

بررسی اثر استفاده از نانوسلولز تهیه شده از کاغذ باطله در بهبود نرخ سایش لنت ترمز

چکیده

در این پژوهش به بررسی اثر استفاده از نانو سلولز تهیه شده از کاغذ باطله بر نرخ سایش مواد اصطکاکی مورد استفاده در لنت ترمز خودرو پرداخته شده است. بخش مهمی از فرمولاسیون مواد اصطکاکی مورد استفاده در لنت ترمز الیاف تقویت کننده است که در واقع نقش اسکلت نگه دارنده مواد را بر عهده دارند. الیاف مختلفی در لنت ترمز استفاده می شوند، مانند الیاف آهن، الیاف سنگ، الیاف شیشه و یکی از مقرون به صرفه ترین الیاف مورد استفاده در لنت ترمز الیاف سلولز است. گرچه الیاف سلولز سختی لنت را پایین می آورد و این یک امتیاز محسوب می شود اما از سوی دیگر به دلیل سست بودن الیاف سلولز نرخ سایش لنت ترمزهای ساخته شده با این الیاف بالا می رود. در این تحقیق امکان استفاده از نانوسلولز جهت بهبود نرخ سایش به عنوان الیاف در فرمولاسیون لنت ترمز بررسی شده است. در این فرمول از رزین فنول فرمالدهید (اتصال دهنده)، پشم آهن و نانوسلولز (الیاف)، باریت و مولایت (پرکننده) و پودر لاستیک، کک، اکسید آهن و اکسید آلومینیوم (اصلاح کننده اصطکاک استفاده شد. لنت های ساخته شده به روش کاملاً صنعتی، مورد آزمون های استاندارد قرار گرفتند و میزان نرخ سایش آن ها در آزمون سایش و اصطکاک با توجه به میزان کاهش جرم آن اندازه گیری شد. متوسط نرخ سایش (کاهش جرم) لنت های ساخته شده با سلولز ۸ گرم و متوسط نرخ سایش لنت های ساخته شده با نانو سلولز ۵/۸۸ گرم است نتایج نشان دهنده بهبود ۴۰ درصدی نرخ سایش لنت ترمز با استفاده از نانوسلولز به جای سلولز است.

واژگان کلیدی: مواد اصطکاکی، الیاف، سایش و اصطکاک، کاهش جرم.

محمد احمدی^{۱*}

آیدا معزی پور^۲

بیبا معزی پور^۳

^۱ دانشیار صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

^۲ دانش آموخته دکتری صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۳ استادیار صنایع چوب و کاغذ، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیل، اردبیل، ایران

مسئول مکاتبات:

m.ahmadi@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۸

مقدمه

سیستم ترمز اتومبیل از یک لقمه اصطکاکی که بر روی یک دیسک آهنی ساییده می شود تشکیل شده است. برای ترمز گیری مناسب، ضریب اصطکاک لقمه باید نسبتاً بالا و پایدار حدود ۰/۳ تا ۰/۷ باشد و این ویژگی از یک فرمولاسیون دقیق مواد اصطکاکی حاصل می شود. [۱]. مواد اصطکاکی در سیستم ترمز نقش کلیدی در کارایی مؤثر و ایمنی ترمز ایفا می کنند [۲]. همچنین مواد اصطکاکی باید عملکرد مناسبی مانند مقاومت به سایش

مناسب، ضریب اصطکاک پایدار، افت ضریب کم، قیمت پایین، عدم لرزش و صدا، استحکام خوب و عدم آلودگی محیط زیست و عدم آسیب به انسان و موجودات زنده را در لنت ترمز تحت شرایط مختلف ترمز گیری ایجاد نمایند [۳] و [۴]. از آنجایی که هیچ ماده ای به تنهایی قادر به ایجاد همه این ویژگی ها نیست مواد اصطکاکی به صورت ترکیب چندگانه از مواد مختلف طراحی می شوند که شامل بیشتر از ۱۰ جزء است. ویژگی های تریبولوژی و مورفولوژی مواد اصطکاکی به وسیله این مواد تعیین می شود که به چهار

با پشم سنگ بودند، ضمن اینکه استفاده از الیاف استیل سبب کاهش نرخ سایش لنت ترمز می‌شود [۱۴]. الیاف سلولز تقویت‌کننده بسیار خوبی برای ساخت لنت ترمز هستند و سبب افزایش ضریب اصطکاک [۱۵] و کاهش صدای جیغ ترمز می‌شوند و انعطاف‌پذیری بالا و قیمت پایینی دارند. باوجود نرمی الیاف سلولز این الیاف به بهبود سختی سطح لنت کمک می‌کنند که علت آن را می‌توان به پراکنش مناسب این الیاف و واکنش خوب آن با رزین نسبت داد، زیرا الیاف سلولز الیافی پلیمری با پایه آلی و طبیعی هستند که تعداد زیادی گروه‌های شیمیایی کاربردی دارند که سبب واکنش مؤثرتر میان سلولز و رزین می‌شوند [۱۶]. اما درحالی‌که الیاف سلولز ضریب اصطکاک بالایی ایجاد می‌کنند به دلیل پایداری حرارتی ضعیف سبب افزایش نرخ سایش لنت ترمز می‌شوند [۱۲]. نانوسلولز اغلب به‌عنوان یک گزینه مناسب برای تولید فرآورده‌های مرکب مستحکم در نظر گرفته می‌شود. بنابراین مقاومت حرارتی نانوسلولز یکی از ویژگی‌های اصلی است که باید موردتوجه قرارگیری. گرچه رفتار حرارتی نانوسلولز بسیار متغیر است و بستگی به نوع تیمار و منبع مواد اولیه دارد اما دمای تجزیه آن به‌طور کلی حدود ۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سلسیوس است این دما برای سلولز ۱۵۰ تا ۲۱۰ درجه سلسیوس است [۱۷]. بنابراین انتظار می‌رود نانو سلولز مقاومت به حرارت و در نتیجه مقاومت به سایش بهتری نسبت به سلولز داشته باشد. هدف از این تحقیق بررسی اثر نانو سلولز بر نرخ سایش لنت ترمز است.

مواد و روش‌ها

مواد

در این تحقیق از سلولز سنتز شده از کاغذ باطله استفاده شد. ویژگی‌های نانو سلولز مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است.

گروه رزین اتصال‌دهنده، تقویت‌کننده، اصلاح‌کننده اصطکاک و پرکننده تقسیم می‌شوند [۵ و ۶]. الیاف تقویت‌کننده استفاده شده در ترکیب مواد اصطکاک اثر بسیار مهمی در تعیین ویژگی‌های اصطکاک لنت ترمز دارد. برای بهبود استحکام فیزیکی و عملکرد اصطکاک در ترکیب مواد اصطکاک از دو یا سه نوع الیاف استفاده می‌شود مانند الیاف فلزی، سرامیکی، شیشه، آکرلیک و ... [۷] وقتی که مواد به‌عنوان اجزایی استفاده می‌شوند که روی هم ساییده می‌شوند، سختی و مقاومت به سایش نقش بسیار مهمی را در عملکرد آنها ایفا می‌کنند [۸]. از سوی دیگر، اخیراً مطالعه بر روی سایش لنت ترمز به علت مسائل محیط‌زیستی و غبار حاصل از ترمز گیری موردتوجه بسیاری قرار گرفته است، زیرا غبار حاصل از ترمز گیری وارد هوا و محیط‌زیست می‌شود و نتایج حاصل از بررسی غبار ناشی از ترمز گیری نشان‌دهنده وجود مواد اصطکاک لنت و دیسک در این غبار است. ۱۰ تا ۳۰ درصد این غبار ناشی از مواد اصطکاک است و هر چه نرخ سایش بالاتر باشد مقدار این غبار بیشتر خواهد بود [۹]. همچنین مقاومت به سایش تعیین‌کننده طول عمر مواد اصطکاک در طی عملکرد آنها است و به اجزا تشکیل‌دهنده و روش ساخت لنت ترمز بستگی دارد [۱۰] و Yaoqing [۱۱] و همکاران در سال ۲۰۱۰ رفتار حرارتی و تریبولوژیک الیاف میکرو سرامیک و الیاف نانو تیتانات پتاسیم را در لنت ترمز بررسی نمودند. نتایج نشان داد ترکیب هر دو نوع الیاف سبب بهبود ویژگی‌های حرارتی و کاهش نرخ سایش لنت ترمز می‌شود [۱۲]. Baklouti و همکاران در سال (۲۰۱۴) از الیاف شیشه به‌منظور بهبود ویژگی‌ها و عملکرد لنت ترمز استفاده کردند. نتایج نشان دادند استفاده از الیاف شیشه سبب کاهش نرخ سایش لنت ترمز می‌شود [۱۳] Jayakumari و Bernard نیز در سال (۲۰۱۶) به بررسی و مقایسه استفاده از الیاف پشم سنگ و الیاف استیل در ترکیب لنت ترمز پرداخته‌اند. نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب الیاف استیل در مقایسه

جدول ۱. ویژگی‌های نانوسلولز مورد استفاده

نوع نانو سلولز	نانو سلولز سنتز شده از کاغذ باطله
قطر الیاف نانو	۵۰ نانومتر
روش تولید	مکانیکی
خلوص	۹۹ درصد

نانو سلولز باشد به عنوان عامل متغیر در نظر گرفته شد که به مقدار ۵ درصد در فرمولاسیون استفاده شد. درصد وزنی مواد در نمونه‌های لنت ترمز ساخته شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

برای بررسی اثر نانو سلولز بر نرخ سایش لنت ترمز از یک فرمولاسیون مناسب و تأیید شده توسط آکرو دیتته شرکت لنت پارسیان ترمز (معتمد استاندارد) استفاده شد که مشخصات آن در جدول ۲ آورده شده است. نوع سلولز مورد استفاده در فرمولاسیون که سلولز کاغذ بازیافتی و یا

جدول ۲. درصد وزنی مواد فرمولاسیون بدون مس و آزبست برای ساخت لنت ترمز

نام ماده	درصد وزنی
رزین فنول فرمالدهید	۷
پودر لاستیک	۶
پشم آهن	۲۰
سلولز/ نانو سلولز	۵
مولایت	۱۰
پرکننده معدنی	۲۵
کک	۱۵
اکسید آهن	۶
اکسید آلومینیوم	۶

روش‌ها

پرس قرار داده شده و مواد پیش پرس شده بر روی آن قرار گرفته و برای اتصال کفشک به لقمه و فرم دهی نهایی لنت ترمز از پرس گرم با دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس و فشار ۸۵ بار استفاده شد. مدت زمان پرس ۶ دقیقه بود. نمونه‌های پرس شده به مدت ۸ ساعت در کوره باز پخت با دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها از کوره خارج شده و پس از خنک شدن مراحل ساب‌زنی و نصب سنسور و رنگ زنی روی آن‌ها انجام شد. تصویر لنت‌های ساخته شده در شکل ۱ نشان داده شده است. سپس آزمون و سایش و اصطکاک طبق استاندارد مربوطه روی نمونه‌های ساخته شده، انجام شد. در آخر میانگین داده‌های حاصل با انجام آزمون t باهم مقایسه شدند.

برای انجام آزمون‌ها با در نظر گرفتن یک عامل متغیر (نوع پسماند سلولزی)، نمونه‌هایی از دو ترکیب مختلف ساخته شدند. برای هر تیمار ۵ تکرار در نظر گرفته شد و در مجموع ۱۰ عدد لنت ترمز خودرو تیباً برای انجام تحقیق ساخته شد. مواد با درصد وزنی مشخص شده در جدول ۲ تهیه شدند و سپس لنت‌ها به روش کاملاً صنعتی به شرح زیر ساخته شدند. ابتدا مواد با ترکیب مشخص درون میکسر ریخته و به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت rpm ۲۰۰ باهم مخلوط شدند. سپس به منظور فرم دهی اولیه داخل قالب ریخته شده و به کمک پیش پرس سرد فشرده شدند. کفشک‌های چسب خورده روی حفره‌های قالب



شکل ۱. تصویر لنت‌های ساخته شده

آزمون سایش و اصطکاک

مهم‌ترین آزمونی که در صنعت روی لنت‌های ساخته شده انجام می‌شود آزمون سایش و اصطکاک است که مطابق با استاندارد ملی ۵۸۶ انجام می‌شود و به نوعی عملکرد لنت ترمز را در شرایط مختلف بررسی می‌نماید. یکی از ویژگی‌های بسیار مهم حاصل از این آزمون، نرخ سایش حاصل از افت وزن نمونه مورد آزمون است که در واقع نشان‌دهنده طول عمر لنت ترمز و میزان گردوغبار حاصل از ترمز گیری است. نمونه‌ها پس از ساخت از نظر ظاهری بررسی شدند، سپس لقمه‌ها از یک پلیت فلزی جدا شده و به ابعاد $10 \times 24 \times 24$ میلی‌متر بریده شدند. پس از آن به وسیله دستگاه آماده‌سازی قوسی بر روی نمونه

ها ایجاد شد تا تماس بهینه بین نمونه و دیسک دستگاه آزمون ایجاد شود. دستگاه ویژه این آزمون (شکل ۲) از نوع دور ثابت است و ضریب اصطکاک و میزان سایش را در درجه حرارت‌های مختلف و تحت بار یا گشتاور ثابتی که بر روی لنت ترمز اعمال می‌شود اندازه‌گیری می‌کند. دیسک مورد استفاده در این دستگاه از جنس چدن خاکستری با زمینه پرلیتی و با سختی ۲۹۹-۱۷۹ برینل است. دستگاه دارای وزنه‌ای به وزن $43/55$ کیلوگرم است که فشاری معادل ۷ کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع را با سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه برای شبیه‌سازی عملیات ترمز گیری بر روی نمونه اعمال می‌کند.



شکل ۲. دستگاه آزمون سایش و اصطکاک لنت ترمز

سلسیوس است شروع شده و با استفاده از هوا خنک‌کن، حداکثر و حداقل دما در ترمزگیری‌های این مرحله بین ۸۲ تا ۱۰۴ درجه سلسیوس نگه‌داشته می‌شود.

- مرحله گرمایی اول

در حالی که وسایل گرم‌کن و خنک‌کن خاموش می‌باشند. به کاسه فرصت داده می‌شود تا با چرخش خود، خنک شود. در دمای ۸۲ درجه سلسیوس با اعمال نیرو بر

آزمون سایش و اصطکاک شامل مراحل زیر می‌باشد [۱۸]:

- مرحله مبنای اولیه

۲۰ مرتبه عمل ترمز گیری در ۶۶۷ نیوتن ۴۱۷ دور بر دقیقه اجرا می‌شود و در هر ترمز ۱۰ ثانیه عمل ترمز گیری (اعمال نیرو) انجام و ۲۰ ثانیه قطع می‌گردد. این مرحله در حالی که درجه حرارت کاسه ۸۲ تا ۹۳ درجه

اندازه‌گیری نرخ سایش ویژه

مطابق مراحل اندازه‌گیری وزن و ضخامت اولیه نمونه تعیین شده و ضخامت آن اندازه‌گیری می‌شود. در هر بار ترمز گیری ضریب اصطکاک ثبت می‌شود. پس از انجام آزمون، نمونه‌ها مجدداً با دقت ۰/۰۱ وزن و نرخ سایش ویژه Sw از رابطه ۱ محاسبه گردید:

$$Sw = \frac{m_1 - m_2}{2\pi r \times N \times F_m} \quad (1)$$

که در رابطه (۱): Sw نرخ سایش ویژه (گرم بر نیوتن متر)، m_1 وزن اولیه نمونه (گرم)، m_2 وزن ثانویه نمونه (گرم)، r شعاع دیسک (متر)، N دور بر دقیقه دیسک در طول یک آزمون کامل و F_m میانگین نیروی سایشی (نیوتن) است.

در نهایت، تجزیه و تحلیل‌های آماری بر روی داده‌های به دست آمده از آزمون‌های استاندارد با استفاده از نرم‌افزار spss انجام شد. برای این منظور از آزمون t جفتی برای قضاوت معنی‌دار بودن تأثیر تیمارها بر روی مؤلفه‌های مورد تحقیق استفاده شد.

نتایج و بحث

بررسی رفتار حرارتی

آنالیز پایداری حرارتی (TGA)

روش وزن سنجی حرارتی (TGA) ساده‌ترین روش آنالیز حرارتی است که اساس آن بر اندازه‌گیری وزن نمونه در هنگام گرمایش استوار است. این روش زمانی که ماده در خلال گرمایش، تجزیه شود و یا با محیط گازی اطراف خود واکنش دهد، اطلاعات مفیدی را ارائه خواهد کرد. دستگاه TGA دارای یک ترازوی الکترونیکی حساس است که تغییر وزن نمونه را بر اساس جریان الکتریکی، در یک سیم‌پیچ اندازه‌گیری می‌کند. مواد سلولزی کاربردهای متنوعی دارند مانند صنعت کاغذسازی، صنعت نساجی مواد ساختمانی و ... در تمام این کاربردها رفتار تجزیه حرارتی سلولز برای ارزیابی عملکرد این ماده، نکته کلیدی است. [۱۷] به همین دلیل مطالعات زیادی روی این موضوع انجام شده است. ترموگرام‌های مربوط به آنالیز توزین حرارتی سلولز و نانو سلولز مورد استفاده در تحقیق در شکل ۳ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تجزیه‌ی

نمونه و روشن شدن گرم‌کن، عمل ترمز گیری ممتد شروع می‌شود. این مرحله در شرایط ۶۶۷ نیوتن و ۴۱۷ دور بر دقیقه انجام می‌شود و ترمز گیری به مدت ۱۰ دقیقه و یا تا رسیدن به دمای ۲۸۸ درجه سلسیوس با اولویت وقوع هر یک، ادامه می‌یابد.

- مرحله بازیابی اول

بلافاصله پس از اتمام مرحله حرارتی اول، گرم‌کن خاموش و خنک‌کن روشن می‌شود. در هر یک از دماهای ۲۶۰، ۲۰۴، ۱۴۹ و ۹۳ درجه سلسیوس عمل ترمز گیری به مدت ۱۰ ثانیه حین خنک شدن کاسه و در شرایط ۶۶۷ نیوتن ۴۱۷ دور بر دقیقه انجام می‌گیرد

- مرحله سایش ۱۰۰ مرتبه ترمز گیری در ۶۶۷ نیوتن و ۴۱۷ دور بر دقیقه انجام می‌شود. به طوری که در هر مرتبه ۲۰ ثانیه عمل ترمز گیری انجام و ۱۰ ثانیه قطع می‌شود. این مرحله در دمای کاسه ۱۹۳ تا ۲۰۴ درجه سلسیوس شروع شده و دما طی مرحله با استفاده از خنک‌کننده بین ۱۹۳ تا ۲۱۶ درجه سلسیوس نگه‌داشته می‌شود.

- مرحله گرمایی دوم

بعد از اتمام مرحله سایش درحالی که وسایل گرم‌کن و خنک‌کن خاموش است، به کاسه فرصت داده می‌شود تا با چرخش خود خنک شود. در دمای ۸۲ درجه سلسیوس با اعمال نیرو بر روی نمونه و روشن شدن گرم‌کن عمل ترمز گیری ممتد شروع می‌شود. این مرحله در شرایط ۶۶۷ نیوتن و ۴۱۷ دور بر دقیقه انجام می‌گیرد. ترمز گیری به مدت ۱۰ دقیقه و یا تا رسیدن به دمای ۳۴۳ درجه سلسیوس با اولویت وقوع هر یک ادامه می‌یابد. ثبت نیروی اصطکاک از دمای ۹۳ درجه سلسیوس با فواصل ۲۸ درجه سلسیوس شروع می‌شود. زمان مورد نیاز برای رسیدن به دمای ۳۴۳ درجه سلسیوس ثبت می‌گردد.

- مرحله بازیابی دوم

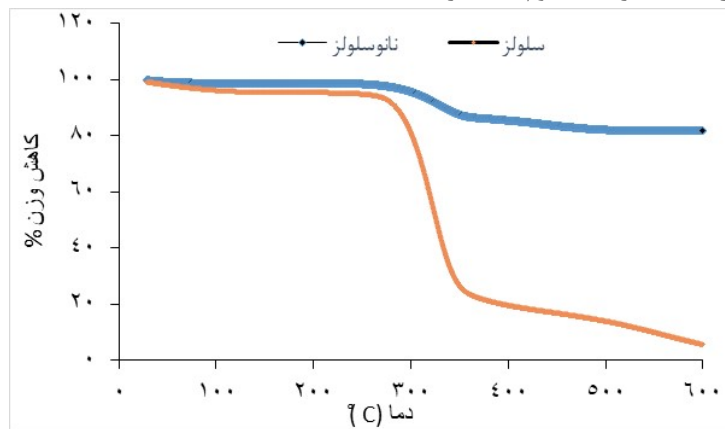
بلافاصله پس از اتمام مرحله گرمایی دوم، گرم‌کن خاموش و خنک‌کن روشن می‌شود. در هر یک از دماهای ۳۱۶، ۲۶۰، ۲۰۴، ۱۴۹ و ۹۳ درجه سلسیوس عمل ترمز گیری به مدت ۱۰ ثانیه حین خنک شدن کاسه و در شرایط ۶۶۷ نیوتن و ۴۱۷ دور بر دقیقه انجام می‌گیرد.

- مرحله مبنای دوم

مرحله مبنای اولیه تکرار می‌شود.

عناصر تشکیل دهنده‌ی چوب رخ می‌دهد هرچقدر مقدار کاهش وزن کمتر باشد یعنی پایداری حرارتی بیشتر بوده است [۱۹]. مرحله‌ی سوم: بالای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد که تجزیه‌ی کامل اتفاق می‌افتد [۲۰ و ۲۱].

حرارتی الیاف در سه فاز، فاز اول از ۳۰ تا ۳۰۰ درجه، فاز دوم از ۳۰۰ تا ۳۵۰ و فاز سوم از ۳۵۰ تا ۶۰۰ درجه رخ داده است. بدین ترتیب در منحنی‌های TGA سه مرحله را تشخیص داده می‌شود: مرحله‌ی اول: که در آن تبخیر آب صورت می‌گیرد [۱۸]. مرحله‌ی دوم: که تخریب



شکل ۳. ترموگرام‌های آنالیز توزین حرارتی سلولز و نانو سلولز

رخ می‌دهد که چنانچه در جدول ۳ مشاهده می‌شود افت ضریب اصطکاک در لنت‌هایی که در آنها از نانوسلولز استفاده شده در مرحله حرارتی اول ۵۰ درصد و در مرحله حرارتی دوم ۲۶ درصد کمتر از لنت‌هایی است که در ترکیب آن از سلولز استفاده شده است.

چنانچه در شکل ۳ مشاهده می‌شود در حدود دمای ۳۰۰ تا ۳۵۰ درجه که افت وزن مشهودی رخ می‌دهد عملکرد نانوسلولز بسیار بهتر از سلولز بوده و افت کمتری را در این مرحله شاهد هستیم. در واقع این همان دمایی است که در آن افت حرارتی ضریب اصطکاک لنت ترمز نیز

جدول ۳. درصد تغییرات ضریب اصطکاک نسبت به میانگین ضریب اصطکاک مرحله مبنای اولیه در آزمون سایش و اصطکاک

مرحله آزمون	تغییرات ضریب اصطکاک نمونه ساخته شده با سلولز		تغییرات ضریب اصطکاک نمونه ساخته شده با نانوسلولز		حدود پذیرش استاندارد	
	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین	حد بالا	حد پایین
مبنای اولیه	۸/۴	-۱۵/۶	۳/۹	-۱۱/۷	۲۰	-۲۰
حرارتی اولیه	۴/۶	-۱۲	۳	-۶	۳۰	-۳۰
بازیابی اول	۳/۷	-۵/۶	۴/۹	-۵/۳	۲۰	-۲۰
سایش	۲/۹	-۲/۴	۶/۱	-۳/۳	۲۰	-۲۰
حرارتی دوم	۸/۷	-۳۴	۷/۳	-۲۵/۱	۳۰	-۳۰
بازیابی دوم	۴/۷	-۹/۱	۴/۸	-۱۳/۱	۲۰	-۲۰
مبنای دوم	۱/۸	-۲/۵	۳	-۳	۲۰	-۲۰

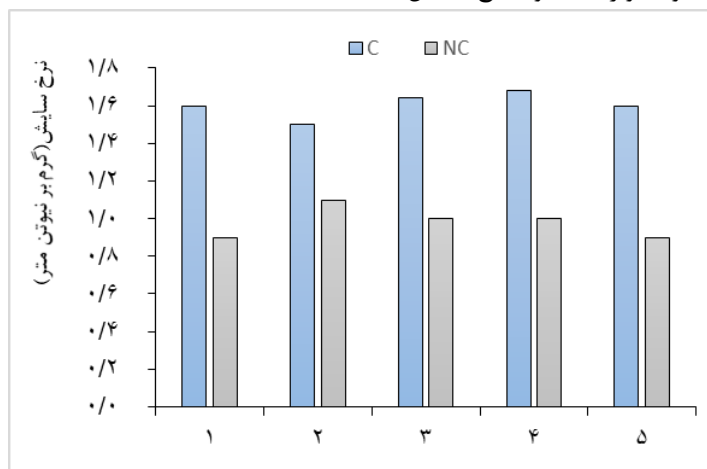
۵۸۶، حداکثر نرخ سایش ویژه لنت ترمز دیسکی در آزمون سایش و ضریب اصطکاک باید ۲/۲ گرم بر نیوتن متر باشد [۱۸]. میانگین نرخ سایش ویژه و تغییر جرم نمونه‌ها پس از آزمون در شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب نشان داده شده

نرخ سایش ویژه

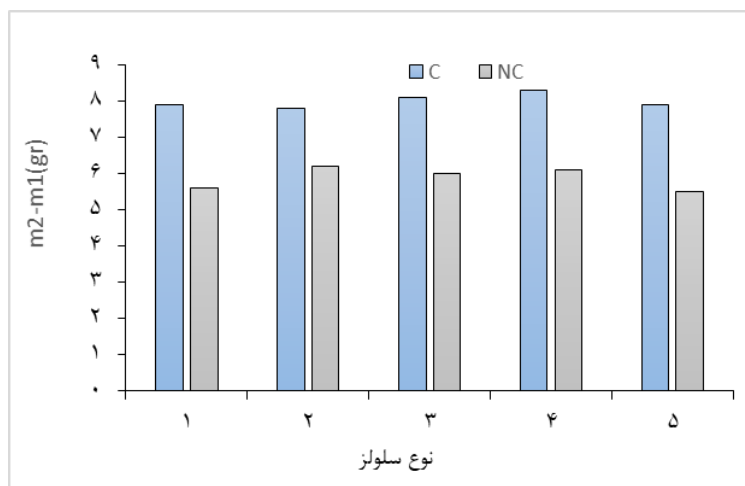
ویژگی مهمی که در آزمون سایش و اصطکاک موردبررسی قرار می‌گیرد، نرخ سایش ویژه (SW) لنت‌های ساخته شده است. طبق استاندارد ملی ایران به شماره

آزمون t داده‌ها (جدول ۳) نیز نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اختلاف میانگین‌ها در سطح ۱ درصد است.

است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات جرم لنت‌های ساخته‌شده با استفاده از سلولز تجاری بیشتر از سایش نمونه‌های ساخته‌شده با نانو سلولز است و نتایج حاصل



شکل ۴. مقایسه نرخ سایش ویژه نمونه‌های لنت ساخته‌شده با سلولز تجاری (C) و نانو سلولز (NC)



شکل ۵. مقایسه تغییرات جرم نمونه‌های لنت ساخته‌شده با سلولز تجاری (C) و نانو سلولز (NC)

جدول ۴. مقایسه میانگین تغییرات جرم نمونه‌های ساخته‌شده با سلولز تجاری و نانو سلولز

ویژگی لنت	انحراف معیار	خطای استاندارد میانگین	t	درجه آزادی	سطح معنی‌داری
نرخ سایش	۰/۳۱۱	۰/۱۳۹۲۸	۱۵/۲۲۱	۴	۰/۰۰۰

معنی‌دار بودن این تفاوت می‌باشد. علت این نتیجه را می‌توان این‌گونه توضیح داد که پایین بودن دمای تجزیه و تخریب الیاف سلولز ۱۴۰ تا ۲۰۰ درجه سلسیوس سبب افزایش نرخ سایش (افت وزنی لنت ترمز) می‌شود البته این‌گونه ذرات ساییده به‌عنوان

چنانچه در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود تغییرات جرم نمونه بعد از آزمون و متعاقباً میزان نرخ سایش نمونه‌های ساخته‌شده با سلولز تجاری بیشتر از لنت‌های ساخته‌شده با نانو سلولز است و مقایسه آماری میانگین‌ها در جدول ۳ نشان‌دهنده

سلولز تجاری بیشتر است و این سبب کاهش حفره‌های ایجاد شده در لنت ترمز در دماهای بالا و در نتیجه کاهش نرخ سایش می‌شود.

نتیجه‌گیری

نتایج آنالیز توزین حرارتی و تغییرات ضریب اصطکاک، نشان داد که مقاومت به حرارت لنت‌های ساخته شده با نانوسلولز بیشتر از لنت‌های ساخته شده با سلولز تجاری است و همچنین نتایج تغییرات جرم حاصل از آزمون سایش اصطکاک نشان‌دهنده این است که کاهش جرم لنت‌های ساخته شده از نانوسلولز ۴۰ درصد کمتر از لنت‌های ساخته شده با سلولز تجاری است و در نتیجه نرخ سایش لنت‌های ساخته شده از نانوسلولز کمتر از لنت‌های ساخته شده با سلولز تجاری است و بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود که استفاده از نانوسلولز سبب بهبود مقاومت حرارتی، کاهش نرخ سایش و افزایش طول عمر مفید لنت ترمز می‌شود و می‌توان از نانوسلولز در تولید لنت ترمز با نرخ سایش کمتر و عمر طولانی‌تر استفاده کرد.

عامل سایشی لایه سوم در عملکرد لنت شناخته می‌شوند و به افزایش ضریب اصطکاک کمک می‌کنند. اما تحقیقات نشان داده که ضریب اصطکاک کامپوزیت‌های حاوی الیاف سلولز بیشتر با افزایش سرعت ترمز گیری روند کاهشی نشان می‌دهد این رفتار را می‌توان ناشی از گرمای حاصل از اصطکاک بالاتر (به دلیل ضریب اصطکاک بالاتر) این ماده دانست که ممکن است منجر به دمای فلاش بالاتر و تخریب حرارتی سلولز شود. دمای تجزیه پایین سلولز منجر به تشکیل حفره‌های حرارتی در کامپوزیت می‌شود که سبب تخریب شدید آن می‌شود. در کل تجزیه الیاف سلولز منجر به شکستن اتصالات β گلوکوزید می‌شود که منجر به تشکیل حفره‌هایی می‌شود که مانند ترک‌هایی عمل می‌کنند که سبب گسترش شدیدتر ترک‌های موجود می‌شود. با این حال ضریب اصطکاک بالا و رفتار بازیابی مناسب در کامپوزیت‌های حاوی سلولز مشاهده می‌شود [۱۵]. با توجه به نتایج حاصل از TGA می‌توان گفت مقاومت حرارتی نانوسلولز از

منابع

- [1] Straffellini, G., and Maines, L., 2013. The relationship between wear of semimetallic friction materials and pearlitic cast iron in dry sliding, *Wear*, 307:75-80.
- [2] Cho, M. H., Kim, S. J., Kim, D., and Jang, H., 2005. Effects of ingredients on tribological characteristics of a brake lining: an experimental case study. *Wear*, 258(11-12), 1682-1687.
- [3] Liu, Y., Ma, Y., Yu, J., Zhuang, J., Wu, S., and Tong, J., 2019. Development and characterization of alkali treated abaca fiber reinforced friction composites. *Composite Interfaces*, 26(1), 67-82.
- [4] Ma, Y., Liu, Y., Wang, L., Tong, J., Zhuang, J., and Jia, H., 2018. Performance assessment of hybrid fibers reinforced friction composites under dry sliding conditions. *Tribology International*, 119, 262-269.
- [5] Wang, Z., Hou, G., Yang, Z., Jiang, Q., Zhang, F., Xie, M., and Yao, Z., 2016. Influence of slag weight fraction on mechanical, thermal, and tribological properties of polymer-based friction materials. *Materials & Design*, 90, 76-83.
- [6] Blau, P., 2001. Composition, functions and testing of friction brake materials and their additives. *Journal of OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY*, 64:1-23.
- [7] Liew, K. W., and Nirmal. U., 2013. Frictional performance evaluation of newly designed brake pad materials. *Journal of Material and design*, 48: 25-33.

- [8] Darmawan, A. S., Siswanto, W. A., and Sujitno, T., 2013. Comparison of commercially pure titanium surface hardness improvement by plasma nitrocarburizing and ion implantation. In *Advanced Materials Research* (Vol. 789, pp. 347-351). Trans Tech Publications Ltd.
- [9] Straffelini, G., and Maines, L., 2013. The relationship between wear of semimetallic friction materials and pearlitic cast iron in dry sliding. *Wear*, 307(1-2), 75-80.
- [10] Hwang, H. J., Jung, S. L., Cho, K. H., Kim, Y. J., and Jang, H., 2010. Tribological performance of brake friction materials containing carbon nanotubes. *Wear*, 268(3-4), 519-525.
- [11] Liu, Y., Wang, L., Liu, D., Ma, Y., Tian, Y., Tong, J., and Saravanakumar, S., 2019. Evaluation of weafiber-reinforced corn stalk fiber reinforced brake friction materials prepared by wet granulation. *Wear*, 432, 102918.
- [12] Wu, Y., Zeng, M., Yu, L., and Fan, L., 2010. Synergistic effect of nano-and micrometer-size ceramic fibers on the tribological and thermal properties of automotive brake lining. *Journal of reinforced plastics and composites*, 29(18), 2732-2743.
- [13] Baklouti, M., Cristol, A. L., and Desplanques Y., 2014. Impact of glass fibers addition on tribological behaviour and braking performances of organic matrix composites for brake lining, *Wear* 330-336.
- [14] Stephen Bernard, S., and Jayakumari, L. S., 2016. Effect of rockwool and steel fiber on the friction performance of brake lining materials. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 21, 656-665.
- [15] Song, W., Park, J., Choi, J., Lee, J. J., and Jang, H., 2021. Effects of reinforcing fibers on airborne particle emissions from brake pads. *Wear*, 484, 203996.
- [16] Shojaei, A., Arjmand, M., and Saffar, A., 2011. Studies on the friction and wear characteristics of rubber-based friction materials containing carbon and cellulose fibers. *Journal of materials science*, 46(6), 1890-1901.
- [17] Santmartí, A., and Lee, K. Y., 2018. Crystallinity and thermal stability of nanocellulose. In *Nanocellulose and sustainability* (pp. 67-86). CRC Press.
- [19] Standard Test Method for Brake pads - test features and methods, ISIRI, 586. 2010.
- [20] Feng, Y., Mu, J., Chen, S.H., Huang, Z.H., and Yu, Z.H., 2012. The influence of urea formaldehyde resins on pyrolysis characteristics and products of wood-based panels, *Bio resources Journal*, 7(4): 4600-4613.
- [21] Aydemir, D., Gunduz, G., Altuntas, E., Ertas, M., Turgut, S. and Alma, H., 2011. Investigating changes in the chemical constituents and dimensional stability of heat-treated Hornbeam and Uludag Fir wood, *Bioresources* 6(2): 1308-1321.
- [22] Ahmadi, M., Moezzi-pour, B., and Moezzi-pour, A., 2019. Thermal stability of wood fibers produced from recycled medium density fiberboards, *Dravna Industrija*, 70(2): 149-155.

Investigation on influence of utilization of nanocellulose prepared from waste paper for improvement of brake pads wear rate

Abstract

In this research, the effect of using nanocellulose prepared from waste paper on the wear rate of friction materials used in car brake pads has been investigated. An important part of the formulation of the friction materials used in the brake pads is the reinforcing fibers, which in fact play the role of supporting the material skeleton. Various fibers are used in brake pads, such as iron fibers, rock fibers, glass fibers, and cellulose fibers which are one of the most cost-effective fibers used in brake pads. Although cellulose fibers reduce the stiffness of the pad, which is a plus, on the other hand, due to increase of wear rate of the brake pads. In this research, the possibility of using nanocellulose to improve the wear rate as fibers in copper-free brake pad formulations has been investigated. In this formula, phenol formaldehyde resin (binder), iron wool and cellulose / nanocellulose (fibers), barite and mullite (filler) and rubber powder, coke, iron oxide and aluminum oxide (friction modifier) were used. Pads made by completely industrial method were subjected to standard tests and the wear rate of pads made with cellulose and nanocellulose was measured to investigate the effect of nanocellulose on the wear rate. The average wear rate (mass reduction) of pads made of cellulose is 8 grams and the average wear rate of pads made of nanocellulose is 5.88 grams. Thus, the results show a 40% improvement in the wear rate of brake pads using nanocellulose instead of cellulose.

Keywords: friction materials, fibers, wear and friction, mass reduction.

M. Ahmadi^{1*}
A. Moezzi²
B. Moezzi³

¹ Associate Professor, Wood and paper science and technology, Faculty of agriculture and natural resources, University of Mohaghegh ardabili, Ardabil, Iran

² Ph.D. graduated, Department of wood and paper science and technology, Faculty of natural resources, University of Tehran. Karaj, Iran

³ Assistant Prof, Wood and paper science and technology, Faculty of agriculture and natural resources, University of Mohaghegh ardabili, Ardabil, Iran

Corresponding author:
m.ahmadi@uma.ac.ir

Received: 2022/02/04

Accepted: 2022/05/08