

تأثیر نیرو و نانوذرات آلومینا بر مکانیزم های ایجاد آسیب ناشی از خراش نانو کامپوزیت زمینه پلی متیل متاکریلات

آرزو سزاوار^{۱*}، سید مجتبی زبرجد^۲ و سید عبدالکریم سجادی^۲

چکیده

در این پژوهش نقش نانو ذرات آلومینا و تأثیر افزایش نیرو بر روی رفتار خراش پلی متیل متاکریلات (PMMA) مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، نمونه‌های استاندارد از نانو کامپوزیت‌های زمینه پلی متیل متاکریلات تقویت شده با درصد‌های متفاوت وزنی آلومینا (۰، ۵، ۱۰، ۱۵) با روش قالب گیری فشاری ساخته شدند. سپس آزمون خراش بر اساس استاندارد ASTM G171 در شرایط دمای محیط و سرعت خراش ۵ mm/s و تحت نیروهای خراشی ۱۰ و ۱۵ N انجام شد. برای بررسی و شناخت مکانیزم های خراش از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. نتایج پژوهش نشان می دهد که سختی خراش نمونه‌ها به مقدار نانو ذرات آلومینا بستگی دارد، به گونه‌ای که افزایش نانو ذرات از ۰ تا ۱۵ درصد باعث کاهش پهنا یا عرض خراش از ۲۷۴ به ۲۱۰ μm می‌شود. هم‌چنین، نتایج ارزیابی میکروسکوپی بیانگر این موضوع است که با اعمال نیروی خراش ۱۵ N اثر خراش در نمونه پلی متیل متاکریلات خالص به صورت ترک‌های فصل مشترکی ظاهر می شود. در حالی‌که افزودن نانو ذرات تا ۵ درصد وزنی باعث تغییر ترک‌ها به کریز و افزایش تا ۱۵ درصد وزنی سبب بهبود مقاومت به خراش و ایجاد آسیب مار (Mar) می شود.

واژه های کلیدی: پلی متیل متاکریلات، آلومینا، نانو کامپوزیت، رفتار خراش.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- دانشیار دانشگاه فردوسی مشهد.

*- نویسنده مسئول مقاله: a.sezavar@yahoo.com

پیشگفتار

امروزه پلیمرها به گونه ای گسترده در صنایع گوناگون همچون صنعت الکترونیک، وسایل خانگی و کاربردهای مربوط به وسایل نقلیه استفاده می‌شوند و چون بحث زیبایی ظاهری آنها در برخی از این کاربردها دارای اهمیت است، مبحث خراش پلیمرها نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. بر خلاف سرامیک‌ها و فلزات، پلیمرها حتی با نیروهای تماسی کم نیز به تغییر سطحی حساس می‌باشند [۱].

آزمون خراش یکی از موثرترین روش‌ها جهت تعیین مقاومت پلیمرها و پوشش‌ها در برابر نیروهای دینامیکی می‌باشد [۲]. خراش، فرایند تغییر شکل مکانیکی است که نیروی کنترل شده‌ای بر یک سوزن اعمال می‌شود و سوزن با سرعت مشخصی روی سطح پلیمر حرکت کرده و اثری از خود باقی می‌گذارد. باید توجه داشت شکل و هندسه نوک سوزن خراش دهنده، ضخامت زیر لایه، ویژگی های سطح ماده و سرعت خراش دهنده همگی می‌توانند بر رفتار خراش پلیمر تاثیر گذار باشند. در دو دهه اخیر، تلاش‌های پژوهشی زیادی برای بهبود مقاومت به خراش پلیمرها انجام شده است [۳-۱]. برای بهبود در تریبولوژی و دیگر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی پلیمرها مثل مدول استحکام، چقرمگی شکست، هدایت الکتریکی و ... بسته به کاربردهای مورد نظر، انواع گوناگونی از تقویت کننده‌ها به پلیمرها افزوده می‌شوند. نیاز به استفاده از کامپوزیت‌های مرسوم (میکروکامپوزیت‌ها) باعث می‌گردد تا برخی از خواص که از یکدیگر تاثیر می‌پذیرند به گونه یکسان بهبود پیدا نکنند. برای مثال، افزایش سفتی و استحکام که در مقاومت خراش پلیمرها نقشی مهم دارند، باعث کاهش چقرمگی شکست و برخی ویژگی‌های دیگر می‌شوند. برای غلبه بر این مشکل که ناشی از حضور تقویت کننده‌های میکرونی است، اندازه تقویت کننده‌ها باید کوچک و در حد نانو شود [۴]. انواع آسیب‌های ناشی از خراش که برای شمار زیادی از پلیمرها مشاهده شده است، به صورت مار^۱، پولک ماهی^۲، ترک‌های موازی^۳ و کنده شدن سطح ماده^۴ می‌باشد [۵]. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهند که

آسیب‌های ایجاد شده ناشی از خراش در پلیمرها می‌توانند شامل اتو زدن^۵، پارگی^۶، شکاف^۷، ترک^۸ و براده برداری^۹ باشد [۶]. گروهی از پژوهشگران [۷] آسیب‌های خراش روی اپوکسی، پلی کربنات و پلی متیل متاکریلات را مطالعه کردند و نشان دادند در شرایط مشخص آزمون خراش، ویژگی‌های مکانیکی پلیمر مثل مدول و داکتیلیتی بر مکانیزم‌های خراش تاثیر می‌گذارند. در پلیمرهای با مدول بالاتر شکاف‌های کم عمق تر تشکیل می‌شود و اگر انعطاف پذیری سطح آنها بالا باشد، به طور مومسان تغییر شکل می‌دهند. همچنین، در پژوهشی دیگر تاثیر ضخامت یک پوشش اکریلیک با زیر لایه فولادی روی رفتار خراش بررسی و نشان داده شده است که یک ضخامت بحرانی برای پوشش پلیمر وجود دارد که از آن پس رفتار خراش مثل یک ماده توده‌ای می‌شود [۶].

پلی متیل متاکریلات دارای خاصیت استثنایی شفافیت نوری و مقاومت در برابر تشعشعات خارجی است. در مقابل قلیاها، مایع‌های پاک کننده، روغن‌ها و اسیدهای رقیق پایدار است، اما بسیاری از حلال‌ها روی آن اثر می‌گذارند. خاصیت ویژه و منحصر به فرد آن یعنی انعکاس داخلی نور به طور صد در صد، موجب کاربرد آن در ساخت علائم خبری، تبلیغاتی و مصارف پزشکی شده است [۸]. پلی متیل متاکریلات به عنوان ماده دندانانی در دندانپزشکی و همچنین، به عنوان سیمان استخوان در پزشکی مورد استفاده واقع شده است. استفاده از پلی متیل متاکریلات (PMMA) به عنوان ماده دندانانی به این صورت است که دانه های پلی متیل متاکریلات که از قبل پلیمریزاسیون شده اند، با مایع مونومر متاکریلات که شامل درصد کمی از پیوند دهنده‌های عرضی دی متیل اکریلات است، مخلوط می‌شود و ماده پایه دندانانی را تولید می‌کند [۹].

با وجود پژوهش‌های بسیاری که در زمینه خراش پلیمرها و همچنین، نانوکامپوزیت‌های پلیمری انجام شده است، ولی هنوز بررسی کاملی در زمینه خراش نانوکامپوزیت PMMA/Al₂O₃ انجام نشده است. لذا، در این پژوهش

⁵ - Ironing

⁶ - Tearing

⁷ - Groving

⁸ - Cracking

⁹ - Chipping

¹ - Mar

² - Fish Scale

³ - Parabolic Cracks

⁴ - Removal Materials

در قالب باز شد تا اضافات خمیر حذف شود سپس دوباره در قالب بسته شد و زیر فشار قرار گرفت [۱۰].

آزمون خراش

برای انجام آزمون خراش از دستگاه خراش ساخت شرکت پارسا پلیمر شریف استفاده شد. این دستگاه قابلیت اعمال نیروهای گوناگون و تغییر سرعت خراش دهی به گونه پیوسته را دارا می باشد. نمونه‌ها پس از آماده سازی و پولیش به گونه مناسب در دستگاه قرار گرفتند و آزمون خراش در نیروهای ۱۰ و ۱۵ N انجام پذیرفت، شکل (۲).

ارزیابی میکروسکوپی

برای بررسی نقش نانو ذرات و همچنین، اثر نیرو بر روی رفتار خراش از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل VP LEO 1400 ساخت کشور آلمان و انگلیس استفاده شد. بمنظور جلوگیری از تجمع بار الکتریکی، سطح نمونه‌ها پیش از ارزیابی میکروسکوپی با پوشش طلا پوشانده شد. برای مقایسه دقیق تر مکانیزم های خراش، با توجه به بازگشت الاستیکی که پس از خراش نمونه‌ها اتفاق می افتد، برای همه نمونه‌ها از نظر فاصله زمانی بین خراش و عکسبرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی شرایط یکسان در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

شکل (۳) تصویر میکروسکوپ نوری را از سطح نمونه خالص پلی متیل متاکریلات پیش از انجام آزمون خراش نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، سطح نمونه شامل دانه‌های پلی متیل متاکریلات است که در زمینه پلیمری پراکنده شده اند. در استاندارد ASTM G171 از پهنای خراش (عرض خراش) برای تعیین سختی خراش و در نتیجه، مقایسه مقاومت ماده در برابر خراش استفاده می‌شود. شکل (۴) تغییرات عرض خراش بر حسب درصد وزنی نانو ذرات آلومینا را نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش درصد وزنی نانو ذرات آلومینا، عرض خراش کاهش یافته است. با توجه به اینکه رفتار خراش یک پلیمر وابسته به مقاومت آن در برابر نفوذ و حرکت یک سوزن خراش دهنده است،

به بررسی تاثیر افزایش نیرو و نانوذرات آلومینا بر مکانیزم‌های ایجاد آسیب ناشی از خراش این نانو کامپوزیت پایه پلیمری پرداخته می شود.

مواد و روش پژوهش

مواد آزمایش

در این پژوهش از آکريل خود پخت ویژه ترمیم (با نام تجاری آکروپارس) محصول شرکت صنایع پزشکی مارلیک به عنوان زمینه پلیمری استفاده شده است. همچنین، از نانوذرات آلومینا (خلوص ۹۹/۷٪) و اندازه متوسط ۲۵nm به عنوان تقویت کننده استفاده گردید. شکل (۱) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری گرفته شده از نانو ذرات آلومینا را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل مشخص است نانو ذرات به شکل بی نظم و توده‌ای می‌باشند.

نمونه سازی

برای بدست آوردن توزیع یکنواخت از نانو ذرات آلومینا در زمینه پلیمری و کاهش میزان آگلومره شدن روش آسیاکاری بکار گرفته شد. در این روش از دستگاه میکسر میل مدل MM400 ساخت کمپانی Retch استفاده شد. پودر پلی متیل متاکریلات و نانو ذرات آلومینا با درصدهای وزنی ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درون ظرفی از جنس فولاد زنگ نزن با گلوله‌هایی از همان جنس قرار گرفت و برای جلوگیری از افزایش دما ظروف میکسر میل پیش از قرار گرفتن در دستگاه به مدت ۵ دقیقه درون ظرف حاوی نیتروژن مایع گذاشته شدند. آسیاکاری به مدت ۱۰ دقیقه و با فرکانس ۲۰Hz انجام گرفت. نمونه‌های آزمون خراش بر مبنای استاندارد ASTM G171 ساخته شدند. بدین منظور برای تولید نمونه‌های نانوکامپوزیت، مخلوط پودر پلی متیل متاکریلات و نانو ذرات آلومینای آسیا کاری شده، بر اساس راهکار سازنده با مایع متیل متاکریلات مخلوط شد و پس از رسیدن به مرحله خمیری، خمیر بدست آمده داخل قالب قرار داده شد.

پس از قرار دادن خمیر در قالب و بستن آن، فشاری معادل ۲۵۰ - ۲۰۰ Kg به آن وارد گردید. در این مرحله

می‌شود. حضور این نوع آسیب‌های ناشی از خراش و افزایش آنها تحت نیروی خراش ۱۵ N نشان دهنده این مطلب است که افزایش نیروی خراش باعث ایجاد آسیب‌هایی جدی‌تر در این پلیمر شده است و مکانیزم خراش از نوع آسیب (مار) به ایجاد ترک تبدیل شده است. این نتیجه در پژوهش‌های دیگران نیز مشاهده شده است برای مثال، بر اساس پژوهش‌های Sue و همکارانش [۵] در پلیمرهای ترد و ضعیف مانند پلی استایرن حین آزمون خراش تحت نیروی کم، آسیب مار مشاهده می‌شود، اما با افزایش نیروی خراش، مکانیزم پولک ماهی همراه با میکرو ترک‌ها، کریزها و حفره‌ها ایجاد می‌شود و هنگام اعمال نیروی خراش بالاتر ماده به صورت نامنظم از سطح کنده می‌شود.

اشکال (۷-الف) و (۷-ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح خراش دیده، نانو کامپوزیت زمینه پلی متیل متاکریلات تقویت شده با ۵ درصد وزنی آلومینا تحت نیروهای خراش ۱۰ و ۱۵ N را نمایش می‌دهند. همان‌گونه که از شکل مشخص است، در نیروهای خراش ۱۰ N افزون بر وجود ترک‌های فصل مشترکی، کریزهایی نیز در زمینه پلیمری ایجاد می‌شود شکل (۷-الف). افزایش نیروی خراش از ۱۰ به ۱۵ N، باعث افزایش عرض خراش از ۲۱۱ به ۲۶۲ μm می‌گردد شکل (۷-ب). همان‌گونه که در تصویر نیز مشاهده می‌شود، با افزایش نیرو به ۱۵ N، مکانیزم خراش به سمت تشکیل کریز پیش می‌رود و مساحت کریزها در این حالت نسبت به مساحت کریزهای ایجاد شده تحت نیروی خراش ۱۰ N افزایش یافته و همچنین، به گونه‌ای گسترده تر در سطح خراش پراکنده شده است. کریزها در برخی از قسمت‌های سطح خراش در داخل دانه‌های پلی متیل متاکریلات نیز مشاهده می‌شوند. افزون بر این، حالت چین خوردگی نیز در سطح خراش وجود دارد که به دلیل افزایش تمایل پلیمر به تغییر شکل مومسان ناشی از افزایش نیروی اعمالی می‌باشد. مقایسه سطح خراش نمونه نانو کامپوزیت $\text{PMMA}/\text{Al}_2\text{O}_3$ با پلیمر خالص پلی متیل متاکریلات نشان می‌دهد که حضور ۵٪ درصد وزنی نانو ذرات آلومینا باعث ضعیف شدن زمینه پلیمری شده است زیرا با افزودن نانو ذرات اثر ترکندگی مایع مونومر تضعیف شده و در نتیجه، کاهش

بنابراین، براحتی می‌توان این مقاومت را به سختی خراش نسبت داد. در حقیقت، سختی خراش، بیانگر مقاومت سطح جامد به نفوذ به وسیله حرکت سوزن با شعاع راس مشخص و نیرو و سرعت ثابت می‌باشد و عدد سختی خراش، مقداری است که با واحد نیرو بر واحد سطح بیان می‌شود.

بر اساس استاندارد ASTM G171 سختی خراش بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$H_s = \frac{8F}{\pi W^2} \quad (1)$$

که در رابطه بالا H_s ، F ، W به ترتیب سختی خراش بر حسب MPa، نیروی اعمالی خراش بر حسب N، عرض خراش بر حسب mm می‌باشد. شکل (۵) وابستگی مقدار سختی خراش نسبت به درصد وزنی نانو ذرات آلومینا را نمایش می‌دهد.

اشکال (۶-الف) و (۶-ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح خراش پلی متیل متاکریلات خالص تحت تاثیر نیروهای ۱۰ و ۱۵ N نیوتن را نشان می‌دهند. همان‌گونه که از شکل مشخص است نوع تخریب در نمونه پلی متیل متاکریلات خالص که تحت نیروی خراش ۱۰ N قرار گرفته است از نوع مار می‌باشد که با تعداد اندک ترک‌هایی که در فصل مشترک دانه‌های پلی متیل متاکریلات و زمینه پلیمر تشکیل شده است، همراه می‌باشد شکل (۶-الف). در حقیقت آسیب مار شامل تغییر شکل الاستیک برگشت پذیر، تغییر شکل ویسکو الاستیک وابسته به زمان و تغییر شکل مومسان برگشت ناپذیر می‌باشد [۵]. افزایش نیروی خراش از ۱۰ به ۱۵ N، باعث افزایش عرض خراش از ۲۱۷ به ۲۷۴ μm می‌گردد شکل (۶-ب). همان‌گونه که در تصویر نیز مشاهده می‌شود، ترک‌های ایجاد شده در اثر خراش، در فصل مشترک زمینه و دانه‌های پلی متیل متاکریلات تشکیل شده اند که این ترک‌ها در سرتاسر سطح خراش پراکنده شده اند. همچنین، در زمینه، حفره‌هایی^۱ را می‌توان مشاهده کرد و نیز در قسمت‌هایی از سطح پلیمر که نزدیک به لبه خراش می‌باشند، حالت چین خوردگی^۲ سطح دیده

¹ - Voids

² - Wrinkle

نانو ذرات آلومینا، آسیب (مار) نیز که در حالت پلیمر خالص با همین مقدار نیروی خراش قابل مشاهده بود، در اینجا به سختی قابل تشخیص است. افزایش نیروی خراش از ۱۰ به ۱۵ N، باعث افزایش عرض خراش از ۲۰۵ به ۲۱۰ μm می‌گردد شکل (۹-ب). همان گونه که Sue و همکارانش [۱] در پژوهشی در ارتباط با خراش پلیمرها به این نتیجه رسیدند، برای پلیمرهایی که استحکام و بازگشت الاستیکی زیادی دارند، تا زمانی که نیروهای خراش اعمالی به اندازه کافی بالا نباشد، آسیب (مار) قابل مشاهده نمی‌باشد. همچنین، برای پلیمرهای ترد و مستحکم آسیب (مار) تحت نیروی خراش کم ایجاد می‌شود و با وجود ترد بودن این پلیمر، برای مشاهده هر گونه آسیب قابل تشخیص نیروی خراش بالایی نیاز است.

نتیجه گیری

در این پژوهش نانوکامپوزیت زمینه پلی متیل متاکریلات تقویت شده با درصدهای وزنی متفاوت آلومینا (۱۵، ۱۰، ۵، ۰) تولید و رفتار خراش آن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان‌دهنده این است که مکانیزم خراش وابسته به نیروی اعمالی و درصد وزنی فاز تقویت کننده می‌باشد به گونه‌ای که:

- نانوذرات آلومینا به عنوان یک تقویت کننده مناسب در راستای افزایش مقاومت به خراش زمینه پلی متیل متاکریلات می‌باشند.

- حضور ۵٪ وزنی نانو ذرات آلومینا باعث ضعیف شدن زمینه پلیمری شده است زیرا با افزودن نانو ذرات اثر ترکنندگی مایع مونومر تضعیف شده و در نتیجه، کاهش چسبندگی میان دانه های پلیمر PMMA با زمینه بیش تر می شود به گونه‌ای که در هر دو نیروی خراش ۱۰ و ۱۵ N کریزهایی در سطح زمینه پلیمری ایجاد می‌شود.

- هرچند افزایش نیروی خراش از ۱۰ به ۱۵ N تاثیر زیادی بر تغییر مکانیزم خراش نمی‌گذارد، اما باعث می‌شود که آسیب‌های ناشی از خراش به گونه‌ای گسترده تر روی سطح نمونه پراکنده شوند.

چسبندگی میان دانه‌های پلیمر PMMA با زمینه بیش‌تر می‌شود و در هر دو نیروی خراش ۱۰ و ۱۵ N کریزهایی در سطح زمینه پلیمری ایجاد می‌شود. شکل (۷-ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح خراش دیده نانوکامپوزیت زمینه پلی متیل متاکریلات تقویت شده با ۵ درصد وزنی آلومینا تحت نیروی خراش ۱۵N در بزرگنمایی بالاتر را نمایش می‌دهد.

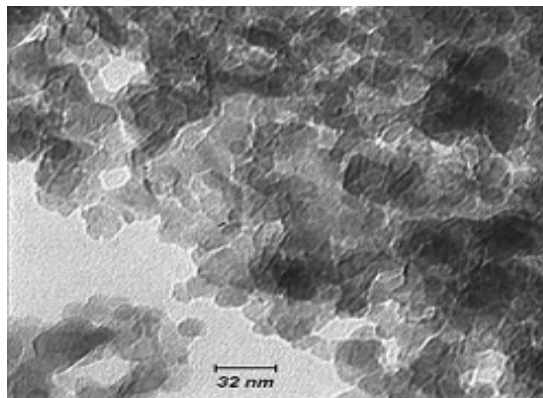
شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح خراش دیده نانوکامپوزیت زمینه پلی متیل متاکریلات تقویت شده با ۱۰ درصد وزنی آلومینا تحت نیروهای خراش ۱۰ و ۱۵ N نیوتن را نمایش می‌دهند. افزایش آلومینا تا ۱۰ درصد وزنی باعث افزایش مقاومت به خراش می‌شود. در درصدهای وزنی بالا (۱۰٪) نانو ذرات، تجمع کرده و در برخی بخش‌های سطح به صورت تجمعات میکرونی ظاهر می‌شوند. این مسئله عاملی برای افزایش مقاومت به خراش است زیرا این تجمعات در برابر خراش مقاومت کرده و از زنجیره‌های پلیمری اطراف آن محافظت می‌کنند. در نتیجه، همان گونه که مشاهده می‌شود، آسیب‌ها در این نانو کامپوزیت‌ها در حد آسیب‌های ابتدایی می‌باشد لذا، تحت نیروی ۱۰ N آسیب‌های (مار) ایجاد می‌شود، شکل (۸-الف). افزایش نیروی خراش به ۱۵ N، باعث افزایش عرض خراش از ۲۱۱ به ۲۵۷ μm می‌گردد شکل (۸-ب). همان گونه که در تصویر مشاهده می‌شود، با افزایش نیرو تا ۱۵ N علاوه بر آسیب (مار)، تعداد کمی ترک بین فصل مشترک دانه‌های پلی متیل متاکریلات و زمینه پلیمر تشکیل شده است.

اشکال (۹-الف) و (۹-ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح خراش دیده نانوکامپوزیت زمینه پلی متیل متاکریلات تقویت شده با ۱۵ درصد وزنی آلومینا تحت نیروهای خراش ۱۰ و ۱۵ N را نمایش می‌دهند. با افزایش درصد وزنی آلومینا و رسیدن آن به ۱۵ درصد مشاهده می‌شود که حتی در نیروی ۱۵ N نیز تخریب جدی روی سطح نانوکامپوزیت در اثر خراش به وجود نیامده است. به علت افزایش استحکام ماده در اثر افزایش

منابع

- 1- K. Friedrich, H.J. Sue, P. Liu, A.A. Almajid, "Scratch resistance of high performance polymers", Tribology International, Vol.44, pp. 1032-1046, 2011.
- 2- P. Liu, R. L. Browning, H.J. Sue, J. Li, S. Jones, "Quantitative scratch visibility assessment of polymers based on Erichsen and ASTM/ISO scratch testing methodologies", Polymer Testing, Vol.30, pp. 633-640, 2011.
- 3- R. L. Browning, H. Jiang, H.J. Sue, "Scratch behavior of polymeric materials", Tribology of polymeric nanocomposites, Vol.55, pp. 354-369, 2008.
- 4- R.L. Browning, G. T. Lim, A. Moyse, H. J. Sue, H. Chen, J.D. Earls, "Quantitative evaluation of scratch resistance of polymeric coatings based on a standardized progressive load scratch test", Surface & Coatings Technology, Vol.201, pp. 2970-2976, 2006.
- 5- H. Jiang, R. Browning, H.J. Sue, "Understanding of scratch induced damage mechanisms in polymers", Polymer, Vol.50, pp. 4056-2065, 2009.
- 6- A. Dasari, Z. Z. Yu, Y.W. Mai, "wear and scratch damage in polymer nanocomposites", Tribology of polymeric nanocomposites, Vol.55, pp. 374-396, 2008.
- 7- J. S. S. Wong, H. J. Sue, K.Y. Zeng, R. K.Y. Li, Y. W. Mai, "Scratch damage of polymers in nanoscale", Acta Mater, Vol.52, pp. 431, 2004.
- ۸- مهندسی پلاستیک، کرافورد، ترجمه مهرداد کوبی، چاپ دوم، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵
- 9- A.M. Vuorinen, S. R. Dyer, V.J. Lippo Lassila, Pekka K. Vallittu, "Effect of rigid rod polymer filler on mechanical properties of poly-methyl methacrylate denture base material", dental materials, Vol.24, pp.708-713, 2008.
- 10- Billmeyer, F.W. "Text book of polymer science" wiley interscience, 1971.

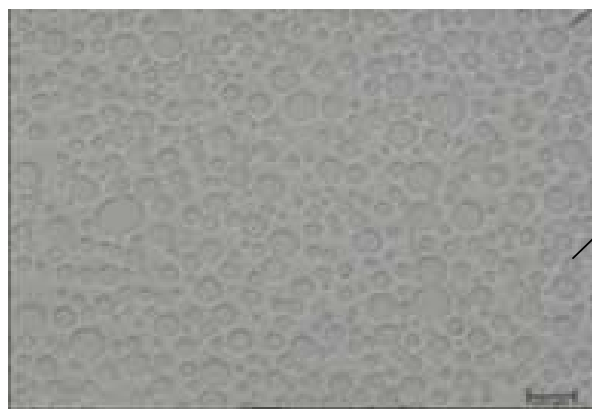
پیوست‌ها



شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانوذرات آلومینا

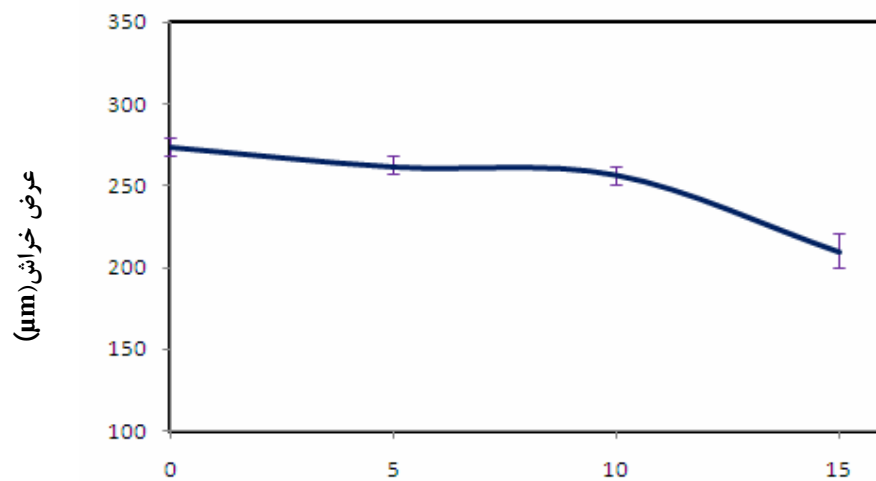


شکل ۲- تصویر دستگاه خراش.



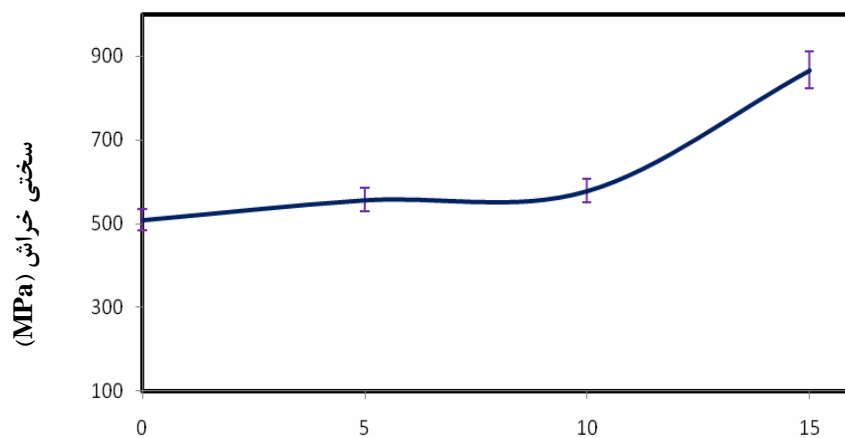
دانه های PMMA در زمینه پراکنده شده اند.

شکل ۳- تصویر میکروسکوپ نوری از سطح نمونه خالص پیش از آزمون خراش.



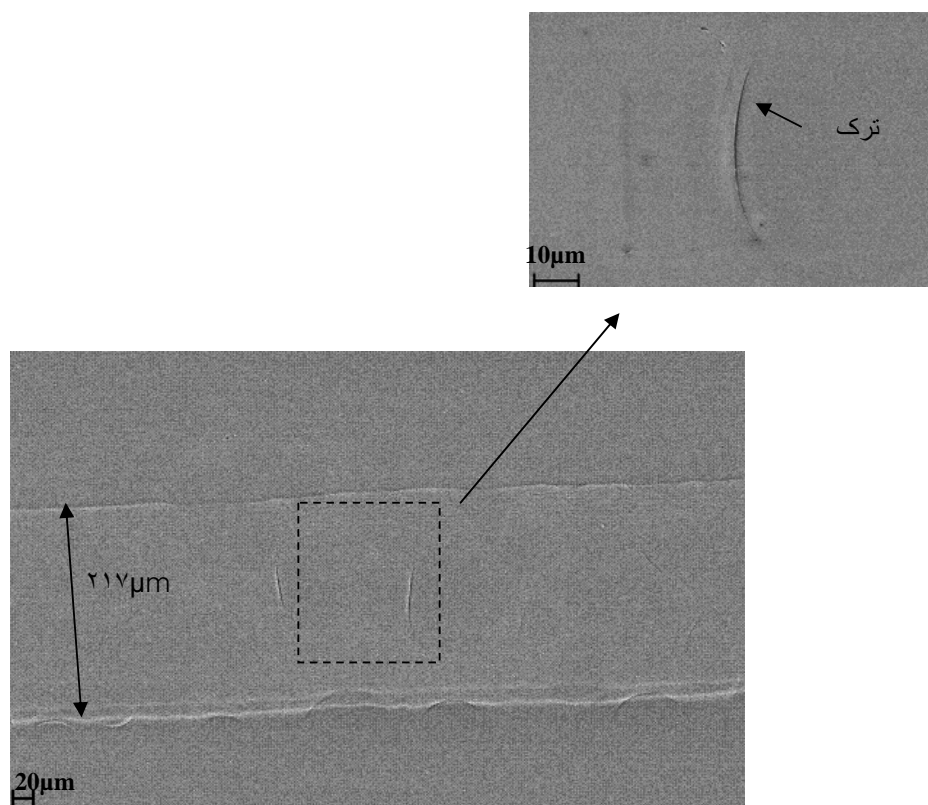
درصد وزنی نانوذرات آلومینا

شکل ۴- نمودار عرض خراش بر حسب درصد وزنی نانوذرات آلومینا

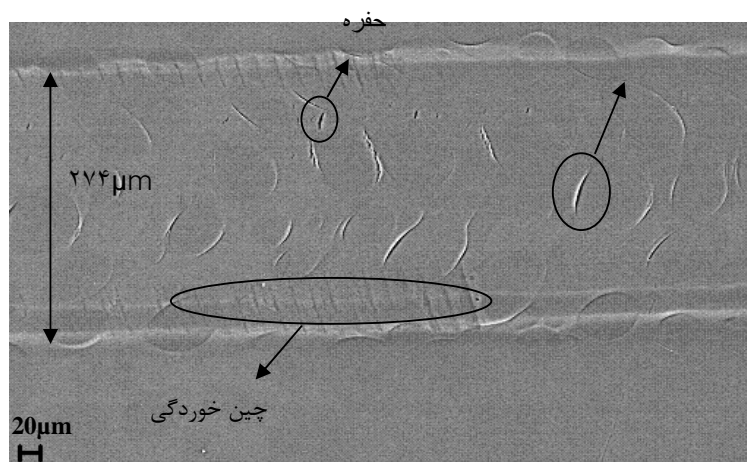


درصد وزنی نانوذرات آلومینا

شکل ۵- نمودار سختی خراش بر حسب درصد وزنی نانو ذرات آلومینا.

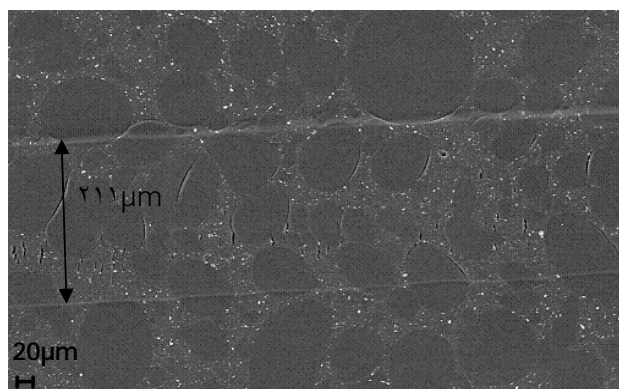


(الف)

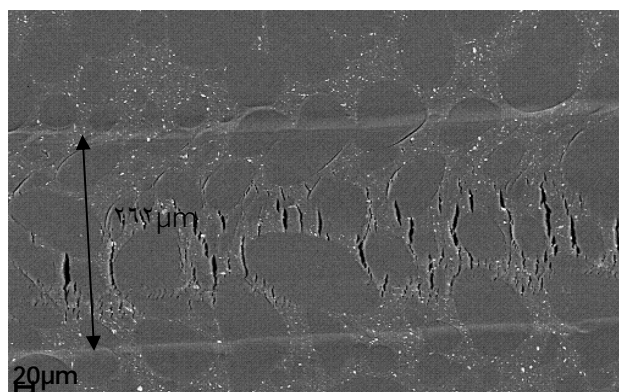


(ب)

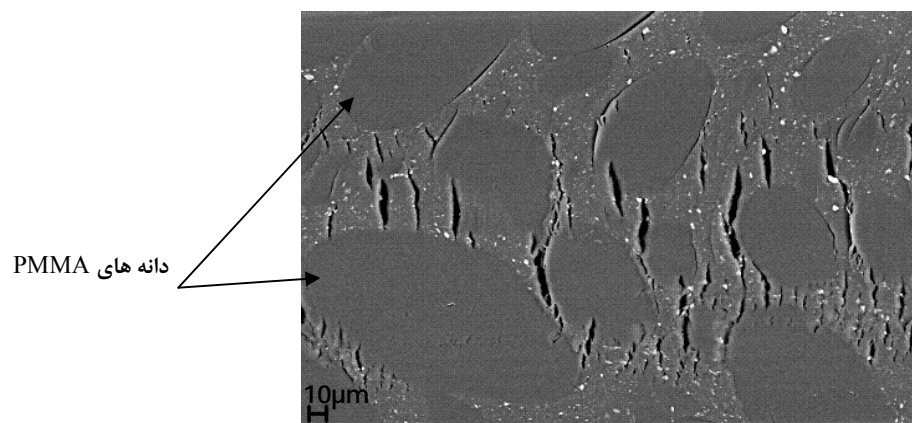
شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح خراش نمونه‌های خالص پلی متیل متا کریلات
الف) نیروی ۱۰N (ب) نیروی ۱۵ N



(الف)

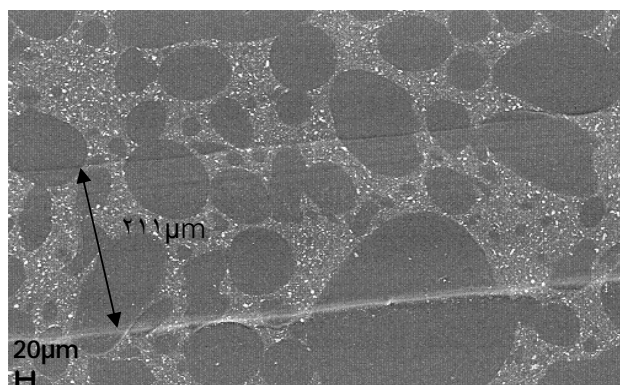


(ب)

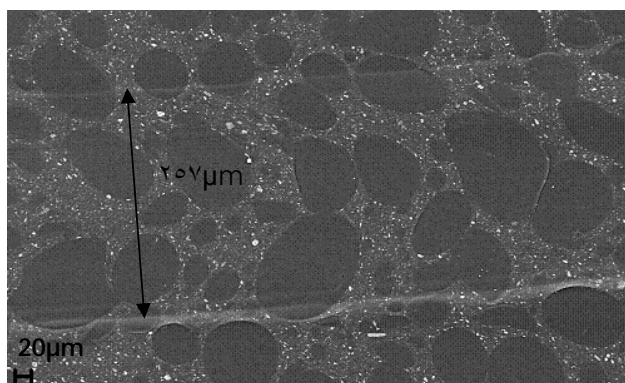


(ج)

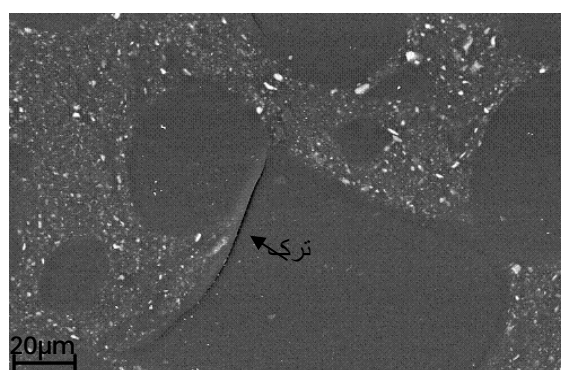
شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح خراش نمونه های با ۰.۵٪ وزنی نانوذرات آلومینا
 (الف) نیروی خراش ۱۰ N (ب) نیروی خراش ۱۵ N (ج) تصویر ب با بزرگنمایی بزرگتر



(الف)

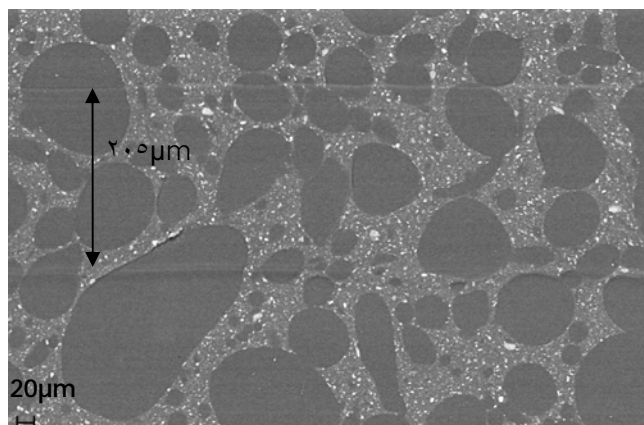


(ب)

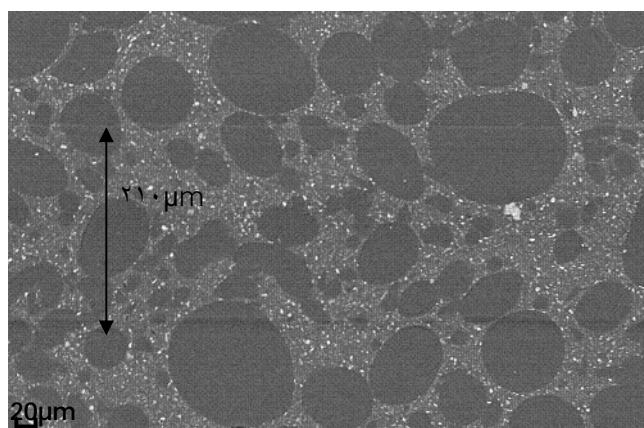


(ج)

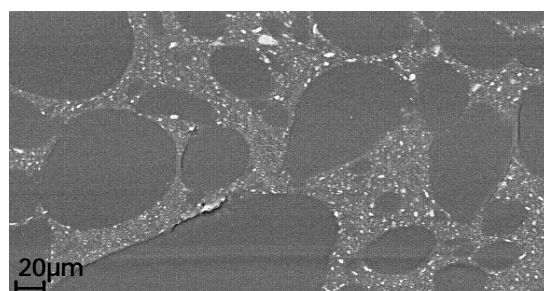
شکل ۸- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه های نانو کامپوزیت با ۱۰٪ وزنی نانو ذرات آلومینا
 (الف) نیروی خراش ۱۰N (ب) نیروی خراش ۱۵ N (ج) تصویر ب با بزرگنمای بزرگ‌تر



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح خراش نمونه های با ۱۵٪ وزنی نانوذرات آلومینا
 الف) نیروی خراش ۱۰N ب) نیروی خراش ۱۵N ج) تصویر الف با بزرگنمایی بزرگتر

