

سایش پذیری رزین پلی استر سیر نشده حاوی ذرات تیتانیم دیوکسید: نقش برهمکنش بین سطحی و پراکنش ذرات

Wear of Unsaturated Polyester Resin Containing Titanium Dioxide Particles: The Role of Interfacial Interaction and Particles Dispersion

المیرا سیروس پور، ناصر محمدی*، مرضیه خطیب زاده، نادر طاهری قزوینی،

عطیه متقی، پانته آنظران

تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی پلیمر، گروه تحقیقات بنیادین لقمان، صندوق پستی ۱۵۸۷۵/۴۴۱۳

دریافت: ۸۳/۸/۲۶، پذیرش: ۸۴/۲/۲۵

چکیده

در این پژوهش، امکان برقراری ارتباط قانونمند بین ویژگیهای سطحی اجزا و چگونگی پراکنش فاز متفرق با خواص مکانیکی یک لایه پوشش پر شده بررسی شده است. مشخصه‌های سطحی پلیمر و ذره پرکننده، چسبندگی آنها و نحوه پراکنش فاز متفرق به ترتیب با روشهای متداول شامل شناسایی سطح به کمک زاویه تماس، آزمون چسبندگی قرص فشرده ذرات به زمینه و میکروسکوپ الکترون پویشی سطح شکست تعیین شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با پخت رزین پلی استر بر سطح ذره TiO_2 ، تمایل ترمودینامیکی آن دو کاهش می‌یابد (افزایش زاویه تماس). در ضمن، انرژی چسبندگی جداسازی رزین پلی استر پخت شده از سطح تیتانیم دیوکسید حدود 67 kJ/m^2 است. همچنین، با افزایش مساحت فصل مشترک ذره پرکننده - زمینه به وسیله بهبود پراکنش (اختلاط مؤثر)، مقاومت در برابر ضربه و سایش پوشش پر شده افزایش می‌یابد و رابطه مشخصه این دو از قانون توانی $W \sim I^{-1}$ پیروی می‌کند.

واژه‌های کلیدی

رزین پلی استر سیر نشده، سایش، چسبندگی، برهمکنش بین سطحی، تیتانیم دیوکسید

Key Words

unsaturated polyester resin, wear, adhesion, interfacial interaction, titanium dioxide

مقدمه

آلی به پلیمرها با هدف بهبود خواص فیزیکی - مکانیکی (مدول، سختی، چقرمگی و سایش)، قیمت تمام شده و خواص ظاهری (رنگ و پشت پوشی) از لحاظ علمی و فناوری بسیار حائز اهمیت است [۱]. این موضوع به دلیل

علم تبیین ساز و کارهای اصطکاک، روان سازی و سایش سطوح در تماس با حرکت نسبی (tribology) از نقطه نظر فناوری بکارگیری پلیمرها در صنایع مختلف اهمیت بسیار زیادی دارد [۱]. از طرف دیگر، افزودن مواد معدنی و

تجربی

مواد

رزین پلی استر سیر نشده متشکل از مالئیک انیدرید، فتالیک انیدرید و پروپیلن گلیکول تهیه شده از رزین بوشهر به عنوان زمینه (matrix)، رنگدانه تیتانیم دیوکسید روتیل با نام تجاری کریستال ۱۰۰ محصول شرکت ملی تیتانیم دیوکسید عربستان سعودی به عنوان فاز متفرق و همچنین کبالت نفتنات و متیل اتیل کتون پروکسید (MEKP) به ترتیب به عنوان فعال کننده و کاتالیزور پخت رزین استفاده شدند. جداسازی قطعه از قالب با اعمال و پرداخت (polish) موم کارناتوبا و پوشش آن با فیلم پلی وینیل الکل (از محلول آبی ۲ درصد) انجام شد.

دستگاهها

در این پژوهش، مخلوط کن با پره دنداندار برای تهیه آمیزه ها و میکروسکوپ الکترون پوششی فیلیپس مدل XL ۳۰ برای بررسی سطح شکست نمونه ها بکار گرفته شد.

روشها

اختلاط زمینه با رنگدانه

رزین پلی استر محتوی درصدهای حجمی مختلف از رنگدانه (Powder Volume Concentration, PVC) (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۷) با استفاده از مخلوط کنی با پره دنداندار با دور ثابت ۱۰۰۰ rpm و مدت زمان ۱h در دمای محیط تهیه شد. سپس، با افزودن یک درصد وزنی کبالت به آمیزه ها و ۲/۵ درصد پروکسید، بلافاصله آمیزه به داخل ظرف تفلونی آغشته به موم منتقل و فیلم ریخته گری شد. نمونه ها پس از پخت اولیه در دمای محیط برای تکمیل واکنش، به مدت ۲h در کوره با دمای ۱۲۰°C پس پخت (post-cure) شدند.

اندازه گیری خواص سطحی

با ریختن ۳g پودر تیتانیم دیوکسید داخل قالب و اعمال فشار ۱۰۰ bar با پرس دستی در دمای محیط، قرصی از رنگدانه با قطر ۳ cm و ضخامت ۲ mm تهیه شد. سپس، تصویر جانبی قطره ای از رزین پلی استر بر سطح قرص با استفاده از دوربین مجهز به لنز مناسب در زمانهای مختلف (لحظه اعمال و بعد از ۵ و ۱۰ min) گرفته شد.

اندازه گیری استحکام چسبندگی فصل مشترک

با توجه به شکل ۱ بخش بالایی میخ (۱) (دیسک به قطر ۶ mm) به موم

سروکار داشتن با متغیرهای متعدد و مؤثر موادی و فرایندی روی خواص محصول نهایی، پیچیدگیهای زیادی دارد و بهینه سازی آن با هزینه زیادی همراه است. بنابراین، فعالیت قابل توجهی در رابطه با درک اصول حاکم بر اختلاط مواد افزودنی به پلیمرها، نحوه پراکنش فاز متفرق و اثر ویژگیهای مواد اولیه، مساحت و ویژگیهای فصل مشترک بر خواص پلیمرها برای تسهیل و کاهش هزینه های بهینه سازی انجام شده است [۳]. مثلاً دانگیان (Dongyan) و همکاران [۴] با افزودن پرکننده باریم تیتانات به پلی یورتان تغییر رفتار از حالت منعطف به شکننده (افزایش مدول و کاهش چقرمگی) را گزارش کرده اند. داکوستا (da Costa) و همکاران [۵] با افزودن سبوس برنج به لاستیک طبیعی ضمن کاهش قیمت تمام شده موفق به تولید قطعه لاستیکی با رنگ روشن شدند. شرط دستیابی به اهداف مورد نظر در اختلاط افزودنیهای آلی و معدنی با پلیمرها، انتخاب صحیح اجزا و ایجاد فصل مشترکی با استحکام مناسب و چسبندگی مطلوب است. برای دستیابی به چسبندگی مورد نظر در فصل مشترک، زمینه باید در سطح بزرگتری افزودنی را خیس کند. لازمه این امر کاهش آنتالپی برهمکنش اجزا از طریق افزایش تمایل ترمودینامیکی آنهاست [۶]. از سوی دیگر، خیس کردن سطح ماده افزودنی بدون اغتشاش شکل فضایی زنجیر پلیمر توده نیز منشأ چسبندگی مطلوب در فصل مشترک است [۷].

سومیتا و همکاران [۸] از طریق تغییر کنترل شده زبری سطح افزودنی، موفق به افزایش استحکام فصل مشترک آن با زمینه و بهبود خواص نهایی سامانه شدند. همچنین، آوکی و همکاران [۹] با تغییر نحوه پراکنش فاز متفرق، ذرات هسته - پوسته، شرایط افزایش مساحت فصل مشترک و اثر بیشتر بر رفتار سامانه نهایی (چقرمگی زمینه) را فراهم کردند. عامل مهم دیگر مؤثر بر چسبندگی فصل مشترک دو فاز، خواص ویسکوالاستیک زمینه است [۱۰]. به عبارت دیگر، با انطباق منحنی $\tan \delta$ زمینه بر شرایط اندازه گیری می توان در انرژی فصل مشترک ثابت به چسبندگی بیشتر دست یافت. تلاش برای بهبود چسبندگی فصل مشترک اجزای مواد مرکب از طریق بهبود برهمکنش بین سطحی و ویژگیهای فازهای پیوسته و متفرق بطور تجربی با اقدامات تکمیلی برای پیش بینی و تنظیم تغییرات انجام شده از سالها قبل آغاز و بتازگی به دستاوردهای جدیدی ختم شده است [۱۱].

در این کار پژوهشی، امکان پیش بینی مقاومت ضربه ای و سایش پذیری پوششی مرکب از رزین پلی استر سیر نشده دارای درصدهای مختلف از ذرات افزودنی تیتانیم دیوکسید بر مبنای استحکام فصل مشترک و نحوه پراکنش ذرات در زمینه بررسی شده است.

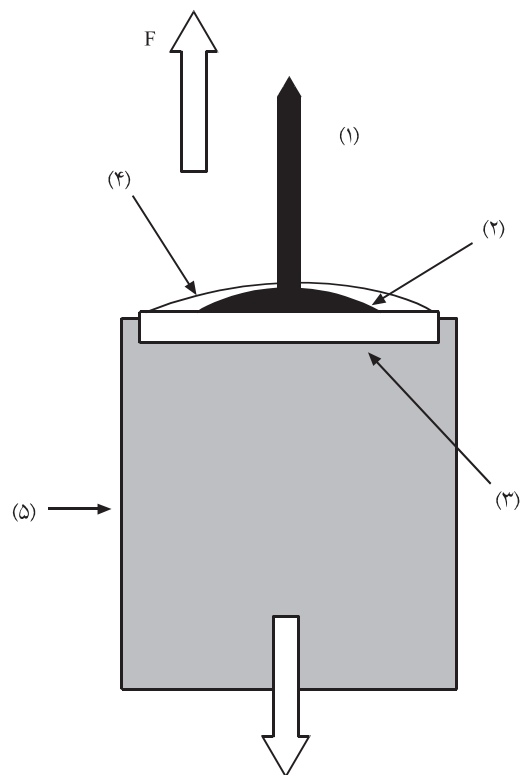
طول شکاف ۱ یا ۲/۵ mm (ASTM D ۲۵۶-۹۳A) انجام شد. نسبت انرژی شکست به طول پشت شکاف اولیه به عنوان معیاری از مقاومت در برابر ضربه نمونه گزارش شد.

اندازه گیری مقاومت سایشی

نمونه های محتوی پودر تیتانیم دیوکسید به شکل قرصی به قطر ۱۶ mm و ضخامت حدود ۶ mm قالبگیری و در داخل گیره متحرک دستگاه تثبیت شدند. نمونه با حرکت رفت و برگشت روی سمباده چسبانده شده بر استوانه در حال دوران، ساییده شد (ASTM D ۵۹۶۳). عکس کاهش وزن بهنجار شده (normalized) با چگالی قطعه، پس از پیمودن طول مشخصی از سمباده به عنوان مقاومت در برابر سایش نمونه گزارش شد.

نتایج و بحث

شکل ۲ (الف) تا (ج) به ترتیب زاویه تماس قطره رزین پلی استر خالص، رزین محتوی کبالت و رزین پخت شده با کبالت و کاتالیزور بر سطح قرص رنگدانه را نشان می دهد. زاویه تماس قطره با افزودن کبالت نفتنات و کاتالیزور از ۵۱° به ۶۸° و در نهایت به ۱۰۰/۵° افزایش می یابد. این مشاهدات را می توان به کاهش تمایل ترمودینامیکی رزین به سطح رنگدانه در اثر افزودن فعال کننده، کاتالیزور و پخت آن نسبت داد. شایان ذکر است که با پلیمر شدن مونومر نیز تمایل آن به مواد دیگر و سطوح جامد کاهش می یابد. زیرا در اثر پلیمر شدن تغییر آنتروپی و آنتالپی اختلاط نیز بطور عمومی کاهش می یابد [۱۲]. در ضمن، افزایش زاویه تماس در اثر افزودن فعال کننده را شاید بتوان به جذب ترجیحی آن بر سطح قرص و تمایل کمتر آن به TiO_2 به دلیل حجیم بودن آن نسبت داد. اندازه گیری زاویه تماس رزین بر سطح قرص صرفاً معرف جزء آنتالپی برهمکنش بین سطحی بین زمینه و فاز متفرق است. اما، در فرایندهای شکست (برای مثال، آزمون ضربه و سایش پذیری)، انرژی چسبندگی فصل مشترک به عنوان مانعی در برابر رشد ترک عمل می کند. بنابراین، بر مبنای چیدمانی (شکل ۱) استحکام چسبندگی بین سطحی رزین پخت شده به رنگدانه اندازه گیری شد. برای تعیین انرژی چسبندگی، نیروی لازم برای جدا کردن رزین از سطح قرص رنگدانه ۹۳/۱ N محاسبه شد. در ضمن سطح جدا شده رزین از قرص در این آزمون $۰/۴۱۸ \text{ cm}^2$ بود. همچنین، مسیر طی شده در پشت شکاف با اعمال نیروی برای جداسازی حدود ۳ mm بوده است. بنابراین، انرژی



شکل ۱ طرح کلی اجزای آزمون اندازه گیری استحکام چسبندگی رزین پخت شده به رنگدانه: (۱) میخ، (۲) مرز مشترک بین سطح میخ و قرص رنگدانه (پیش ترک)، (۳) قرص رنگدانه (۴) رزین پلی استر پخت شده و (۵) قطعه رزین پخت شده برای مهار قرص رنگدانه.

جداکننده آغشته شد و روی قرص رنگدانه (۳) تثبیت شده در رزین پلی استر (۵) قرار گرفت. فصل مشترک سطح بالایی میخ به جدا کننده آغشته می شود تا نقش ترک اولیه (pre-crack) (شکل ۱) را ایفا کند. سپس، بخش پایینی ناحیه مسطح میخ و رویه قرص رنگدانه با چسب پلی استر سیر نشده به ضخامت تقریبی ۱ mm (۴) پوشش داده می شود. پس از پخت پوشش مورد نظر، نمونه از سمت میله میخ با اعمال وزنه بحرانی تحت نیروی کششی قرار گرفته، جدا می شود.

میکروسکوپ الکترونی

نمونه های رزین پخت شده دارای درصدهای مختلف رنگدانه، پس از پوشش دهی با فیلم نازک طلا به وسیله میکروسکوپ الکترون پویشی بررسی شدند.

اندازه گیری مقاومت به ضربه

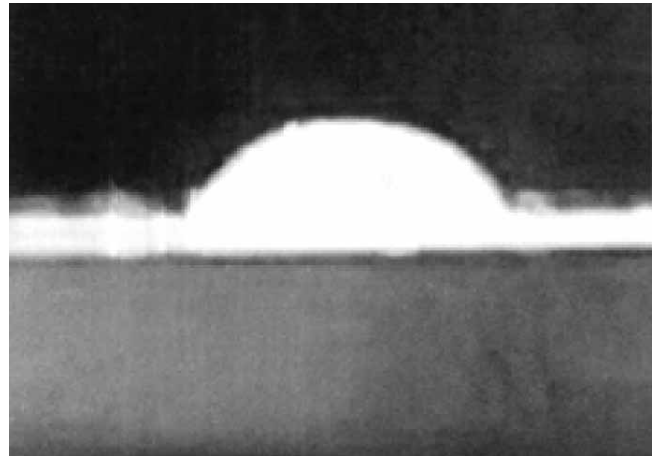
آزمون ضربه آیزود (Izod) نمونه ها به ابعاد $۳ \times ۶۳/۵ \times ۱۲/۷ \text{ mm}^3$ با

چسبندگی برابر $6/68 \text{ kJ/m}^2$ است. بنظر می رسد که این انرژی چسبندگی با توجه به زاویه تماس مشاهده شده قابل توجه باشد. این امر را می توان به زبری سطح قرص که موجب گیر افتادن مکانیکی (mechanical interlocking) می شود، نسبت داد. همچنین، انقباض رزین حین پخت نیز به عنوان مکملی بر افزایش چسبندگی فصل مشترک عمل می کند.

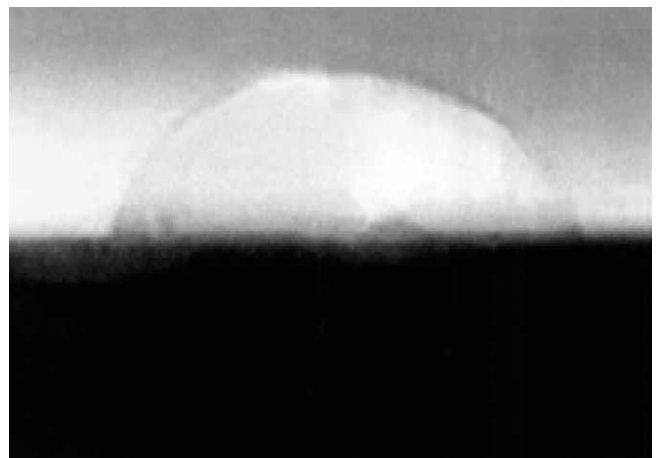
شکل ۳ نحوه پراکنش درصدهای حجمی مختلفی از رنگدانه را در زمینه نشان می دهد. با افزایش درصد حجمی رنگدانه از ۵ تا ۱۵، پراکنش در زمینه بهبود و متوسط اندازه ذرات کاهش می یابد. این امر را می توان به افزایش گرانیوی مؤثر سامانه و تمرکز بیشتر برش پره مخلوط کن بر سطح کلوخه های ذرات نسبت داد. با افزایش غلظت حجمی رنگدانه به بیش از ۱۵ درصد، توزیع اندازه ذرات مجدداً افزایش می یابد. کلوخه ای شدن مجدد ذرات در غلظتهای حجمی ۲۰ و ۲۷ درصد به دلیل غلبه عامل تمایل ذرات به تجمع و کاهش انرژی آزاد سامانه نسبت به تمایل نیروی برشی پره برای شکستن کلوخه ها انجام می شود.

در شکل ۴ و جدول ۱ مقاومت در برابر ضربه نمونه بر حسب درصد حجمی رنگدانه نشان داده شده است. با افزایش درصد حجمی رنگدانه از ۵ تا ۱۵، مقاومت در برابر ضربه نمونه ها افزایش کمی می یابد. البته انتظار می رفت که با افزایش رنگدانه، مدول الاستیک رزین افزایش و چقرمگی آن کاهش یابد. اما، بنظر می رسد که به دلیل کلوخه ای شدن ذرات در نمونه های دارای ۵ و ۱۰ درصد رنگدانه، سطح تماس آن با رزین کاهش یافته، و اثر کاهندگی چقرمگی تا حدودی تعدیل شده باشد. به عبارت دیگر، اگر ۵ درصد حجمی رنگدانه به شکل ذرات تک اندازه به رزین اضافه می شد، شاید مقاومت در برابر ضربه کمتری مشاهده می شد. این موضوع در نمونه دارای ۱۰ درصد حجمی از ذرات رنگدانه از شدت کمتری برخوردار است. با افزایش بیشتر درصد حجمی رنگدانه و بهبود پراکنش نخست بهبود جزئی در مقاومت ضربه ای و سپس کاهش آن آغاز می شود. این امر را می توان به اثر ذرات تک اندازه سفت با چسبندگی بین سطحی مطلوب در افزایش مقاومت ضربه ای و سپس کاهش آن در اثر کلوخه شدن ناشی از عبور از غلظت بحرانی ذرات برای تجمع نسبت داد. زیرا حالت پراکنش ذرات در بهینه رفتار رئولوژیکی نمونه در شرایط اختلاط بدست می آید.

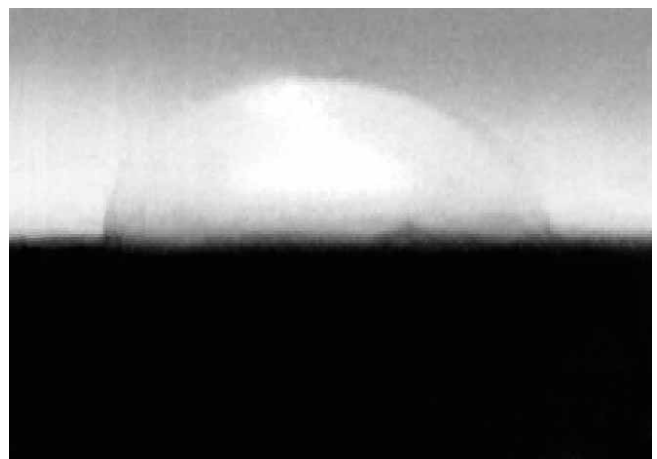
در شکل ۵ و جدول ۱ مقاومت سایشی نمونه ها در درصدهای حجمی متفاوت رنگدانه ارائه شده است. با افزایش درصد حجمی رنگدانه و کاهش جزء اتلاف کننده انرژی (رزین پلی استر) کاهش مقاومت سایشی انتظار می رود. این روند در رابطه با وزن ساییده شده به عنوان معیار مقاومت صادق است، ولی با تعویض معیار به حجم ساییده شده (وزن ساییده شده کاهش یافته با چگالی متوسط) افزایش مقاومت مشاهده



(الف)

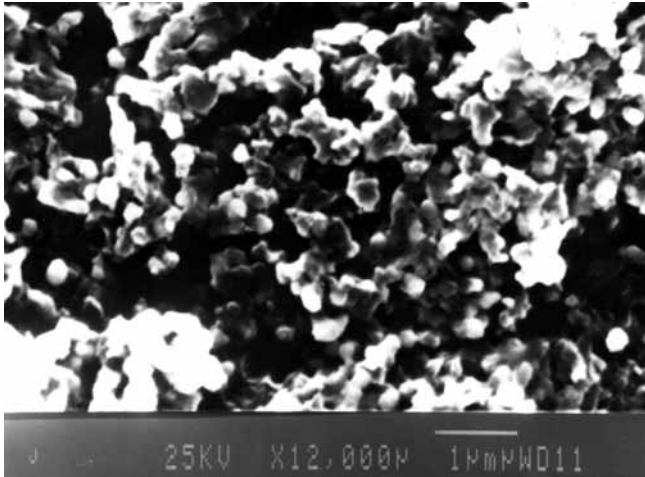


(ب)

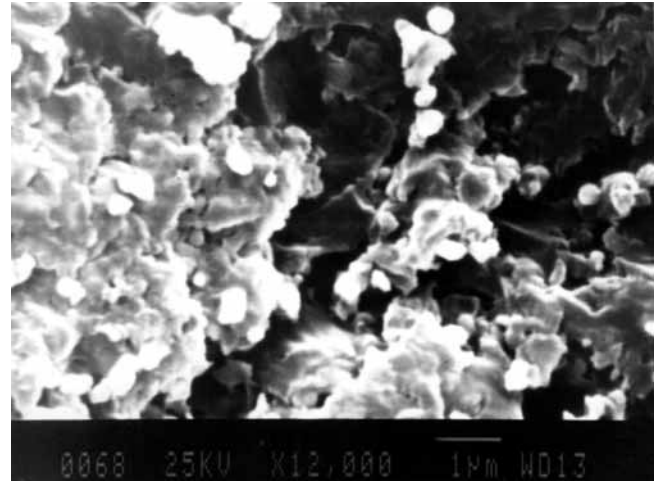


(ج)

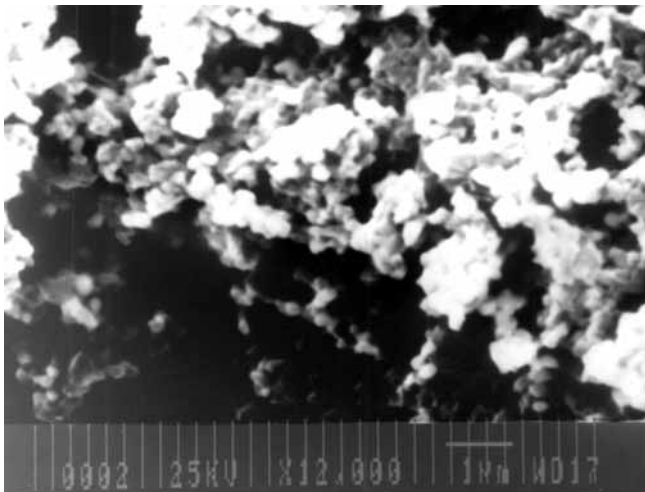
شکل ۲ چگونگی تغییرات زاویه تماس تیتانیوم دیوکسید با رزین: (الف) رزین پلی استر خالص، زاویه تماس 51° ، (ب) رزین پلی استر حاوی کبالت، زاویه تماس 68° و (ج) رزین پلی استر حاوی کبالت و کاتالیزور، زاویه تماس $100/5^\circ$.



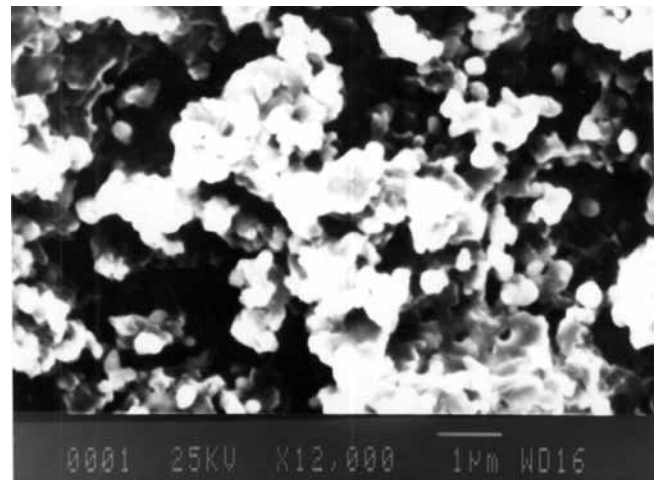
(ج)



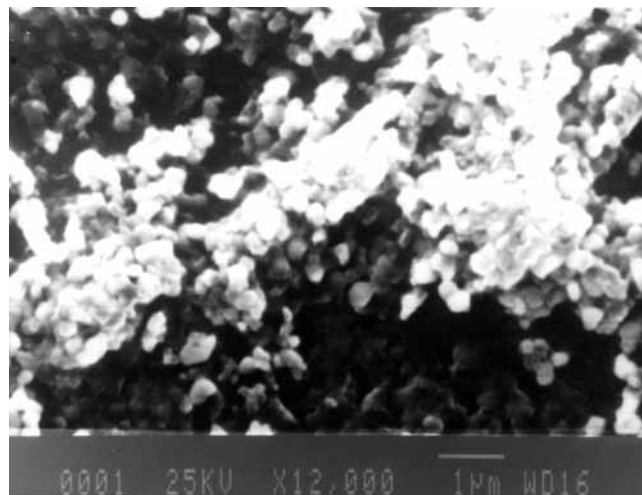
(الف)



(د)

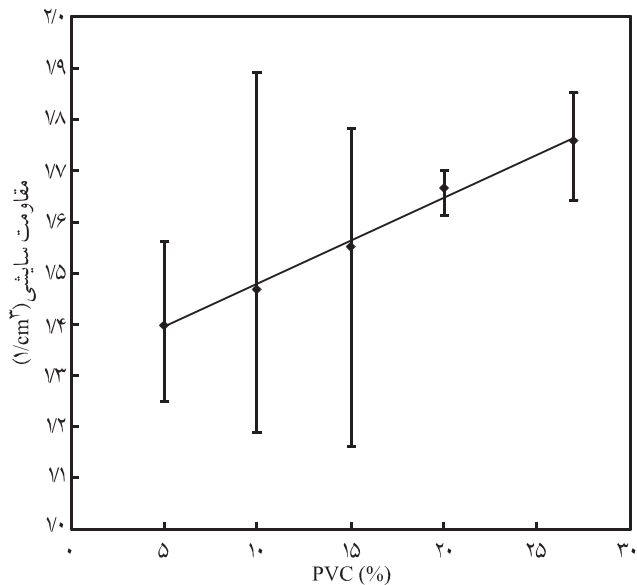


(ب)



(و)

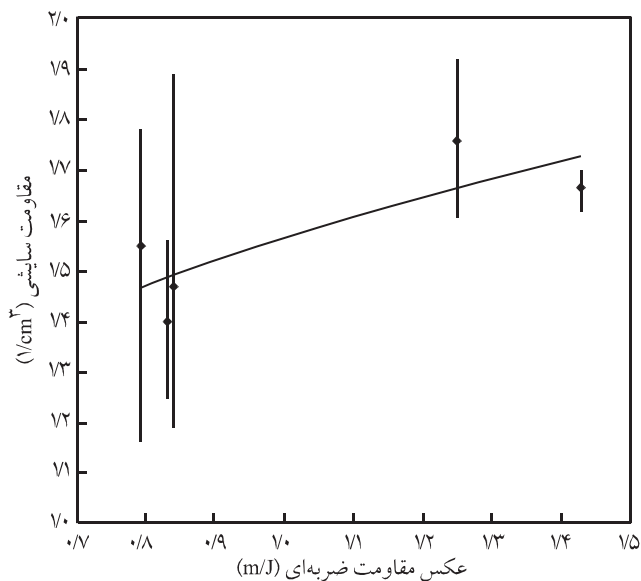
شکل ۳ تصاویر SEM نحوه پراکنش رنگدانه تیتانیم دیوکسید در زمینه در درصد های حجمی مختلف: (الف) ۵ درصد، (ب) ۱۰ درصد، (ج) ۱۵ درصد، (د) ۲۰ درصد و (و) ۲۷ درصد.



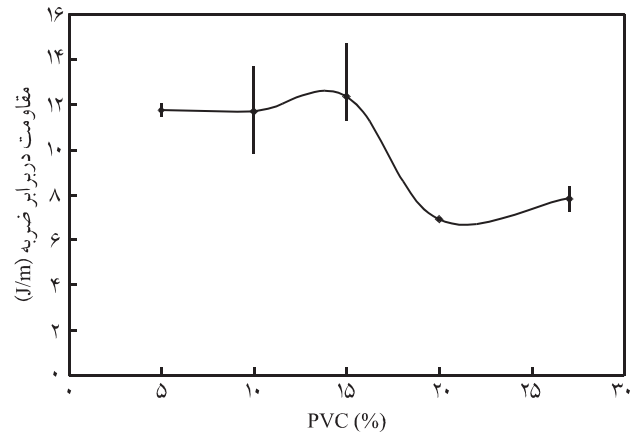
شکل ۵ نمودار تغییر مقاومت سایشی بر حسب درصد حجمی رنگدانه.

می انجامد. در حالی که در آزمون ضربه به دلیل سرعت کرنش بسیار زیاد، نه تنها ترک مسیر طولانیتری را طی می کند، بلکه موجب افزایش ذرات رنگدانه، ایجاد ضعف و اشاعه سریعتر ترک خواهد شد.

شکل ۶ تابعیت مقاومت سایشی پوشش پر شده نسبت به مقاومت به ضربه آنها را نشان می دهد. بنظر می رسد که در محدوده خطای آزمایش تقریباً روندی منطقی بر نتایج حاکم است. به عبارت دیگر، می توان چنین



شکل ۶ نمودار تابعیت مقاومت فرسایشی پوشش پر شده به مقاومت در برابر ضربه.



شکل ۴ نمودار تغییر مقاومت در برابر ضربه بر حسب درصد حجمی رنگدانه.

می شود. البته، بهبود مقاومت سایشی در اثر افزایش درصد حجمی رنگدانه مشروط بر یکنواختی توزیع ذرات و عاری بودن ماده مرکب از فضاهای خالی به واقعیت نزدیک خواهد بود. اما، با توجه به ناهمگنی پراکنش که اغلب مشاهده می شود و احتمال در برداشتن حفره بویژه در مقادیر زیاد ذرات، می توان افزایش ملایمتری را انتظار داشت. همچنین، کاهش حجم ساییده شده در اثر افزایش درصد حجمی ذرات را می توان به جدا شدن ذرات کوچکتر ولی چگالتر مربوط دانست. در این حالت، بنظر می رسد که در فرایند سایش، ترک نسبت به آزمون ضربه مسیر کوتاه تری را طی می کند. این امر، با افزایش درصد حجمی ذرات تشدید می شود. این فرضیه را می توان به سرعت کرنش کمتر فرایند سایش نسبت داد. در این حالت، نقش ذرات نیز در تقویت یا تضعیف زمینه، در ظاهر متأثر از سرعت اعمال نیرو و شدت آن است. به عبارت دیگر، سرعت کرنش کمتر فرایند سایش به کوچکتر شدن ذرات جدا شده

جدول ۱ مقادیر مقاومت سایشی و مقاومت در برابر ضربه بر حسب درصد حجمی رنگدانه.

درصد حجمی رنگدانه	مقاومت سایشی (J/cm³)	مقاومت در برابر ضربه (J/m)
۵	74 ± 0.15	1176 ± 0.196
۱۰	747 ± 0.35	1166 ± 0.179
۱۵	755 ± 0.31	1235 ± 0.15
۲۰	767 ± 0.04	684 ± 0.05
۲۵	776 ± 0.1	784 ± 0.05

مقادیر مختلف ذرات تیتانیم دیوکسید نشان می دهد که با داشتن چسبندگی مناسب در فصل مشترک اجزاء، می توان سایش پذیری را به کمک مقاومت در برابر ضربه تخمین زد. از طرف دیگر، عامل تغییر مقاومت در برابر ضربه رزینهای دارای مقادیر مختلف ذرات TiO_2 ، بازده متفاوت پراکنش ذرات تشخیص داده شد که موجب تفاوت اثر وجود فاز متفرق می شود. در ضمن، روشی ساده و کاربردی برای اندازه گیری چسبندگی رزین به سطح فاز متفرق طراحی و بکار گرفته شد.

قدردانی

نویسندگان مقاله از آقای مهندس وجر و آقای مهندس شمایل کارشناسان کارگاههای پوشش رنگ (Paint) و لاستیک دانشکده پلیمر دانشگاه صنعتی امیرکبیر به دلیل مساعدت در انجام پژوهش تشکر می کنند.

گفت که مقاومت در برابر ضربه یا معیاری از قابلیت جذب انرژی در زمانهای کوتاه با جذب انرژی دینامیکی در فرایند جدا کردن ذرات کوچکتر از سطح نمونه در اثر تماس با اجسام تیز ارتباط منطقی دارد [۱۳]. تابعیت توانی سایش نمونه بر حسب مقاومت در برابر ضربه نمونه ها $W \sim I^{-1}$ است. در این رابطه W و I به ترتیب مقاومت سایشی کاهش یافته و مقاومت ضربه ای نمونه ها را نشان می دهند. البته محدوده خطای آزمایشهای انجام شده نسبتاً گسترده است. این امر را می توان به دامنه خطای نسبتاً زیاد آزمونهای مکانیکی از یک سو و خطای ناشی از ثابت بودن شرایط اختلاط و تغییر آن به دلیل تغییر ماهیت آمیزه ها نسبتاً داد. با این وجود، جهتگیری نتایج با مبانی نظری حاکم تطابق نسبتاً خوبی نشان می دهد. بنابراین، بنظر می رسد که با داشتن مقاومت در برابر ضربه نمونه می توان سایش آن را تخمین زد.

نتیجه گیری

بررسی خواص مکانیکی رزین پلی استر سیر نشده پخت شده و دارای

مراجع

- Sadati M., Mohammadi N., Taheri Qazvini N., Tahmasebi N. and Koopahi N., Evaluation of Scratch Resistance of an Acrylic-melamine Clear Coat Based on its Fracture Energy, *Prog. Org. Coat.*, **53**, 23-28, 2005.
- Xu W. and Liu P., Effect of Interfacial Interaction on the Mechanical Properties of Electron Beam Irradiated HDPE/STC Blend, *J. Appl. Polym. Sci.*, **84**, 814-820, 2002.
- Luo H., Kluppel M. and Schneider H., Study of Filled SBR Elastomers Using NMR and Mechanical Measurements, *Macromolecules*, **37**, 8000-8009, 2004.
- Dongyan T., Liangsheng Q., Zheng Z. and Weimin C., Synthesis and Application Studies of Castol Oil/Poly(methyl methacrylate) IPNs, *J. Appl. Polym. Sci.*, **84**, 709, 2002.
- Da Costa H. M., Visconte L. L., Nunes R. C. R. and Furtado C. R. G., Mechanical and Dynamic Mechanical Properties of Rice Husk Ash-Filled Natural Rubber Compounds, *J. Appl. Polym. Sci.*, **83**, 2331-2346, 2002.
- Sharif A., Mohammadi N., Moghbeli M. R. and Zanjirian E., Heterogeneity in the Strength of Interfacial Bonds and the Resultant Synergism in Promoting Polyurethane/SBR Adhesion Strength, *J. Adhesion Sci. Technol.*, **17**, 1727-1739, 2003.
- Sternstein S. S. and Zhu A. J., Reinforcement Mechanism of Nanofilled Polymer Melts as Elucidated by Nonlinear Viscoelastic Behavior, *Macromolecules*, **35**, 7262-7273, 2002.
- Wu G., Asai S., Sumita M. and Yui H., Entropy Penalty-Induced Self-Assembly in Carbon Black or Carbon Fiber Filled Polymer Blends, *Macromolecules*, **35**, 945-951, 2002.
- Hasegawa R., Aoki Y. and Doi M., Optimum Graft Density for Dispersing Particles in Polymer Melts, *Macromolecules*, **29**, 6656-6662, 1996.
- Sharif A., Mohammadi N., Nekoomanesh M. and Jahani Y., The Role of Interfacial Interactions and Loss Function of Model Adhesives on their Adhesion to Glass, *J. Adhesion Sci. Technol.*, **16**, 33-45, 2002.
- Sharif A., Mohammadi N. and Taheri Qazvini N., *Polymer Surface Modification: Relevance to Adhesion*, Mittal K.L. (Ed.), VSP, Amsterdam, **3**, 477-487, 2004.
- Carr C. and Wallstom E., Theoretical Aspects of Self-Stratification, *Prog. Org. Coat.*, **28**, 161-171, 1996.
- Taheri Qazvini N., Mohammadi N., Bagheri R., Jalali A. and Varasteh A., Rubber Wear: A Universal View, *Int. Rubber Conf.*, Prague, Czech Republic, July 2002.