات‌های لایه‌ای ۱:۱ معروفاند، خانواده کائولن‌ها^۹ جز سیلیکات‌های لایه‌ای ۱:۱ محسوب می‌شوند. کانی‌های کائولن شامل کائولینیت^{۱۰}، دیکیت^{۱۱}، ناکریت^{۱۲} و هالوزیت^{۱۳} است. فراوان‌ترین کانی این گروه کائولینیت می‌باشد. در شکل ۱.a ساختار کائولینیت نشان داده شده است.

۲. کانی‌هایی که از دولایه چهاروجهی و یک لایه هشت‌وجهی ایجاد شده‌اند که به سیلیکات‌های لایه‌ای ۲:۱ معروفاند. گروه اسمکتیت^{۱۴} جز خانواده سیلیکات‌های لایه‌ای ۲:۱ محسوب می‌شود. مونت موریلونیت معروفترین رس موجود در خانواده سیلیکات‌های ۲:۱ می‌باشد. در شکل ۱.b ساختار مونت موریلونیت نشان داده شده است [۶-۸].

ضخامت لایه‌های هر صفحه از مونت موریلونیت برابر یک نانومتر (Å^{۱۵} ۹/۶) است و اندازه جانبی آن بین ۳۰۰ Å تا چند میکرون می‌باشد و نسبت طول به ضخامت آن معمولاً بیشتر از ۱۰۰۰ می‌باشد [۷-۹]. در کل شبکه این لایه‌ها تکرار می‌شوند و به وسیله نیروهای الکترواستاتیکی به هم چسبیده‌اند و به شکل پودر درآمده‌اند. سطح مخصوص مونت موریلونیت برابر ۷۵۰ تا ۸۰۰ مترمربع بر گرم است. فضای بین لایه‌ها در نانورس گالری^{۱۶} نامیده می‌شود و فاصله بین لایه‌ها را با d₀₀₁ نشان می‌دهند [۱۰-۱۲]. به دلیل وجود این نیروی الکترواستاتیکی ذرات رس به راحتی در آب متورم می‌شوند. در ساختار خاک رس به جای یون‌های Al³⁺، Si⁴⁺ ممکن است یون‌های دیگری بنشینند. در طول جاننشینی هم‌ریخت در صفحات چهاروجهی و هشت‌وجهی لایه‌ها معمولاً دارای بار منفی می‌شوند. جانشین شدن Al³⁺ بجای Si⁴⁺ در صفحات چهاروجهی و

پوشش‌های آلی به دلیل ارزانی، کاربردهای متنوع و سهولت نسبی اعمال رایج می‌باشند و یکی از ارزان‌ترین ابزارهای کنترل خوردگی محسوب می‌شود. یکی از راه‌های بهبود خواص فیزیکی، مکانیکی و ضدخوردگی این پوشش‌ها، استفاده از رنگدانه‌های معدنی است [۱]. عوامل اصلی در انتخاب رنگدانه‌ها میزان سمیت، میزان تأثیر آنها در خواص فیزیکی، مکانیکی و خوردگی، سازگاری آنها با محمل و همچنین قیمت آنها است [۱، ۲]. با کوچک شدن اندازه ذرات پرکننده، در صورت سازگاری آنها با محمل تمایل آنها به مولکول‌های مجاور بیشتر شده و تمایل زیادی برای ایجاد اتصالات قوی پیدا می‌کنند. اگر ابعاد در حد نانو شود، این اتصالات بسیار قوی شده و نام نانو تقویت‌کننده را به خود می‌گیرد. مقادیر بسیار کم (در حدود ۲ تا ۳٪) از این نانو تقویت‌کننده‌ها، خواصی بهینه معادل با حضور ۴۰ تا ۶۰٪ وزنی از پرکننده‌های معمولی را ایجاد می‌کند [۳-۷]. یکی از پرکننده‌هایی که امروزه کاربرد زیادی پیدا کرده است نانورس‌ها هستند که استفاده آنها در پلیمرها باعث ایجاد نانوکامپوزیت پلیمر-خاک رس^۱ می‌گردد. ماده کامپوزیتی به ماده‌ای می‌گویند که دو یا چند ماده نامتجانس برای ایجاد یک ساختار با خواص موردنظر باهم ترکیب می‌شوند. یکی از نانوکامپوزیت‌های پرکاربرد، نانوکامپوزیت پلیمر-خاک رس است. در سال‌های اخیر تحقیقات و مقالات زیادی در مورد ساختارهای نانوکامپوزیتی پلیمرهای شامل سیلیکات‌های لایه‌ای بسیار زیاد شده است. اضافه کردن میزان کمی خاک رس (معمولاً کمتر از ۵٪) بهبود شگرفی در خواص حرارتی، فیزیکی، مکانیکی و سدشوندگی ایجاد می‌کند [۱، ۳، ۴].

۲- ساختار

سیلیکات‌های لایه‌ای شامل رس‌های طبیعی (هکتوریت^۲، ساپونیت^۳، مونت موریلونیت^۴) و رس‌های سنتز شده (مگادیت^۵، لاپونیت^۶، فلوروهکتوریت^۷) است. هر دو نوع شکل لایه‌های سیلیکاتی در تهیه پلیمرهای نانوکامپوزیتی کاربرد دارند. هکتوریت هم به صورت طبیعی و هم مصنوعی یافت می‌شود. از مزایای نانورس‌های مصنوعی در مقایسه با حالت طبیعی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- در حالت مصنوعی فاصله‌ها و اندازه حفرات موجود (فضای بین صفحات) در رس قابل کنترل است [۵].
- ۲- میزان خلوص نانورس مصنوعی در مقایسه به حالت طبیعی بسیار بیشتر است.
- ۳- قابلیت تکثیر و تولید مجدد را در حالت مصنوعی به راحتی می‌توان

⁸ Toyota

⁹ Kaolin

¹⁰ Kaolinite

¹¹ Dickite

¹² Nacrite

¹³ Halloysite

¹⁴ Smectite

¹⁵ Angstrom

¹⁶ Gallery

¹ Polymer-Clay

² Hectorite

³ Saponite

⁴ Montmorillonite (MMT)

⁵ Magadiite

⁶ Laponite

⁷ Fluorohectorite

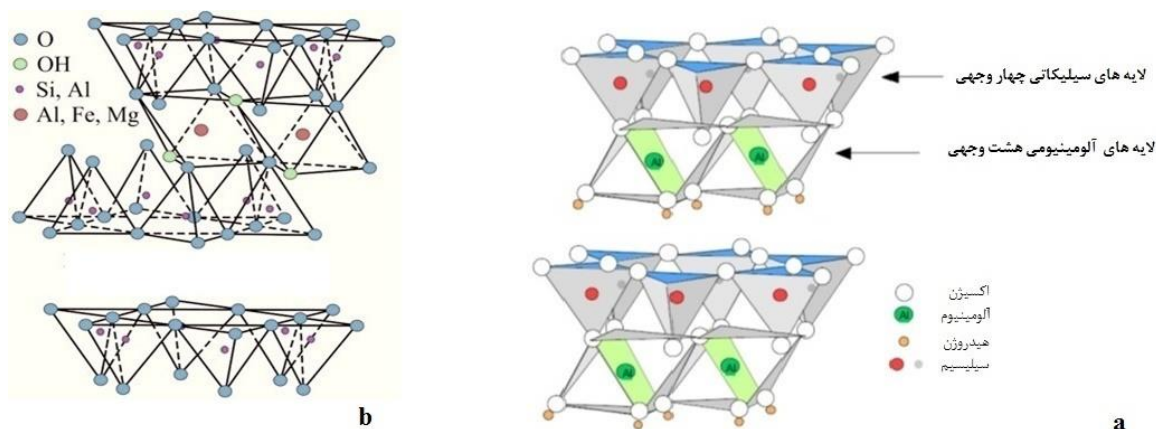
قطبیت، خواص آب‌گریزی، اسیدی بودن و همچنین مقدار اصلاح‌کننده آلی در لایه‌های سیلیکاتی اصلاح شده دارد [۱۴]. زنجیره‌های بلند نمک آلکاید آمونیم برای انجام این تبادل یونی کاربرد زیادی دارند، زیرا آنها فاصله بین لایه‌های رس را افزایش داده و در نتیجه به پخش شدن همگن خاک رس در ساختار پلیمر کمک می‌کنند [۹، ۴]. در شکل ۲ به صورت قطبی داشته باشد می‌توان برای اصلاح سطحی از گروه‌های هیدروکسیل یا کربوکسیل نیز استفاده کرد [۴].

استفاده از اصلاح‌کننده‌های آلی که در اکثر مواقع یون‌های آلکاید آمونیم هستند، باعث ایجاد زنجیره‌های آویزانی می‌شود که ممکن است باعث کاهش درجه بلوری شدن، کاهش پیوندهای متقابل در پوشش و همچنین چسبندگی سطحی شوند. ساختار، گروه عاملی، سازگاری، میزان واکنش‌پذیری و قطبیت اصلاح‌کننده، در خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت بسیار موثر است، در نتیجه انتخاب مناسب و درست اصلاح‌کننده تأثیر به‌سزایی در خواص پلیمر دارد [۱۱].

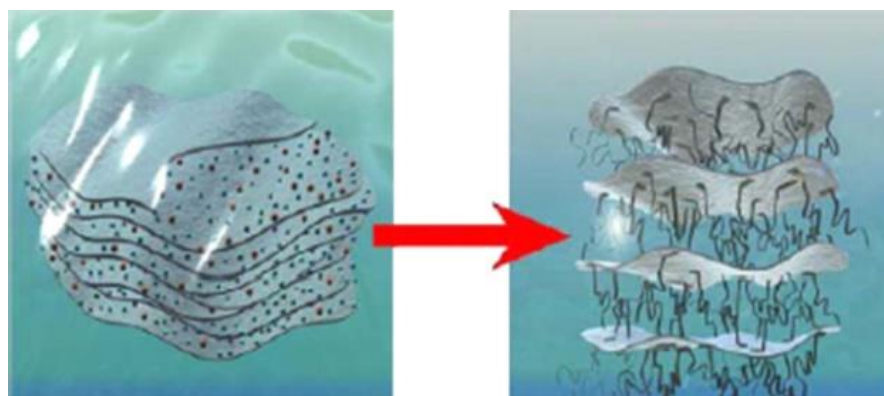
همچنین Mg^{2+} بجای Al^{3+} در صفحات هشت‌وجهی جزء رایج‌ترین جایجایی‌هاست [۱۳]. لایه‌های سیلیکاتی معمولاً بین ۰/۲۵ تا ۰/۹ بار منفی دارند. این لایه‌ها به وسیله میانگین بار سطحی که ظرفیت تبادل یونی^۱ نامیده می‌شود از هم متمایز می‌شوند و معمولاً برحسب $100\text{ gr}/\text{meq}$ بیان می‌شود. این بار ثابت نیست و از لایه‌ای به لایه دیگر تغییر می‌کند، در نتیجه یک مقدار میانگین را برای کل بلور در نظر می‌گیرند. بار منفی ایجاد شده با نشست فلزات قلیایی و قلیایی خاکی در فضای گالری خنثی می‌شود. اکثر مواد معدنی سطح انرژی آب‌دوستی زیادی دارند، در نتیجه با پلیمرهای آب‌گریز سازگاری خوبی ندارند. یک تبادل یونی بین کاتیون‌های آلی با کاتیون‌های معدنی خاک رس باعث ایجاد خواص چربی‌دوستی و آب‌گریزی در خاک رس می‌شود و همچنین انرژی سطحی خاک رس را کاهش می‌دهد. در واقع خواص تقویت‌کنندگی لایه‌های سیلیکاتی در بستر پلیمر وابستگی زیادی به اندازه، میزان

¹ Cation exchange capacity (CEC)

² Miliequivalentes

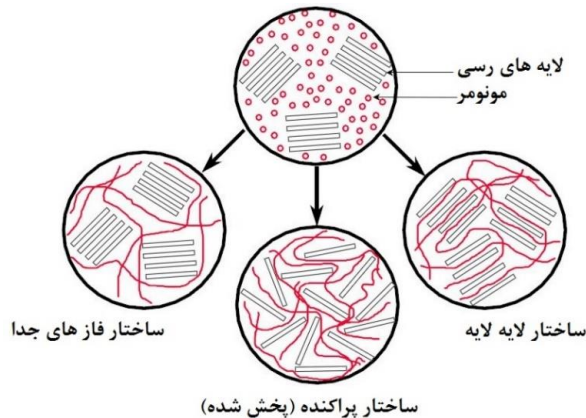


شکل ۱- ۱ ساختار رس (کائولینیت) متشکل از لایه‌های سیلیکاتی و آلومینیومی b ساختار سیلیکات لایه‌ای ۲:۱ (مونت موریلونیت) [۱۸].



شکل ۲- فرآیند تبادل یونی، یون‌های معدنی (سدیم، کلسیم) جای خود را به یون‌های حجیم آلی (آمونیم و غیره) می‌دهد [۱۰].

همگن و یکنواخت در بستر پلیمری توزیع شده باشند این ساختار ایجاد می‌شود. در این ساختار برهم‌کنش لایه‌های رس و پلیمر به حداکثر رسیده و تغییرات مشهودی در خواص فیزیکی و مکانیکی پلیمر ایجاد می‌شود. به همین دلیل این ساختار از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۷].



شکل ۳- انواع ساختارهای ایده‌آل کامپوزیت‌های پلیمر- نانو رس [۱۵].

همان‌طور که مشخص است ساختار نانوکامپوزیت به ترتیب و نحوه چیدمان نانوذرات بسیار حساس است. در این بین نسبت طول به عرض و یا نسبت ابعاد ذره^۵ نیز بسیار مهم است، زیرا نسبت طول به عرض بالا در واقع بیانگر پخش خوب نانوذرات می‌باشد^۶ و همچنین نسبت طول به عرض کوچک بیانگر این است که عمل اختلاط به‌خوبی انجام نگرفته است و صفحات رس به‌خوبی جدا نشده‌اند [۴].

⁵ Aspect ratio

⁶ Well-exfoliated structure

۳- برهم‌کنش بین لایه‌های سیلیکاتی و پلیمرها^۱

شکل و اندازه نانوذرات و نحوه برهم‌کنش آنها با پلیمر بسیار با اهمیت است، زیرا خواص نهایی نانوکامپوزیت به آنها وابسته است. هر ترکیب فیزیکی پلیمر و لایه‌های سیلیکاتی (ترکیب هر ماده معدنی در ماده آلی دیگر) لزوماً به تشکیل نانوکامپوزیت نمی‌انجامد و معمولاً در این موارد جدایش فازی صورت می‌گیرد. در سیستم‌های غیرقابل امتزاج برهم‌کنش ضعیف بین فاز آلی و معدنی باعث ایجاد خواص مکانیکی ضعیف در فاز نهایی می‌شود. از طرف دیگر اگر میزان رس مصرفی از مقداری بیشتر شود که دیگر بستر پلیمری قادر به جا دادن آن در خود و جدایش لایه‌ها و همچنین نفوذ به فضای بین لایه‌ها نباشد، باعث تجمع و بر انباشتگی ذرات سیلیکاتی در یک نقطه می‌شود و در نهایت خواص مطلوب مورد نظر ایجاد نمی‌شود [۱۶، ۱۰]. بسته به اجزای تشکیل‌دهنده ساختار کامپوزیتی (نوع لایه‌های سیلیکاتی، کاتیون‌های آلی و بستر پلیمری) و همچنین با توجه به فعل و انفعالات نیروهای سطحی متقابل بین بستر پلیمری و لایه‌های سیلیکاتی سه نوع کامپوزیت ممکن است ایجاد شود (شکل ۳).

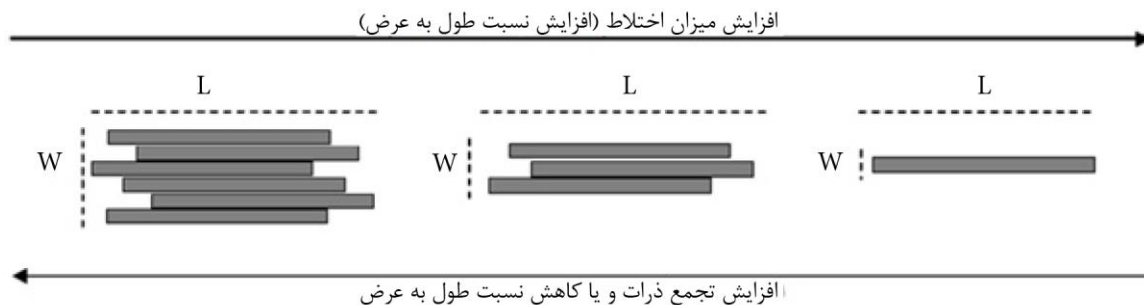
- ۱- ساختار فازهای جدا^۲: در این حالت اگر پلیمر به فضای بین لایه‌ها به‌خوبی نفوذ نکند یک ساختار میکروکامپوزیتی ایجاد می‌شود که در آن امکان جدایش فازی وجود دارد.
- ۲- ساختار لایه‌لایه^۳: این ساختار نانوکامپوزیتی وقتی ایجاد می‌شود که یک یا چند زنجیر پلیمری به درون لایه‌های سیلیکاتی نفوذ کند و ساختار ساندویچی ایجاد شود.
- ۳- ساختار پراکنده یا پخش‌شده^۴: در صورتی که لایه‌های رس به‌طور

¹ Nano composite structures and characterization

² The phase separated composite or conventional composite (tactoid)

³ Intercalated structure

⁴ Exfoliated or delaminated structure



شکل ۴- تأثیر نسبت طول به عرض لایه‌های سیلیکاتی در نحوه پخش آنها [۴].

در مرحله آخر حلال از ترکیب ایجاد شده تبخیر می‌شود (معمولاً به‌وسیله تحت خلأ قرار دادن ترکیب) [۲۱، ۲۲]. روند انجام کار به‌صورت شمایی در شکل ۶ آمده است [۶].

۴-۳- اختلاط به روش مذاب^۴

اختلاط به روش مذاب برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ توسط وایا و همکارانش^۵ گزارش شده است [۶]. این روش متشکل از مخلوط‌کردن یک مذاب ترموپلاستیک با نانورس اصلاح‌شده در دمایی بالاتر از دمای شیشه‌ای شدن پلیمر، می‌باشد. از مزایای این روش عدم وجود حلال است، به همین دلیل از لحاظ زیست‌محیطی مورد تأیید می‌باشد. عامل مهم برای انجام این فرآوری شرایط انجام آزمایش (پروفایل دما، سرعت چرخش هم‌زن و میزان زمان اختلاط) می‌باشد [۲۳]. روند انجام کار به‌صورت شمایی در شکل ۷ آمده است [۶].

۴- روش‌های فراورش نانوکامپوزیت‌ها^۱

۴-۱- پلیمریزاسیون درجا^۲

این روش اولین بار برای ایجاد ساختار نانوکامپوزیتی پلیمر-نانورس بر پایه رزین پلی آمید^۶ گزارش شد [۶]. در این روش نانورس اصلاح‌شده توسط مونومر مورد نفوذ فرار گرفته و متورم می‌شود. زمان مورد نیاز برای متورم شدن نانو رس در مونومر به میزان قطبیت مونومر میزان آماده‌سازی سطحی خاک رس و همچنین دمای تورم بستگی دارد. بعد از متورم شدن رس، با استفاده از عامل پخت یا پراکسیدها و یا افزایش دما (بسته به نوع رزین پلیمری) فرآیند پلیمریزاسیون انجام می‌شود [۲۱-۱۸]. روند انجام کار به‌صورت شمایی در شکل ۵ آورده شده است [۶].

۴-۲- روش حلالی^۳

حلال‌های قطبی می‌توانند در سنتز پلیمر- نانورس برای ایجاد ساختار نانوکامپوزیتی مورد استفاده قرار گیرند. روش کار تا حد زیادی شبیه پلیمریزاسیون درجاست. در این روش ذرات رس اصلاح‌شده در یک حلال قطبی پخش می‌شود و در آن متورم می‌شوند، سپس پلیمر به آن اضافه می‌شود و زنجیره‌های پلیمری در بین رس‌های متورم شده قرار می‌گیرند.

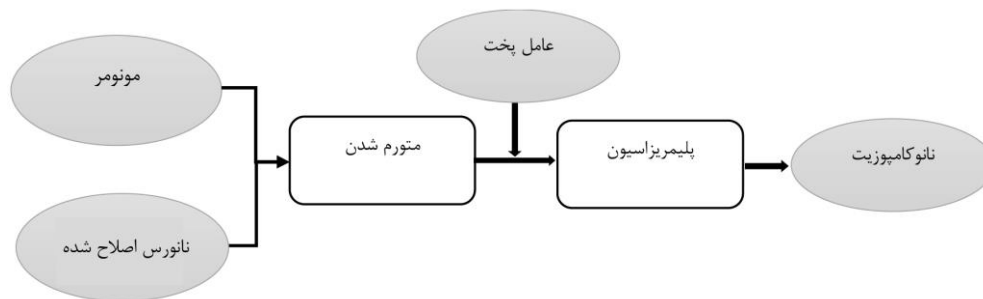
¹ Synthesis of Polymer-Clay Nanocomposites

² In-Situ Polymerization

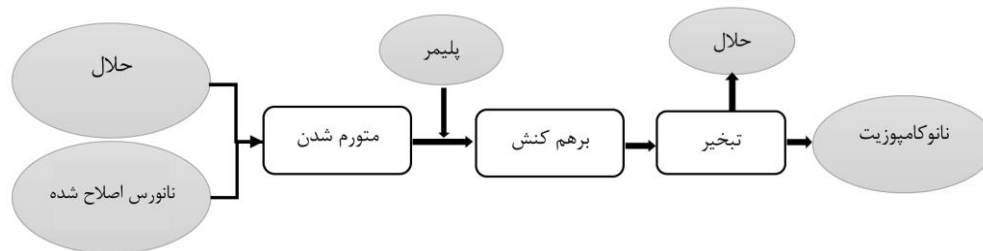
³ Solution

⁴ Melt intercalation

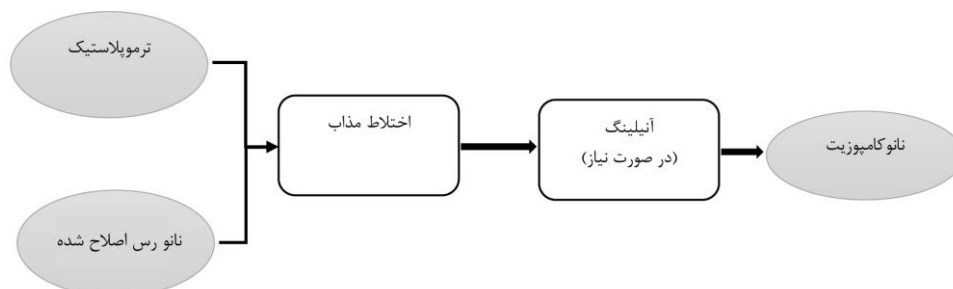
⁵ Vaia et al



شکل ۵- شمای روش پلیمریزاسیون درجا [۶].



شکل ۶- شمای روش حلالی [۶].



شکل ۷- معرفی روش مذاب [۶].

۵- خواص نانوکامپوزیت‌های سیلیکاتی

وجود لایه‌های سیلیکاتی به میزان کم (کمتر از ۵٪) در ساختار پلیمر باعث بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی می‌شود [۲۷-۲۴]. این بهبود خواص شامل افزایش مدول کششی، استحکام، مقاومت حرارتی و همچنین کاهش نفوذپذیری گازها و کاهش قابلیت اشتعال در پلیمرها می‌شود. در واقع ذرات نانورس از راه‌های مختلف می‌تواند باعث بهبود خواص مکانیکی شوند.

- استحکام و سختی ذاتی موجود در ذرات نانورس باعث افزایش مقاومت و استحکام نانوکامپوزیت می‌شود.
- صفحات نانوخاک رس در پلیمر می‌توانند با مسدود کردن راه ترک‌ها، از پیشروی و انتشار آنها جلوگیری کنند و در نهایت مانع شکست پلیمر شوند.

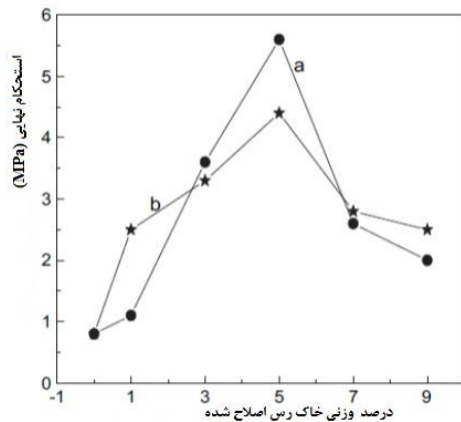
تغییر در ساختار زنجیره‌های مولکولی پلیمر در نزدیک سطح صفحات نانورس باعث تغییر خواص مکانیکی نسبت به پلیمر خالص می‌شود. در این بین باید توجه داشت که بهبود در خواص مکانیکی پلیمر مستقیماً به نحوه پخش ذرات خاک رس در بستر پلیمر بستگی دارد. اگر ذرات نانورس به خوبی پخش نشوند ممکن است، تأثیر نامطلوبی در خواص فیزیکی و مکانیکی پلیمر ایجاد کنند. در ادامه برخی خواص فیزیکی، مکانیکی نانوکامپوزیت‌های سیلیکاتی بررسی خواهند شد [۲۸، ۱۱].

۵-۱- خواص کششی^۱

وجود نانورس در ساختار پلیمر باعث بهبود چشمگیری در خواص کششی ماده می‌شود [۳۱-۲۹]. تأثیر میزان مونت موریلونیت در ساختار نانوکامپوزیت پلی‌یورتان- مونت موریلونیت در شکل ۸ آمده است. در این آزمایش از دو نوع مونت موریلونیت اصلاح‌شده MO-MMT^۲ و C16-MMT^۳ استفاده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص است با افزایش خاک رس اصلاح‌شده تا ۵٪، استحکام نهایی نانوکامپوزیت به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. به‌طوری‌که استحکام نهایی برای MO-MMT به اندازه ۶۰٪ و برای C16-MMT تا ۴۵٪ نسبت به حالت پلیمر خالص (بدون رس اصلاح‌شده) افزایش یافته است [۳۲].

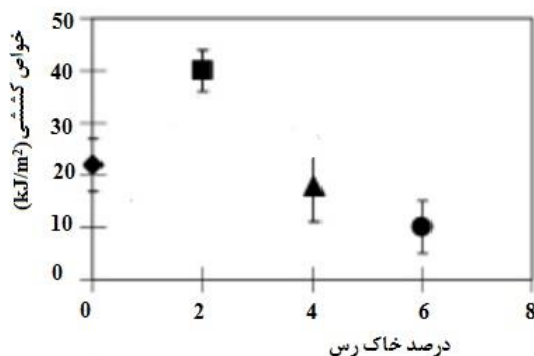
میزان بهبود خواص مکانیکی به‌طور مستقیم وابسته به طول ذرات رس پخش‌شده در ساختار است [۳۲، ۳۳]. هاگمن و هالاوی^۴ نیز در سال ۲۰۰۵ خواص مکانیکی اپوکسی تقویت‌شده با رس را بررسی کردند [۳۴] و همچنین در بررسی دیگری بر روی نانوکامپوزیت اپوکسی- نانورس، بیکر و همکارانش^۵ نشان دادند با اضافه کردن مقادیر کم رس به ساختار مقاومت کششی و خواص مکانیکی کامپوزیت بهبود می‌یابد [۳۵]. در بعضی گزارش‌ها افزودن نانورس باعث کاهش استحکام کششی نهایی و

همچنین میزان کرنش^۶ شده است که دلیل آن نیز برهم‌کنش نامناسب رس با پلیمر خالص بوده است [۳۶].



شکل ۸- تأثیر نانورس اصلاح‌شده روی استحکام کششی (a) PU/MO-MMT، (b) PU/C16-MMT [۳۲].

پارک و جانا^۷ خواص مکانیکی پوشش پلی متیل متاکریلیک- اپوکسی (نسبت ۸۰ به ۲۰) را در حضور درصد‌های مختلف نانورس مطالعه کردند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با افزایش نانورس تا ۲٪ میزان خواص کششی نانوکامپوزیت به مقدار قابل توجهی نسبت به پوشش بدون پلیمر افزایش می‌یابد و به حد بهینه خود می‌رسد. در مقادیر بالاتر از ۲٪ نانورس خواص کششی به شدت کاهش می‌یابد، زیرا در این مقادیر نانورس به خوبی پخش نمی‌شود و در نقاطی تجمع می‌کند که همین تجمع ذرات رسی عامل تمرکز تنش و ایجاد فازی ناهمگن در سطح پوشش نانوکامپوزیتی می‌شود و باعث کاهش چشمگیر خواص مکانیکی می‌شود. روند تغییر خواص کششی نانوکامپوزیت پلی متیل متاکریلیک- اپوکسی- نانورس برحسب میزان نانورس موجود در ساختار در شکل ۹ آمده است [۳۷].



شکل ۹- تأثیر رس اصلاح‌شده در خواص کششی پوشش پلی متیل متاکریلیک- اپوکسی [۳۷].

¹ Tensile properties

² Methylene-bis-ortho-chloroaniline-MMT

³ Cetyltrimethylammonium-bromide (CTAB)- MMT

⁴ Hackman, I., and L. Hollaway

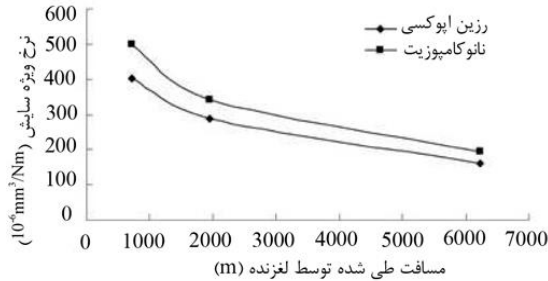
⁵ Ole Becker et al

⁶ Strain

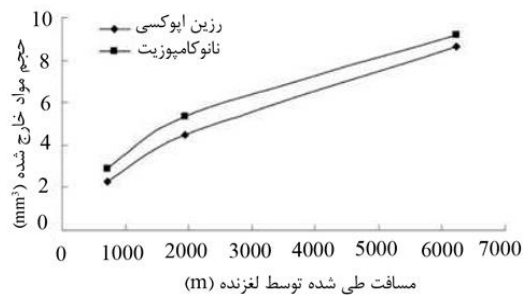
⁷ Park, J. H., & Jana, S. C

۲-۵- خواص ضدسایش^۱

زیادی به پخش شدن بهتر نانورس در ساختار می‌کنند. روک‌ها و یوپرهی^۸ نیز به بررسی خواص ضدسایش اپوکسی- خاک رس در حضور ۳- آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان^۹ پرداختند. نتایج حاصل از بررسی روک‌ها در شکل ۱۲ آمده است. این نتایج بهبود چشمگیر خواص ضدسایش (در سرعت‌های بالای 0.6 m.S^{-1} برای لغزنده) را در حضور اصلاح‌کننده سطحی ۳- آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان نشان می‌دهد [۴۱].



a

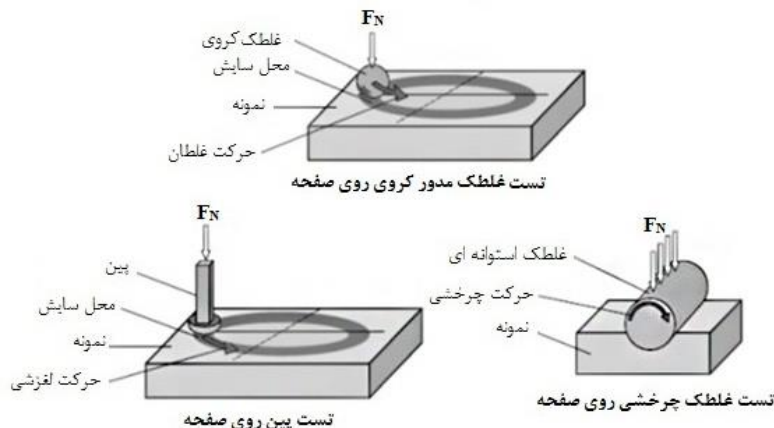


b

شکل ۱۰- ۱۰- نرخ ویژه سایش برای اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی- نانورس، b حجم مواد خارج شده برای اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی- نانورس [۴۰].

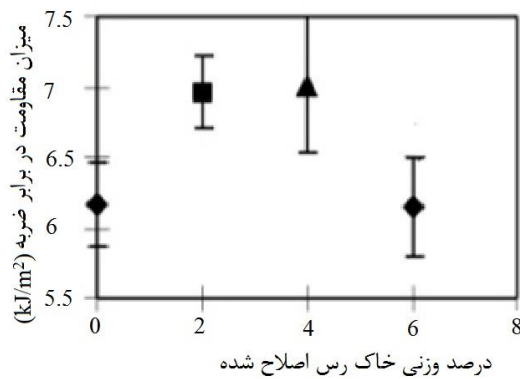
در بسیاری از مواقع خواص سایشی کامپوزیت‌ها و پوشش‌های بر پایه پلیمر از اهمیت خاصی برخوردار می‌شود. وجود نانورس در ساختار پلیمر می‌تواند باعث بهبود خواص سایشی کامپوزیت پلیمری حاصله نسبت به حالت پلیمر تنها شود. نحوه پخش لایه‌های سیلیکاتی در ساختار پلیمر و نوع جهت‌گیری آنها در ساختار ارتباط مستقیمی با بهبود خواص سایشی آنها دارد. به جز عوامل بالا نوع آزمایش سایش نیز مهم است. برای بررسی خواص سایشی می‌توان از آزمون‌های پین روی صفحه^۲، غلطک مدور کروی روی صفحه^۳ و یا غلطک روی صفحه^۴ استفاده کرد. در این آزمون‌ها لغزنده^۵ روی پلیمر با نیرویی مشخص حرکت کرده و باعث ایجاد لهیدگی و چروک روی پلیمر می‌شود. نحوه انجام این آزمون‌ها در شکل ۱۰ آمده است [۳۸]. استفاده از نانورس در ساختار باعث کاهش میزان این لهیدگی‌ها در آزمون غلطک مدور کروی روی صفحه شده است [۳۹]. در مواردی نیز استفاده از نانورس در ساختار باعث کاهش خواص ضدسایش شده است. اگر نانورس به‌خوبی در ساختار پلیمری پخش نشود، باعث ایجاد دو فاز مجزا در کامپوزیت می‌شود، این فازهای مجزا چسبندگی زیادی در کنار هم از خود نشان نمی‌دهند، در نتیجه خواص ضدسایش کاهش می‌یابد [۴۰، ۴۱]. ژو و همکارانش^۶ نشان دادند که خواص ضدسایش رزین اپوکسی در حضور ۵٪ خاک رس کاهش می‌یابد. شکل ۱۱.a آمده است. همچنین نمودار حجم مواد خارج شده از پلیمر نیز در شکل ۱۱.b آمده است [۴۰]. برای بهبود این پیامد معمولاً از اصلاح‌کننده‌های سطح^۷ به‌صورت افزودنی استفاده می‌کنند. این مواد باعث بهبود برهم‌کنش بین پلیمر و خاک رس شده و در واقع کمک

- 1 Anti-wear properties
- 2 Pin-on-plate (POP)
- 3 Orbital rolling ball-on-plate (orbital-RBOP)
- 4 Roller on plate (ROP)
- 5 Slider
- 6 Zhu, Hong Gang, et al
- 7 Surface-modification

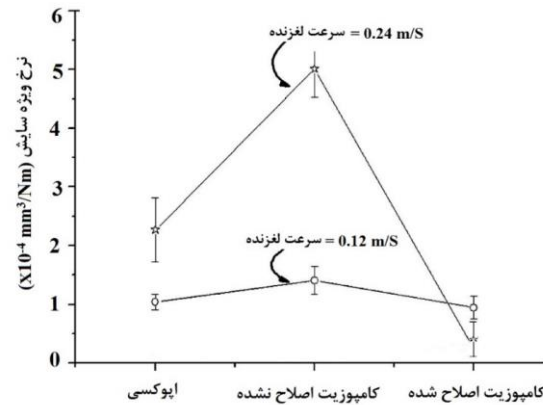


شکل ۱۱- شمایی آزمون‌های سایش در پلیمرها با استفاده از آزمون‌های پین روی صفحه، غلطک مدور کروی روی صفحه و غلطک روی صفحه [۳۹].

^۸ Ha, Sung Rok, and Kyong Yop Rhee
^۹ 3-Aminopropyltriethoxysilane



شکل ۱۳- تأثیر رس اصلاح شده در مقاومت به ضربه پوشش پلی متیل متا آکرلیک- اپوکسی [۳۷].



شکل ۱۲- مقایسه نرخ ویزه سایش برای رزین اپوکسی، کامپوزیت اپوکسی- خاک رس اصلاح نشده و کامپوزیت اپوکسی- خاک رس اصلاح شده [۴۱].

۴-۵- خواص حرارتی^۳

وجود نانورس در ساختار باعث ایجاد خواص خوب حرارتی نیز می شود [۴۵، ۴۶]. عوامل فیزیکی و شیمیایی زیادی در سازوکار حرارتی نانوکامپوزیت های سیلیکاتی دخیل هستند که از مهم ترین سازوکارهای فیزیکی می توان به خواص سدشوندگی اشاره کرد. صفحات سیلیکاتی به عنوان یک سد فیزیکی قوی در مقابل احتراق عمل می کند و باعث حفاظت سطح در برابر گرما می شود و همچنین با توجه به نتایج روش توزین حرارتی^۴ باعث کاهش نرخ خروج مواد فرار قابل اشتعال از پلیمر در فرآیند تخریب پلیمری به وسیله حرارت می شوند. نانورس ها به عنوان عایق حرارتی نیز عمل می کنند [۴۷-۴۸]. از سازوکارهای شیمیایی نیز می توان به محدودیت حرکت های مولکولی^۵ و اثر کاتالیزوری نانوخاک رس ها اشاره نمود. محدودیت حرکت های مولکولی یکی از اولین سازوکارهای بهبود خواص حرارتی است. بسیاری از مطالعات کاهش در میزان تحرک زنجیره های پلیمری در گیر با سطح نانورس را تأیید کرده اند که این عمل باعث افزایش دمای انتقال شیشه ای^۶ (T_g) در نانوکامپوزیت می شود. در نتیجه رسیدن به نقطه انتقال شیشه ای در نانوکامپوزیت ها نیازمند دما، حرارت و انرژی فعال سازی بالاتری نسبت به پلیمر معمولی است. از آنجا که تحرک مولکولی عامل اصلی در واکنش پذیری پلیمرهاست، در نتیجه نانوکامپوزیت های سیلیکاتی پایداری حرارتی و شیمیایی بیشتری نسبت به پلیمر خالص دارند [۵۱-۵۵].

الکساندر بلمستین^۷ به بررسی خواص حرارتی لایه های سیلیکاتی در رزین پلی متیل متاکریلیک (PMMA^۴) پرداخت. او با بررسی خواص حرارتی نانوکامپوزیت پلی متیل متاکریلیک با آزمایش توزین حرارتی (TGA) بهبود خواص حرارتی را در حضور رس نشان داد. نتایج روش توزین حرارتی بالاتر رفتن مقاومت در برابر تجزیه حرارتی را در حضور رس نشان می دهند. به طوری که در حضور نانورس دمای تجزیه حرارتی

۳-۵- مقاومت در برابر ضربه^۱

اضافه کردن میزان بسیار کمی نانورس در ساختار باعث بهبود مقاومت در برابر ضربه نانوکامپوزیت پلیمر- نانورس می شود. ولی با گذر از این مقدار به دلیل تجمع لایه های سیلیکاتی در کنار هم در یک نقطه باعث تمرکز تنش در آن نقطه می شود. در نتیجه احتمال شروع ترک از آن نقطه به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. میزان بهینه رس در ساختار برای افزایش مقاومت در برابر ضربه در پلیمرهای مختلف متفاوت است، ولی در اکثر تحقیقات این مقدار کمتر از ۳٪ بوده است [۴۲، ۴۴]. برای نمونه در تحقیقاتی که توسط لاندردی و همکارانش^۲ بر روی پوشش های نانوکامپوزیتی آکرلیک- نانورس صورت گرفت مشاهده شد که اگر نانورس ها به خوبی در بستر پخش شوند مقاومت به سایش پوشش افزایش می یابد. در مقادیر بالای ۳٪ مشاهده شد که میزان مقاومت به ضربه به شدت کاهش می یابد. باید توجه داشت که دما در میزان مقاومت به ضربه پارامتر بسیار مهمی است. همچنین نحوه اختلاط و پخش شدن رس در ساختار نیز در مقاومت به ضربه کامپوزیت تأثیر به سزایی دارد [۴۴]. اگر خاک رس به خوبی در پلیمر پخش نشود (ساختار کامپوزیتی) و ساختار نانوکامپوزیت ایجاد نشود، مقاومت به ضربه آن به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد. همچنین نتایج حاصل از بررسی مقاومت به ضربه پوشش پلی متیل متاکریلیک- اپوکسی در حضور مقادیر مختلف نانورس (۲، ۴، ۶٪) در شکل ۱۳ آمده است. در این بررسی نیز مقاومت به ضربه در حضور مقادیر کم نانورس افزایش یافته است [۳۷].

¹ Impact resistant

² Véronic Landry, et al

³ Thermal properties

⁴ Thermo gravimetric Analysis (TGA)

⁵ Restriction of molecular motions

⁶ Glass transition temperature (T_g)

⁷ Blumstein, Alexander

نشان می‌دهند. از این‌رو، می‌توان از آنها به‌عنوان سپر گرمایی فداشونده استفاده کرد [۶۰-۵۸]. وجود نانورس در بعضی از پلیمرها باعث تغییر در واکنش‌های منجر به تجزیه حرارتی پلیمر می‌شود و با ایجاد سریع‌تر زغال بر روی سطح از تجزیه بیشتر پلیمر جلوگیری می‌کند. همچنین کاتیون‌های آهن و آلومینیم موجود در خاک رس در پایداری حرارتی پلیمر موثرند [۶۱]. در واقع وجود فلز در پلیمر می‌تواند با رادیکال‌های پلیمری واکنش دهد (مدل گیرنده رادیکالی^۴) و تجزیه آنها بر اثر حرارت را به تاخیر بیندازد. تحقیقات نشان می‌دهد که تأثیر کاتیون‌های آهن موجود در خاک رس نسبت به کاتیون‌های آلومینیم بیشتر است [۶۲]. علاوه بر این جذب فیزیکی مولکول‌های کوچک (مانند HCl) بر روی صفحات خاک رس نیز در پایداری حرارتی نانوکامپوزیت‌های سیلیکاتی موثرند.

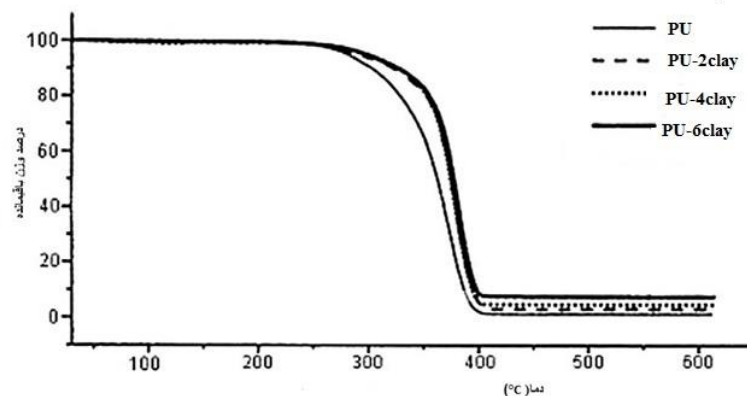
خواص ضدآتش‌گیری و ضدشعله لایه‌های سیلیکاتی برای اولین بار به‌صورت تخصصی در سال ۱۹۷۶ در ژاپن منتشر شد. بعد از آن به دلیل اهمیت زیاد کاهش اشتعال‌پذیری نانوکامپوزیت‌ها تحقیقات زیادی بر روی خواص ضدحریق نانوکامپوزیت‌های سیلیکاتی تاکنون انجام گرفته است. بر اساس مقالات برای ایجاد خواص ضد حریق مونت موریلونیت (MMT) باید به‌صورت نانو پخش شده باشد. وجود نانو‌خاک رس در ساختار باعث ایجاد زغال^۵ می‌شود که به‌عنوان یک سد حفاظتی عمل می‌کند و مانع انتقال جرم و انرژی از پلیمر می‌شود. استفاده از خاک رس در کنار نانو تیوب‌های کربنی می‌تواند ایجاد اثر هم‌افزایی^۶ کند [۶۳، ۶۴].

به‌اندازه ۴۰ تا ۵۰°C، بالاتر رفته است. وی بیان کرد که گیر افتادن زنجیره‌های پلیمر در فضای گالری نیز در افزایش مقاومت حرارتی مهم است [۵۱]. شکل ۱۴ بیانگر آزمون توزین حرارتی بر روی پلی یورتان است که توسط چن یانگ^۱ و همکارانش انجام شد. همان‌طور که مشخص است نانوکامپوزیت پلی یورتان - نانورس پایداری حرارتی بیشتری در مقایسه با پلی یورتان تنها دارد [۵۶]. شرایط حاکم و نوع اصلاح‌کننده سطحی رس نیز در خواص حرارتی نانوکامپوزیت موثر است. با اضافه کردن مقدار بسیار کمی رس (حتی ۱/۰٪) پایداری حرارتی بهبود زیادی می‌یابد [۵۷].

۵-۵- اثر بازدارنده آتش^۲

یکی از مشخصات بسیار مهم مواد از نظر خطر حریق، میزان حرارت‌زایی آنها در هنگام اشتعال است. یکی از دستگاه‌های پیشرفته برای اندازه‌گیری این مشخصه، دستگاه گرماسنج مخروطی^۳ است که بر اساس تئوری مصرف اکسیژن ساخته شده است. زمان افروزش، سرعت آزاد شدن حرارت، غلظت دود و درصد گازهای کربن مونوکسید و کربن دی‌اکسید حاصل از احتراق، پارامترهای مهم در بررسی خواص بازدارندگی اشتعال می‌باشند.

فدا شدن عایق گرمایی، روشی مطمئن و کاربردی در حفاظت از سازه‌ها در برابر آثار مخرب گرمایش با دمای زیاد محسوب می‌شود. در این بین استفاده از عایق‌های گرمایی غیرفعال، به‌خصوص کامپوزیت‌های فدا شونده زغال‌گذار نسبت به سایر روش‌ها موثرتر و مقرون‌به‌صرفه‌تر است. مهم‌ترین محدودیت این کامپوزیت‌ها، سرعت نسبتاً زیاد خوردگی ناشی از جریان گاز داغ و کم بودن مقاومت مکانیکی زغال تشکیل شده ناشی از فدا شدن است. در واقع زغال به‌راحتی دچار خوردگی مکانیکی می‌شود و پس‌روی سطح عایق سریع‌تر انجام می‌گیرد. تحقیقات نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت‌های پلیمر - خاک رس در برابر شعله مقاومت زیادی از خود



شکل ۱۴ - نمودار توزین حرارتی (TGA) برای پلی یورتان و نانوکامپوزیت‌های آن [۵۶].

¹ Chen-Yang, et al

² Fire retardant properties

³ Cone calorimeter

⁴ Radical trapping model

⁵ Char

⁶ Synergistic

۱-۶-۵- خواص بلوری پلیمر

سازوکار نفوذ مولکول‌های گازی کوچک به داخل پلیمر به خواص ساختاری و پیوندهای بین مولکولی وابسته است. در هنگام اضافه کردن رس به پلیمر تغییرات ایجاد شده در پیوندهای موجود در ساختار پلیمر بسیار مهم است. واضح است که اگر ساختار آمورف باشد به دلیل حرکت زنجیره‌های پلیمری و همچنین خالی بودن حجم بیشتری از فضا، گازها امکان نفوذ بیشتری به داخل دارند، در مقابل ساختار بلوری، مانند سدی محکم در برابر نفوذ گازها عمل می‌کند و باعث کاهش حرکت زنجیره‌های پلیمری و همچنین افزایش مسیر حرکت مشخصه جسم می‌گردد [۷۰]. نحوه تأثیر صفحات سیلیکاتی در این خواص به صورت واضح مشخص نیست و به نحوه عمل‌آوری و همچنین نوع ماده دارد. برای مثال در مطالعاتی که روی کامپوزیت پلی آمید- رس انجام شد بعضی از مقالات عدم تغییر فاز بلوری در ترکیب پلی آمید- رس نسبت به پلیمر تنها را نشان می‌دهند [۷۱] و مقالات دیگری افزایش فاز بلوری را نشان می‌دهند (با شروع شدن دانه‌بندی از نانوذرات وارد شده درجه بلوری افزایش می‌یابد.) [۷۲, ۷۳]. در بعضی مقالات نیز کاهش فاز بلوری نسبت به پلیمر اولیه (به دلیل فشرده‌سازی و یا عملیات شکل‌دهی) مشاهده شده است [۷۴]. پس به صورت کلی وجود نانورس می‌تواند باعث تغییر فاز بلوری پلیمر شود [۷۵-۷۰].

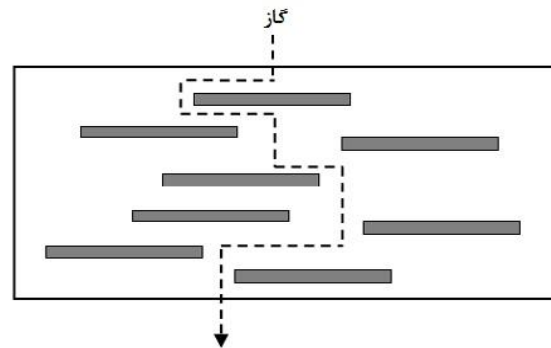
۲-۶-۵- نحوه فراورش و پردازش^۲

نحوه پردازش، مواد اولیه و شرایط تهیه پوشش در ویژگی‌های عملکردی پوشش تأثیر بسزایی دارد و آگاهی از شرایط بهینه انجام کار بسیار مهم است [۷۶]. لای^۳ و همکارانش اثر خاک رس را روی پلی آکرلیک آبی بررسی کردند و نتایج حاصل از بررسی میزان نفوذ گازهای O_2 , H_2O را در نانوکامپوزیت به دست آمده در شکل ۱۶ آمده است [۷۷]. میزان نفوذ آب به داخل پوشش نانوکامپوزیتی اپوکسی- نانورس توسط باقرزاده و مهدوی^۴ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این تحقیق که در جدول ۱ آمده است، کاهش چشمگیر جذب آب به داخل پوشش را با افزایش نانورس تا ۵٪ نشان می‌دهد [۷۸].

امروزه در صنعت افزودنی‌های زیادی جهت بهبود پایداری حرارتی و افزایش مقاومت در برابر سوختن، در نانوکامپوزیت‌ها به کار می‌رود. باید توجه داشت برای بررسی اثر نانورس در خواص حرارتی این نانوکامپوزیت‌ها علاوه بر بررسی برهم‌کنش بین نانورس و پلیمر باید برهم‌کنش‌های بین نانورس و افزودنی‌های دیگر نیز بررسی گردد [۶۵].

۶-۵- خواص سدکنندگی در برابر نفوذ گازها در نانوکامپوزیت‌های پلیمر-نانورس

افزایش خواص سدکنندگی در برابر نفوذ گازها در حضور نانورس عموماً به افزایش مسیر حرکت (اثر پر پیچ و خم شدن مسیر^۱) به دلیل وجود نانورس در پلیمر نسبت داده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، در حضور نانورس مولکول‌های گاز برای نفوذ ناچارند که تغییر مسیر دهند و به نیروی بسیار بیشتری برای نفوذ نیاز دارند [۴]. بنابراین مسیر نفوذ طولانی‌تر می‌شود و نفوذ گاز با محدودیت شدیدی همراه می‌شود، در نتیجه شار گاز نفوذی به شدت کاهش می‌یابد. پخش شدن کامل باعث به حداکثر رسیدن مسیر حرکت و بهبود خواص سدکنندگی می‌شود [۶۸-۶۶]. در آنالیز خواص سدکنندگی نانوکامپوزیت‌های سیلیکاتی هم پلیمر و هم لایه‌های سیلیکاتی نقش مهمی بر عهده دارند. درجه بلوری یا بی‌شکل بودن و میزان قطبیت پلیمر از عوامل مهم در نفوذپذیری نانوکامپوزیت می‌باشد. وجود نانورس در ساختار می‌تواند باعث تغییر خواص یادشده در پلیمر شود [۶۹].



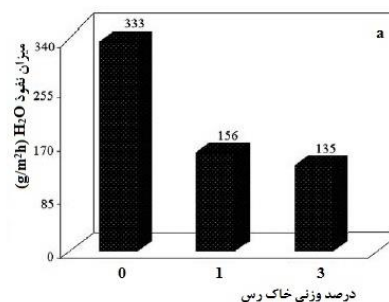
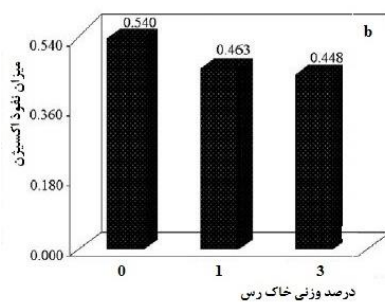
شکل ۱۵- مسیر پر پیچ و خم (غیرمستقیم) نفوذ به نانوکامپوزیت به دلیل وجود نانورس پراکنده شده در داخل بستر [۴].

¹ Tortuous path

² Synthesis and processing conditions

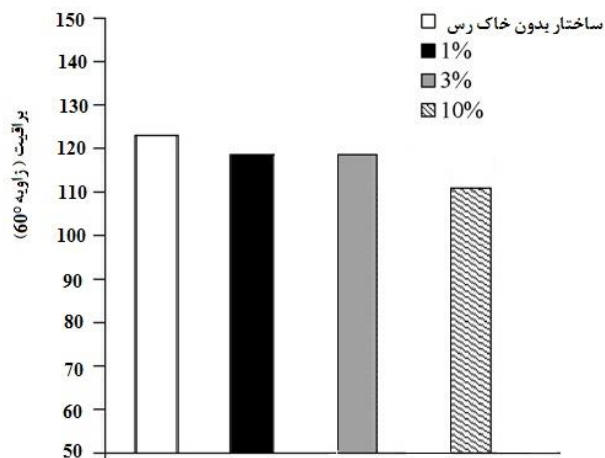
³ Lai, Mei-Chun, et al

⁴ M. R. Bagherzadeh, F. Mahdavi



شکل ۱۶- بررسی میزان نفوذ گازهای H_2O و O_2 در پوشش نانوکامپوزیتی پلی آکرلیک- نانورس [۷۷].

مناسب، در جدایش کامل صفحات خاک رس و لایه‌لایه شدن آنها و در نهایت پخش بهتر نانورس‌ها موثر است [۸۰].



شکل ۱۷- میزان براقیت در پوشش‌های نانوکامپوزیتی آکریلات- نانورس [۴۴].

۷- نتیجه‌گیری

نانوکامپوزیت‌ها به دلیل پخش بهتر و در بر گرفتن کل محیط پلیمر خواص فیزیکی و مکانیکی ماده را بهبود زیادی می‌بخشند. در بین سیلیکات‌های لایه‌ای مونت موریلونیت به دلیل چگالی بار مناسب و ساختار صفحه‌ای شکل و همچنین لایه‌لایه شدن آن در پلیمر از همه معروف‌تر و پرکاربردتر است. نوع اصلاح‌کننده سطحی در نانورس، نوع پلیمر، نحوه برهم‌کنش بین پلیمر- نانورس، شرایط فراروش و مقدار نانورس مورد استفاده در ساختار، همگی در ویژگی‌های کامپوزیت ایجاد شده موثرند. بررسی‌های انجام شده عملکرد مناسب‌تر پوشش‌های پلیمری در حضور مقادیر کم نانورس (معمولاً کمتر از ۵٪) را نشان می‌دهند. استفاده نانورس بیشتر از میزان بهینه آن در ترکیب باعث کاهش خواص مکانیکی ماده می‌شود. یکی از مهم‌ترین دلایل ایجاد این حالت پخش نشدن خوب رس در ساختار و همچنین برهم‌کنش ناقص پلیمر- نانورس است. میزان بهبود خواص مکانیکی به‌طور مستقیم به طول نانورس پخش شده در ساختار بستگی دارد. در مواردی که برهم‌کنش بین پلیمر- نانورس به‌خوبی صورت گرفته و ساختار نانوکامپوزیتی ایجاد شده باشد خواص ضدسایش، حرارتی، استحکام کششی و خواص سدکنندگی در برابر نفوذ مواد خورنده، به میزان قابل توجهی بهبود یافته است. در واقع لایه‌های سیلیکاتی به‌عنوان یک سد فیزیکی قوی در برابر حرارت، ورود و خروج مواد و یا گازها عمل می‌کنند و در نهایت باعث محافظت از سطح می‌شوند. علاوه بر مزایای یاد شده، ویژگی‌های ساختاری نانورس‌ها همانند توانایی باز شدن و لایه‌لایه شدن صفحات نانورس و همچنین توانایی حفظ شیمی سطح نانورس در طی واکنش‌های انجام شده (در طی مراحل تبادل یونی، اصلاح سطحی و پخش شدن در بستر پلیمری) باعث شده که توجه زیادی به نانوکامپوزیت‌های پلیمر- نانورس در صنایع مختلف شود. امروزه از نانورس‌ها در بسیاری از صنایع همانند خودروسازی و هوافضا استفاده

جدول ۱- میزان جذب آب برای نانوکامپوزیت حاوی مقادیر مختلف نانورس اصلاح شده بعد از ۵۰۰ ساعت آزمون مه نمکی [۷۸].

میزان جذب آب	درصد نانورس
۱۴۰	۰
۳۹	۱
۳/۲	۳
۱/۱	۵

۶- خواص نوری

خواص نوری^۱ با آزمایش‌هایی همچون آزمون براقیت^۲، آزمون رنگ‌سنجی^۳، آزمون شفافیت^۴ و یا آزمون کدروی رنگ^۵ (مه‌آلود بودن) مشخص می‌شود. یکی دیگر از ویژگی‌های نانوکامپوزیت‌های پلیمری ایجاد شده با نانورس‌ها خواص خوب نوری آنها است [۴۴، ۷۹]. در کامپوزیت‌های پلیمری معمولی به دلیل پراکندگی زیاد امواج توسط پرکننده‌های (تقویت‌کننده‌های) موجود در محمل، پوشش کدر می‌شود ولی در نانوکامپوزیت‌ها، نانورس اضافه شده به میزان بسیار کمی است (معمولاً کمتر از ۵٪ وزنی) و به‌خوبی در محمل پخش می‌شود. در واقع می‌توان گفت که چون دامنه فازهای تشکیل شده در نانوکامپوزیت‌ها، کوچک‌تر از طول موج نور مرئی است، موج‌ها می‌توانند از پوشش عبور کنند و در نتیجه پوشش شفاف به نظر می‌رسد [۸۰-۸۲]. نتایج حاصل از بررسی صلاح‌الدین^۶ بر روی خواص نوری نانوکامپوزیت اپوکسی- نانورس بهبود بسیار خوب خواص نوری^۷ را در مقایسه با کامپوزیت‌های معمولی نشان داد [۸۰].

نحوه پخش نانورس در بستر پلیمری نیز در میزان براقیت موثر است. اما به‌صورت کلی افزودن خاک رس به رزین باعث کاهش براقیت پوشش می‌شود. نتایج حاصل از بررسی لاندردی و همکارانش بر روی میزان براقیت نانوکامپوزیت‌های آکریلات- خاک رس در شکل ۱۷ آمده است، همان‌طور که مشخص است با افزودن مقادیر کم نانورس، براقیت به میزان کمی کاهش یافته است. با این وجود، پوشش‌ها در محدوده براق قرار گرفته‌اند. نوع هم‌زن و آسیاب مورد استفاده جهت پخش کردن نانورس در بستر پلیمری در میزان براقیت موثر است [۴۴]. آزمون رنگ‌سنجی نیز نشان داد که با افزودن نانورس به آکریلات، رنگ به زردی^۸ متمایل می‌شود اما میزان تغییرات رنگ برای نمونه‌های ۱ و ۳ درصد خاک رس با چشم غیرمسلح قابل تشخیص نیست [۴۴]. انتخاب عامل پخت نیز در خواص نوری پوشش تأثیر به‌سزایی دارد. در واقع انتخاب عامل پخت

¹ Optical properties

² Gloss

³ Colorimetry

⁴ Optical clarity

⁵ Haze

⁶ Salahuddin

⁷ Optical clarity

⁸ Yellowness

پلیمرها به دلیل خواص بسیار خوب مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی که حضور نانورس در پلیمر ایجاد می‌کند گسترده‌تر شود.

می‌شود. در صنایع هوایی از پوشش‌های نانوکامپوزیتی حاوی نانورس برای افزایش مقاومت در برابر تغییرات جوی، صاعقه، سایش و مقاومت محیطی بالا استفاده می‌شود. انتظار می‌رود در آینده کاربرد نانورس‌ها در

۸- مراجع

- M. Behzadnasab, S. Mirabedini, M. Esfandeh, "Corrosion protection of steel by epoxy nanocomposite coatings containing various combinations of clay and nanoparticulate zirconia", *Corros. Sci.*, 75, 134-141, **2013**.
- J. Sinko, "Challenges of chromate inhibitor pigments replacement in organic coatings", *Prog. Org. Coat.*, 42, 267-282, **2001**.
- D. Zaarei, A. A. Sarabi, F. Sharif, S. M. Kassiriha, "Structure, properties and corrosion resistivity of polymeric nanocomposite coatings based on layered silicates", *J. Coat. Technol. Res.*, 5, 241-249, **2008**.
- V. Mittal, "Barrier properties of composite materials", *Barrier Properties of Polymer Clay Nanocomposites*. Nova Science Publishers, New York, **2009**.
- K. A. Carrado, "Synthetic organo-and polymer-clays: preparation, characterization, and materials applications", *Appl. Clay Sci.*, 17, 1-23, **2000**.
- X. Kornmann, "Synthesis and characterization of thermoset-clay nanocomposites", *Introduction*, Lulea Tekniska Universite, **1999**.
- P. Kiliaris, C. Papaspyrides, "Polymer/layered silicate (clay) nanocomposites: an overview of flame retardancy", *Prog. Polym. Sci.*, 35, 902-958, **2010**.
- A. A. Azeez, K. Y. Rhee, S. J. Park, D. Hui, "Epoxy clay nanocomposites—processing, properties and applications: a review", *Composites Part B: Engineering*, 45, 308-320, **2013**.
- E. Pavlacky, D. C. Webster, "Polymer/clay nanocomposite plasticization: Elucidating the influence of quaternary alkylammonium organic modifiers", *J. Appl. Polym. Sci.*, 129, 324-333, **2013**.
- S. Pavlidou, C. Papaspyrides, "A review on polymer-layered silicate nanocomposites", *Prog. Polym. Sci.*, 33, 1119-1198, **2008**.
- S. Sinha Ray, M. Okamoto, "Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing", *Prog. Polym. Sci.*, 28, 1539-1641, **2003**.
- L. A. Utracki, "Clay-containing polymeric nanocomposites", *Ismithers Rapra Publishing*, 1, **2004**.
- G. Choudalakis, A. Gotsis, "Recent developments in the permeability of polymer clay nanocomposites", in *Handbook of Polymernanocomposites. Processing, Performance and Application*, ed: Springer, 415-451, **2014**.
- P. I. Xidas, K. S. Triantafyllidis, "Effect of the type of alkylammonium ion clay modifier on the structure and thermal/mechanical properties of glassy and rubbery epoxy-clay nanocomposites", *Eur. Polym. J.*, 46, 404-417, **2010**.
- L. Utracki, "Clay-containing polymeric nanocomposites", *SPE Plastics Research Online*, **2011**.
- G. Beyer, "Nanocomposites: a new class of flame retardants for polymers", *Plastics, Additives and Compounding*, 4, 22-28, **2002**.
- E. P. Giannelis, "Polymer-layered silicate nanocomposites: synthesis, properties and applications", **1998**.
- C. P. McAdam, N. Hudson, J. Liggat, R. Pethrick, "Synthesis and characterization of nylon 6/clay nanocomposites prepared by ultrasonication and in situ polymerization", *J. appl. Polym. Sci.*, 108, 2242-2251, **2008**.
- S. Chaeichian, P. Wood-Adams, S. Hoa, "In situ polymerization of polyester-based hybrid systems for the preparation of clay nanocomposites", *Polym.*, 54, 1512-1523, **2013**.
- P. Panupakorn, E. Chaichana, P. Praserttham, B. Jongsomjit, "Polyethylene/clay nanocomposites produced by in situ polymerization with zirconocene/MAO catalyst", *J. Nanomater.*, vol. 2013, 2, **2013**.
- S. G. Kim, E. A. Lofgren, S. A. Jabarin, "Nanocomposite development with organically modified clay through in situ polymerization of poly (ethylene terephthalate)", *Adv. Polym. Tech.*, 32, **2013**.
- M. Pramanik, S. K. Srivastava, B. K. Samantaray, A. K. Bhowmick, "Rubber-clay nanocomposite by solution blending", *J. Appl. Polym. Sci.*, 87, 2216-2220, **2003**.
- R. Puffr, J. L. Špátová, J. Brožek, "Clay mineral/polyamide nanocomposites obtained by in-situ polymerization or melt intercalation", *Appl. Clay Sci.*, 83, 294-299, **2013**.
- M. Wang, X. Fan, W. Thitsartarn, C. He, "Rheological and mechanical properties of epoxy/clay nanocomposites with enhanced tensile and fracture toughnesses", *Polym.*, 58, 43-52, **2015**.
- H. Ebadi-Dehaghani, H. A. Khonakdar, M. Barikani, S. H. Jafari, "Experimental and theoretical analyses of mechanical properties of PP/PLA/clay nanocomposites", *Composites Part B: Engineering*, 69, 133-144, **2015**.
- M. Bashar, P. Mertiny, U. Sundararaj, "Effect of nanocomposite structures on fracture behavior of epoxy-clay nanocomposites prepared by different dispersion methods", *J. Nanomater.*, vol. 2014, **2014**.
- G. Choudalakis, A. Gotsis, "Morphology and gas transport properties of acrylic resin/bentonite nanocomposite coatings", *Prog. Org. Coat.*, 77, 845-852, **2014**.
- Q. Zeng, A. Yu, G. Lu, "Multiscale modeling and simulation of polymer nanocomposites", *Prog. Polym. Sci.*, 33, 191-269, **2008**.
- M. I. Faraz, N. A. M Besseling, A. V. Korobko, S. J. Picken, "Structure-property relationships and modeling of the mechanical properties of a high-temperature resistant thermoset nanocomposite", *Composites Part B: Engineering*, 56, 9-14, **2014**.
- Y. Sun, Y. Zhang, K. Xu, W. Xu, D. Yu, L. Zhu, R. Cheng, "Thermal, mechanical properties, and low-temperature performance of fibrous nanoclay-reinforced epoxy asphalt composites and their concretes", *J. Appl. Polym. Sci.*, 132, **2015**.
- M. H. Gabr, W. Okumura, H. Ueda, W. Kuriyama, K. Uzawa, I. Kimpara, "Mechanical and thermal properties of carbon fiber/polypropylene composite filled with nano-clay", *Composites Part B: Engineering*, 69, 94-100, **2015**.
- J. Xiong, Y. Liu, X. Yang, X. Wang, "Thermal and mechanical properties of polyurethane/montmorillonite nanocomposites based on a novel reactive modifier", *Polymer Degradation and Stability*, 86, 549-555, **2004**.

33. K. G. Gatos, J. Karger-Kocsis, "Effect of the aspect ratio of silicate platelets on the mechanical and barrier properties of hydrogenated acrylonitrile butadiene rubber (HNBR)/layered silicate nanocomposites", *Eur. Polym. J.*, 43, 1097-1104, **2007**.
34. I. Hackman, L. Hollaway, "Epoxy-layered silicate nanocomposites in civil engineering", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37, 1161-1170, **2006**.
35. O. Becker, R. Varley, G. Simon, "Morphology, thermal relaxations and mechanical properties of layered silicate nanocomposites based upon high-functionality epoxy resins", *Polym.*, 43, 4365-4373, **2002**.
36. M. W. Noh, D. C. Lee, "Synthesis and characterization of PS-clay nanocomposite by emulsion polymerization", *Polym. Bull.*, 42, 619-626, **1999**.
37. J. H. Park, S. C. Jana, "The relationship between nano-and micro-structures and mechanical properties in PMMA-epoxy-nanoclay composites", *Polym.*, 44, 2091-2100, **2003**.
38. S.-W. Zhang, "Tribology of elastomers", Elsevier, 47, **2004**.
39. D. Xu, J. Karger-Kocsis, "Dry rolling and sliding friction and wear of organophilic layered silicate/hydrogenated nitrile rubber nanocomposite", *J. mater. Sci.*, 45, 1293-1298, **2010**.
40. H. G. Zhu, R. S. Woo, C. K. Leung, J. K. Kim, "Wear resistance of organic nanocomposites", *Key Eng. Mater.*, 334, 605-608, **2007**.
41. S. R. Ha, K. Y. Rhee, "Effect of surface-modification of clay using 3-aminopropyltriethoxysilane on the wear behavior of clay/epoxy nanocomposites", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 322, 1-5, **2008**.
42. I. Isik, U. Yilmazer, G. Bayram, "Impact modified epoxy/montmorillonite nanocomposites: synthesis and characterization", *Polym.*, 44, 6371-6377, **2003**.
43. D. Zaarei, A. A. Sarabi, F. Sharif, M. M. Gudarzi, S. M. Kassiriha, "The impact of organoclay on the physical and mechanical properties of epoxy-clay nanocomposite coatings", *J. Macromol. Sci., Part B*, 49, 960-969, **2010**.
44. V. Landry, P. Blanchet, B. Riedl, "Mechanical and optical properties of clay-based nanocomposites coatings for wood flooring", *Prog. Org. Coat.*, 67, 381-388, **2010**.
45. L. Wang, X. Shui, X. Zheng, J. You, Y. Li, "Investigations on the morphologies and properties of epoxy/acrylic rubber/nanoclay nanocomposites for adhesive films", *Compos. Sci. Technol.*, 93, 46-53, **2014**.
46. R. H. Patel, K. S. Patel, "Synthesis of flame retardant polyester-urethanes and their applications in nanoclay composites and coatings", *Polym. Int.*, 63, 529-536, **2014**.
47. H. Stretz, M. Wootan, P. Cassidy, J. Koo, "Effect of exfoliation on poly (styrene-co-acrylonitrile)/ montmorillonite nanocomposite flammability", *Polym. Adv. Technol.*, 1, 239-248, **2005**.
48. U. Costantino, A. Gallipoli, M. Nocchetti, G. Camino, F. Bellucci, A. Frache, "New nanocomposites constituted of polyethylene and organically modified ZnAl-hydrotalcites", *Polym. Degrad. Stab.*, 90, 586-590, **2005**.
49. A. Tidjani, O. Wald, M.-M. Pohl, M. P. Hentschel, B. Schartel, "Polypropylene-graft-maleic anhydride-nanocomposites: I—Characterization and thermal stability of nanocomposites produced under nitrogen and in air", *Polym. Degrad. Stab.*, 82, 133-140, **2003**.
50. X. Shi, Z. Gan, "Preparation and characterization of poly (propylene carbonate)/ montmorillonite nanocomposites by solution intercalation", *Eur. Polym. J.*, 43, 4852-4858, **2007**.
51. A. Blumstein, "Polymerization of adsorbed monolayers. II. Thermal degradation of the inserted polymer", *J. Polym. Sci. Part A: General Papers*, 3, 2665-2672, **1965**.
52. K. Chen, C. A. Wilkie, S. Vyazovkin, "Nanoconfinement revealed in degradation and relaxation studies of two structurally different polystyrene-clay systems", *The Journal of Physical Chemistry B*, 111, 12685-12692, **2007**.
53. S. Vyazovkin, I. Dranca, "A DSC study of α -and β -relaxations in a PS-clay system", *The Journal of Physical Chemistry B*, 108, 11981-11987, **2004**.
54. K. Wang, S. Liang, J. Deng, H. Yang, Q. Zhang, Q. Fu, et al., "The role of clay network on macromolecular chain mobility and relaxation in isotactic polypropylene/organoclay nanocomposites", *Polym.*, 47, 7131-7144, **2006**.
55. J. M. Mata-Padilla, F. J. Medellín-Rodríguez, C. A. Ávila-Orta, E. Ramírez-Vargas, G. Cadenas-Pliego, M. Valera-Zaragoza, et al., "Morphology and chain mobility of reactive blend nanocomposites of PP-EVA/Clay", *J. Appl. Polym. Sci.*, **2014**.
56. Y. Chen-Yang, H. Yang, G. Li, Y. Li, "Thermal and anticorrosive properties of polyurethane/ clay nanocomposites", *J. Polym. Res.*, 11, 275-283, **2005**.
57. J. Zhu, A. B. Morgan, F. J. Lamelas, C. A. Wilkie, "Fire properties of polystyrene-clay nanocomposites", *Chem. Mater.*, 13, 3774-3780, **2001**.
58. L. Torre, J. Kenny, A. Maffezzoli, "Degradation behaviour of a composite material for thermal protection systems Part II Process simulation", *J. mater. Sci.*, 33, 3145-3149, **1998**.
59. A. R. Bahramian, M. Kokabi, "Ablation mechanism of polymer layered silicate nanocomposite heat shield", *J. hazard. mater.*, 166, 444-454, **2009**.
60. A. R. Bahramian, M. Kokabi, M. H. N. Famili, M. H. Beheshty, "High temperature ablation of kaolinite layered silicate/ phenolic resin/asbestos cloth nanocomposite", *J. hazard. Mater.*, 150, 136-145, **2008**.
61. Y. Ding, Z. Gui, J. Zhu, Y. Hu, Z. Wang, "Exfoliated poly (methyl methacrylate)/ MgFe-layered double hydroxide nanocomposites with small inorganic loading and enhanced properties", *Mater. Res. Bull.*, 43, 3212-3220, **2008**.
62. J. Zhu, F. M. Uhl, A. B. Morgan, C. A. Wilkie, "Studies on the mechanism by which the formation of nanocomposites enhances thermal stability", *Chem. Mater.*, 13, 4649-4654, **2001**.
63. E. Devaux, M. Rochery, S. Bourbigot, "Polyurethane/clay and polyurethane/POSS nanocomposites as flame retarded coating for polyester and cotton fabrics", *Fire Mater.*, 26, 149-154, **2002**.
64. Y. Wu, H. Huang, W. Zhao, H. Zhang, Y. Wang, L. Zhang, "Flame retardance of montmorillonite/rubber composites", *J. Appl. Polym. Sci.*, 107, 3318-3324, **2008**.
65. S. Bocchini, S. Morlat-Therias, J. L. Gardette, G. Camino, "Influence of nanodispersed hydrotalcite on polypropylene photooxidation", *Eur. Polym. J.*, 44, 3473-3481, **2008**.
66. A. Kalendova, D. Merinska, J. F. Gerard, M. Slouf, "Polymer/clay nanocomposites and their gas barrier properties", *Polym. Compos.*, 34, 1418-1424, **2013**.
67. M. Galimberti, "Rubber-clay nanocomposites: science, technology, and applications", John Wiley & Sons, **2011**.
68. O. Yucel, E. Unsal, J. Harvey, M. Graham, D. H. Jones, M. Cakmak, "Enhanced gas barrier and mechanical properties in organoclay reinforced multi-layer poly (amide-imide) nanocomposite film", *Polym.*, 55, 4091-4101, **2014**.
69. L. Incarnato, P. Scarfato, G. Russo, L. Di Maio, P. Iannelli, D. Acierno, "Preparation and characterization of new melt compounded copolyamide nanocomposites", *Polym.*, 44, 4625-4634, **2003**.
70. J. Comyn, "Polymer permeability", Springer, **1985**.
71. K. Yoon, M. B. Polk, B. G. Min, D. A. Schiraldi, "Structure and property study of nylon-6/clay nanocomposite fiber", *Polym. Int.*, 53, 2072-2078, **2004**.
72. D. Lincoln, R. Vaia, Z.-G. Wang, B. Hsiao, "Secondary structure and elevated temperature crystallite morphology of nylon-6/layered silicate nanocomposites", *Polym.*, 42, 1621-1631, **2001**.

73. E. Devaux, S. Bourbigot, A. E. Achari, "Crystallization behavior of PA-6 clay nanocomposite hybrid", *J. Appl. Polym. Sci.*, 86, 2416-2423, **2002**.
74. T. Fornes, P. Yoon, D. Paul, "Polymer matrix degradation and color formation in melt processed nylon 6/clay nanocomposites", *Polym.*, 44, 7545-7556, **2003**.
75. H. E. Miltner, G. V. Assche, A. Pozsgay, B. Pukánszky, B. V. Mele, "Restricted chain segment mobility in poly (amide) 6/clay nanocomposites evidenced by quasi-isothermal crystallization", *Polym.*, 47, 826-835, **2006**.
76. E. Picard, A. Vermogen, J.-F. Gérard, E. Espuche, "Barrier properties of nylon 6-montmorillonite nanocomposite membranes prepared by melt blending: influence of the clay content and dispersion state: consequences on modelling", *J. Membr. Sci.*, 292, 133-144, **2007**.
77. M.-C. Lai, K.-C. Chang, J.-M. Yeh, S.-J. Liou, M.-F. Hsieh, H.-S. Chang, "Advanced environmentally friendly anticorrosive materials prepared from water-based polyacrylate/Na⁺-MMT clay nanocomposite latexes", *Eur. Polym. J.*, 43, 4219-4228, **2007**.
78. M. Bagherzadeh, F. Mahdavi, "Preparation of epoxy-clay nanocomposite and investigation on its anti-corrosive behavior in epoxy coating", *Prog. Org. Coat.*, 60, 117-120, **2007**.
79. K. L. Kelly, E. Coronado, L. L. Zhao, G. C. Schatz, "The optical properties of metal nanoparticles: the influence of size, shape, and dielectric environment", *The Journal of Physical Chemistry B*, 107, 668-677, **2003**.
80. N. A. Salahuddin, "Layered silicate/epoxy nanocomposites: synthesis, characterization and properties", *Polym. Adv. Technol.*, 15, 251-259, **2004**.
81. C. Decker, L. Keller, K. Zahouily, S. Benfarhi, "Synthesis of nanocomposite polymers by UV-radiation curing", *Polym.*, 46, 6640-6648, **2005**.
82. E. Kaya, M. Tanoğlu, S. Okur, "Layered clay/epoxy nanocomposites: Thermomechanical, flame retardancy, and optical properties", *J. Appl. Polym. Sci.*, 109, 834-840, **2008**.