Research article

Available in: http://jips.ippi.ac.ir

Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian),
Vol. 36, No. 2, 151-165
June-July 2023
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883
DOI: 10.22063/JIPST.2023.3375.2224

Experimental Study on Wear Behavior of Polyacetal-Based Nanocomposite Gears

Rasool Mohsenzadeh[1,2*], Karim Shelesh-Nezhad[1], Tajbakhsh Navid Chakherlou[1]

1. Division of Plastics and Composites Engineering, Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Postal Code 5166616471, Tabriz, Iran
2. Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University, P.O. Box 143576137, Tehran, Iran

Received: 17 March 2023, accepted: 23 August 2023

ABSTRACT

Hypothesis: The effect of incorporation of carbon black nanoparticles (CB) and nano-precipitated calcium carbonate (NPCC) on wear behavior, thermal behavior and morphology in polyacetal (POM)-based nanocomposite gears has been studied. Polyacetal is one of the widely used engineering materials for manufacturing gears. Nevertheless, heat resistance, relatively low crack impact strength and sensitivity to UV are the major disadvantages of POM. Adding carbon black nanoparticles into the polyacetal can simultaneously increase the tensile strength and toughness and increase the UV resistance of the polyacetal. In addition, the presence of NPCC in the POM/CB can lead to improvements in CB dispersibility, increase of wear and thermal resistance.

Methods: POM/CB/NPCC nanocomposite gears containing 0.42% (by wt) carbon black and different fractions (1.5%, 3% and 4.5% all by wts) of NPCC were produced by utilizing a twin-screw extruder and injection molding machine. Morphology and nanostructure were investigated by applying scanning electron microscopy. The gear performance of nanocomposites was examined by applying a gear test rig. Gear tests were performed in the mode of constant loading. The temperature and wear of the gears were evaluated in the gear tests.

Findings: The simultaneous addition of both types of nanoparticles to polyacetal led to a reduction in the amount of wear by 58% compared to pure polyacetal. The temperature of the gear surface, in the same number of revolutions, was reduced using CB and NPCC nanoparticles. The decrease in the temperature of the nanocomposite tooth surface compared to pure POM was attributed to the increase in storage modulus and improvement in elastic behavior, decrease in damping ratio, as well as a decrease in friction coefficient and increase in heat transfer in the presence of nanoparticles. The use of 4.5% (by wt) of NPCC nanoparticles caused cracks and expansion of wear and material flow in the gear pitch zone.

Keywords:

gear wear,
polyacetal,
carbon black,
calcium carbonate,
morphology

(*)To whom correspondence should be addressed.
E-mail: r_mohsenzadeh@tvu.ac.ir

Please cite this article using:
Mohsenzadeh R., Shelesh-Nezhad K., Navid Chakherlou T., Experimental Study on Wear Behavior of Polyacetal-Based Nanocomposite Gears, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **36**, 151-165, 2023.

مقاله پژوهشی

بررسی تجربی رفتار سایش چرخ‌دنده‌های نانوکامپوزیتی بر پایه پلی‌استال

دسترس‌پذیر در نشانی: http://jips.ippi.ac.ir

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،
سال سی وششم، شماره ۲،
صفحه ۱۶۵-۱۵۱، ۱۴۰۲
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883
DOI: 10.22063/JIPST.2023.3375.2224

رسول محسن‌زاده[۱،۲*]، کریم شلش‌نژاد[۱]، تاج‌بخش نوید چاخرلو[۱]

۱- تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده مکانیک، گروه مهندسی ساخت و تولید، کد پستی ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱
۲- تهران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، گروه مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۱۴۳۵۷۶۱۳۷

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۶، پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۱

چکیده

فرضیه: در این پژوهش، اثر به‌کارگیری نانوذرات دوده (CB) و کلسیم کربنات رسوبی (NPCC) بر رفتار سایش، گرمایی و شکل‌شناسی در چرخ‌دنده‌های نانوکامپوزیتی بر پایه پلی‌استال (POM) به‌طور تجربی مطالعه شد. پلی‌استال از جمله مواد مهندسی پرکاربرد برای ساخت چرخ‌دنده است. با وجود این، از ضعف‌های عمده آن مقاومت گرمایی و استحکام ضربه‌ای شکاف‌دار نسبتاً کم و حساسیت به پرتو فرابنفش است. افزودن نانوذرات دوده به پلی‌استال، می‌تواند به‌صورت هم‌زمان استحکام کششی و چقرمگی و مقاومت به پرتو فرابنفش پلی‌استال را افزایش دهد.

روش‌ها: نمونه‌های چرخ‌دنده‌ای نانوکامپوزیتی بر پایه آمیخته پلی‌استال دارای ٪۰/۴۲ وزنی تقویت‌کننده نانوذرات دوده و نانوذرات کلسیم کربنات (۱/۵، ۳ و ٪۴/۵ وزنی) با روش اکسترودر و قالب‌گیری تزریقی تولید شدند. بررسی شکل‌شناسی و مطالعه نانوساختار با آزمون‌های میکروسکوپی الکترونی پویشی انجام شد. عملکرد گران‌روکشسانی نانوکامپوزیت‌ها با آزمون دینامیکی مکانیکی گرمایی مطالعه شد. عملکرد چرخ‌دنده‌ای نانوکامپوزیت‌ها با دستگاه آزمون چرخ‌دنده ارزیابی شد. در آزمون چرخ‌دنده، پارامترهای دما و سایش ارزیابی شدند. سطح سایش دنده در مرحله شکست با به‌کارگیری میکروسکوپ الکترونی پویشی بررسی شد و سازوکارهای سایش آن مطالعه شد.

یافته‌ها: افزودن هم‌زمان هر دو نوع نانوذرات به پلی‌استال موجب کاهش مقدار سایش تا ٪۵۸ نسبت به پلی‌استال خالص شد. دمای سطح دنده، در تعداد دور یکسان، با به‌کارگیری نانوذرات دوده و کلسیم کربنات کاهش یافت. کاهش دمای سطح دنده در نمونه‌های نانوکامپوزیتی در مقایسه با نمونه پلیمری خالص، به افزایش مدول ذخیره و بهبود رفتار کشسانی، کاهش نسبت میرایی (رفتار گران‌رو) و نیز کاهش ضریب اصطکاک و افزایش انتقال گرما در اثر وجود نانوذرات نسبت داده شد. استفاده از ٪۴/۵ وزنی نانوذرات کلسیم کربنات به‌همراه دوده، باعث ایجاد ترک و گسترش سایش خراشی و جریان مواد در بخش گام دنده شد.

واژه‌های کلیدی

سایش چرخ‌دنده،
پلی‌استال،
دوده،
کلسیم کربنات،
شکل‌شناسی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:
r_mohsenzadeh@tvu.ac.ir

مقدمه

به‌طور کلی چرخ‌دنده‌ها، شکل تکامل‌یافته چرخ‌های اصطکاکی هستند که برای جلوگیری از لغزش و اطمینان از یکنواختی حرکت نسبی، دندانه به آن‌ها اضافه شده است. در گذشته، چرخ‌دنده‌ها برحسب کاربرد، از چوب یا فلز ساخته می‌شدند. با پیشرفت صنایع و عرضه پلاستیک‌ها، ساخت چرخ‌دنده از پلیمر نیز توسعه یافت. مقاومت خوردگی، آسانی ساخت به‌دلیل قابلیت قالب‌گیری تزریقی، عملکرد بدون روان‌کار و صدای کم از جمله مزایای چرخ‌دنده‌های پلیمری است [۳-۱]. با وجود این، به‌دلیل خواص مکانیکی و گرمایی کم، عملکرد چرخ‌دنده‌های پلیمری زیر بارهای متوسط و سنگین محدود است [۴]. از این‌رو، چند رویکرد از جمله روان‌کاری [۵]، اصلاح هندسه دنده [۶،۷] و افزودن فاز صلب [۸]، برای گسترش دامنه عملیاتی چرخ‌دنده‌های ماتریس پلیمری مدنظر قرار گرفته است. استفاده از تقویت‌کننده‌های معدنی، رویکرد عملی و آسان برای بهبود عملکرد چرخ‌دنده‌های پایه‌پلیمری در مقایسه با سایر روش‌هاست، زیرا به اعمال هیچ گونه تغییری در طراحی دنده، قالب چرخ‌دنده و دستگاه آزمون چرخ‌دنده نیازی نیست.

پلی‌استال (polyacetal, POM) از انواع مواد گرمانرم با ساختار بلوری است که به‌طور گسترده در تولید چرخ‌دنده‌ها استفاده می‌شود. این پلیمر سفتی، استحکام، مقاومت خزشی و مقاومت گرمایی نسبتاً خوبی در مقایسه با سایر پلیمرها داشته و در گروه پلیمرهای مهندسی قرار دارد. Singh و همکاران [۹] سازوکارهای سایش و واماندگی در سه نوع پلیمر مختلف شامل آکریلونیتریل بوتادی‌ان استیرن، پلی‌اتیلن پرچگالی و پلی‌استال را حین درگیری با چرخ‌دنده فولادی و تحت گشتاور و دورهای مختلف بررسی کردند. با توجه به نتایج، چرخ‌دنده‌های POM نسبت به دو چرخ‌دنده پلیمری دیگر، دوام بیشتری نشان دادند. با وجود این، استحکام ضربه‌ای شکاف‌دار نسبتاً کم و حساسیت به پرتو فرابنفش (UV)، از ضعف‌های عمده POM بوده و اغلب محدودیت‌های زیادی برای کاربردهای این پلیمر ایجاد می‌کند. بنابراین، اثر افزودن فاز صلب در ماتریس پلی‌استال برای افزایش عملکرد چرخ‌دنده‌ای، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. Mao و همکاران [۱۰] اثر به‌کارگیری ۲۸٪ وزنی الیاف شیشه را بر عملکرد چرخ‌دنده‌ای کامپوزیت‌های پلی‌استال-الیاف شیشه بررسی کردند. نتایج بارگذاری پله‌ای نشان داد، گشتاور بحرانی چرخ‌دنده‌ها از ۷/۵ N.m برای پلی‌استال خالص به ۱۱ N.m برای کامپوزیت انتقال یافت و به‌کارگیری الیاف شیشه ظرفیت حمل بار را حدود ۵۰٪ افزایش داد. با وجود این، گران‌روی مذاب بیشتر و اثر منفی آن بر فرایندپذیری، افزایش مقدار سایش، انقباض ناهمگن و آسیب‌های احتمالی به واحد قالب‌گیری به‌دلیل ویژگی سایشی الیاف شیشه، ممکن است، استفاده از چرخ‌دنده‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه را محدود کند [۱۱]. افزودن نانوذرات سفت و سخت به‌عنوان جایگزینی برای الیاف میکرونی، به‌دلیل سطح ویژه زیاد، در درصدهای کمتر، اثرهای تقویت‌کنندگی توجه‌پذیر را ایجاد می‌کند [۱۸-۱۲]. سودمند و همکاران [۱۹] اثر به‌کارگیری کلسیم کربنات بر عملکرد چرخ‌دنده‌ای نانوکامپوزیت‌های بر پایه پلی(بوتیلن ترفتالات) را به‌طور تجربی مطالعه کردند. افزودن نانوذرات، دما و سایش چرخ‌دنده‌های نانوکامپوزیتی را در مقایسه با چرخ‌دنده پلیمری خالص کاهش داد که این نتیجه به افزایش مدول ذخیره، کاهش نسبت میرایی و بهبود مقاومت گرمایی و سایشی، در اثر وجود نانوذرات نسبت داده شد. افزون بر این، نانوذرات دوده (carbon black, CB)، تقویت‌کننده دیگری است که می‌تواند به پایداری گرمایی، افزایش انرژی شکست، مقاومت در برابر سایش و کاهش ضریب اصطکاک در ماتریس پلیمر منجر شود [۲۰،۲۱]. استفاده از دوده می‌تواند محدودیت‌های POM را از نظر پایداری گرمایی و چقرمگی شکست جبران کند و عملکرد چرخ‌دنده‌های نانوکامپوزیتی بر پایه POM را بهبود بخشد. در مطالعه محسن‌زاده و همکاران [۱۴،۱۶] افزودن نانوذرات دوده در ماتریس پلی‌استال، به افزایش عمر، مقاومت سایشی و مقاومت گرمایی چرخ‌دنده‌های نانوکامپوزیتی منجر شد. با وجود این، نانوذرات دوده به‌دلیل سطح ویژه زیاد و برهم‌کنش قوی وان‌دروالسی بین ذرات تمایل زیادی به کلوخه‌شدن دارند [۲۲]. افزودن فاز دوم در پلیمر ماتریس، روش نوینی برای بهبود پخش‌شوندگی فاز اول مانند دوده است [۲۳]. نتایج مطالعات نشان داده است، افزودن فاز نانوذره معدنی دوم باعث افزایش پراکنش نانوذرات دوده در ماتریس پلیمری می‌شود [۲۴،۲۵]. افزودن نانوذرات کلسیم کربنات رسوبی (nano-precipitated calcium carbonate, NPCC) در ماتریس POM/CB، افزون بر بهبود پخش‌شوندگی دوده، موجب افزایش مقاومت سایشی، استحکام مکانیکی و مقاومت گرمایی در کاربردهای چرخ‌دنده‌ای می‌شود [۲۶،۲۷]. محسن‌زاده و همکاران [۲۸] افزایش ۶۰٪ مقاومت سایشی چرخ‌دنده‌های $POM/CaCO_3$ را در مقایسه با POM تقویت‌نشده گزارش کردند. سلطان‌زاده و همکاران [۲۹] با افزودن نانوذرات کلسیم کربنات در ماتریس پلیمری POM، به افزایش ۴۰٪ استحکام خمشی و ۳۳٪ استحکام ضربه‌ای دست یافتند.

در پژوهش حاضر، اثر هم‌افزایی نانوذرات دوده و کلسیم کربنات بر عملکرد چرخ‌دنده‌های نانوکامپوزیتی POM/CB/NPCC از نظر سایش، دما و سازوکارهای سایش بررسی شده است. مقادیر سایش دنده بر اساس روش مبتنی بر پردازش تصویر و با میکروسکوپ

دیجیتالی اندازه‌گیری شد. رفتار گران‌روکشسانی نانوکامپوزیت‌ها با آزمون دینامیکی مکانیکی گرمایی (DMTA) ارزیابی شد و همبستگی نتایج آن با نتایج عملکردی چرخ‌دنده‌ها بررسی شد.

تجربی

مواد

در پژوهش حاضر، پلی‌استال خالص (F20-03) با شاخص جریان مذاب ۹ g/۱۰ min و پلی‌استال دارای ۰/۴۲٪ وزنی دوده (F20-03c) دارای شاخص جریان مذاب ۱۱ g/۱۰ min، محصول شرکت Capital کره، به‌عنوان مواد اولیه پلیمری انتخاب شدند. از نانوذرات کلیسم کربنات (NPCC) با نام تجاری Hakuenka®CCR-S، محصول شرکت Omya اتریش با قطر متوسط ۸۰ nm و هندسه لوزوجهی (rhombohedral)، به‌عنوان تقویت‌کننده دوم استفاده شد. به‌منظور کاهش انرژی سطحی نانوذرات کلسیم کربنات و بهبود پراکنش آن‌ها در ماتریس پلیمری، سطح این نانوذرات با اسید چرب پوشش یافت.

دستگاه‌ها و روش‌ها

قالب‌گیری نمونه

مواد اولیه شامل POM و POM/CB با مقدارهای وزنی متفاوت (۱/۵، ۳ و ۴/۵٪) از NPCC، پس از رطوبت‌گیری به‌مدت ۶ h در دمای ۸۰°C، ابتدا به‌طور مکانیکی و پس از آن به روش مذاب با اکسترودر دوپیچی ZSK-25، ساخت شرکت Kuprin آلمان با قطر پیچ ۲۵ mm و نسبت طول به قطر ۴۰، مخلوط شده و رشته‌های خروجی از اکسترودر با دستگاه برش‌دهنده به گرانول تبدیل شدند. پس از آن، دستگاه قالب‌گیری تزریقی Poolad 380/110، ساخت ایران برای تهیه نمونه‌های چرخ‌دنده از پنج ترکیب مختلف، شامل POM خالص، POM/CB و سه نانوکامپوزیت دارای ۱/۵، ۳ و ۴/۵٪ وزنی NPCC در ماتریس پلیمری POM/CB به‌کار گرفته شد. مشخصات هندسی چرخ‌دنده مورد آزمون در جدول ۱ آمده است.

میکروسکوپ الکترونی پویشی

میکروسکوپ الکترونی پویشی با نام تجاری VEGA/TESCAN ساخت جمهوری چک با ولتاژ کاری ۱۰ kV برای بررسی ریزساختار نانوکامپوزیت‌ها و نیز شکل‌شناسی شکست در نمونه‌های مختلف به‌کار گرفته شد. پیش از آزمون‌های میکروسکوپی، سطح نمونه‌ها با لایه‌ای از طلا پوشش یافت.

جدول ۱- مشخصات چرخ‌دنده‌های آزمون.

Table 1. Specifications of test gears.

Parameter	Amount	Parameter	Amount
Module	2 mm	Tooth number	36
Pitch dia.*	72 mm	Pressure angle	20°
Addendum dia.	76 mm	Face width	12 mm
Dedendum dia.	67 mm	Operating distance	72 mm
Contact ratio	1.69	-	-

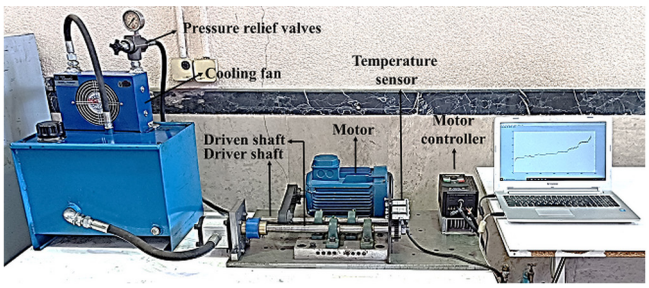
*diameter

آزمون‌های خواص دینامیکی-مکانیکی

رفتار گران‌روکشسانی نانوکامپوزیت‌ها با به‌کارگیری آزمون DMTA و براساس استاندارد ASTM D4065-01 به‌کمک نمونه‌ها با ابعاد ۳۵×۱۰×۳ mm بررسی شد. برای این آزمون از دستگاه با نام تجاری Tritec-2000 ساخت Technology TreaTech انگستان استفاده شد. نمونه‌ها زیر خمش یک‌سرگیردار با فاصله بین‌تکیه‌گاهی ۲۰ mm، تحت پویش دمایی و بسامد ۲۵ Hz (منطبق با بسامد آزمون چرخ‌دنده)، آزمایش شدند. بازه تغییرات دما از ۱۰۰°C- تا ۱۵۰°C و سرعت گرمادهی ۲°C/min انتخاب شد.

آزمون چرخ‌دنده

به‌منظور بررسی عملکرد چرخ‌دنده‌ای POM خالص و نانوکامپوزیت‌های آن با مشخصات ابعادی درج‌شده در جدول ۱، دستگاه آزمون چرخ‌دنده در دانشکده ساخت و تولید دانشگاه تبریز طراحی و ساخته شد. شکل ۱ نمای بسته‌ای از دستگاه مدنظر را نشان می‌دهد که چرخ‌دنده‌ها به‌صورت پشت به پشت با یکدیگر درگیر شده‌اند. سامانه محرک (شامل محور و چرخ‌دنده) با به‌کارگیری مجموعه تسمه و تنظیم قرقره (pulley timing) دقیق با نسبت ۱:۱ به موتور جریان متناوب متصل شده و از دستگاه کنترل دور برای تنظیم سرعت دورانی چرخ‌دنده‌ها استفاده شد. برای ایجاد گشتاور مدنظر،



شکل ۱- دستگاه آزمون چرخ‌دنده.

Fig. 1. Gear test rig.

چرخ‌دنده متحرک به‌طور مستقیم و با به‌کارگیری جفت‌کننده، به واحد هیدرولیکی متصل شد. مطابق شکل ۱، این واحد هیدرولیکی متشکل از پمپ دنده‌ای هیدرولیک، مخزن روغن هیدرولیک، شیر کنترل فشار، فن خنک‌کننده هیدرولیک و شلنگ‌های هیدرولیکی است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، شیر کنترل فشار به‌همراه فشارسنج در انتهای پمپ نصب شده‌اند تا فشار خروجی پمپ را به‌ترتیب تنظیم و پایش کند. معادله (۱) فشار خروجی پمپ را به گشتاور ایجادشده در محور پمپ و چرخ‌دنده‌ها مرتبط می‌سازد [۳۰]:

$$T = \frac{1.59\, V\Delta P}{100\eta_{mh}} \qquad (۱)$$

به‌طوری که T گشتاور (N.m) محاسبه‌شده، V جابه‌جایی حجمی پمپ دنده‌ای، که مقدار آن برای پمپ استفاده‌شده در این پژوهش برابر با ۲۱/۳ سانتی‌متر مکعب بر دور است، ΔP فشار کاری اندازه‌گیری‌شده (bar) و η_{mh} بازدهی هیدرومکانیکی است. بر اساس منحنی‌های مشخصه پمپ به‌کاررفته، مقدار η_{mh} در سرعت چرخش ۱۵۰۰ rpm، برابر با ۰/۹ بود. شایان ذکر است، تغییرات فشار سامانه حین درگیری دو چرخ‌دنده و با توجه به مشاهدات فشارسنج، بسیار پایدار بوده که این موضوع اعمال گشتاور یکنواخت را طی آزمون نشان می‌دهد. تصاویر دیجیتال از دنده چرخ‌دنده با میکروسکوپ دیجیتالی گرفته شد. دمای دنده با حسگر دمای زیرقرمز غیرتماسی (GY-MCU90615) اندازه‌گیری شد. حسگر در بالا و در مجاورت دنده چرخ‌دنده محرک قرار گرفته است.

برای انجام آزمون چرخ‌دنده، نانوکامپوزیت‌های مشابه به‌عنوان چرخ‌دنده‌های محرک و متحرک استفاده شدند و تمام آزمون‌ها با سرعت دورانی ۱۵۰۰ rpm، مطابق دور اسمی پمپ، انجام شد. آزمون تحت گشتاور ثابت (۱۰ N.m) انجام شد که این مقدار طبق نتایج بارگذاری تدریجی، برای همه نمونه‌ها، گشتاور بحرانی است [۱۸]. در این روش، چرخ‌دنده‌ها در هر بازه ۲۰۰۰۰ چرخه تا لحظه واماندگی، بررسی شدند. برای حذف خطای ناشی از تاریخچه سایش و کاهش دمای سطح دنده به‌دلیل توقف دستگاه، در هر بازه زمانی، جفت چرخ‌دنده عوض شده و جفت چرخ‌دنده نو جایگزین شد (روش تجدید چرخ‌دنده). آزمون برای هر جفت چرخ‌دنده جایگزین از ابتدا انجام شد. در این روش در هر بازه زمانی، آزمون با دو مرتبه تکرار انجام شد. مقدار سایش برای چرخ‌دنده‌های محرک و در چهار ناحیه متفاوت و ثابت برای تمام چرخ‌دنده‌ها اندازه‌گیری شد. تصاویر بزرگ‌نمایی‌شده از مقطع دنده پلی‌استال خالص و نمونه‌های نانوکامپوزیتی در فواصل زمانی معین (هر ۲۰۰۰۰ چرخه) به‌منظور ارزیابی سایش خطی (W_m) گرفته شد. تصاویر دیجیتالی گرفته‌شده با نرم‌افزار Image-J با هندسه استاندارد دنده مربوط مقایسه شد. پس از آن، مطابق شکل ۲، بیشینه عمق حفره حاصل از سایش (در راستای خط فشار) روی تصاویر اندازه‌گیری شد. میانگین مقدار اندازه‌گیری‌های به‌دست‌آمده از چهار دندان متوالی، W_m درنظر گرفته شد.

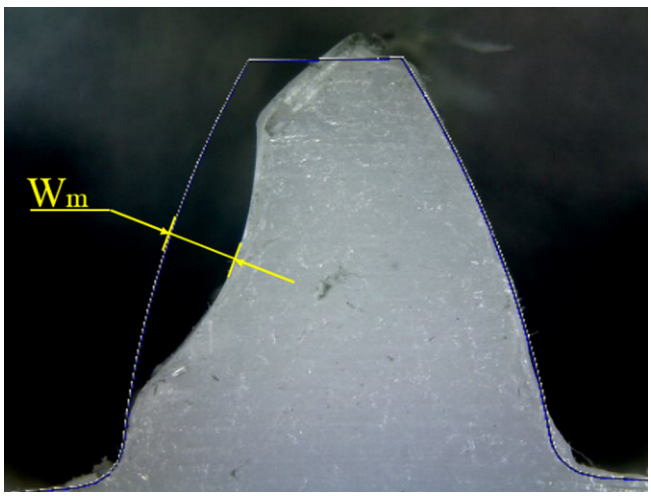
افزون بر این، از مدل کنترل سایش پیشنهادشده با استاندارد VDI 2736 [۳۱] برای تعیین ضریب سایش (k_w) چرخ‌دنده‌های خالص و نانوکامپوزیتی استفاده شد. بر این اساس، سایش خطی از معادله (۲) به‌دست آمد:

$$W_m = \frac{T.2.\pi N_L H_v k_w}{b.z.l_F} \qquad (۲)$$

با توجه به استاندارد VDI 2736، مقدار ضریب سایش (k_w)، برای دو نوع چرخ‌دنده پلیمری POM و PBT درگیر با چرخ‌دنده فولادی تعیین شده است. در این پژوهش، با اندازه‌گیری مقدار سایش خطی، مقدار ضریب سایش (k_w) برای چرخ‌دنده‌های پلی‌استالی و نانوکامپوزیتی درگیر با چرخ‌دنده هم‌جنس و با استفاده از معادله (۳) تعیین شد:

$$k_w = \frac{b.z.l_{Fl}.W_m}{T.2.\pi N_L H_V} \qquad (۳)$$

در معادله (۲)، b و z، به‌ترتیب نشان‌دهنده پهنای دنده و تعداد دنده چرخ‌دنده، T گشتاور و N_L تعیین‌کننده چرخه‌کاری است. l_{Fl} نشان‌دهنده طول مقطع دنده است و از معادله (۴) تعیین شد. درجه اتلاف دنده (degree of tooth loss)، H_V، اثر هندسه دنده بر اصطکاک



شکل ۲- نمایش اندازه‌گیری سایش خطی در دنده چرخ‌دنده.
Fig. 2. Display of measurement of the Wm on gear tooth.

را توصیف می‌کند و از معادله (۵) تعیین شد:

$$l_{Fl} = \frac{1}{d_b}.(r_o^2 - r_f^2) \quad (۴)$$

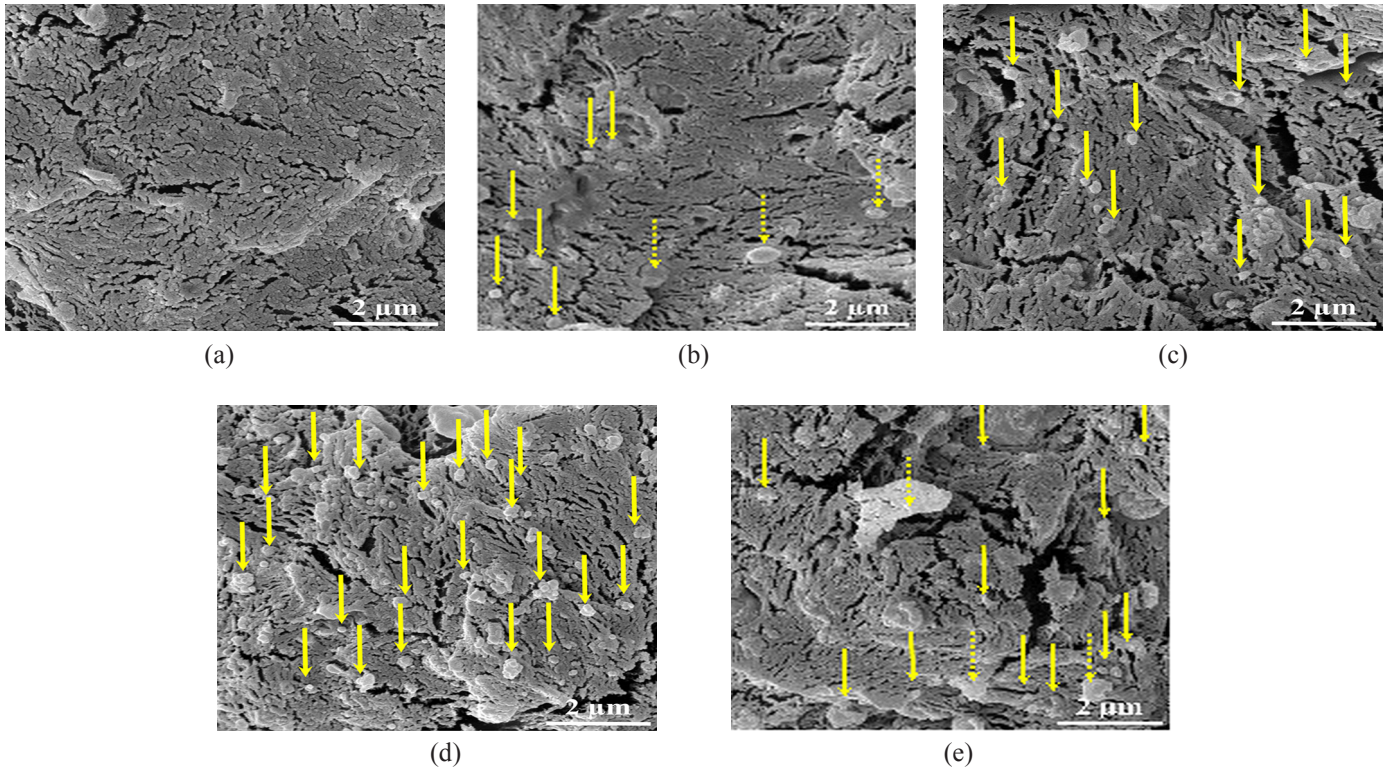
$$H_V = \frac{\pi.(u+1)}{z.\cos(\alpha)}.(1 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2) \quad (۵)$$

در این معادله‌ها، d_b و r_f نشان‌دهنده دایره مبنا و شعاع دایره ریشه دنده و u نشان‌دهنده نسبت درگیری چرخ‌دنده محرک و متحرک است. ε_1 و ε_2 به‌ترتیب بیان‌کننده نسبت تماس مربوط به چرخ‌دنده محرک و متحرک و نیز α معرف زاویه فشار چرخ‌دنده است.

نتایج و بحث

شکل شناسی

شکل ۳، تصاویر میکروسکوپی از مقاطع شکست نمونه‌های ضربه را به‌ترتیب برای پلی‌استال خالص، POM/CB، POM/CB/1.5C، POM/CB/3C و POM/CB/4.5C نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ (b)، وجود و پراکنش نانوذرات دوده قابل مشاهده است. با وجود این نشانه‌هایی از نانوذرات کلوخه‌شده دوده وجود دارد که با پیکان خط‌چین نشان داده شده است. نانوذرات دوده به‌دلیل سطح ویژه زیاد و برهم‌کنش قوی وان‌دروالس میان ذرات به کلوخه‌شدن تمایل زیادی دارند [۲۲]. با توجه به شکل‌های ۳ (c) و (d)، به‌وضوح مشخص است، پراکندگی نانوذرات در ماتریس پلی‌استال نسبتاً خوب است. این بدان معناست که پوشش استئاریک اسید نانوذرات کلسیم کربنات در پراکندگی آن‌ها مؤثر بوده است. پوشش استئاریک اسید بر سطح نانوذرات، به‌طور چشم‌گیری انرژی آزاد سطح پرکننده و در نتیجه برهم‌کنش ذره–ذره را کاهش می‌دهد، که این موجب پراکنش بهتر نانوذرات در ماتریس و کاهش کلوخه‌شدن آن‌ها می‌شود [۲۶]. نانوذرات پراکنده‌شده و برهم‌کنش سطحی قوی میان نانوذرات و پلیمر ماتریس می‌تواند با سازوکار مسدودکننده ترک به‌طور شایان توجهی از انتشار ترک جلوگیری کند [۳۲،۳۳]. افزون بر این، از مقایسه شکل‌های ۳ (b) و (c)



شکل ۳- ریزنگارهای SEM با بزرگ‌نمایی ۱۵۰۰۰ برابر به‌ترتیب برای نمونه‌های: (a) POM، (b) POM/CB، (c) POM/CB/1.5NPCC، (d) POM/CB/3NPCC و (e) POM/CB/4.5NPCC. پیکان توپر و خط‌چین نشان‌دهنده به‌ترتیب نانوذارت و نانوذرات کلوخه‌شده است.

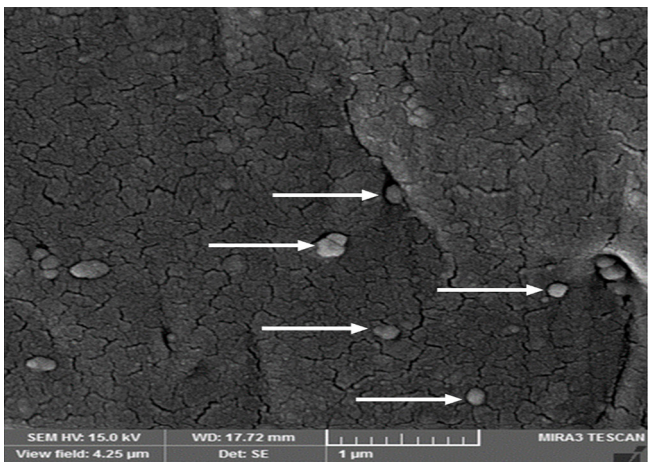
Fig. 3. SEM micrographs, with a magnification of 15000 times, of (a) POM, (b) POM/CB, (c) POM/CB/1.5NPCC, (d) POM/CB/3NPCC, and (e) POM/CB/4.5NPCC. Solid arrow and dashed arrow indicate nanoparticles and aggregated nanoparticles, respectively.

مشخص است، افزودن نانوذرات کلسیم کربنات در ماتریس POM/CB، موجب بهبود پراکنش نانوذرات دوده شده است. بهبود پراکنش نانوذرات با افزودن فاز تقویت‌کننده ثانویه به پلیمر ماتریس، پیش از این نیز گزارش شده است [۳۴]. اگرچه پوشش استئاریک اسید روی نانوذرات کلسیم کربنات، انرژی سطحی را به‌مقدار شایان توجهی کاهش می‌دهد، اما به‌دلیل کوچکی ذرات و بزرگی سطح ویژه و در نتیجه افزایش تراز انرژی آزاد سطح، باز هم احتمال به‌هم‌چسبیدن ذرات و کلوخه‌شدن در درصدهای بیشتر نانوذرات وجود دارد [۳۵،۳۶]. از این‌رو، در نمونه دارای ٪۴/۵ نانوذرات کلسیم کربنات، پراکنش ذرات کاهش یافته و کلوخه‌های با اندازه بزرگ‌تر شکل گرفته است که با پیکان خط‌چین دیده می‌شود (شکل ۳ (e)). اصلاح سطح نانوذرات و نیز شرایط اختلاط مذاب اعمال‌شده با اکسترودر دوپیچی نقش تعین‌کننده‌ای در وضعیت پراکنش نانوذرات در ماتریس پلیمری داشته‌اند. پراکنش مناسب نانوذرات در ماتریس پلیمری، موجب پخش بار اعمال‌شده در تمام ماتریس و نانوذرات شده است و انرژی لازم برای تغییرشکل افزایش می‌یابد [۳۳]. در شکل ۴ (a)، نانوذرات دوده پراکنده با اندازه حدود ۱۵۰ nm دیده می‌شود. افزون بر این، در شکل ۴ (b)، که دارای نانوذرات دوده و کلسیم کربنات است، ذرات پراکنده با ابعاد حدود ۵۰ nm نیز دیده می‌شود. با توجه به اینکه با مقایسه تصاویر دارای نانوذرات دوده و تصاویر دارای نانوذرات کلسیم کربنات همراه با نانوذرات دوده، تشخیص دو نانوذره دوده و کربنات کلسیم مشکل است، بنابراین برای بررسی وجود نانوذرات کلسیم کربنات در نمونه‌ها از تجزیه عنصری با روش طیف‌نمایی پاشنده انرژی (energy dispersive spectroscopy, EDS) استفاده شد. شکل ۵، وجود عنصر کلسیم در نمونه‌های نانوکامپوزیتی دارای نانوذرات کلسیم کربنات را نشان می‌دهد

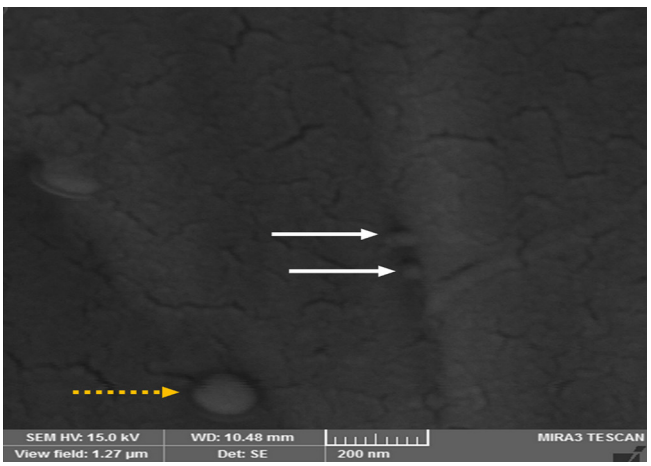
خواص گران‌روکشسانی

گران‌روکشسانی، خاصیت دسته‌ای از مواد همچون پلیمرهاست که رفتاری میان گران‌روبودن و کشسانی نشان می‌دهند و این خاصیت هنگام تحمیل نیروی خارجی و اعمال تغییرشکل بر آن ظاهر می‌شود. در جامدات گران‌روکشسان، بخش گران‌رو انرژی را هدر می‌دهد و بخش کشسان ماده، انرژی را در خود ذخیره کرده و به‌محض حذف تنش، به‌تدریج آن را آزاد می‌کند. شکل ۶، بیانگر رفتار گران‌روکشسان آمیزه‌های خالص و نانوکامپوزیتی در دو پارامتر مدول ذخیره (شکل ۵ (a)) و ضریب اتلاف (شکل ۶ (b)) است.

شکل ۶ (a)، اثر افزایش نانوذرات مختلف بر مدول ذخیره (E') پلی‌استال خالص را در محدوده دمایی ۱۰۰°C- تا ۱۵۰°C نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، با افزایش دما به سمت دمای ذوب و در پی آن افزایش تحرک زنجیر پلیمری، مدول ذخیره تمام نمونه‌ها شامل نمونه خالص و نانوکامپوزیتی کاهش می‌یابد. افزون بر این، افزودن نانوذرات دوده و نیز افزودن نانوذرات کلسیم کربنات همراه با دوده، موجب افزایش مدول ذخیره و رفتار کشسان نمونه‌های نانوکامپوزیتی در تمام محدوده دمایی شده است. بیشترین افزایش برای نانوکامپوزیت دارای دوده و ٪۳ وزنی نانوذرات کلسیم کربنات همراه با دوده در دمای ۱۰۰°C رخ داده است که به‌ترتیب ۸۰ و ٪۱۱۰ نسبت به پلی‌استال خالص است. دلیل اصلی افزایش مدول ذخیره با به‌کارگیری نانوذرات را می‌توان به اتصال



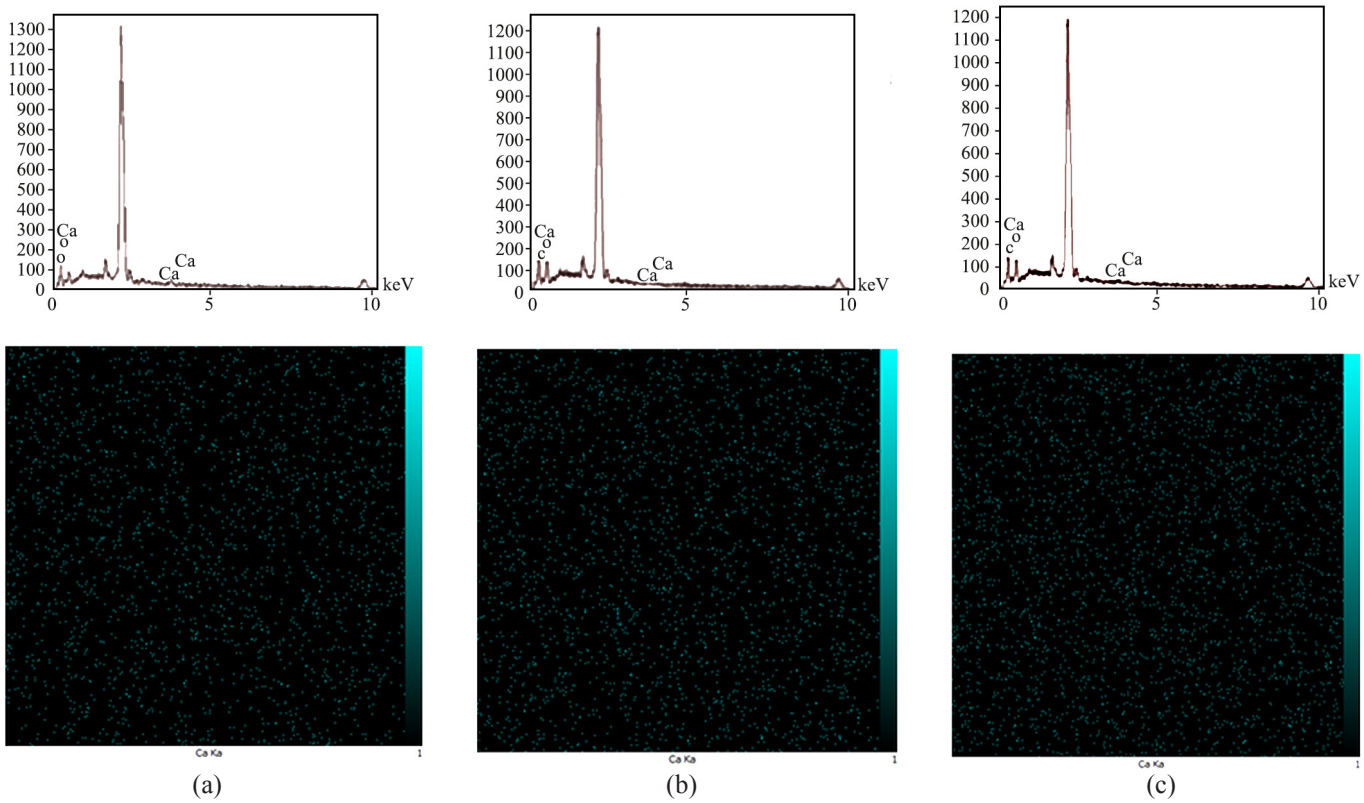
(a)



(b)

شکل ۴- ریزنگار SEM برای نمونه‌های (a) POM/CB و (b) POM/CB/1.5C.

Fig. 4. SEM micrograph of (a) POM/CB and (b) POM/CB/1.5NPCC.

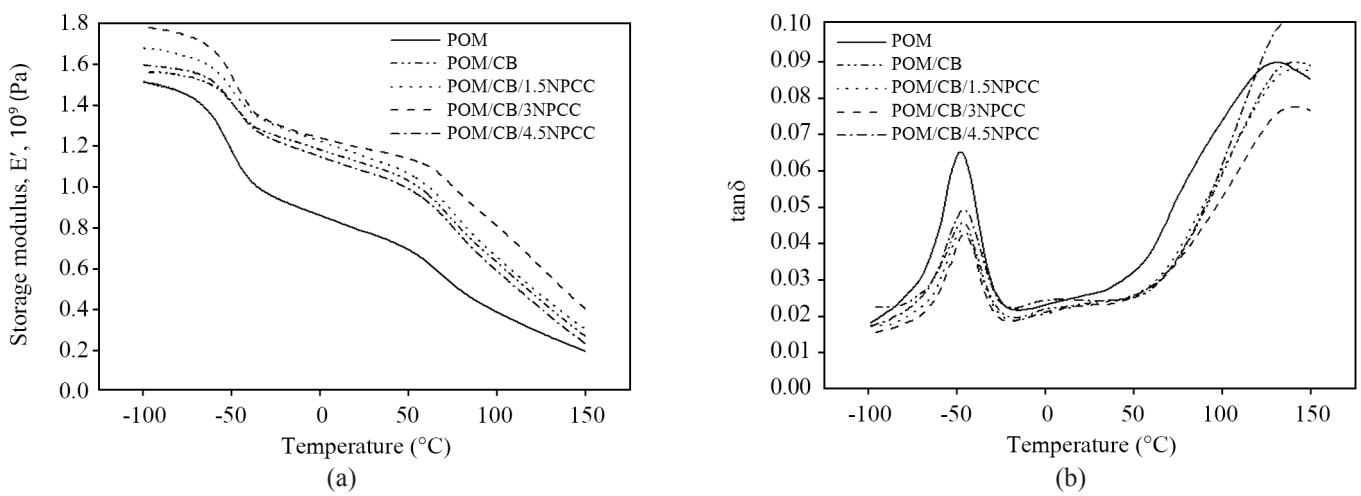


شکل ۵- نتایج آزمون EDS برای نمونه‌های نانوکامپوزیتی POM.

Fig. 5. EDS analysis results for POM nanocomposite specimens.

نانوذرات به پلیمر ماتریس نسبت داد که انتقال تنش از ماتریس به نانوذرات سفت را در محل تماس ذره-پلیمر افزایش می‌دهد. افزون بر این، پخش‌شدگی نانوذرات، باعث افزایش درهم‌تنیدگی زنجیرهای پلیمری با نانوذرات می‌شود و تحرک زنجیرها را کاهش می‌دهد که این اثر می‌تواند باعث افزایش مدول ذخیره شود [۳۷].

شکل ۶ (b) تغییرات ضریب میرایی را برحسب دما برای POM



شکل ۶- تغییرات (a) مدول ذخیره و (b) ضریب میرایی نسبت به دما.

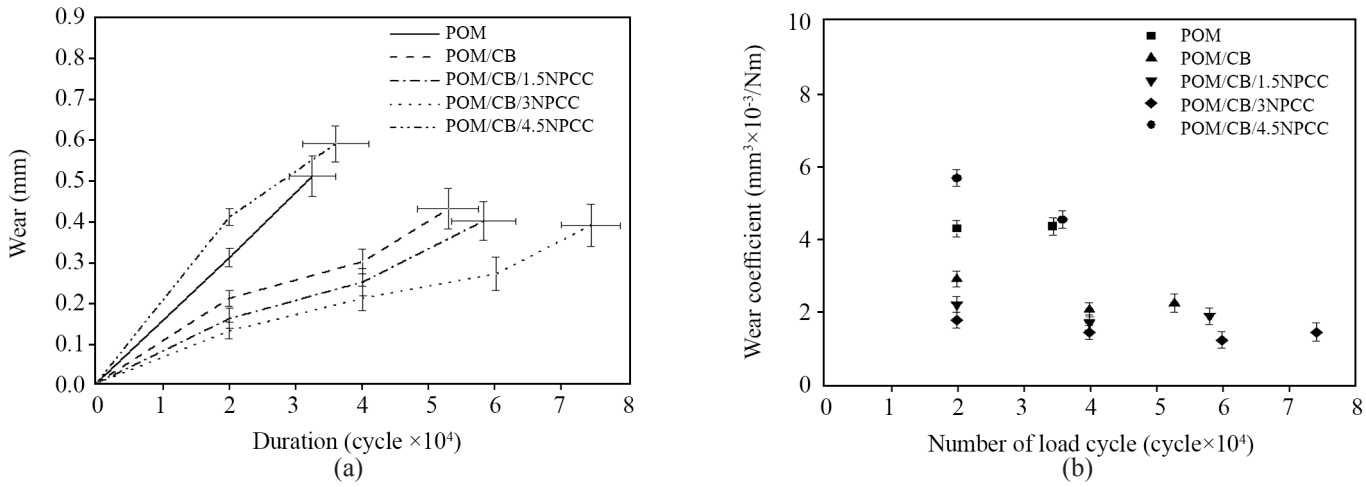
Fig. 6. Variation of (a) storage modulus and (b) damping factor vs. temperature.

خالص و نانوکامپوزیت‌های آن نشان می‌دهد. دمای متناظر با نقطه بیشینه در نمودار tanδ، دمای گذار شیشه‌ای (T_g) است. مطابق شکل ۵ (b)، ضریب میرایی تمام نمونه‌ها پیش از دمای T_g کمتر از حالت گذار است، زیرا گرمای اعمال‌شده در حالت شیشه‌ای انرژی لازم برای ایجاد حالت گذار و القای حرکت چرخشی در قطعه‌های پلیمری را ندارد و این قطعه‌ها در حالت بی‌حرکتی خواهند بود [۳۸]. بنابراین، نوع تغییر شکل، بیشتر به‌صورت کشسان بوده و لغزش‌های مولکولی که موجب جریان گران‌رو می‌شوند، بسیار محدود است [۳۹]. مطابق شکل ۶ (b)، به‌کارگیری هر دو نانوذره کلسیم کربنات و دوده، ارتفاع پیک منحنی نسبت اتلاف ($tan\delta_{max}$) را متناسب با مقدار وزنی نانوذرات کاهش داده است. این تغییرات نشان‌دهنده کاهش پدیده میرایی در مقیاس مولکولی برای نانوکامپوزیت و در مقایسه با پلیمر خالص است. کاهش ارتفاع پیک tanδ، ناشی از انتقال تنش از ماتریس به نانوذرات است که باعث می‌شود انرژی کمتری حین فرایند آسایش و حرکت برگشتی زنجیرها در درون پلیمر تلف شود. عامل دیگر، محبوس‌شدن زنجیرها در ناحیه بین‌فازی پلیمر–نانوذره است که فرایند حرکت برگشتی زنجیرها آسایش را دشوارتر می‌سازد. بنابراین، برقراری اتصال سطحی مناسب نسبت اتلاف را کاهش می‌دهد که حاکی از اثر تقویت‌کنندگی نانوذرات است.

سایش چرخ‌دنده

برای بررسی رفتار سایش شامل مقدار سایش و ضریب سایش (k_w) و نیز سازوکارهای سایش در فاصله‌های زمانی متفاوت برای نمونه‌های خالص و نانوکامپوزیتی، آزمون چرخ‌دنده تحت گشتاور ثابت ۱۰ N.m با سرعت دورانی ثابت ۱۵۰۰ rpm انجام شد. آزمون چرخ‌دنده در هر ۲۰۰۰۰ چرخه متوقف شد و با یک جفت چرخ‌دنده جدید ادامه یافت. این روش تا لحظه واماندگی چرخ‌دنده ادامه یافت. این روش موجب حذف خطای ناشی از کاهش ناگهانی دما در توقف‌های متوالی می‌شود.

شکل ۷ (a) تغییرات مقدار سایش دنده برای چرخ‌دنده‌های خالص و نانوکامپوزیتی در شرایط کاری و زمان‌های یکسان را تحت گشتاور ۱۰ N.m و طی آزمون نشان می‌دهد. مطابق این شکل، افزودن نانوذرات دوده به پلی‌استال موجب کاهش مقدار سایش تا ٪۳۲ (در ۲۰۰۰۰ چرخه) نسبت به پلی‌استال خالص شده است. افزون بر این، افزودن تا ٪۳ وزنی نانوذرات کلسیم کربنات همراه با دوده موجب افزایش مقاومت سایشی تا ٪۵۸ (در ۲۰۰۰۰ چرخه) نسبت به نمونه خالص شده است. با توجه به پراکنش نانوذرات در پلیمر ماتریس و زیادبودن سطح ویژه نانوذرات، برهم‌کنش نانوذرات و پلیمر ماتریس بیشتر شد که این موضوع موجب تقویت خواص سایشی پلیمر ماتریس شده است. کاهش ضریب اصطکاک نیز به عملکرد نانوذرات به‌عنوان روان‌کار جامد و افزایش خودروان‌کاری در نانوکامپوزیت حین لغزش سطوح روی یکدیگر نسبت داده شد که باعث کاهش سایش خراشان (abrasive wear) شده است [۴۰]. پخش مناسب نانوذرات درون ماتریس پلیمری، موجب افزایش سطح تماس نانوذرات و کاهش تماس مستقیم ماتریس پلیمری با جفت درگیر پلیمری شده و در نهایت ضریب اصطکاک را کاهش و مقاومت سایشی را در نانوکامپوزیت‌های POM/CB/NPCC افزایش داده است [۴۱]. کاهش مقدار سایش در چرخ‌دنده‌های نانوکامپوزیتی

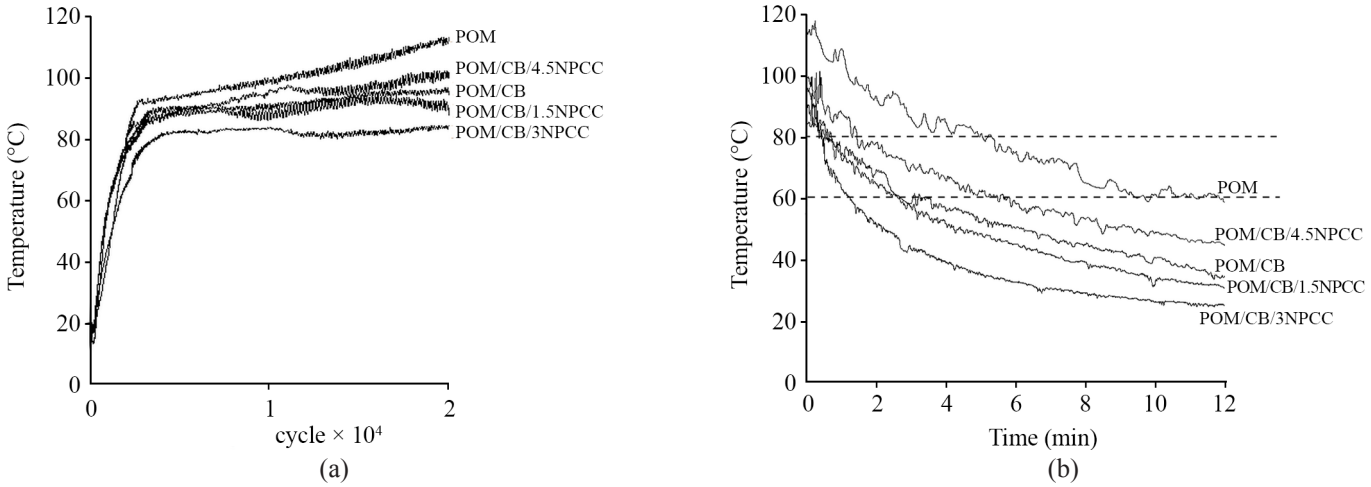


شکل ۷– تغییرات (a) سایش دنده و (b) ضریب سایش نسبت به تعداد چرخه برای چرخ‌دنده‌های پلی‌استال خالص و نانوکامپوزیتی.

Fig. 7. Variation of (a) gear teeth wear and (b) and wear coefficient (k_w) versus cycle numbers for POM and POM nanocomposite gear.

POM/CB/NPCC ناشی از تشکیل ناحیه بین‌فازی مستحکم میان نانوذرات و ماتریس پلیمری است که انتقال بار تماسی از ماتریس به نانوذرات را افزایش می‌دهد و مقاومت سایشی را بهبود می‌بخشد [۴۲]. افزودن مقادیر بیشتر (۴/۵٪ وزنی) از نانوذرات کلسیم کربنات، موجب افزایش شایان توجه مقدار سایش شد که علت آن می‌تواند کلوخه‌ای‌شدن ذرات کلسیم کربنات در ماتریس پلیمری باشد. کلوخه‌های کلسیم کربنات با فعال‌کردن سازوکار سایش سه‌جسمی در بین دو سطح درگیر به‌عنوان عوامل ساینده عمل می‌کند و باعث افزایش سایش در چرخ‌دنده‌ها می‌شوند. شکل ۷ (b)، ضریب سایش (k_w) محاسبه‌شده با استفاده از معادله (۳) برای تمام نمونه‌های چرخ‌دنده‌ای را برحسب تعداد چرخه چرخ‌دنده‌ها تا لحظه واماندگی نشان می‌دهد. مطابق این شکل، رابطه بین ضریب سایش و مدت زمان آزمون، خطی نیست و بسته به زمان آزمون متفاوت است. این نتیجه نشان می‌دهد، ضریب سایش (k_w) برخلاف فرض لحاظ‌شده در استاندارد VDI 2736 [۳۱]، مقدار ثابتی نیست.

با درنظرگرفتن اینکه تمام نمونه‌های خالص و نانوکامپوزیتی در بازه زمانی شروع تا ۲۰۰۰۰ چرخه، بدون واماندگی به درگیری خود ادامه داده‌اند، بنابراین در این بازه زمانی تغییرات دمایی نمونه‌های متفاوت، به‌طور برخط (online) اندازه‌گیری و مقایسه شد. برای بررسی نسبی انتقال گرما در چرخ‌دنده، پس از اتمام ۲۰۰۰۰ چرخه و توقف دستگاه آزمون چرخ‌دنده، اندازه‌گیری دمای سطحی دنده تا دمای محیط ادامه یافت. شکل ۸ (a) دمای سطحی اندازه‌گیری‌شده چرخ‌دنده پلی‌استال و چرخ‌دنده‌های نانوکامپوزیتی را در گشتاور ۱۰ N.m با سرعت دورانی ثابت ۱۵۰۰ rpm، نشان می‌دهد. طبق این شکل، برای نمونه خالص و نمونه POM/CB/4.5NPCC، دمای دنده پس از افزایشی سریع، به‌طور کامل پایدار نشده و افزایش تدریجی دما تا ۲۰۰۰۰ چرخه دیده شده است. این موضوع به تجمع گرمای زیاد در سطح دنده، به‌دلیل تماس مستقیم با جفت درگیر، مربوط است که از پایدارشدن کامل دما طی آزمون جلوگیری می‌کند. با وجود این، برای سایر نمونه‌های نانوکامپوزیتی، دمای سطح دنده ابتدا افزایش یافت و پس از سپری‌کردن تعداد دور مشخص، به نقطه تقریباً پایداری رسید. این مشاهده را می‌توان به شرح زیر بررسی کرد. افزایش ناگهانی دما در ابتدای آزمون به گرمای اصطکاکی تولیدشده در سطح دنده مربوط است. پس از تعداد دور مشخص و در ناحیه انتهایی شیب تند دما، افزایش دمای دنده به‌دلیل شرکت مستقیم در درگیری جفت دنده و انتقال گرمای بیشتر، بسیار بیشتر از دمای محیط شده به‌طوری که تبادل گرما میان پلیمر و محیط تشدید می‌شود. پس از مدت زمان بسیار کوتاه، وضعیت تعادلی میان گرمای تولیدشده در سطح دنده و گرمای منتقل‌شده به‌وجود می‌آید که موجب تثبیت دمای دنده می‌شود [۹]. چرخ‌دنده POM/CB/3NPCC دمای سطح کمتری نسبت به چرخ‌دنده خالص و سایر نمونه‌های نانوکامپوزیتی نشان می‌دهد. بهبود سفتی به‌ویژه در دماهای بیشتر در نانوکامپوزیت‌ها باعث کاهش سطح درگیری میان دو دنده و اصطکاک میان آن‌ها می‌شود و در نتیجه گرمای تولیدشده ناشی از اصطکاک نیز کاهش می‌یابد. اتلاف گرمایی پسماند نیز می‌تواند باعث تولید گرمای مضاعف در چرخ‌دنده‌های پلیمری شود که دلیل آن اتلاف انرژی حین تغییرشکل دنده‌های درگیر در هر چرخه است. کاهش نسبت اتلاف در اثر وجود نانوذرات می‌تواند تولید گرمای ناشی از پسماند را کاهش دهد.



شکل ۸- تغییرات دمای سطح دنده نسبت به (a) تعداد چرخه و (ب) زمان پس از توقف دستگاه در ۲۰۰۰۰ چرخه.

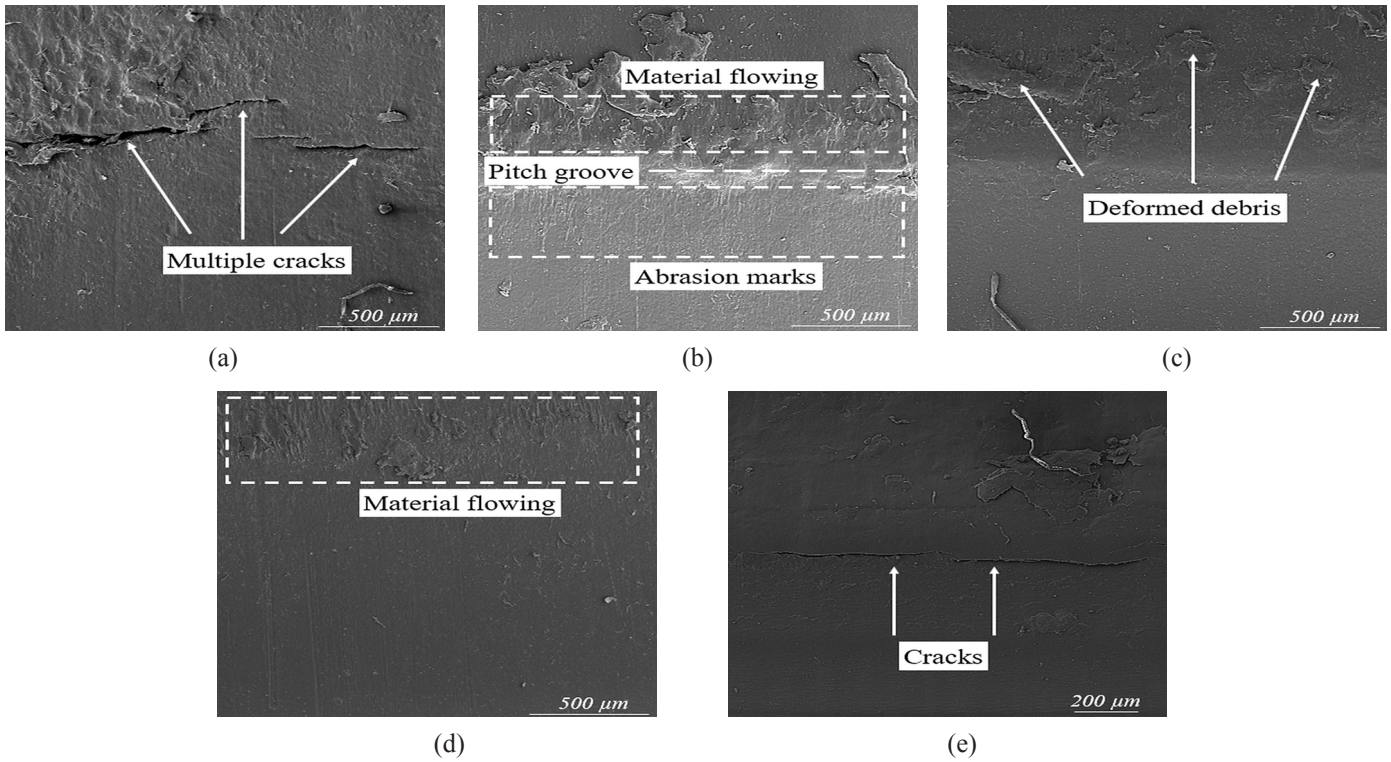
Fig. 8. Variation of gear surface temperature as a function of (a) cycle numbers and (b) time after test stop at 20,000 cycles.

شکل ۸ (b)، تغییرات دمایی سطح دنده برحسب زمان را پس از توقف آزمون چرخ‌دنده (۲۰۰۰۰ چرخه) نشان می‌دهد. با توجه به اینکه تمام نمونه‌ها بازه دمایی ۶۰°C تا ۸۰°C را طی کرده‌اند، بنابراین برای مقایسه انتقال گرمای نسبی، تغییرات دمایی سطح دنده برحسب زمان برای تمام نمونه‌ها در بازه دمایی ۶۰°C تا ۸۰°C بررسی شد. با توجه به شکل ۸ (b)، چرخ‌دنده‌های POM، POM/CB، POM/CB/1.5NPCC، POM/CB/3NPCC و POM/CB/4.5NPCC برای پیمودن این بازه دمایی، به‌ترتیب مدت زمان ۳۱۰، ۱۱۷، ۱۱۱، ۴۷ و ۲۵۳ s را سپری کردند. نتایج نشان داد، افزودن هر دو نانوذرات دوده و کلسیم کربنات، موجب افزایش انتقال گرما می‌شود. این نتیجه را می‌توان به بیشتربودن ضریب انتقال گرمای ذاتی هر دو نانوذره نسبت به پلیمر ماتریس، پخش مناسب نانوذرات و نیز سطح ویژه زیاد نانوذرات نسبت داد [۴۳،۴۴].

سازوکار سایش

در شکل ۹ تصاویر SEM از شرایط و سازوکارهای سایش سطح دنده چرخ‌دنده‌های پلی‌استالی خالص و نانوکامپوزیتی پس از واماندگی نشان داده شده است. نکته گفتنی در شکل ۹، برای چرخ‌دنده POM، وجود ترک در ناحیه گام است. چند ترک به‌دلیل بار خستگی تماسی در سطح دنده و در نزدیکی ناحیه گام دیده می‌شود. شروع و گسترش ترک را می‌توان به تنش‌های تماسی زیاد در منطقه تک‌دنده که از هر چرخ‌دنده فقط یک منطقه درگیر است [۴۵]، معکوس‌بودن جهت لغزش در ناحیه گام و دمای انباشته‌شده زیاد در منطقه گام نسبت داد. گسترش ترک نیز به‌دلیل انحراف دنده در اثر دما و تنش تماسی زیاد است. انحراف دنده باعث ایجاد درگیری زودرس در دنده بعدی می‌شود که این عامل سبب اعمال اضافه بار آنی در دنده بعدی شده و نیز باعث ایجاد و رشد ترک در دنده بعدی می‌شود.

وجود عیب‌های میکرونی و جابه‌جایی‌ها در سطح دنده نیز می‌تواند موجب تمرکز تنش شده و با افزایش تنش موضعی، عامل ایجاد ترک شود. در مرحله دوم، با ادامه بارگذاری چرخه‌ای، ترک رشد می‌کند و انحراف دنده بیشتر می‌شود. شروع و رشد ترک در منطقه گام دنده برای چرخ‌دنده‌های پلیمری در نتایج پژوهش‌های دیگری نیز مشاهده شده است [۴۶،۴۷]. نکته شایان ذکر درباره شکل‌شناسی سطوح ساییده‌شده چرخ‌دنده POM/CB این است که برخلاف چرخ‌دنده‌های POM اثری از ترک دیده نمی‌شود.



شکل ۹- ریزنگارهای SEM سطوح سایش چرخ‌دنده‌های خالص و نانوکامپوزیتی پس از واماندگی در ناحیه گام دنده با بزرگ‌نمایی ۷۰ برابر.

Fig. 9. SEM micrographs of wear surfaces of pure and nanocomposite gears after failure in tooth pitch zone with a magnification of 70 times.

دلیل این موضوع افزایش مقاومت خستگی در اثر وجود نانوذرات دوده است. نانوذرات، با فعال‌کردن سازوکارهای مسدودکننده ترک (crack pinning) و انحراف ترک (crack deflection) از رشد ترک جلوگیری می‌کند [۴۸،۴۹]. در سطح گشتاور بیشتر (۱۰ N.m)، چرخ‌دنده POM/CB تنش تماسی و دمای بیشتری را تحمل می‌کند و بنابراین تشکیل براده‌های بزرگ تغییرشکل‌یافته و مواد جریان‌یافته را به‌ویژه در مناطق بالای گام و گام تسریع می‌کند. با وجود این، طبق شکل ۸، اثرهایی از سایش خراشی و سایش چسبان ملایم در منطقه پایین گام دیده می‌شود. مطابق شکل ۹، نکته شایان توجه درباره شکل‌شناسی سطوح ساییده‌شده چرخ‌دنده POM/CB/1.5NPCC این است که همچون چرخ‌دنده‌های POM/CB و برخلاف چرخ‌دنده‌های POM آثاری از ترک دیده نشد. دلیل این موضوع افزایش مقاومت خستگی در اثر وجود نانوذرات کلسیم کربنات به‌همراه دوده است. افزایش چقرمگی نانوکامپوزیت با وجود نانوذرات کلسیم کربنات را می‌توان به تشکیل ساختار لیفچه‌ای (fibrillated structure) ربط داد [۵۰].

لیفچه‌ای‌شدن در اثر وجود نانوذرات کلسیم کربنات به حفره‌سازی نانوذرات مربوط است. نانوذرات همسان‌گرد به‌عنوان مرکز تمرکز تنش عمل کرده و نسبتی از انرژی دریافتی از پلیمر ماتریس را صرف رهایی از پلیمر و در نتیجه حفره‌سازی در فرایند انتقال بار می‌کنند [۵۱]. افزایش گشتاور به بیش از گشتاور بحرانی (۹ N.m) چرخ‌دنده POM/CB/1.5NPCC [۱۸]، به‌دلیل افزایش دما و تنش تماسی، موجب نرم‌شدگی دنده و تغییرشکل پلاستیک در ناحیه بالای گام و جریان مواد تحت گشتاور ۱۰ N.m شد. براده‌های ایجادشده نیز در اثر سایش خراشی، در راستای درگیری دو دنده حرکت کردند و از محل درگیری خارج شدند. با وجود این، برخی براده‌ها امکان خروج از محل درگیری را نداشتند و طی درگیری حبس شده و به‌صورت انباشته پرس شده‌اند. محدودشدن تغییرشکل پلاستیک و هموارترشدن سطح سایش با ٪۳ وزنی نانوذرات کلسیم کربنات، متناسب با بهبود مقاومت سایشی و کاهش مقدار سایش است و دلیل آن را می‌توان به افزایش مقاومت سطح نسبت به آثار گرمایی و نیز نیروهای اصطکاکی با استفاده از نانوذرات کلسیم کربنات، تحت بارگذاری ۱۰ N.m، نسبت داد. جریان‌یابی مواد سازوکار غالب سطح دنده وامانده‌شده در ناحیه سردنده است. جریان‌یابی مواد در راستای غلتش و لغزش در ناحیه سردنده به‌دلیل اثر هم‌افزایی تنش و دماست [۵۲].

با توجه به نتایج بخش‌های مربوط به سایش، دما و DMTA، کاهش عملکرد چرخ‌دنده با افزودن ٪۴/۵ وزنی نانوذرات کلسیم کربنات مشاهده شد. بنابراین انتظار می‌رود، کاهش عملکرد چرخ‌دنده به‌ازای افزودن نانوذرات بیش از ٪۳ وزنی کلسیم کربنات در شکل‌شناسی سطوح ساییده‌شده نیز آشکار شود. بروز ترک و شکست، عامل غالب در واماندگی چرخ‌دنده POM/CB/4.5NPCC بود. کلوخه‌شدن نانوذرات کلسیم کربنات در مقدارهای وزنی زیاد باعث کاهش انعطاف‌پذیری می‌شود. زیرا این کلوخه‌ها به‌عنوان مراکز تمرکز تنش عمل می‌کنند و نقش مؤثری در آسانی شکل‌گیری و انتشار ترک و کاهش جذب انرژی شکست دارند. کلوخه‌ها مانع انتقال مؤثر تنش بین ماتریس پلیمری و نانوذرات تقویت‌کننده و نیز استهلاک انرژی ترک می‌شوند [۵۳].

نتیجه‌گیری

چرخ‌دنده‌های نانوکامپوزیتی POM/CB/NPCC با مقدار ٪۰/۴۲ وزنی از نانوذرات دوده و مقدارهای وزنی ۱/۵، ۳ و ٪۴/۵ از NPCC با روش قالب‌گیری تزریقی تولید و تحت آزمون چرخ‌دنده و در شرایط خشک بررسی شدند. خواص چرخ‌دنده از جمله سایش، دمای سطحی و ریزساختار سایش تحت مدت زمان آزمایش یکسان مطالعه شد. ریزنگارهای سطوح شکسته‌شده در اثر ضربه، توزیع یکنواخت نانوذرات CB و NPCC را در ماتریس پلیمر و اثرهای کلوخگی در مقدارهای وزنی بیشتر NPCC (٪۴/۵ وزنی) را نشان داد. نتایج اندازه‌گیری سایش نشان‌دهنده کاهش مقدار سایش تا ۳۲ و ٪۵۸ برای POM/CB و POM/CB/3NPCC در مقایسه با چرخ‌دنده‌های POM بود. عمر کاربری نانوکامپوزیت‌های POM/CB و POM/CB/3NPCC به‌ترتیب تا ۵۰ و ٪۱۲۵ نسبت به POM افزایش یافت. افزودن CB و NPCC به POM، دمای سطحی چرخ‌دنده‌های نانوکامپوزیتی را طی درگیری به‌دلیل بهبود خواص گران‌روکشسانی و خواص گرمایی کاهش داد. در شکل‌شناسی سطوح ساییده‌شده چرخ‌دنده‌های POM/CB، POM/CB/1.5NPCC و POM/CB/3NPCC، برخلاف چرخ‌دنده‌های POM و POM/CB/4.5NPCC، آثاری از ترک در هیچ یک از سطوح گشتاور دیده نشد. این نتیجه را می‌توان به افزایش مقاومت خستگی در اثر وجود نانوذرات کلسیم کربنات به‌همراه دوده نسبت داد. نانوذرات، احتمالاً با فعال‌کردن سازوکارهای مسدودکننده و انحراف ترک، از رشد ترک جلوگیری می‌کند.

مراجع

1. Pogačnik A. and Tavčar J., An Accelerated Multilevel Test and Design Procedure for Polymer Gears, *Mater. Des.*, **65**, 961-

973, 2015.

2. Mao K., Li W., Hooke C., and Walton D., Friction and Wear Behaviour of Acetal and Nylon Gears, *Wear*, **267**, 639-645, 2009.
3. Terashima K., Tsukamoto N., and Nishida N., Development of Plastic Gears for Power Transmission: Design on Load-Carrying Capacity, *JSME Int. J. B-Fluid Thermal Eng.*, **29**, 1326-1329, 1986.
4. Sinha S.K. and Briscoe B.J., *Polymer Tribology*, 1st ed, World Scientific, 243-251, New Jersey 2009.
5. Lu Z., Liu H., Zhu C., Song H., and Yu G., Identification of Failure Modes of a Peek-Steel Gear Pair under Lubrication, *Int. J. Fatigue*, **125**, 342-348, 2019.
6. Düzcükoğlu H., Study on Development of Polyamide Gears for Improvement of Load-Carrying Capacity, *Tribol. Int.*, **42**, 1146-1153, 2009.
7. İmrek H., Performance Improvement Method for Nylon 6 Spur Gears, *Tribol. Int.*, **42**, 503-510, 2009.
8. Mohsenzadeh R., Shelesh-Nezhad K., and Chakherlou T., Experimental and Finite Element Analysis on the Performance of Polyacetal/Carbon Black Nanocomposite Gears, *Tribol. Int.*, **160**, 107055, 2021.
9. Singh P.K. and Singh A.K., An Investigation on the Thermal and Wear Behavior of Polymer Based Spur Gears, *Tribol. Int.*, **118**, 264-272, 2018.
10. Mao K., Greenwood D., Ramakrishnan R., Goodship V., Shrouti C., Chetwynd D., and Langlois P., The Wear Resistance Improvement of Fibre Reinforced Polymer Composite Gears, *Wear*, **426**, 1033-1039, 2019.
11. Senthilvelan S. and Gnanamoorthy R., Influence of Reinforcement on Composite Gear Metrology, *Mech. Mach. Theory*, **43**, 1198-1209, 2008.
12. Ansari R. and Hassanzadeh-Aghdam M., Micromechanical Investigation of Creep-Recovery Behavior of Carbon Nanotube-Reinforced Polymer Nanocomposites, *Int. J. Mech. Sci*, **115**, 45-55, 2016.
13. Anand A., Banerjee P., Sahoo D., Rathore D.K., Prusty R.K., and Ray B.C., Effects of Temperature and Load on the Creep Performance of CNT Reinforced Laminated Glass Fiber/Epoxy Composites, *Int. J. Mech. Sci.*, **150**, 539-547, 2019.
14. Mohsenzadeh R., Shelesh-Nezhad K., and Chakherlou T.N., Experimental and Finite Element Analysis on the Performance of Polyacetal/Carbon Black Nanocomposite Gears, *Tribol. Int.*, **160**, 107055, 2021.
15. Mohsenzadeh R. and Fathi A., Evaluation of the Impact Resistance of POM/TPU/CB Three-Phase Nanocomposite for Application in Bumper Bracket, *Iran. J. Polym. Sci Technol. (Persian)*, **34**, 557-568, 2022.
16. Mohsenzadeh R., Shelesh-Nezhad K., Chakherlou T.N., and Yaghini H.H., Gear Life and Failure Mode Versus Meshing Stress in Polyacetal/Carbon Black Nanocomposite Gears, *Eng. Fail. Anal.*, **131**, 105859, 2022.
17. Mohsenzadeh R., Soudmand B.H., and Shelesh-Nezhad K., A Combined Experimental-Numerical Approach for Life Analysis and Modeling of Polymer-Based Ternary Nanocomposite Gears, *Tribol. Int.*, **173**, 107654, 2022.
18. Mohsenzadeh R., Soudmand B.H., and Shelesh-Nezhad K., Load-Bearing Analysis of Polymer Nanocomposite Gears Using a Temperature-Based Step Loading Technique: Experimental and Numerical Study, *Wear*, **514-515**, 204595, 2023.
19. Soudmand B. and Shelesh-Nezhad K., Failure and Wear Analysis of Poly(butylene terephthalate) Nanocomposite Spur Gears, *Tribol. Int.*, **151**, 106439, 2020.
20. Gao X., Qu C., and Fu Q., Toughening Mechanism in Polyoxymethylene/Thermoplastic Polyurethane Blends, *Polym. Int.*, **53**, 1666-1671, 2004.
21. Gojny F.H., Wichmann M.H.G., Köpke U., Fiedler B., and Schulte K., Carbon Nanotube-Reinforced Epoxy-Composites: Enhanced Stiffness and Fracture Toughness at Low Nanotube Content, *Compos. Sci. Technol.*, **64**, 2363-2371, 2004.
22. Gubbels F., Jérôme R., Teyssie P., Vanlathem E., Deltour R., Calderone A., Parente V., and Brédas J.-L., Selective Localization of Carbon Black in Immiscible Polymer Blends: A Useful Tool to Design Electrical Conductive Composites, *Macromdecules*, **27**, 1972-1974, 1994.
23. Gashti M.P., Allahyary H., Nasraei P., and Gashti M.P., SiO_2-Kaolinite Affecting the Surface Properties of Ternary Poly(vinyl chloride)/Silica/Kaolinite Nanocomposites, *Fibers Polym.*, **14**, 1870-1876, 2013.
24. Lohar G.S. and Jogi B.F., Influence of Carbon Black (CB) on Mechanical Behaviour and Microscopic Analysis of Poly-propylene (PP)/Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) Nanocomposites, *Procedia Manuf.*, **20**, 85-90, 2018.
25. Mohsenzadeh R., Soudmand B.H., and Shelesh-Nezhad K., Synergetic Impacts of Two Rigid Nano-Scale Inclusions on the

Mechanical and Thermal Performance of POM/Carbon Black/ $CaCO_3$ Ternary Nanocomposite Systems, *Polym. Compos.*, **43**, 3041-3056, 2022.

26. Lin Y., Chen H., Chan C.-M., and Wu J., The Toughening Mechanism of Polypropylene/Calcium Carbonate Nanocomposites, *Polymer*, **51**, 3277-3284, 2010.
27. Kemal I., Whittle A., Burford R., Vodenitcharova T., and Hoffman M., Toughening of Unmodified Polyvinylchloride through the Addition of Nanoparticulate Calcium Carbonate, *Polymer*, **50**, 4066-4079, 2009.
28. Mohsenzadeh R., Majidi H., Soltanzadeh M., and Shelesh-Nezhad K., Wear and Failure of Polyoxymethylene/Calcium Carbonate Nanocomposite Gears, *Proc. Inst. Mech. Eng. J: J. Eng. Tribol.*, **234**, 811-820, 2019.
29. Soltanzadeh M., Salari F., Shelesh-Nezhad K., and Mohsenzadeh R., Experimental Studies on Mechanical Properties and Thermal Behavior of Polyoxymethylene/$CaCO_3$ Nanocomposites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **27**, 51-62, 2014.
30. Johnson J., *Introduction to Fluid Power*, 1st ed., Cengage Learning, Boston, 63-65, 2002.
31. Standard Verein Deutscher Ingenieure V.P., *Thermoplastic Gear Wheels, Cylindrical Gears, Calculation of the Load-Carrying Capacity,* Vdi-Richtlinien, 2014.
32. Gojny F., Wichmann M., Köpke U., Fiedler B., and Schulte K., Carbon Nanotube-Reinforced Epoxy-Composites: Enhanced Stiffness and Fracture Toughness at Low Nanotube Content, *Compos. Sci. Technol.*, **64**, 2363-2371, 2004.
33. Singh R., Zhang M., and Chan D., Toughening of a Brittle Thermosetting Polymer: Effects of Reinforcement Particle Size and Volume Fraction, *J. Mater. Sci.*, **37**, 781-788, 2002.
34. Zhang B.Y., Xu L., Guo Z.X., Yu J., and Nagai S., Effects of Glass Fiber on the Properties of Polyoxymethylene/ Thermoplastic Polyurethane/Multiwalled Carbon Nanotube Composites, *Polym. Compos.*, **38**, 1319-1326, 2017.
35. Chan C.-M., Wu J., Li J.-X., and Cheung Y.-K., Polypropylene/ Calcium Carbonate Nanocomposites, *Polymer*, **43**, 2981-2992, 2002.
36. Kiss A., Fekete E., and Pukánszky B., Aggregation of $CaCO_3$ Particles in PP Composites: Effect of Surface Coating, *Compos. Sci. Technol. (Persian)*, **67**, 1574-1583, 2007.
37. Karamipour S., Ebadi-Dehaghani H., Ashouri D., and Mousavian S., Effect of Nano-$CaCO_3$ on Rheological and Dynamic Mechanical Properties of Polypropylene: Experiments and Models, *Polym. Test.*, **30**, 110-117, 2011.
38. Ferry J.D., *Viscoelastic Properties of Polymers,* 1st ed., John Wiley and Sons, New York, 12-16, 1980.
39. Gu H., Dynamic Mechanical Analysis of the Seawater Treated Glass/Polyester Composites, *Mater. Des.*, **30**, 2774-2777, 2009.
40. Chopra S., Batthula S., Deshmukh K., and Peshwe D., Tribological Behaviour of Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNT) Filled Polybutylene Terephthalate (PBT) Nanocomposites, *Trans. Indian Inst. Met.*, **70**, 801-807, 2017.
41. Mu B., Wang Q., Wang T., Wang H., Jian L., and Pei X., Preparation and Friction Properties of PBT/MMT Composites, *Polym. Compos*, **30**, 619-628, 2009.
42. Zhaohong X., Zhenhua L., Jian L., and Fei F.Y., The Effect of CF and Nano-SiO_2 Modification on the Flexural and Tribological Properties of POM Composites, *J. Thermoplast. Compos. Mater*, **27**, 287-296, 2014.
43. Frormann L., Iqbal A., and Abdullah S.A., Thermo-Viscoelastic Behavior of PCNF-Filled Polypropylene Nanocomposites, *J. Appl. Polym. Sci.*, **107**, 2695-2703, 2008.
44. Vakili M., Ebadi-Dehaghani H., and Haghshenas-Fard M., Crystallization and Thermal Conductivity of $CaCO_3$ Nanoparticle Filled Polypropylene, *J. Macromol. Sci.*, **50**, 1637-1645, 2011.
45. Mohsenzadeh R., Development of Stress Distribution of Composite Gear Tooth Reinforced by Nano-$CaCO_3$, Using Finite Element Analysis and Its Correlation with Experience, *J. Fail. Anal. Prev.,* **22**, 1495-1503, 2022.
46. Walton D. and Shi Y., A Comparison of Ratings for Plastic Gears, *Proc. Inst. Mech. Eng. C: J. Mech. Eng. Sci.*, **203**, 31-38, 1989.
47. Senthilvelan S. and Gnanamoorthy R., Effect of Gear Tooth Fillet Radius on the Performance of Injection Molded Nylon 6/6 Gears, *Mater. Des.*, **27**, 632-639, 2006.
48. Mohsenzadeh R., Experimental Studies on Mechanical Properties and Toughening Mechanisms of PA6/Zeolite Nanocomposites, *Proc. Inst. Mech. Eng. C: J. Mech. Eng. Sci.*, **235**, 7233-7240, 2021.
49. Mohsenzadeh R., Experimental Studies on the Tribology Behavior of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene/ Zeolite Nanocomposite, *Amirkabir J. Mech. Eng.,* **53**, 5159-5168, 2021.
50. Soudmand B., Shelesh-Nezhad K., and Hassanifard S.,

Toughness Evaluation of Poly(butylene terephthalate) Nanocomposites, *Theor. Appl. Fract. Mech*, **108**, 102662, 2020.

51. Tanniru M. and Misra R., On Enhanced Impact Strength of Calcium Carbonate-Reinforced High-Density Polyethylene Composites, *Mater. Sci. Eng. A*, **405**, 178-193, 2005.
52. Mohsenzadeh R., Soudmand B., and Shelesh-Nezhad K., Failure Analysis of POM Ternary Nanocomposites for Gear Applications: Experimental and Finite Element Study, *Eng. Fail. Anal.*, **140**, 106606, 2022.
53. Afshar A., Massoumi I., Khosh R.L., and Bagheri R., Fracture Behavior Dependence on Load-Bearing Capacity of Filler in Nano- and Microcomposites of Polypropylene Containing Calcium Carbonate, *Mater. Des.*, **31**, 802-807, 2010.