

مطالعه تجربی رفتار سایشی چرخنده های قالبگیری شده نانو کامپوزیتی

رسول محسن زاده^۱، کریم شلش نژاد^۲، علی نوزادبناب^۳

^۱گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

^۲گروه مهندسی ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز

^۳گروه مهندسی طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد علوم تحقیقات واحد تبریز

چکیده

بکارگیری چرخنده های پلیمری با توجه به مشخصه هایی همچون، کارکرد بدون صدا، توانایی کارکرد بدون روانکار و هزینه پایین تولید، رو به گسترش است. پلی آمید از جمله مواد پلیمری پرکاربرد در ساخت چرخنده ها می باشد. مهمترین عیبی را که می توان برای پلی آمیدها برشمرد، جذب رطوبت بالای این پلیمر است که منجر به افت قابل ملاحظه در خواص مکانیکی پلی آمید می شود. در این پژوهش پلیمر پلی پروپیلن، بدلیل مقاومت به جذب آب بالا، به پلی آمید ۶ اضافه شد، افزون بر این، از سازگار کننده، پلی پروپیلن پیوند خورده با مالئیک آنیدرید و از نانو کربنات کلسیم بعنوان فاز پراکنده در آمیخته پلیمری PA6/PP استفاده شد. چرخنده های نانو کامپوزیتی مورد نظر، با استفاده از یک دستگاه قالبگیری تزریقی تولید شد. در مرحله بعد، با استفاده از یک دستگاه تست ریگ، دوام چرخنده های نانو کامپوزیتی، میزان سایش چرخنده ها، و دمای سطح دندان چرخنده ها اعم از چرخنده های محرک و متحرک، تحت گشتاور ۱۴،۸ Nm اندازه گیری شد. نتایج حاصل از آزمون های دوام چرخنده ها نشان داد که حداکثر عمر در آمیخته محتوی ۲،۵ phr نانو کربنات کلسیم، نزدیک ۲،۵ برابر بیشتر از عمر چرخنده های پلی آمیدی رخ می دهد.

واژه های کلیدی: چرخنده، پلی آمید، نانو کامپوزیت، سایش.

Rasoolmohsenzadeh@gmail.com

۱- مقدمه

چرخنده ها عموماً در انتقال حرکت و قدرت، تحت بارها و سرعت های مختلف استفاده می شوند. کاربردهای چرخنده های پلیمری بدلیل برخورداری از امتیازاتی همچون، کارکرد بی صدا، وزن کم، ضریب اصطکاک پایین و توانایی کارکرد بدون روانکار و همچنین سهولت در تولید انبوه، رو به افزایش است. پلی آمید از جمله مواد پلیمری پرکاربرد در ساخت چرخنده ها می باشد [۱]. این پلیمر در رده ترمو پلاستیک های مهندسی قرار دارد و در مقایسه با اکثر پلیمر ها از مقاومت حرارتی، سایشی و خواص عمومی مناسب برخوردار می باشد. مهمترین عیب پلی آمید، فرایند پذیری پایین و تمایل زیاد آن به جذب رطوبت است که این مشکل منجر به افت قابل ملاحظه در خواص مکانیکی این پلیمر از جمله تنش تسلیم و مقاومت سایش می شود [۲]. بنابراین، کاهش جذب رطوبت و افزایش خواص مکانیکی جهت ارتقای کاربرد مهندسی این ماده از جمله دغدغه های صنعت می باشد و محققان را بر آن داشته تا تحقیقاتی در این زمینه انجام دهند. منتخبی [۳] در تحقیقی که جهت کاهش جذب آب PA6 و ارتقای کاربرد مهندسی این ماده انجام داد، از PP جهت کاهش جذب آب، از PP-g-MAH بعنوان سازگار کننده و از نانوکربنات کلسیم جهت تقویت خواص مکانیکی استفاده کرد و در نهایت شاهد کاهش جذب آب، افزایش استحکام و مدول خمش شد. کوزمو و همکارانش [۴] با اضافه کردن نانو رس به ترکیب PA6/PP، کاهش مقاومت در مقابل ضربه و ازدیاد طول در نقطه شکست را مشاهده کردند. اشرفی [۵] اثر افزودن نانو ذرات رس روی خواص سایشی چرخنده های نانو کامپوزیتی پلی استال و پلی آمید ۶ را مورد بررسی قرار داد. نتایج تست سایش چرخنده ها، کاهش میزان سایش دندان را در تمام نانو کامپوزیت ها نسبت به پلیمر خالص را نشان داد. همچنین نتایج حاصل از اندازه گیری دمای سطح دندان ها، کاهش دمای سطح دندان چرخنده های نانو کامپوزیتی را نسبت به دمای دندان پلیمر خالص نشان داد. مو و همکارانش [۶] رفتار سایشی چرخنده های پلی

آمیدی و پلی استال خالص بطور تجربی مطالعه کردند. در آن تحقیق اثر مدت زمان انتقال حرکت و میزان گشتاور بر اندازه سایش دنده آزمایش شد و نشان داده شد که در یک بار بحرانی، میزان سایش بطور قابل ملاحظه ای افزایش یافته و ازدیاد درجه حرارت یکی از عوامل اصلی در تعیین نرخ سایش چرخ دنده است.

۲- هدف اصلی

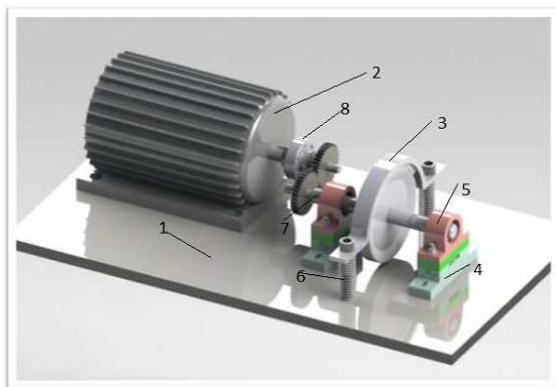
هدف از این تحقیق، مطالعه تجربی مقاومت سایشی چرخ دنده های قالبگیری شده از مواد پلیمری PA6/PP که به آن ذرات تقویت کننده کربنات کلسیم در مقیاس نانو افزوده شده، می باشد.

۳- مواد و روش ها

۳-۱- مواد

در این تحقیق از PA6 با نام تجاری Akulon F223-D با شاخص جریان مذاب ۱۳g/۱۰ min محصول شرکت DSM، از PP با نام تجاری PI0800 با شاخص جریان مذاب ۱۰g/۱۰ min محصول شرکت پتروشیمی بندرامام، از Nano - CaCO₃ با نام تجاری SOCAL 312 با اندازه متوسط ۵۰-۹۰ نانومتر، پوشش داده شده با اسید استئاریک و محصول شرکت SOLVAY و PP-g-MAH بعنوان سازگار کننده با نام تجاری PP-G110، با شاخص جریان مذاب ۱۰g/۱۰ min و ۵۰-۸۰ و ۱،۳-۰،۸ درصد مالئیک آنیدرید، محصول شرکت کیمیا جاوید سپاهان ایران استفاده شد.

دور معین و در زمان مشخصی باهم درگیر شده و کار می کنند که توان مورد نظر جهت دوران چرخ دنده ها از طریق یک AC موتور ۱،۱ کیلوواتی و برق مصرفی ۳۸۰ ولت و دور خروجی ۶۴۵ دور بر دقیقه تامین می گردد. مدت زمان کاری تست سایش برای هر نمونه بر حسب ۸×10^4 دور انتخاب شد. گشتاور مورد نیاز از طریق یک سیستم ترمز لنتی (قطعه شماره ۳) تامین گردید.



شکل (۱) نمایی از دستگاه تست چرخدنده: ۱- صفحه پایه، ۲- موتور الکتریکی، ۳- کفشک، ۴- پایه یاتاقان، ۵- یاتاقان، ۶- فنر، ۷- محور، ۸- کوپلینگ

جهت بررسی دقیق رفتار سایشی نمونه بایستی گشتاور اعمالی متناسب با مشخصات چرخدنده انتخاب گردد. آقای مو و همکارانش نشان دادند که برای چرخدنده های پلی آمیدی با یک هندسه و سرعت کاری مشخص، یک بار بحرانی وجود دارد و در آن شرایط نرخ سایش چرخدنده بطور چشمگیری افزایش می یابد. در این تحقیق با توجه به مقایسه های انجام شده، از گشتاور ۱۴،۹ که بالای بار بحرانی می باشد، استفاده شد.

۲-۴-۳- آزمون ابعادی چرخدنده ها

جهت تعیین میزان سایش در دندانه های چرخدنده ها از میکرومتر فک بشقابی با ریزنگری ۰،۰۱ میلی متر و دامنه ۰-۲۵ برای اندازه گیری پارامتر $span-size$ کنترل استفاده شد. در این پژوهش مقدار $span-size$ فاصله پشت تا پشت چهار دنده متوالی در نظر گرفته شد. شکل ۲ تصویری از $span-size$ اندازه گرفته شده توسط میکرومتر فک بشقابی را نشان می دهد و جدولها بالانویس داشته باشند. بین خط پایانی توضیح شکل و یا انتهای جداول و ادامه متن باید یک خط رها شود. جدول ۱ و شکل ۱ نمونه های برای شکل و جدول می باشند.



شکل (۲) اندازه گیری $span-size$ با میکرومتر فک بشقابی

۲-۳- تجهیزات

در این پژوهش از یک دستگاه اکسترودر دو پیچه، محصول شرکت coperion آلمان و با نام تجاری ZSK-25، دستگاه خرد کن، محصول شرکت Wieser با نام تجاری (WG-LS,200/200)، یک دستگاه تزریق پیشرفته مدل ۱۱۰/۳۸۰ ساخت شرکت پولاد، سامانه خشک کن و نگهدارنده مواد با مدل SHD-25 ساخت شرکت shini چین، قالب چرخدنده، طراحی و ساخته شده در دانشکده مکانیک دانشگاه تبریز با مشخصات چرخدنده تولید شده مدول ۲mm و تعداد دندانه ۳۶، دستگاه تست ریگ، طراحی و ساخته شده در دانشکده مکانیک دانشگاه تبریز، استفاده شد.

۳-۳- آماده سازی نمونه

در آماده سازی نمونه ها نسبت درصد وزنی پلی پروپیلن به زمینه پلیمری پلی آمید ۶، در ترکیبات ۳۳ به ۶۷ (w/w) می باشد. بر اساس نتایج تحقیقات [۳] افزودن ۳۳ درصد وزنی PP به ۶۷ درصد وزنی PA6 منجر به کاهش جذب آب ۷۲ درصدی در پلی آمید (پلیمر زمینه) می گردد. در این پژوهش از نانوکربنات کلسیم با نسبت های وزنی متفاوت ۲،۵، ۵، ۷،۵ و ۱۰ phr استفاده شده است. میزان سازگارکننده PP-g-MAH بکار برده شده در کامپوزیت ها نیز برابر با ۵ phr می باشد. درصد وزنی مواد تشکیل دهنده در جدول ۱ آورده شده است. مراحل آماده سازی نمونه ها به ترتیب عبارتند از:

جدول (۱) فرمول بندی نانو آمیخته های پلیمری

آمیزه	کد آمیزه	PA6 (%wt)	PP (%wt)	PP - g - MAH (phr)	CaCO3 (phr)
PA6	PA	100	0	0	0
PA6/PP/5M	PM	67	33	5	0
PA6/PP/5M/2.5C	PM2.5C	67	33	5	2.5
PA6/PP/5M/5C	PM5C	67	33	5	5
PA6/PP/5M/7.5C	PM7.5C	67	33	5	7.5
PA6/PP/5M/10C	PM10C	67	33	5	10

رطوبت گیری مواد اولیه به مدت ۸ ساعت در دمای ۸۰°C در دستگاه خشک کن، اختلاط فیزیکی PA6، PP، PP-g-MAH و نانو ذرات کربنات کلسیم با درصد های وزنی معین، اختلاط ذوبی ترکیبات حاصل از مرحله قبل در دستگاه اکسترودر دو ماردرنه، خنک شدن کلاف های رشته ای حاصل از دستگاه اکسترودر تا دمای محیط، تبدیل کلاف های رشته ای به گرانول توسط دستگاه خرد کن، خشک کردن گرانول ها به مدت ۶ ساعت در دمای ۸۰°C در دستگاه خشک کن، تزریق نمونه ها به منظور تهیه نمونه های تست چرخدنده با استفاده از دستگاه تزریق پلاستیک.

۴-۳- آزمون ها

۱-۴-۳- تست چرخدنده

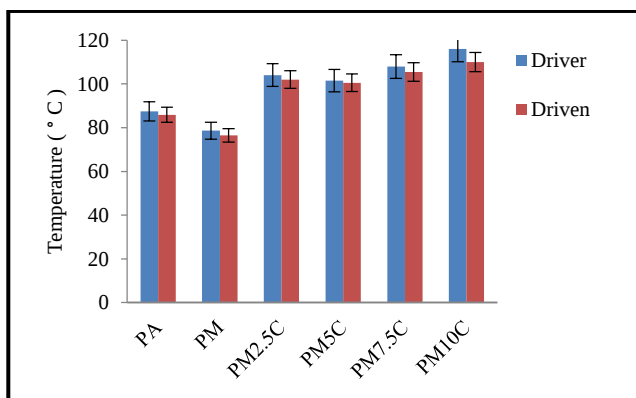
در این تحقیق برای انجام آزمون سایش چرخ دنده روی نمونه های چرخ دنده، از یک دستگاه test rig طراحی شده در گروه ساخت و تولید دانشگاه تبریز استفاده شد. شکل ۱ نمایی از دستگاه و ابزارهای مختلف استفاده شده جهت انجام تست سایش را نشان می دهد. مکانیزم دستگاه تست چرخدنده به طور خلاصه بدین صورت است که دو چرخ دنده یکسان تحت گشتاور و

۳-۴-۳- اندازه گیری دمای سطح دندان‌های چرخنده ها

جهت اندازه گیری دمای سطح دندان‌های چرخنده ها در لحظه توقف موتور از یک سنسور دیجیتالی تماسی اندازه گیری دما نوع Nicer-Ni ساخت شرکت Tastotermo آلمان، استفاده شد

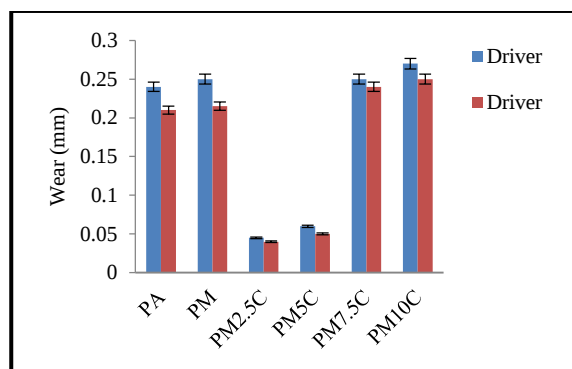
۴- نتایج

در این پژوهش، در هر ۱۰۴ دور دستگاه متوقف شد، میزان سایش بر حسب میزان کنترلی span-size و دمای سطحی دندان‌ها با استفاده از ترمو متر اندازه گرفته شد. شکل ۴، نتایج عملکرد سایشی چرخنده های نانو کامپوزیتی را نشان می دهد. با توجه به شکل مشاهده می شود که با افزودن PP به PA6، میزان سایش به دلیل نازل بودن خواص سایشی PP، افزایش یافته است [۷]. افزایش میزان ۲٫۵ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم به ترکیب PA6/PP، منجر به کاهش ۸۳ درصدی میزان سایش نسبت به پلی آمید خالص شده است. علت کاهش را می توان به موارد زیر نسبت داد. نانو ذرات کربنات کلسیم در پلیمر زمینه خاص هسته زنی داشته و می تواند منجر به افزایش درجه کریستالی شود، با افزایش هسته زنی و درجه کریستالی در نتیجه باعث افزایش مقاومت به سایش پلیمر زمینه شود [۱۰، ۹، ۸]. از طرف دیگر نانو ذرات کربنات کلسیم شامل هدایت گرمایی بالایی حدود سه برابر پلی آمید خالص می باشند و در نتیجه منجر به هدایت گرمایی در چرخنده شده و از انباشتگی حرارت ممانعت می کند [۱۱].

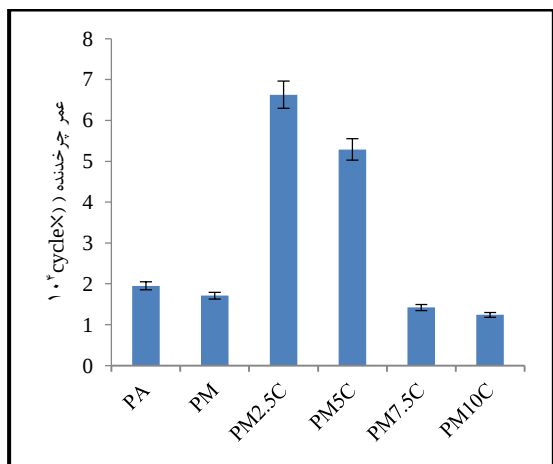


شکل ۴ تغییرات دمایی در سطح دنده چرخنده ها با آمیزه های مختلف تحت گشتاور ۱۴٫۸ Nm

افزون بر این، چرخنده های پلی آمید خالص از سفتی پایین تری برخوردار هستند از اینرو سطح تماس دندان‌های چرخنده محرک و متحرک در حین درگیر بیشتر است. در حالی که چرخنده های حاوی نانوذرات کربنات کلسیم ازسفتی بالایی نسبت به پلی آمید خالص برخوردار بوده و سطح تماس دندان‌های دو چرخ دنده کمتر است. افزایش سطح تماس درگیری دندان‌ها منجر به افزایش حرارت و سایش می شود [۱۰]. نهایتاً، نانو ذرات کربنات کلسیم، به دلیل شکل هندسی شبه کروی آن، در حین درگیری دو چرخنده، نقش روانکار را ایفا میکنند [۱۲]. نانو کربنات کلسیم، مشابه نقش بلبرینگ در تجهیزات مکانیکی، به مانند روانکار عمل کرده و از وقوع حرکات لغزشی که منجر به سایش می شود ممانعت کرده و به حرکات غلتشی تداوم می بخشد. نتایج سایش چرخنده های نانوکامپوزیتی حاوی ۵ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم تقریباً مشابه چرخنده ها با آمیزه PA6/PP/5M/2.5CaCO₃ می باشد. علاوه بر این افزودن ۷٫۵ و ۱۰ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم، منجر به افزایش قابل توجه نرخ سایش شده علت امر این است که با



شکل ۳ مقایسه نتایج تست سایش برای چرخنده های با آمیزه های مختلف تحت گشتاور ۱۴٫۸ Nm



شکل ۵ مقایسه نتایج عمر برای چرخنده های با آمیزه های مختلف تحت گشتاور ۱۴٫۸ Nm

۳. منتخبی کلجاهی، سعید. ۱۳۹۰. اثر افزودن نانو ذرات معدنی بروی خواص مکانیکی آلیاژ PA6/PP. دانشکده ساخت و تولید. دانشگاه تبریز.
4. Kusmono, Mohd Ishak, Chow, Takeichi, T. and Rochmadi. 2008. Enhancement of properties of PA6/PP nanocomposites via organic modification and compatibilization. *Express Polymer Letters* Vol. 2, No. 9: 655-664.
۵. اشرفی، ابراهیم. ۱۳۸۹. مطالعه تجربی رفتار سایشی در چرخنده پلیمری تقویت شده با نانو ذرات رس. دانشکده ساخت و تولید. دانشگاه تبریز.
6. Mao, K., et al. 2009. Friction and wear Behavior of acetal and nylon gears. *Wear*, 267: 639-645.
7. Tripathi D. 2002. Practical Guide to Polypropylene. UK: Rapra Technology Limited;
8. Srinath, G. nanamoorthy. 2007. Sliding wear performance of polyamide 6-clay nanocomposites in water. *Composites Science and Technology*. 67:399-405.
9. Lam, T.D, Hoang, T.V., Quang, D.T. and Kim, J.S. 2009. Effect of nanosized and surface-modified precipitated calcium carbonate on properties of CaCO₃/polypropylene nanocomposites. *Materials Science and Engineering*. A. 501: 87-93.
10. Kirupasankar, C. Gurunathan, R. Gnanamoorthy. 2012. Transmission efficiency of polyamide nanocomposite spur gears. S0261-3069(12)00102-1.
11. Srinath, G., nanamoorthy, R. 2005. Effect of nanoclay reinforcement on tensile and tribo behaviour of Nylon 6. *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE*, 40: 2897 – 2901.
12. Xie, X.L., Liu, Q.X., Li, R.K.Y., Zhou, X.P., Zhang, Q.X., Yu, Z.Z. and Mai, Y.W. 2004. Rheological and mechanical properties of PVC/CaCO₃ nanocomposites prepared by in situ polymerization. *Polymer*. 45: 6665-6673.
13. Abu Bakar A., Rosli N. N. M. 2006. Effect of Nano-Precipitated Calcium Carbonate on Mechanical Properties of PVC-U and PVC-U/Acrylic Blend. *Jurnal Teknologi*. 45: 83-93.

مدول خمشی ذرات صلب نانو کربنات کلسیم بیشتر از زمینه پلیمری می باشد (۱۳۱ MPa) بیشتر از پلی آمید خالص)، بنابراین افزودن نانو ذرات باعث افزایش مدول می شود [۹]. افزایش مدول خمشی احتمالاً دلالت بر این امر دارد که ذرات صلب کربنات کلسیم، قابلیت محدود کردن حرکت مولکولهای پلیمری را دارند که منجر به افزایش مقاومت به تغییر فرم کامپوزیت ها با حضور نانو ذرات کربنات کلسیم می شود [۱۳]، علت بعدی، نانو ذرات کربنات کلسیم، به دلیل کاهش در میزان سایش و در نتیجه کاهش در میزان حرارت، منجر به کاهش تغییر شکل و افزایش عمر می گردد. افزون بر این، با توجه به ابعاد کوچک و پراکندگی ذرات تقویت کننده در پلیمر زمینه، انرژی وارد شده در تمام مقطع پخش شده و صرف تغییر شکل پلاستیک در نواحی اطراف نانو ذرات می شود. بنابراین میزان انرژی جذب شده قبل از شکست افزایش میابد.

۵- نتیجه گیری

چرخنده های نانوکامپوزیتی PA6/PP/CaCO₃ به روش قالبگیری تزریقی تولید و تحت آزمون دوام چرخنده قرار گرفتند و نتایج زیر حاصل شد. افزودن ۲٫۵ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم منجر به کاهش میزان سایش و کاهش میزان انباشتگی حرارت در سطح دندانها، در مقایسه با سایر چرخنده های نانو کامپوزیتی شد. به کارگیری ۲٫۵ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم، عمر چرخنده را حدوداً تا ۲٫۵ برابر نسبت به پلی آمید خالص افزایش داد. افزودن بیش از ۵ قسمت وزنی از نانو ذرات کربنات کلسیم، منجر به افزایش میزان سایش و حرارت، و کاهش عمر چرخنده گردید.

۶- منابع

1. Senthilvelan, R. Gnanamoorthy. 2007. Effect of rotational speed on the performance of unreinforced and Glass fiber reinforced Nylon6 spur gears. *Materials and Design* 28: 765-772.
2. Vlasveld, D.P.N., Groenewold, J., Bersee, H.E.N. and Picken, S.J. 2005. Moisture absorption in polyamide-6silicatenanocompo and its influence on the mechanical properties. *Polymer*. 46: 12567-12576.