



مطالعه تجربی دوام چرخنده‌های نانوکامپوزیتی پلی آمید ۶-پلی پروپیلن-کربنات کلسیم

رسول محسن‌زاده^۱، کریم شلش‌نژاد^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* shelesh-nezhad@tabrizu.ac.ir، ۵۱۶۶۵-۳۱۵، صندوق پستی

چکیده

چرخنده‌های نانوکامپوزیتی بر پایه آمیخته پلی آمید ۶-پلی پروپیلن (با نسبت وزنی ۶۷/۳۳ PA6/PP) حاوی نانوذرات کربنات کلسیم (۲/۵ تا ۱۰ قسمت وزنی) و سازگارکننده PP-g-MAH (۵ قسمت وزنی) به روش قالب‌گیری تزریقی تولید شد. شکل شناسی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی مطالعه شد. با استفاده از یک دستگاه آزمون دوام چرخنده، مقدار سایش و دمای سطحی دندانها و همچنین عمر کاری چرخنده‌ها تحت دو گشتاور خروجی ۸/۹ و ۱۴/۸ Nm اندازه‌گیری شد. در همه آزمایش‌ها، مقادیر دما و سایش برای چرخنده محرک بیشتر از چرخنده متحرک بود. به کارگیری ۲/۵ و ۵ قسمت وزنی نانو ذرات، باعث کاهش دما و سایش چرخنده‌ها شد. مقدار سایش در چرخنده‌های حاوی ۲/۵ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم تحت گشتاورهای ۸/۹ و ۱۴/۸ Nm به ترتیب حدود ۶۰ و ۸۳ درصد کمتر از چرخنده‌های پلی آمیدی خالص مشاهده شد. حداکثر عمر تحت گشتاور ۱۴/۸ Nm (حدود ۶۳ هزار دور)، در چرخنده‌های نانوکامپوزیتی حاوی ۲/۵ قسمت وزنی از نانو کربنات کلسیم مشاهده شد که این مقدار تقریباً ۲۰۰ درصد بیشتر از عمر چرخنده‌های پلی آمیدی خالص (حدود ۲۱ هزار دور) بود. افزایش دوام چرخنده‌های پایه پلیمری در اثر وجود نانوذرات کربنات کلسیم را می‌توان به بهبود مقاومت خمشی، سایشی و گرمایی دنده‌ها نسبت داد.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۴/۹/۱۶

پذیرش: ۹۴/۱۰/۲۳

کلیدواژگان:

نانو کامپوزیت

پلی آمید ۶

پلی پروپیلن

نانوذرات کربنات کلسیم

عمر چرخنده

Experimental studies on the durability of PA6-PP-CaCO₃ nanocomposite gears

Rasool Mohsenzadeh, Karim Shelesh-Nezhad*

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran
*P.O.B. 51665-315, Tabriz, Iran, shelesh-nezhad@tabrizu.ac.ir

Keywords

Nanocomposite
Polyamide 6
Polypropylene
Nano-CaCO₃
Gear life

Abstract

Nanocomposite gears based on Polyamide 6/Polypropylene (PA6/PP 67/33) blend containing 2.5 to 10 phr of nano-CaCO₃ and 5 phr of maleated polypropylene (PP-g-MAH) as compatibilizer were produced by injection molding. The morphology was studied using scanning electron microscopy. The wear and temperature of gears teeth as well as gears working lives were characterized by employing a gear test rig under two different output torques including 8.9 and 14.8 Nm. In all experiments, the teeth's temperature and wear values for driver gear were higher as compared to those of driven gear. The incorporation of 2.5 and 5 phr nano-CaCO₃, led to the reduction of temperature and wear rate of gears. The wear rates of gears containing 2.5 phr of nano-CaCO₃, under the torque of 8.9 and 14.8 Nm, were 60 and 83% lower than those of neat PA6 gears respectively. The maximum gear life under the torque of 14.8 Nm (63000 revolutions) was observed in nanocomposite gears containing 2.5 phr of nano-CaCO₃ which was nearly 200% higher than that of neat PA6 gears (21000 revolutions). The raise of Polymer based gears performances as a result of CaCO₃ nanoparticles inclusion may be attributed to the improvements of gear teeth flexural, wear and heat resistances.

۱- مقدمه

نوع ماده یا آمیخته پلیمری برای چرخنده با توجه به شرایط محیطی و بارگذاری حائز اهمیت است. پلی‌آمید یا نایلون یکی از مواد پلیمری مهم در ساخت چرخنده‌ها می‌باشد [۲]. پلی آمید در ردیف پلیمرهای مهندسی قرار داشته و بطور نسبی در مقایسه با سایر پلیمرهای گرمانرم از مقاومت مکانیکی، حرارتی، سایشی و خواص عمومی مناسب برخوردار است [۳].

کاربرد چرخنده‌های پلیمری بدلیل برخورداری از امتیازهایی شامل پایین بودن وزن و صدا، عدم نیاز به روانکاری و همچنین سهولت در تولید انبوه، رو به افزایش است [۱]. چرخنده‌های پلیمری در طی انتقال قدرت در معرض شرایط پیچیده‌ای از بارگذاری و فرسایش قرار دارند. بنابراین، انتخاب صحیح

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mohsenzadeh, R. and Shelesh-Nezhad, K., "Experimental studies on the durability of PA6-PP-CaCO₃ nanocomposite gears", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 2, pp. 147-156, 2016.

مهمترین عیوب پلی آمید شامل، فرایند پذیری پایین به دلیل باریک بودن محدوده دمایی قالبگیری آن [۴] و همچنین تمایل زیاد آن به جذب رطوبت است. رطوبت جذب شده در پلی‌آمید، به دلیل تاثیر بر باند هیدروژنی مابین زنجیره‌های پلیمری و افزایش تحرک آن‌ها، باعث کاهش دمای انتقال شیشه ای^۱ می‌شود [۵]. جذب رطوبت در پلیمرهای نیمه بلوری باعث کاهش مدول و تنش تسلیم، افزایش ازدیاد طول تا پارگی [۶] و کاهش مقاومت به سایش [۸،۷] می‌شود.

مخلوط کردن پلی آمید با پلیمرهای دیگر و پرکننده‌های معدنی می‌تواند بر خواص مکانیکی و جذب آب در آمیخته های پلی آمیدی اثر گذارد. نانوذرات معدنی در مقایسه با ذرات معدنی میکرونی دارای سطح ویژه بسیار زیادتر است و بکارگیری آن در زمینه های پلیمری باعث بهبود سفتی، خواص ضربه‌ای و مقاومت به جذب آب می‌شود. مطلبی و همکارانش، نشان دادند، بکارگیری ۵ درصد وزنی نانوذرات کربنات کلسیم در PA6 باعث بهبود ۶ درصدی در مقاومت ضربه ای و کاهش ۱۵ درصدی در جذب آب می‌شود [۹]. منتهی و همکاران از PP برای کاهش جذب آب در PA6، از PP-g-MAH بعنوان سازگار کننده و از نانو ذرات کربنات کلسیم (۲/۵ تا ۱۰ قسمت وزنی) برای بهبود خواص مکانیکی PA6/PP (۷۰/۳۰) استفاده کردند. نتایج نشان دهنده کاهش جذب آب ۷۲ درصدی، افزایش ۱۶ درصدی در استحکام خمشی، افزایش ۳۲ درصدی در مدول خمشی و افزایش ۹۵ درصدی مقاومت ضربه ای در مقایسه با پلی آمید خالص بود [۱۰]. محسن زاده و همکاران، با افزودن نانوذرات کربنات کلسیم به پلی آمید خالص، منجر به افزایش خواص خمشی و ضربه ای پلیمر خالص شدند [۱۱]. کوزومو و همکاران اثر افزودن نانورس و سازگار کننده را بر روی خواص مکانیکی آمیخته PA6/PP مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که وجود نانوذرات رس و افزایش چسبندگی نانوذرات به پلیمر، باعث بهبود خواص کششی و خمشی می‌شود. از سوی دیگر، افزودن نانورس (با و بدون سازگار کننده) باعث کاهش مقاومت ضربه‌ای و ازدیاد طول در نقطه شکست می‌شود [۱۲].

در برخی دیگر از پژوهش‌ها اثر نانوذرات معدنی بر خواص سایشی پلی آمیدها و آمیخته های پلی آمیدی بررسی شده است. نوزاد و همکاران از نانو ذرات کربنات کلسیم جهت کاهش جذب آب و افزایش مقاومت سایشی پلی آمید ۶ استفاده کردند. نتایج آزمون های پین روی دیسک نشان داد که افزودن نانو ذرات کربنات کلسیم منجر به کاهش سایش می‌شود [۱۳]. سریناس و همکاران با افزودن نانو ذرات رس به پلی آمید ۶، خواص سایشی را تحت شرایط خشک و مرطوب به روش پین روی دیسک بررسی کردند. افزودن نانو ذرات رس در شرایط خشک باعث بهبود بیشتر مقاومت سایشی در مقایسه با شرایط مرطوب شد. رطوبت جذب شده در زمینه پلیمری منجر به کاهش مقاومت سایشی شد [۸].

سورش و همکاران، با استفاده از آزمون پین روی دیسک نشان دادند که بکارگیری ۲ درصد وزنی نانو ذرات رس در آمیخته PA6/PP باعث کاهش حدود ۵۰ درصدی در مقدار سایش می‌شود [۱۴]. زانگ و همکاران از نانو ذرات کربنات کلسیم برای افزایش مقاومت سایشی پلی آلفا الفین^۲ استفاده کردند، نتایج آزمون های پین روی دیسک نشان داد که نمونه های نانو کامپوزیتی دارای مقاومت سایشی بیشتر و ضریب اصطکاک پایین تری نسبت به نمونه های خالص می‌باشند. بهبود مقاومت سایشی به اثر روانکاری نانو ذرات کربنات کلسیم نسبت داده شده است [۱۵].

با توجه به شرایط کاری خاص چرخنده ها، مکانیزم سایش در چرخنده‌ها با مکانیزم سایش در آزمون پین روی دیسک متفاوت بوده و بنابراین برای تعیین عمر چرخنده‌ها لازم است از آزمون سایش چرخنده استفاده نمود [۱۶]. مو و همکارانش رفتار سایشی چرخ دنده‌های پلی آمیدی خالص با مدول و تعداد دنده به ترتیب ۲ میلی‌متر و ۳۰ را بطور تجربی مطالعه کردند. در آن تحقیق، مقدار سایش دنده بر حسب مقدار گشتاور و مدت زمان انتقال حرکت تعیین شد و نشان داده شد که با رسیدن گشتاور به یک مقدار بحرانی (۱۰ تا ۱۱ نیوتن-متر)، مقدار سایش بطور قابل ملاحظه ای افزایش می‌یابد. با افزایش مدت زمان انتقال قدرت، دما و سایش دنده ها افزایش یافت [۱۷]. سنتیلوان نانامورسی، تاثیر سرعت دورانی چرخنده و گشتاور اعمالی را بر عملکرد و دمای سطحی دنده چرخنده‌های پلی آمیدی خالص و چرخنده‌های پلی آمید ۶ تقویت شده با ۲۰ درصد الیاف شیشه را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که با افزایش سرعت دورانی و گشتاور چرخنده‌ها، دمای سطحی دنده‌ها افزایش یافته و از عمر انتقال حرکت چرخنده ها کاسته می‌شود. علاوه بر این چرخنده‌های تقویت شده با الیاف شیشه عملکرد بهتری نسبت به چرخنده‌های پلی آمیدی خالص از خود نشان دادند [۱۸]. مرتن و گوروناسان، چرخنده‌های پلیمری و فلزی را تحت آزمون چرخنده، درگیر کردند. نتایج آزمون چرخنده نشان دادند که با افزایش زبری سطح دندانه ها، دمای سطحی دندانه ها افزایش می‌یابد [۱۸]. کیروپاسانگر و سنتیلوان، کارایی چرخنده‌های پلی آمیدی خالص و چرخنده‌های پلی آمیدی با فاز پراکنده نانو رس را با استفاده از یک دستگاه آزمون چرخنده، مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که بکارگیری نانو ذرات رس منجر به افزایش سفتی و کاهش درجه حرارت دنده های چرخنده می‌شود. آنها همچنین بر این عقیده بودند که افزایش سفتی باعث بهبود مقاومت خمشی دنده‌ها و در نتیجه کاهش سطح تماس بین دو چرخنده می‌شود که این می‌تواند منجر به کاهش سایش شود [۱۹].

همانطور که ذکر شد، بکار گیری نانو ذرات ورقه‌ای رس در چرخنده‌های پلی آمیدی باعث بهبود مقاومت سایشی شده است. از سوی دیگر نانو کامپوزیت های پلی آمید-رس دارای محدودیت‌هایی می‌باشند. نانو ذرات رس ساختاری ناهمسانگرد داشته و این می‌تواند منجر به ایجاد نواحی تمرکز تنش و کاهش مقاومت ضربه ای در چرخنده شود. افزون براین، ساختار ناهمسانگرد نانو ذرات رس می‌تواند باعث ناهمسانگردی در خواص مکانیکی و جمع شدگی چرخنده شود. بکارگیری نانو ذراتی با ساختاری همسانگرد مثل نانوذرات کربنات کلسیم احتمالا می‌تواند باعث بهبود دوام چرخنده‌های پلی آمیدی شود. مزایای بکارگیری نانو ذرات کربنات کلسیم در زمینه پلیمری شامل اثر روانکاری و بهبود خواص سایشی [۲۰-۲۲]، پخش انرژی ضربه [۲۳، ۲۴]، خاصیت جوانه زنی بلوری [۸، ۱۹]، بهبود سفتی و مقاومت حرارتی [۱۹] می‌باشند که این عوامل می‌توانند بر دوام چرخنده‌های پایه پلیمری اثر گذارند.

در این تحقیق از PA6، به علت دارا بودن خواص مکانیکی، حرارتی و شیمیایی مناسب و همچنین کاربرد گسترده آن در تولید چرخنده‌های پلیمری [۲]، استفاده شد. برای کاهش جذب رطوبت، PA6 با PP مخلوط شد [۱۰]. از نانو ذرات کربنات کلسیم برای افزایش مقاومت سایشی و دوام چرخنده‌های پایه PA6/PP استفاده شد. آمیخته های مختلف به روش ذوبی آماده شد و چرخنده‌های پلی آمید ۶ خالص، PA6/PP و نانو کامپوزیتی PA6/PP/CaCO3 با استفاده از یک دستگاه قالبگیری تزریقی پیشرفته تولید شد. در این تحقیق، مقاومت سایشی و دوام چرخ دنده‌های قالبگیری

1. Glass transition temperature
2. Poly-alpha-olefin

جدول ۱ فرمول بندی آمیخته‌های مختلف

نام آمیخته	PA6 (wt. %)	PP (wt. %)	PP-g-MAH (phr)	CaCO ₃ (phr) ⁸
PA6	۱۰۰	۰	۰	۰
PA6/PP	۶۷	۳۳	۵	۰
PA6/PP/2.5C	۶۷	۳۳	۵	۲/۵
PA6/PP/5C	۶۷	۳۳	۵	۵
PA6/PP/7.5C	۶۷	۳۳	۵	۷/۵
PA6/PP/10C	۶۷	۳۳	۵	۱۰

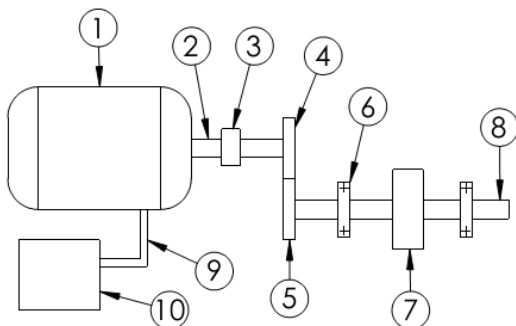
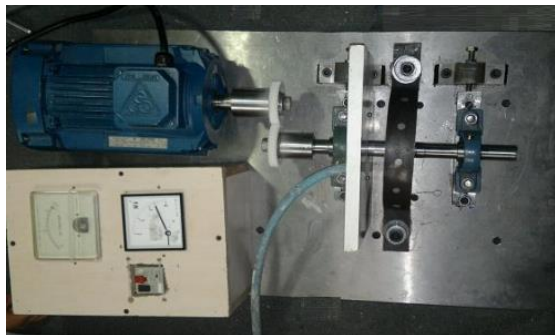
برای آماده سازی نمونه‌های پلی آمید ۶ جذب آب کرده (PA6/W)، چرخنده‌های پلی آمیدی خالص به مدت ۸ روز در آب نگه داشته شدند. با اندازه گیری وزن چرخنده ها قبل و بعد از جذب آب مشخص شد که نمونه ها به مقدار ۵/۴ درصد آب جذب کرده اند.

۴-۲- آزمون میکروسکوپی الکترونی روبشی

میکروسکوپ الکترونی روبشی با ولتاژ کاری ۱۵ kv برای بررسی ریز ساختار در نانو کامپوزیت‌ها و نحوه پراکندگی نانو ذرات در زمینه و همچنین شکل شناسی سایش در نمونه های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. قبل از آزمون‌های میکروسکوپی، سطح نمونه ها توسط لایه ای از طلا پوشش دهی شد.

۵-۲- آزمون دوام چرخنده

شکل ۱، دستگاه آزمون دوام چرخنده را نشان می‌دهد. اجزای اصلی این دستگاه شامل الکتروموتور، محور محرک، محور متحرک و سیستم اعمال گشتاور لنتی می‌باشند.



شکل ۱ دستگاه آزمون دوام چرخنده: ۱- موتور الکتریکی، ۲- محور محرک، ۳- کوپلینگ، ۴- چرخنده محرک، ۵- چرخنده متحرک، ۶- یاتاقان، ۷- سیستم اعمال گشتاور، ۸- محور متحرک ۹- کابل، ۱۰- وات متر

شده تحت گشتاور های مختلف با استفاده از یک دستگاه آزمون دوام چرخنده بطور تجربی مطالعه شد.

۲- تجربی

۱-۲- مواد

پلی آمید-۶ با نام تجاری F223-D آکولون^۱ محصول شرکت دی اس ام^۲ هلند با شاخص جریان مذاب ۱۳ g/۱۰ min و ۲۳۰ °C و ۲/۱۶ kg ، پلی پروپیلن با نام تجاری PI0800 محصول شرکت پتروشیمی بندر امام با شاخص جریان مذاب ۱۰ g/۱۰ min و ۲۳۰ °C و ۲/۱۶ kg به عنوان مواد اولیه پلیمری بکار گرفته شدند. از نانو ذرات کربنات کلسیم پوشش داده شده با اسیداستئاریک محصول شرکت سولوی^۳ فرانسه با نام تجاری ۳۱۲ سوکال^۴ با اندازه متوسط ۷۰ نانومتر، و از پلی پروپیلن پیوند خورده با مالئیک آنیدرید (PP-g-MAH) با نام تجاری PP-G1۱۰ محصول شرکت کیمیا جاوید سپاهان با شاخص جریان مذاب ۶۵ g/۱۰ min و ۱۹۰ °C و ۲/۱۶ kg) محتوی ۱/۳ - ۰/۸ درصد مالئیک آنیدرید، بعنوان سازگار کننده استفاده شد.

۲-۲- تجهیزات

برای تهیه آمیخته‌ها از یک اکسترودر دوپیچی ZSK-25، شرکت کوپرین^۵ آلمان با قطر پیچ ۲۵ mm و نسبت طول به قطر ۴۰ استفاده شد. چرخنده‌های نمونه با مدول ۲ mm و تعداد دندانه ۳۶ با بکارگیری یک دستگاه تزریق پلاستیک ۱۱۰/۳۸۰ از شرکت فولاد قالب‌گیری شدند. جهت شکل‌شناسی نمونه‌ها، از یک میکروسکوپ الکترونی روبشی با نام تجاری VEGA/TESCAN ساخت کشور چک استفاده شد. از یک دستگاه آزمون عملکرد چرخنده، طراحی و ساخته شده در دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، برای تعیین دوام چرخنده‌ها استفاده شد.

این دستگاه دارای توان ۱/۱ کیلووات و دور خروجی ۶۴۵ rpm بوده و در آن از یک موتور AC با ولتاژ ۳۸۰ ولت استفاده شده است. دمای سطح دندانه‌ها در چرخنده‌های مختلف با استفاده از یک سنسور تماسی عددی (Nicer-Ni، شرکت تاستوتروم^۶ آلمان) با دقت ۰/۱ °C اندازه گیری شد. مقدار سایش دندانه با اندازه‌گیری پارامتر کنترلی، پشت تا پشت چهار دنده^۷، و استفاده از یک میکرومتر فک بشقابی با ریزنگری ۰/۰۱ تعیین شد.

۳-۲- آماده سازی نمونه

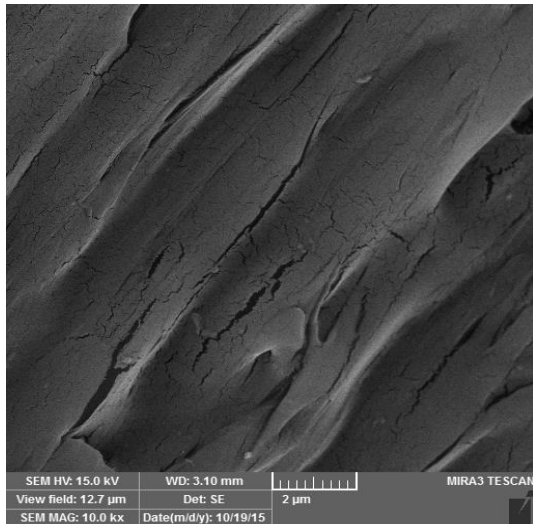
برای تهیه نمونه های مختلف، مواد اولیه شامل PA6، PP، PP-g-MAH و nano-CaCO₃ پس از رطوبت گیری (۸۰ °C، ۸h)، ابتدا به صورت مکانیکی و پس از آن به روش ذوبی و با استفاده از اکسترودر دوپیچه مخلوط شده و رشته‌های خروجی از اکسترودر توسط دستگاه آسیاب به گرانول تبدیل شد. سرعت دورانی مارپیچ‌های اکسترودر معادل ۲۵۰ rpm و دمای هیترها از محل تغذیه تا قالب اکسترودر به ترتیب ۲۱۰، ۲۴۰، ۲۵۰، ۲۵۵، ۲۴۰ و ۲۳۰ °C تنظیم گردید. علائم اختصاری و نسبت وزنی وجود مواد مختلف در آمیخته‌های تهیه شده در جدول ۱ مشخص شده است.

چرخنده‌های نمونه به روش قالب‌گیری تزریقی با دمای مذاب ۲۱۰ °C و دمای قالب ۶۰ °C تولید شد. قبل از قالب‌گیری نمونه‌ها، آمیخته‌ها به مدت ۶ ساعت و در دمای ۸۰ °C رطوبت‌گیری شدند.

1. Akulon
2. DSM
3. SOLVAY
4. SOCAL
5. Coperion
6. Tastotermo
7. Span size

8. Part per hundred resin

با زیاد شدن گشتاور، به دلیل افزایش سطح تماس و اصطکاک، دمای سطحی دندان‌ها بالا می‌رود [۱۸].



شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه PA6/PP

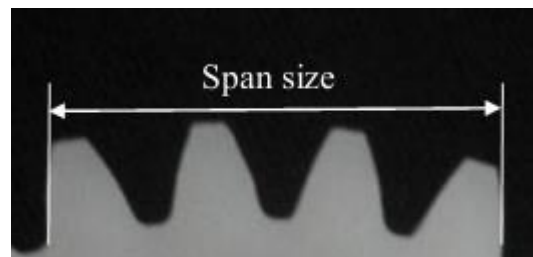
افزودن پلی پروپیلن همراه با سازگارکننده تاثیر جزئی بر دمای سطح دنده‌ها داشته است. بکارگیری نانو ذرات کربنات کلسیم تا ۵ قسمت وزنی به PA6/PP، باعث کاهش دما در سطح دندان‌ها و افزودن بیش از ۵ قسمت وزنی CaCO_3 منجر به افزایش دما شده است. کاهش دما با افزودن نانو ذرات را می‌توان چنین توضیح داد که نانو ذرات معدنی دارای هدایت گرمایی بالاتری در مقایسه با پلی آمید خالص می‌باشند. از سوی دیگر نانو ذرات به دلیل داشتن سطح ویژه بالا [۲۹]، برهم کنش سطحی زیادی با پلیمر زمینه داشته که این می‌تواند منجر به افزایش هدایت گرمایی در چرخنده شده و از انباشتگی حرارت در سطح دندان‌ها مانع کند [۱، ۱۹]. بیشترین دما مربوط به چرخنده PA6/PP/10C می‌باشد و علت آن می‌تواند کلوخه‌ای شدن نانو ذرات کربنات کلسیم باشد. تشکیل نواحی کلوخه‌ای از نانو ذرات می‌تواند منجر به توزیع غیر یکنواخت دما در سطح دنده‌ها شده و باعث انباشتگی حرارت در سطح دندان‌ها شود.

نتایج عملکرد سایشی چرخنده‌های مختلف تحت گشتاور $8/9 \text{ Nm}$ پس از 80000 دور و تحت گشتاور $14/8 \text{ Nm}$ پس از 10000 دور، به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

شکل‌های ۷ و ۸، افزایش مقدار سایش در نمونه‌های پلی آمیدی جذب آب کرده را در مقایسه با نمونه‌های پلی آمید خالص نشان می‌دهد. نفوذ مولکول‌های آب به درون زنجیره‌های پلیمری، جاذبه بین زنجیره‌های پلیمری را کاهش می‌دهد و در نتیجه جدایش زنجیره‌ها از یکدیگر با مقاومت کمتری انجام می‌پذیرد و مقاومت سایشی کاهش می‌یابد [۸، ۳۰]. به دلیل پایین بودن خواص سایشی PP در مقایسه با PA6 [۳۱]، با افزودن PP به PA6، مقدار سایش افزایش یافته است. افزودن $2/5$ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم به PA6/PP، منجر به کاهش ۶۰ درصدی مقدار سایش تحت گشتاور $8/9 \text{ Nm}$ و کاهش ۸۰ درصدی مقدار سایش تحت گشتاور $14/8 \text{ Nm}$ نسبت به پلی آمید خالص شده است. نانو ذرات کربنات کلسیم در پلیمر زمینه خاصیت هسته زنی داشته و می‌تواند منجر به افزایش درجه بلورینگی شود [۸، ۳۲].

در آزمون سایش، دو چرخ دنده یکسان بعنوان چرخنده‌های محرک (۴) و متحرک (۵) تحت دو گشتاور مختلف ($14/8$ و $8/9$ نیوتن متر) و یک دور ثابت (۶۴۵) دور بر دقیقه تا 8×10^4 دور باهم درگیر شدند و کار کردند. گشتاور مورد نیاز از طریق یک سیستم ترمز لنتی (۷) تامین شد و مقدار آن با استفاده از جریان مصرفی موتور کنترل شد.

در این تحقیق دو گشتاور با سطوح پایین ($8/9$ نیوتن متر) و بالا ($14/8$ نیوتن متر)، بر اساس مقادیر گشتاور بحرانی گزارش شده برای چرخنده‌های پلی آمیدی با مدول ۲ [۱۷]، انتخاب شد. فاصله پشت تا پشت چهار دنده متوالی (Span size) به عنوان پارامتر کنترلی مقدار سایش اندازه‌گیری شد. شکل ۲ تصویری از شرایط اندازه‌گیری Span size را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری دمای سطح دندان‌ها پس از هر 10000 دور و در لحظه توقف موتور انجام شد. هر آزمون اندازه‌گیری سه بار تکرار شد.

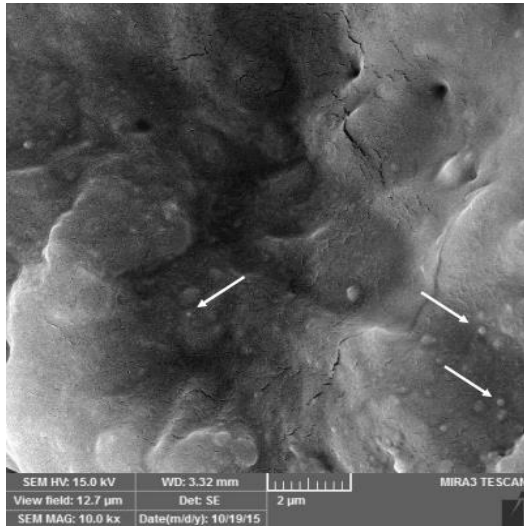


شکل ۲ پارامتر کنترلی برای اندازه‌گیری سایش

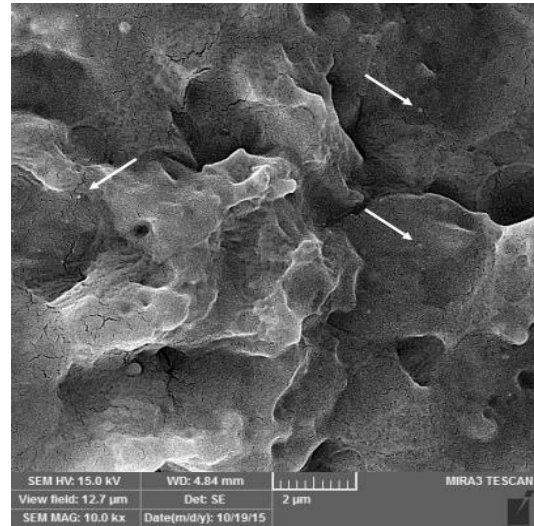
۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی وجود و نحوه پراکندگی نانو ذرات کربنات کلسیم در زمینه پلیمر، تصاویر SEM از مقاطع شکست نمونه‌های مختلف تهیه شد. شکل‌های ۳ و ۴ تصاویر SEM از آمیخته‌های PA6/PP بدون نانو ذرات کربنات کلسیم (شکل ۳)، و نیز آمیخته‌های حاوی $2/5$ ، 5 ، $7/5$ و 10 قسمت وزنی نانو ذرات کربنات کلسیم (شکل ۴)، را نشان می‌دهد. با به کارگیری نانو ذرات کربنات کلسیم تا ۵ قسمت وزنی، نانو ذرات بطور نسبتاً یکنواخت در پلیمر زمینه پخش می‌شود. وجود سازگارکننده و پوشش اسیداستتاریک بر سطح نانو ذرات کربنات کلسیم، به طور چشم‌گیری انرژی آزاد سطح پرنکننده و در نتیجه برهم کنش ذره-ذره را کاهش می‌دهد. این منجر به پراکندگی بهتر نانو ذرات کربنات کلسیم در زمینه پلیمری و کاهش کلوخه شدن آن‌ها می‌گردد. [۲۶، ۲۵]. هرچند پوشش دهی سطح، انرژی سطحی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد اما به دلیل کوچکی نانو ذرات و بزرگی سطح ویژه و در نتیجه بالا بودن تراز انرژی آزاد سطح، احتمال به هم چسبیدن ذرات و کلوخه شدن در درصدهای بیشتر وجود دارد [۲۷، ۲۸]. در نمونه‌های حاوی $7/5$ و 10 قسمت وزنی نانو ذرات کربنات کلسیم، پراکندگی ذرات کاهش یافته و آثار کلوخه شدن مشاهده می‌شود.

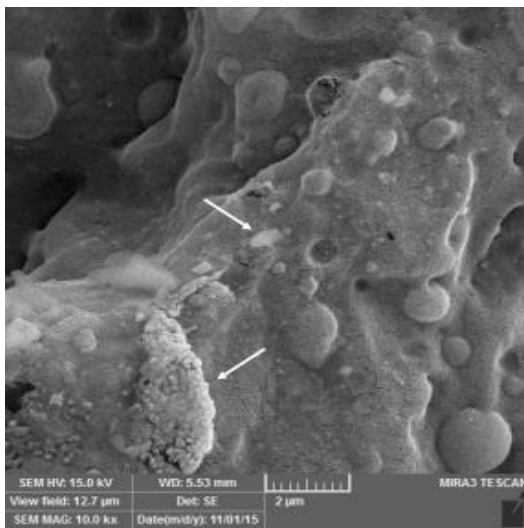
شکل‌های ۵ و ۶، تغییرات دمایی در سطح دنده چرخنده‌های مختلف به ترتیب تحت گشتاور $8/9 \text{ Nm}$ و $14/8 \text{ Nm}$ را نشان می‌دهند. در طی انتقال قدرت از چرخنده محرک به متحرک، به دلیل لغزش و اصطکاک بین سطوح دندان‌ها، بخشی از انرژی مکانیکی به حرارتی تبدیل می‌شود و دمای چرخنده‌ها افزایش می‌یابد. افزایش دما می‌تواند منجر به افت خواص مکانیکی و در نتیجه تغییر شکل چرخنده شود. افزون بر این، مقایسه نتایج تغییرات دما تحت دو گشتاور مختلف (شکل‌های ۵ و ۶) نشان می‌دهد که افزایش گشتاور باعث افزایش دما می‌شود.



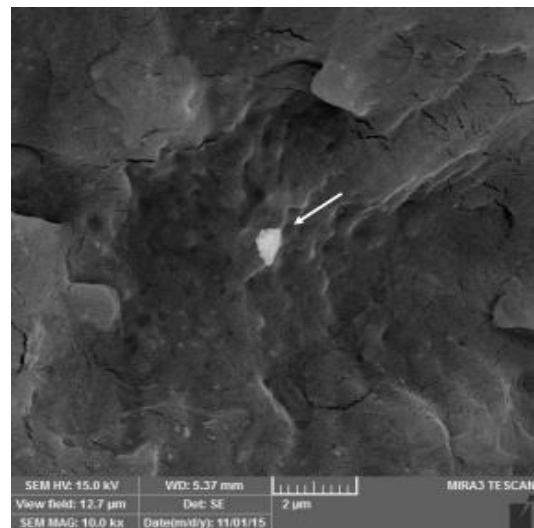
ب



الف

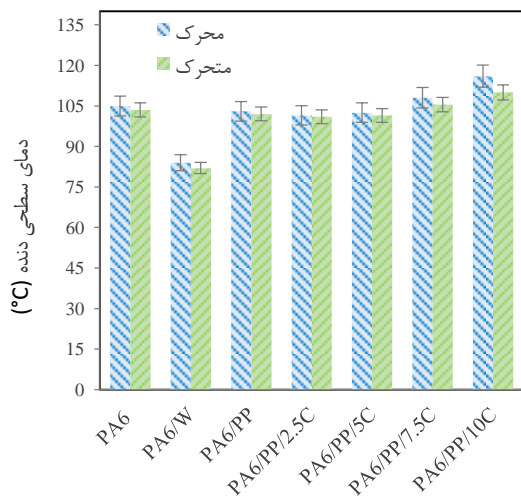


د

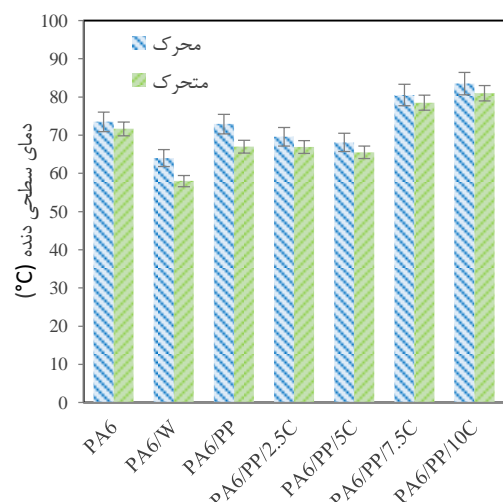


ج

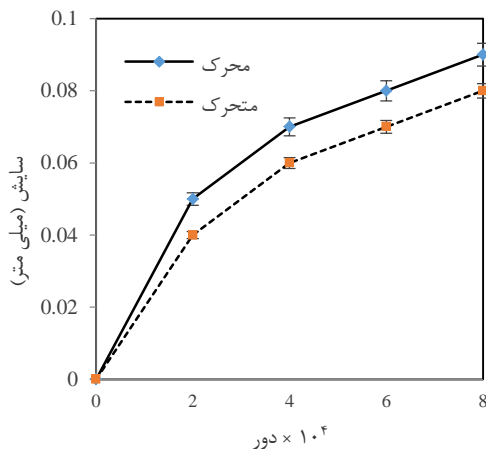
شکل ۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی برای نمونه‌های نانو کامپوزیتی: الف) PA6/PP/2.5C، ب) PA6/PP/5C، ج) PA6/PP/7.5C، د) PA6/PP/10C



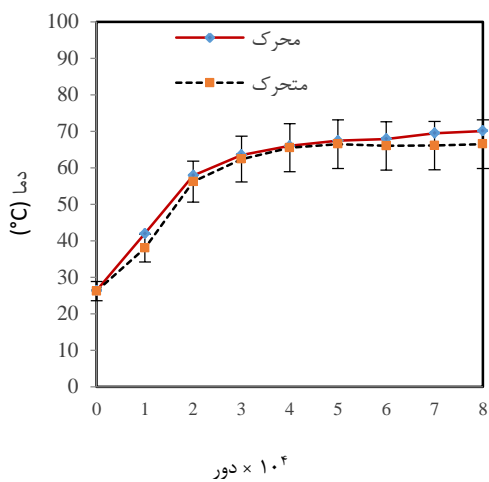
شکل ۶ دما در سطح دنده چرخنده‌ها تحت گشتاور ۱۴/۸ Nm



شکل ۵ دما در سطح دنده چرخنده‌ها تحت گشتاور ۸/۹ Nm

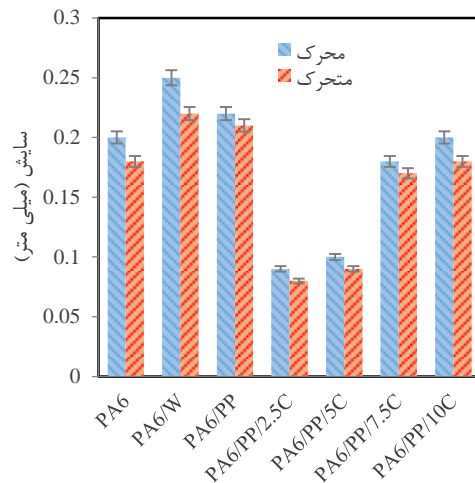


شکل ۹ سایش بر حسب تعداد دور برای چرخنده‌های محرک و متحرک PA6/PP/2.5C تحت گشتاور ۸/۹ Nm

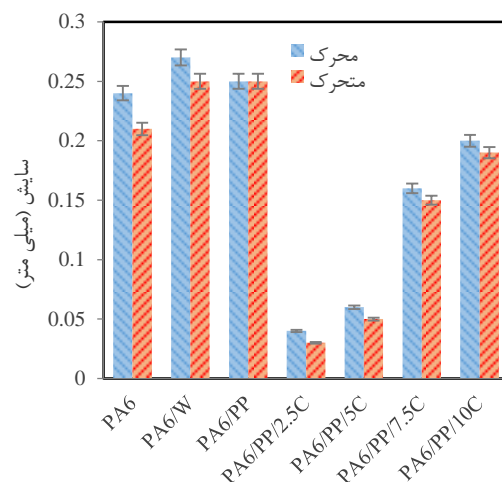


شکل ۱۰ دما بر حسب تعداد دور برای چرخنده‌های محرک و متحرک PA6/PP/2.5C تحت گشتاور ۸/۹ Nm

مطابق شکل ۹، نمودار سایش-زمان را می‌توان به دو مرحله تقسیم بندی نمود، در مرحله اول شیب نمودار روند تندی داشته و در مرحله دوم شیب نمودار به تدریج کاهش می‌یابد. علاوه بر این در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود که تغییرات دمایی در ابتدا به سرعت تا دمای حدود ۶۰ درجه سانتیگراد افزایش یافته و پس از ۲۰۰۰۰ دور روند تقریباً ثابتی را طی می‌کند. دلیل اختلاف در شیب تغییرات را می‌توان به وجود انحراف در پروفیل اینولوت دنده چرخنده‌های قالبگیری شده در مقایسه با پروفیل استاندارد نسبت داد. به طور کلی، حذف کامل خطا و انحراف از پروفیل استاندارد غیر ممکن است ولی می‌توان با بهینه سازی شرایط قالبگیری، آن را کاهش داد. در مرحله ابتدایی از درگیری یک جفت چرخنده، به دلیل وجود خطاهای ابعادی و هندسی در چرخنده‌ها، نرخ سایش زیادتر است. با ادامه کار چرخنده‌ها برای مدت طولانی‌تر، نرخ سایش کمتر می‌شود. در طی انتقال حرکت، سطوح دنده‌ها با یکدیگر درگیر شده و تمایل به منطبق شدن با یکدیگر دارند. این، باعث سایش بخش‌های اضافی و یا رفع انحراف از پروفیل اینولوت در سطوح دنده‌ها می‌شود. پس از گذشت مدت زمانی از درگیری دو چرخنده، سایش (و همچنین دما) با شیب کمتری تغییر می‌کند. دما و سایش در چرخنده‌ها محرک بیشتر از متحرک است (شکل‌های ۹ و ۱۰). با



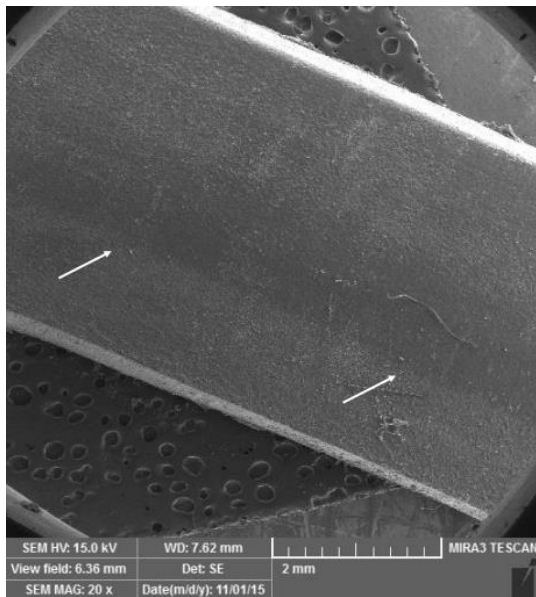
شکل ۷ سایش چرخنده‌ها تحت گشتاور ۸/۹ Nm



شکل ۸ سایش چرخنده‌ها تحت گشتاور ۱۴/۸ Nm

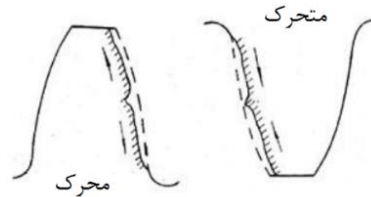
افزایش هسته زنی و درجه بلورینگی می‌تواند باعث افزایش مقاومت به سایش پلیمر زمینه شود. علاوه بر این چرخنده‌های پلی آمیدی خالص از مدول پایین تری، نسبت به چرخنده‌های نانو کامپوزیتی، برخوردار هستند و بنابراین سطح تماس دندانه‌ها در چرخنده‌های محرک و متحرک پلی آمیدی خالص در مقایسه با چرخنده‌های نانو کامپوزیتی، بیشتر است. افزایش سطح تماس درگیری دندانه‌ها منجر به افزایش حرارت و سایش می‌شود [۱۹]. افزون بر این، نانو ذرات کربنات کلسیم، به دلیل داشتن شکل هندسی شبه کروی، می‌تواند نقش روانکار را ایفا کند [۱۵]. نانو ذرات کربنات کلسیم از تماس مستقیم پلیمر با پلیمر کاسته و مانند بلبرینگ در تجهیزات مکانیکی عمل کرده که این منجر به کاهش لغزش و سایش می‌شود [۱۵]. افزودن مقدار بیشتری از نانو ذرات (۵ قسمت وزنی) به طور جزئی مقدار سایش را، در مقایسه با نانو کامپوزیت حاوی ۲/۵ قسمت وزنی، افزایش داد. افزودن مقادیر بالاتر (۷/۵ و ۱۰ قسمت وزنی) از نانو ذرات کربنات کلسیم، منجر به افزایش قابل توجه نرخ سایش شده که علت آن می‌تواند کلوخه ای شدن ذرات کربنات کلسیم در زمینه پلیمری باشد. کلوخه‌های کربنات کلسیم می‌توانند به عنوان عوامل ساینده عمل نموده [۳۰] و باعث افزایش سایش در چرخنده‌ها شوند. شکل‌های ۹ و ۱۰، به ترتیب نتایج آزمون سایش و تغییرات دمایی، برای دو چرخنده محرک و متحرک نانو کامپوزیتی محتوی ۲/۵ قسمت وزنی کربنات کلسیم بر حسب تعداد دور، تحت گشتاور ۸/۹ Nm نشان می‌دهد.

مقایسه با نمونه محتوی ۲/۵ قسمت وزنی نانو ذرات کربنات کلسیم مشاهده می‌شود.



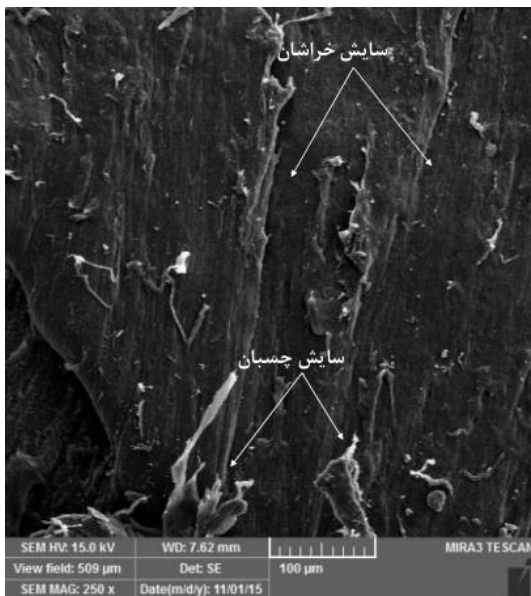
شکل ۱۲ سایب سطح دنده در ناحیه دایره گام چرخنده محرک محتوی ۲/۵ قسمت وزنی نانو ذرات

توجه به پروفیل سطحی دندانه‌ها، سطوح تماسی دو چرخنده محرک و متحرک نسبت به یکدیگر دارای غلظت و لغزش می‌باشند. سایش در تمام سطوح دنده چرخنده‌های محرک و متحرک رخ می‌دهد. با وجود این، بیشترین سایش در چرخنده محرک و در منطقه دایره گام ایجاد می‌شود. طی انتقال حرکت، در سطوح بالا و پایین ناحیه دایره گام، تماس لغزشی قابل ملاحظه‌ای وجود داشته و در چرخنده محرک منجر به ایجاد تنش‌های سطحی در دو جهت خلاف یکدیگر می‌شود. این می‌تواند باعث ایجاد ریز ترک‌هایی در ناحیه دایره گام دنده چرخنده محرک شده و سایش در آن ناحیه را تشدید کند. (شکل ۱۱) [۳۳، ۳۴].

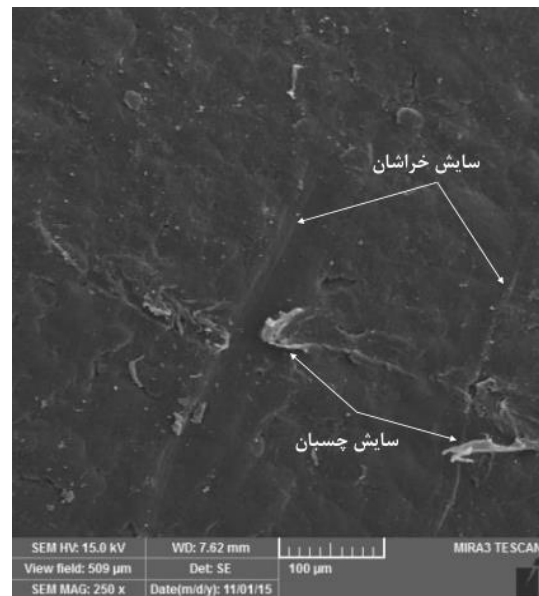


شکل ۱۱ وضعیت سایش سطح دنده در چرخنده‌های محرک و متحرک [۳۴]

شکل ۱۲، سایش بر روی سطح دنده چرخنده محرک در ناحیه دایره گام را نشان می‌دهد. شکل ۱۳، تصاویر SEM از بافت سطحی دندانه در چرخنده‌های حاوی ۲/۵ و ۱۰ قسمت وزنی نانو ذرات کربنات کلسیم را نشان می‌دهد. سایش چسبان و خراشان در هر دو نمونه قابل مشاهده می‌باشد. یک بافت سطحی خشن‌تر در نمونه محتوی ۱۰ قسمت وزنی در



ب



الف

شکل ۱۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سایش سطحی دنده برای نمونه‌های نانو کامپوزیت: الف) PA6/PP/2.5C، ب) PA6/PP/10C

گشتاور ۸/۹ نیوتن متر، و در وضعیت تغییر شکل دائمی پس از ۶۳ هزار دور تحت گشتاور ۱۴/۸ نیوتن متر را نشان می‌دهد.

شکل ۱۵ نتایج دوام و عمر چرخنده‌ها تحت گشتاور ۱۴/۸ Nm را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۵، جذب آب ۵/۴ درصدی در چرخنده پلی آمیدی (PA6/W) باعث کاهش حدود ۳۹ درصدی عمر چرخنده شد. افزودن PP به PA6 منجر به کاهش جزئی عمر چرخنده شده است. افزودن

آزمون‌های عمر چرخنده‌ها تحت گشتاور پایین‌تر (۸/۹ Nm) و ۸۰۰۰۰ دور نشان داد که چرخنده‌ها می‌توانند بدون مشکل در انتقال حرکت به کار خود ادامه دهند. در گشتاور بالاتر (۱۴/۸ Nm) چرخنده‌ها در دوره‌های کمتر از ۶۳۰۰۰ دچار تغییر شکل دائمی شدند و انتقال حرکت متوقف شد. شکل ۱۴، چرخنده نانو کامپوزیتی حاوی ۲/۵ قسمت وزنی نانو ذرات کربنات کلسیم در مراحل قبل از آزمون، پس از ۸۰ هزار دور تحت

به ابعاد کوچک و پراکندگی ذرات تقویت کننده در پلیمر زمینه، انرژی وارد شده پخش شده [۲۴] و بنابراین میزان انرژی جذب شده در چرخنده افزایش می‌یابد. بکارگیری مقادیر بالا از نانوذرات (۷/۵ و ۱۰ قسمت وزنی) باعث کاهش قابل ملاحظه در عمر چرخنده‌ها شد. این نتیجه می‌تواند به دلیل کلوخه‌ای شدن نانوذرات در زمینه پلیمری باشد.

۴- نتیجه‌گیری

چرخنده‌های نانو کامپوزیتی PA6/PP/CaCO₃ محتوی ۲/۵ تا ۱۰ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم به روش قالبگیری تزریقی تولید و تحت آزمون دوام چرخنده در دو گشتاور ۸/۹ Nm و ۱۴/۸ Nm قرار گرفتند. نتایج نشان داد، بکارگیری ۲/۵ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم منجر به کاهش قابل ملاحظه‌ی سایش و دما در چرخنده‌ها می‌شود. به کارگیری ۲/۵ قسمت وزنی از نانوذرات کربنات کلسیم، عمر چرخنده‌ها را تحت گشتاور ۱۴/۸ نیوتن متر، تا ۲۰۰ درصد در مقایسه با پلی آمید خالص، افزایش داد. بکارگیری ۷/۵ و ۱۰ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم، منجر به کلوخه شدن ذرات و افزایش مقدار سایش و حرارت و همچنین کاهش عمر چرخنده‌ها شد. مقدار سایش در چرخنده‌های حاوی ۲/۵ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم تحت گشتاورهای ۸/۹ و ۱۴/۸ Nm به ترتیب حدود ۶۰ و ۸۳ درصد کمتر از چرخنده‌های پلی آمیدی خالص مشاهده شد. در همه آمیخته‌ها، مقادیر سایش و دما در چرخنده‌های متحرک و متحرک، بر حسب تعداد دور کاری، در ابتدا بالا و پس از رسیدن به یک تعداد دور مشخص پایین آمده و به یک مقدار تقریباً ثابتی می‌رسد.

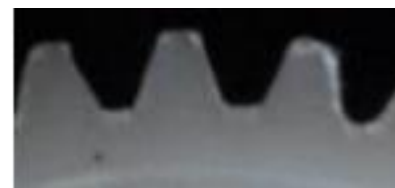
۵- مراجع

- [1] Senthilvelan, R. G., "Effect of Rotational Speed on the Performance of Unreinforced and Glass Fiber Reinforced Nylon6 Spur Gears," Journal of Materials and Design, Vol. 28, pp. 765-772, 2007.
- [2] Imrek, H., "Performance Improvement Method for Nylon 6 Spur Gears," Journal of Tribology International, Vol. 42, pp. 503-510, 2009.
- [3] Alfredo, E., "Selection of Polymeric Materials," USA: William Andrew, pp. 26-27, 2008.
- [4] Faruk, M. Hilal, C. and Mustafa, K., "Fatigue Properties of Polypropylene involute Rack Gear Reinforced with Metallic Springs," Journal of Materials and Design, Vol. 27, pp. 427-433, 2006.
- [5] Kohan, M.L., "Nylon Plastics" handbook, Munich: Carl Hanser, pp. 32-43, 1995.
- [6] Vlasveld, D. P. N. Groenewold, J., Bersee, H. E. N. and Picken, S. J., "Moisture Absorption in Polyamide-6 Silicatenanocomposite and Its Influence on the Mechanical Properties," Journal of Polymer, Vol. 46, pp. 12567-12576., 2005.
- [7] Evans, D. C., "Polymer-Fluid Interaction in Relation to Wear," In: Dowson D, Godet M, Taylor CM, editors. Proceedings of the third Leeds-Lyon symposium on tribology, the wear of non-metallic materials. London: Mechanical Engineering Publication Ltd.; pp. 47-56. 1978.
- [8] Srinath, G., "Sliding Wear Performance of Polyamide6-Clay Nano Composites in Water," Journal of Composites Science and Technology, Vol. 67, pp. 339-405, 2007.
- [9] Orang, H, and Matlabi, M., "Comparison of Mechanical Properties of Polyamide 6 - Calcium Carbonate Nano Composites," In Persian, in 11th Conference on Manufacturing Engineering, Tabriz University: 2010.
- [10] Montakhabi-Kalajahi, S., "The Effect of Adding Mineral Nanoparticles on the Mechanical Properties of PA/PP Alloy," In Persian, Ms. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Tabriz University, 2011.
- [11] Mohsenzadeh, R., Seyyed Noorani, M. R. and Nozad Bonab, A., "Experimental Study on the Thermal Behavior and Mechanical Properties of PA6/CaCO₃Nanocomposites" In Persian. Nanomaterials. Vol. 21, No. 7. pp. 45-52.2015.
- [12] Kusmono, M. I. C. Takeichi, T. and Rochmadi., "Enhancement of Properties of PA6/PP Nano Composites Via Organic Modification and Compatibilization," Express Polymer Letters, Vol. 2, No.9, PP. 655-664. 2008.
- [13] Nozad Bonab, A. Seyyed Noorani, M.R., and Mohsenzadeh, R., "Experimental Study on the Water Absorption and Tribological

۲/۵ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم به زمینه PA6/PP، منجر به افزایش حدود ۲ برابری عمر چرخنده در مقایسه با چرخنده‌های پلی آمیدی خالص شد. همانطور که در قسمت قبل نشان داده شد، نانو ذرات کربنات کلسیم، باعث کاهش سایش و حرارت در دنده‌ها می‌شود و این می‌تواند منجر به کاهش تغییر شکل دائمی و افزایش عمر گردد.



الف

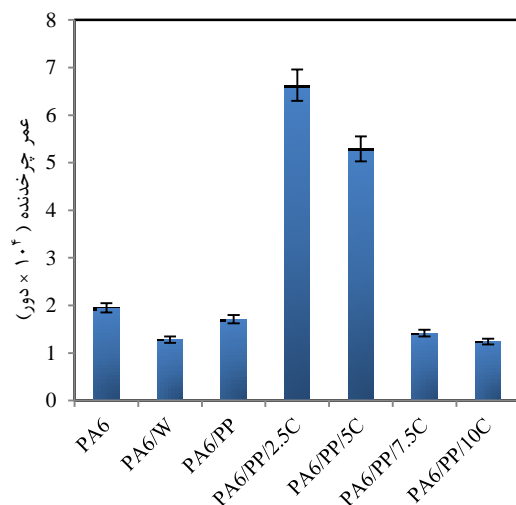


ب



ج

شکل ۱۴ چرخنده PA6/PP/2.5 (الف) قبل از آزمون (ب) پس از ۸۰ هزار دور تحت گشتاور ۸/۹ (ج) پس از ۶۳ هزار دور تحت گشتاور ۱۴/۸ Nm و تغییر شکل دائمی



شکل ۱۵ مقایسه نتایج عمر چرخنده‌های مختلف تحت گشتاور ۱۴/۸ Nm حضور نانو ذرات همچنین می‌تواند باعث تغییر در بلورینگی زمینه پلیمری و بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت شود [۱۹]. افزون بر این، با توجه

- Properties of PA6/CaCO₃ Nanocomposites” In Persian. Modares Mechanical Engineering. Vol. 15, No. 5 .pp. 108-114, 2015.
- [14] Suresha, B. RaviKumar, B. N. and Venkataramareddy, M., “Role of Micro/Nano Fillers on Mechanical and Tribological Properties of Polyamide66/Polypropylene Composites,” Journal of Materials and Design, Vol. 31, pp. 19-23, 2010.
- [15] Zhang, M. Wang, X.B. Fu, X.S. and Xia, Y.Q., “Performance and Anti-Wear Mechanism of CaCO₃ Nanoparticles as a Green Additive in Poly-Alpha-Olefin,” Tribol, Vol. 42, 1029-1039, 2009.
- [16] Wright, N.A. and Kukureka, S.N., “Wear Testing and Measurement Techniques for Polymer Composite Gears,” Wear, Vol. 251, pp. 1567-1578, 2001.
- [17] Mao, K., “Friction and Wear Behavior of Acetal and Nylon Gears,” Wear, Vol. 267, pp. 639-645, 2009.
- [18] Johnney Mertens, A. and Gurunathan, R., “Effect of Mating Metal Gear Surface Texture on the Polymer Gear Surface Temperature” Materials Today: Proceedings 2. pp. 1763-1769, 2015.
- [19] Kirupasankar, C., and Senthilvelan, S., “Transmission Efficiency of Polyamide Nanocomposite Spur Gears,” Journal of Materials and Design, Vol. 112 pp. 1-32, 2014.
- [20] Ayman, A., “Friction and Wear of Polymer Composites Filled by Nanoparticles,” World Journal of Nano Science and Engineering, Vol. 2, pp. 32-39, 2012.
- [21] Li, D. and Chang, A., “Enhancement Effect of Nanoparticles on the Sliding Wear of Shortfiber-Reinforced Polymer Composites,” Tribology International, Vol. 43, pp. 2355-2364, 2010.
- [22] Chang, L., “On the Sliding Wear of Nanoparticle Filled Polyamide 66 Composites,” Composites Science and Technology, Vol. 66, pp. 3188-3198, 2006.
- [23] Zhang, Q., “Crystallization and Impact Energy of Polypropylene/CaCO₃ Nanocomposites with Nonionic Modifier,” In Persian, Journal of Polymer, Vol. 45, pp. 5985-5994, 2004.
- [24] Kemal, I. Whittle, A. Burford, R. Vodenitcharova, T. and Hoffman, M., “Toughening of Unmodified Polyvinylchloride through the Addition of Nanoparticulate Calcium Carbonate,” Polymer, Vol. 50, pp. 4066-4079, 2009.
- [25] Lin, Y. Chen, H. Chan, C.M. and Wu, J., “High Impact Toughness Polypropylene/CaCO₃ Nanocomposites and the Toughening Mechanism,” Macromolecules, Vol. 41, pp. 9204-9213, 2008.
- [26] Lin, Y. Chen, H. Chan, C.M. and Wu, J., “Effects of Coating Amount and Particle Concentration on the Impact Toughness of Polypropylene/CaCO₃ Nanocomposites,” European polymer journal, Vol. 47, pp. 294-304, 2010.
- [27] Kiss, A. Fekete, E. and Pukanszky, B., “Aggregation of CaCO₃ Particles in PP Composites: Effect of Surface Coating,” Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 67, pp. 1574-1583, 2007.
- [28] Chan, C.M. Wu, J. Li, J.X. and Cheung, Y.K., “Polypropylene/Calcium Carbonate Nanocomposites,” Polymer, Vol. 43, pp. 2981-2992, 2002.
- [29] Jordan, J. Jacob, Kl. Tannenbaum, T. Sharaf, M. A. and Janise, I., “Experimental Trends in Polymer Nanocomposites,” Mater Sci Eng, Vol. 393, pp. 1-11, 2005.
- [30] Scheirs, J. Compositional and Failure Analysis of Polymers—A practical Approach. Chichester: John Wiley and Sons; 2000.
- [31] Tripathi, D. Practical Guide to Polypropylene. UK: Rapra Technology Limited; 2002.
- [32] Lam, T.D. Hoang, T.V. Quang, D.T. and Kim, J.S., “Effect of Nanosized and Surface-Modified Precipitated Calcium Carbonate on Properties of CaCO₃/Polypropylene Nanocomposites,” Materials Science and Engineering, Vol. 501, pp. 87-93, 2009.
- [33] Mao, K., “Friction and Wear Behavior of Acetal and Nylon Gears,” Wear, Vol. 267, pp. 639-645, 2009.
- [34] Mao, K., “A New Approach for Polymer Composite Gear Design,” Wear, Vol. 262, pp. 432-441, 2007.

