جلد 7، شماره 1، بهار 99، ص‌ص 791-799

نشریه علمی پژوهشی

علوم و فناوری کامپوزیت

http://jstc.iust.ac.ir

اثر الیاف فولادی بر مکانیزم سایش کامپوزیت لنت ترمز نیمه فلزی

رضا توانگر[1*]، حمید انصاری مقدم[2]، علیرضا خاوندی[3]

1- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- استاد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تبریز، ، صندوق پستی، 51335-1996، tavangar@sut.ac.ir

اطلاعات مقاله:

دریافت: 98/06/06

پذیرش: 99/03/22

کلیدواژگان

کامپوزیت لنت ترمز، کامپوزیت زمینه پلیمری، مواد اصطکاکی، فیلم سایشی، الیاف فولاد

چکیده

اصطکاک و سایش در اغلب کاربردهای مهندسی امری نامطلوب است، اما در کامپوزیت لنت ترمز، اگر چه سایش امری اجتناب ناپذیر است اصطکاک امری لازم است و دستیابی به یک ضریب اصطکاک مناسب و پایدار دغدغه بسیاری از مهندسین این حوزه می‌باشد. در این پژوهش با بررسی سطح سایش لنت ترمز نیمه فلزی، مکانیزم‌های حاکم بر آن مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر الیاف فولاد بر تشکیل صفحات تماسی اولیه و ثانویه به عنوان مناطق بلند به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی گردید. آزمون کنترل کیفی لنت ترمز به منظور آشکار سازی سطوح اصطکاکی و تماسی به وسیله دستگاه اندازه گیری ضریب اصطکاک (Chase Machine) براساس استاندارد SAE J661 انجام گرفت و همچنین مورفولوژی و زبری سطح کامپوزیت اصطکاکی به وسیله رویه نگار اپتیکی سطح بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد که وجود الیاف فلزی به عنوان صفحات تماس اولیه مانند یک سد در مقابل ذرات سایشی عمل کرده و در تشکیل صفحات تماسی ثانویه بسیار موثر بوده و همچنین الیاف فلزی نقش مهمی را در تشکیل فیلم اصطکاکی در کنار مواد روانساز و ساینده ایفا می‌کنند.

Effect of Steel Fibers on Wear Mechanism of Semi-Metallic Brake Pad Composite

Reza Tavangar[1*], Hamid Ansari Moghadam[2], Alireza Khavandi[2]

1-Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2-Faculty of Materials Science and Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

* P.O.B.51335-1996, Tabriz, Iran, tavangar@sut.ac.ir

Keywords

Brake pad composite, polymer matrix composite, friction material, friction film, steel fiber

Abstract

Friction and wear in most engineering applications are undesirable phenomena, however in friction material composites, though wear is inevitable, friction is indispensable and reaching to a suitable and stable friction coefficient has been a major concern of many engineers. In this research, the surface wear of semi-metallic brake pad has been studied to assess the governing mechanism of friction surface. To get that point, the effect of steel fibers on the formation of primary and secondary contact plateaus as high lands through scanning electron microscopy (SEM) were investigated. In order to detect the friction layer of the composite, friction test was evaluated according to SAE J661 standard test procedure by a chase machine. The white light interferometer (WLI) was employed to reveal the surface roughness of the friction composite after braking. Output results showed that the presence of metal fibers as primary contact plateaus act as an anchor against abrasive particles and dust playing an effective role in forming the secondary plateaus. As such, metal fibers play an important role in the formation of friction film along with abrasive and lubricant materials.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Tavangar, R., Ansari Moghadam, H., Khavandi, A. "Effect of Steel Fibers on Wear Mechanism of Semi-Metallic Brake Pad Composite", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 791-799, 2020.

1- مقدمه

لنت ترمز خودروهای سواری و نیمه سنگین، نوعی کامپوزیت زمینه پلیمری است که مواد مورد نیاز برای ساخت آن عموماً به چهار دسته تقویت کننده، اصلاح کننده‌های اصطکاکی شامل مواد ساینده[1] و روانساز[2]، پرکننده-ها و مواد نگهدارنده که همان زمینه پلیمری است تقسم بندی می‌شود [1].

طیف وسیعی از مواد از قبیل مواد پلیمری، معدنی و سرامیکی در ترکیب‌های شیمیائی مختلفی شامل فلزی، نیمه فلزی[3]، کم فلز[4] و سرامیکی در تولید کامپوزیت لنت ترمز برای رسیدن به خواص مطلوب مورد استفاده قرار می‌گیرد [2]. وجود طیف وسیعی از مواد مختلف در این کامپوزیت که گاهی به 20 نوع در یک ترکیب نیز می‌رسد [3]، مطالعه سطح سایش و مکانیزم آن را پیچیده کرده است [4].

مکانیزم اصطکاک و سایش لنت‌های ترمز خودروها به وسیله سه جزء شامل صفحات در تماس دیسک، لنت و فیلم اصطکاکی بین صفحات دیسک و لنت محاسبه و توضیح داده می‌شود [5]. در این میان فیلم اصطکاکی نقش بسیار مهمی را در پایداری ضریب اصطکاک و انتقال نیروی ترمزگیری در لنت‌های ترمز ایفا می‌کند. فیلم اصطکاکی شامل صفحات تماسی هستند که عامل اصلی در ایجاد خواص اصطکاکی بوده که به نام مناطق سخت[5]در بسیاری از منابع مانند استرمیر [6]، ویلکنینگ و همکاران [7] و مولر [8] به آن اشاره شده است. همچنین در برخی منابع دیگر به عنوان صفحات تماسی اولیه، صفحات تماسی ثانویه نوع اول و صفحات تماسی نوع دوم معرفی شده است [9]. در مطالعه‌ای که توسط اریکسون [10] انجام گرفت صفحات تماسی به دو نوع تماسی اولیه و تماسی ثانویه تقسیم بندی شده اند. صفحات تماسی اولیه شامل اجزاء مقاوم به سایش از قبیل الیاف فلزی، مواد سازه‌ای[6] و ذرات ساینده می‌باشد که از سطح کامپوزیت بیرون زده‌اند و مناطق بلند[7] را تشکیل می‌دهند. در مرحله دوم این صفحات سخت بیرون زده از سطح کامپوزیت، ممکن است به مکان‌های برای ایجاد و رشد صفحات تماسی ثانویه تبدیل شوند [11].

ذرات ریز حاصل از سایش[8] در پشت صفحات تماسی اولیه جمع شده و با روی هم انباشته شدن آن‌ها و فشار حاصل از ترمزگیری در هم فشرده شده و منجر به تشکیل صفحات تماسی ثانویه می‌شود [12]. مکانیزم تشکیل و رشد صفحات تماسی ثانویه یک فرآیند تدریجی است زیرا نیازمند فشار، نیروی برشی و حرارت حاصل از اصطکاک می‌باشد [10].

کولوری و همکارانش [13] گزارش کرده‌اند که اندازه، مقدار و ترکیب صفحات تماسی دارای اثر مهمی بر رفتار اصطکاکی لنت ترمز می‌باشد. بر اساس تحقیقات ارائه شده توسط اریکسون [10] نیروی واقعی اصطکاک به وسیله صفحات تماسی منتقل می‌گردد. همچنین مورفولوژی صفحات تماسی می‌تواند یکی از دلایل ایجاد صدا[9] و لرزش تلقی شود [14].

نظر به اهمیت تشکیل صفحات سایشی در رفتار لنت ترمز، این تحقیق در نظر دارد پیرامون خواص سایشی کامپوزیت‌های لنت ترمز و اهمیت آن در ایجاد ضریب اصطکاک پایدار مطالعه و بحث نماید. از این رو در این پژوهش مکانیزم سایش لنت ترمز نیمه-فلزی به وسیله آزمون سایش مورد ارزیابی قرار گرفت و مطالعه مکانیزم تشکیل صفحات اصطکاکی و نقش الیاف فولاد بر ایجاد این صفحات با میکروسکوپ الکترونی روبشی[10] بررسی گردید.

2- مواد و روش آزمایش

2-1- مواد و روش تولید نمونه

مواد اصطکاکی مورد استفاده در این پژوهش از نوع نیمه-فلزی و حاوی 15 جزء که ترکیب کلی آن در جدول 1 آمده است. نمونه‌های لنت ترمز به ترتیب طی مراحل مخلوط کردن، شکل‌دهی اولیه، شکل‌دهی (پرس گرم) و عملیات حرارتی (پخت نهایی) آماده شده‌اند. مرحله مخلوط کردن با استفاده از یک مخلوط‌کن الکتریکی در 3600 دور بر دقیقه به همراه دو کلوخه خردکن[11] (به منظور باز کردن و توزین مناسب الیاف کوتاه مانند آرامید) برای 15 دقیقه مخلوط شده است. سپس مواد اصطکاکی تحت فشار 30 بار برای مدت 10 ثانیه در دمای محیط شکل‌دهی اولیه می‌شود. از آنجائیکه فرآیند بسپارش رزین فنولیک یک واکنش تراکمی بوده، که باعث به وجود آمدن بخار آب شده، باید به نوعی از سیستم خارج شود، درغیر اینصورت منجر ایجاد ترک و عدم یکنواختی خواهد شد [15]. بنابراین در حین فرآیند شکل‌دهی گرم مواد اصطکاکی، فشار وارده بر آن در فاصله زمانی معینی مطابق چرخه شکل‌دهی برداشته می‌شود تا به بخار آب و گازهای به‌وجود آمده درحین فرآیند اجازه خروج داده شوند [16]. چرخه‌ای که در فرآیند شکل‌دهی گرم مورد استفاده قرار می‌گیرد مطابق رابطه 1 می‌باشد.

$$\text{Press cure time} = (w+x).y+z \qquad (1)$$

که در رابطه‌ی (1)، w مدت زمان فشار برحسب ثانیه، x مدت زمان بدون فشار یا مدت زمان برای گاز زدایی، y تعداد دفعات تکرار (w+x) و z مدت زمان فشار نهایی بوده که متفاوت ازw می‌باشد. مدت زمان کل در پرس گرم برابر 165 ثانیه بوده که مطابق رابطه (1) به شکل زیر می‌باشد:

$$\text{Press cure time} = (5+5).5+150$$

جدول1 اجزاء تشکیل دهنده لنت ترمز نیمه فلزی

Table1 Ingredients in the brake pad

اجزاء	درصد وزنی
زمینه کامپوزیت (رزین فنولیک)	12
روانساز (گرافیت، کک، سولفید قلع)	14
پرکننده (باریت، کلسیم هیدروکسید، ورمیکولیت، میکا)	25
تقویت کننده (الیاف فولاد، الیاف آرامید)	30
ساینده (آلومینا، سیلیکات زیرکونیم)	6
بهبود دهندگان اصطکاکی (الیاف مس، ذرات برنج، پتاسیم تیتانات)	12

2-2-خواص اصطکاکی

آشکار سازی سطوح تماسی با آزمون کنترل کیفی لنت ترمز بر اساس استاندارد SAE J661 (ISIRI 582-2) با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری ضریب اصطکاک (Chase Machine) انجام شد. شماتیک دستگاه و موقعیت

[1] Abrasive
[2] Lubricant
[3] Semi-metallic or semi-met
[4] Low metallic or low steel
[5] Hard patches
[6] Structural component
[7] High lands
[8] Wear debris
[9] Noise
[10] Scanning Electron Microscope (SEM)
[11] Chopper

قرارگیری نمونه بر کاسه ترمز در شکل 1 نشان داده شده است. کاسه ترمز دارای آنالیز شیمیایی مشابه دیسک ترمز (چدن خاکستری زمینه پرلیتی) می‌باشد.

آزمون سایش با نمونه‌هایی با ابعاد 6×25.4×25.4 میلیمتر انجام شده است. برای ثبت دما از ترموکوپل نوع K استفاده شد و درجریان آزمون، داده ها شامل دما و ضریب اصطکاک در زمان‌های مختلف جمع آوری شده‌اند. روش کار مطابق استاندارد شامل مراحل آماده سازی[1]، پایه[2]، حرارتی[3]، بازیابی[4] و سایش[5] می‌باشد (جدول 2).

اعداد نشان داده شده در شکل 1 به ترتیب عبارت اند از: 1) نیروسنج، 2) ثبت کننده، 3) مجموعه فشار سنج، تنظیم کننده فشار هوا، 4) شیر برقی هوا، 5) جک پنوماتیک، 6) زمان سنج سیکلی، 7) گرمکن کاسه ترمز.

شروع آزمون با مرحله آماده سازی با انجام 20 مرحله ترمزگیری به منظور تشکیل صفحات اصطکاکی در بازه دمایی 43 تا 93 درجه سانتیگراد در هر مرحله انجام می‌گیرد. در ادامه با مراحل پایه اول با انجام 20 مرحله ترمزگیری به مدت 10 ثانیه و بین هر مرحله ترمزگیری 20 ثانیه بدون ترمز اعمال می‌گردد. سپس حرارتی اول که در سرعت ثابت 411 دور بر دقیقه (rpm) و نیروی 540 نیوتنی که در فواصل دمایی 28 درجه سانتیگراد به صورت پیوسته نیروی اصطکاکی تا زمانی که دمای کاسه ترمز به 289 درجه سانتیگراد برسد، ثبت گردید. سپس دمای کاسه ترمز تا 93 درجه سانتیگراد خنک شده و نیروی اصطکاکی به صورت مداوم در فواصل دمایی 56 درجه سانتیگراد ثبت شده است. در ادامه، مراحل حرارتی دوم، بازیابی دوم و پایه دوم مطابق استاندارد انجام گرفت. مرحله حرارتی دوم و بازیابی دوم مشابه مراحل مراحل اولیه ولی با افزایش دما تا 345 درجه سانتیگراد صورت پذیرفته است.

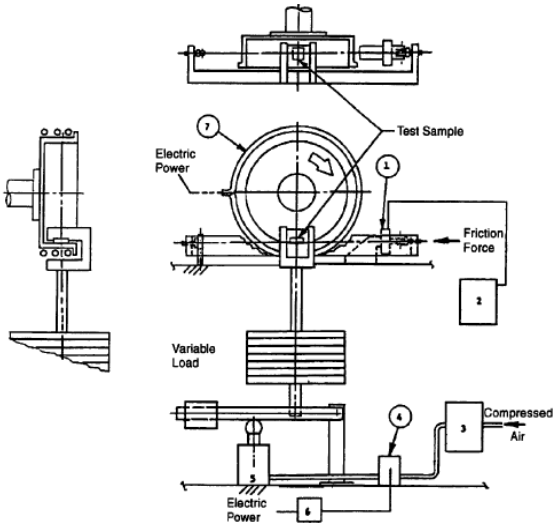


Fig.1 Schematic of friction test device

شکل 1 شماتیک دستگاه تست سایش

[1] Burnish
[2] Baseline
[3] Fade
[4] Recovery
[5] Wear

Table 2 Test schedule

جدول 2 مراحل انجام تست

مراحل	دما (°C)		تعداد ترمزگیری
	شروع	پایان	
آماده سازی	43	93	20
پایه اول	93	104	20
حرارتی اول	93	289	1
بازیابی اول	261	93	1
سایش	93	204	100
حرارتی دوم	93	345	1
بازیابی دوم	317	93	1
پایه دوم	93	93	20

2-3- مطالعه سطح کامپوزیت

شرایط اصطکاکی حاکم بر کامپوزیت لنت ترمز باعث ایجاد یک سطح زبر می‌گردد. از این رو به منظور بررسی زبری سطح و همچنین بررسی فیلم اصطکاکی و صفحات تماسی و موقعیت آن‌ها با مناطق با ارتفاع پایین‌تر[6] (دارای ارتفاع کمتری نسبت به نواحی سایش یافته هستند) از دستگاه رویه نگار اپتیکی یا تداخل سنج نور سفید[7] مدل MOZ-ZA ساخت شرکت فناوری کهربا استفاده گردید. به منظور تصویر برداری از سطح سایش یافته کامپوزیت، مقطع عرضی از نمونه و صفحات تماسی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی تجهیز شده با دستگاه طیف سنج پراش اشعه ایکس[8] استفاده شد.

3- نتایج و بحث

سطح اولیه مواد اصطکاکی انتخاب شده برای این مطالعه در شکل 2 نشان داده شده است. عناصر شناسایی شده در تصویر با استفاده دستگاه SEM تجهیز شده با سیستم آنالیز عنصری EDS شامل: Fe، Cu، O، Si، Mg، Al، Sn، S، Al، Ca می‌باشند. عناصر تشخیص داده شده در تصویر هریک نقشی مهم و کلیدی در ترکیب کامپوزیت نیمه فلزی و ایجاد خواص مورد انتظار ایفا می‌کنند. به عنوان مثال حضور Fe نشان دهنده الیاف فولاد بوده که نقش تقویت کننده را در ترکیب دارد و عاملی مهم در تشکیل صفحات تماسی اولیه و ثانویه می‌باشد [10]. عناصر Sn و S به معنی حضور SnS_2 در ترکیب است که نقش روانساز دمای بالا را در کامپوزیت ایفا کرده و باعث پایداری ضریب اصطکاک در دمای بالا می‌گردد [17]. همچنین وجود عنصر C در آنالیز انجام شده می‌تواند نماینده موادی از قبیل گرافیت ورقه‌ای[9] و کک نفتی باشد. هر یک از این دو ماده کربنی به دلیل داشتن خواص منحصر به فرد باعث بهبود خواص کامپوزیت و در نتیجه کارایی آن می‌گردند. گرافیت ورقه‌ای یک روانساز دمای پایین محسوب می‌شود، اما تولید کنندگان لنت ترمز جهت کاهش هزینه از موادی که دارای درصد کربن بالایی باشند و نقش یک روانساز را ایفا کنند مانند کک نفتی نیز در کنار گرافیت ورقه‌ای استفاده می‌کنند [18]. روانسازهای کربنی مانند گرافیت و کک باعث ایجاد یک لایه انتقالی بر روی سطح سایش شده و به لغزش بین لایه‌های مولکولی کمک

[6] Low lands
[7] White light interferometer (WLI)
[8] Energy dispersive X-Ray spectroscopy (EDS)
[9] Flake graphite

می‌کند، همچنین به منظور جلوگیری از چسبندگی بیش از حد جفت اصطکاکی[1] و ایجاد ضریب اصطکاک پایدار به کامپوزیت اضافه می‌شوند [19].

شکل 3 تصویر الکترون برگشتی میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح سایش یافته کامپوزیت اصطکاکی نیمه فلزی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در برخی نواحی اثر سایش با توجه به شیارهای[2] در امتداد سایش، نسبت به مناطق با ارتفاع پایین‌تر بیشتر است. از آنجایی که مناطق با ارتفاع پایین‌تر از ارتفاع کمتری نسبت به نواحی سایش یافته، که معرف مناطق بلند یا همان صفحات تماسی است، برخوردارند در فرآیند اصطکاک و سایش به خوبی صفحات تماسی عمل نکرده و درنتیجه تاثیر کمی بر ضریب اصطکاک و پایداری آن دارند [9].

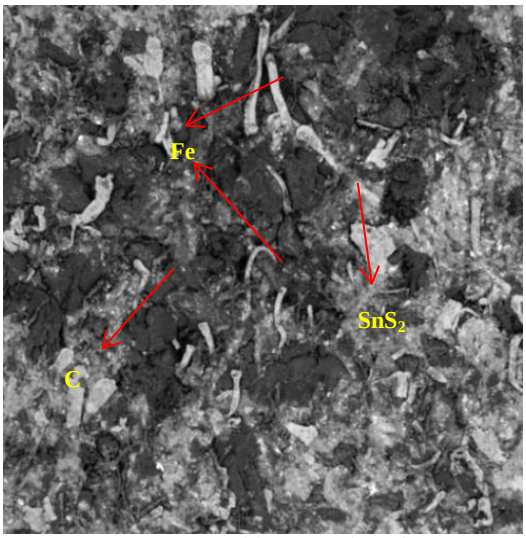


Fig.2 Primary microstructure of friction surface of brake pad

شکل 2 ریزساختار اولیه سطح اصطکاکی لنت ترمز

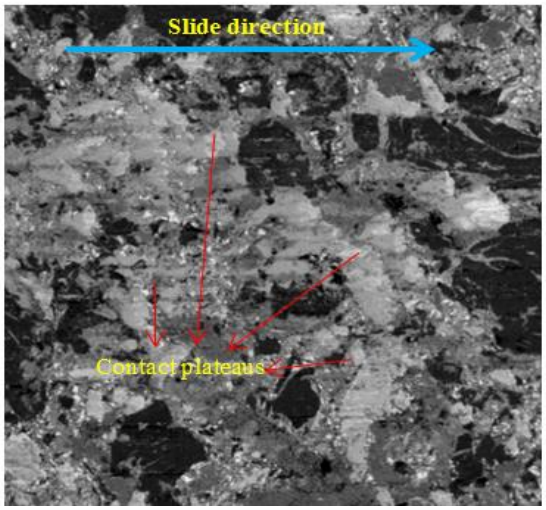


Fig.3 Wear surface of semi-met friction composite. Contact plateaus show with red arrows

شکل 3 سطح سایش کامپوزیت اصطکاکی نیمه فلزی. صفحات تماسی با پیکان قرمز نشان داده شده‌اند.

شکل 4 تصویر سه بعدی تهیه شده با تداخل سنج نور سفید را از سطح کامپوزیت سایش یافته نشان می‌دهد. به خوبی می‌توان مناطق بلند یا همان صفحات تماسی را مشاهده کرد که نسبت به مناطق با ارتفاع پایینتر از ارتفاع بیشتری برخوردارند. سایش سطح کامپوزیت در مقابل دیسک، باعث ایجاد زبری‌های متفاوت در جهات مختلف می گردد که در شکل 5a مقدار زبری سطح سایش کامپوزیت در امتداد خط قرمز نشان داده شده است. با توجه به شکل 5 می‌توان مشاهده کرد که صفحات تماسی از ارتفاع بیشتری نسبت به مناطق با ارتفاع پایین‌تر برخوردارند و از این رو نقش مهمی را در انتقال نیروی اصطکاکی و مکانیزم سایش ایفا می‌کنند [10].

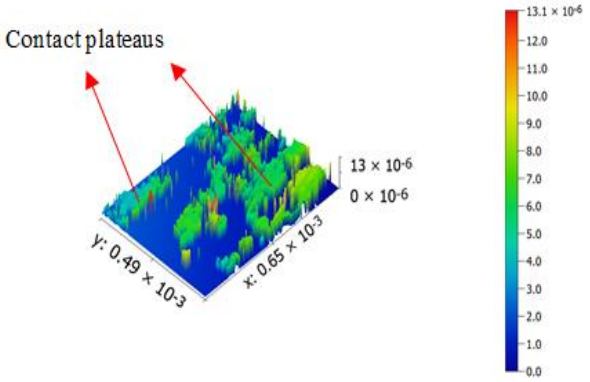


Fig.4 3D-Micrograph of WLI on friction surface.

شکل 4 تصویر 3 بعدی رویه نگار اپتیکی از سطح سایش

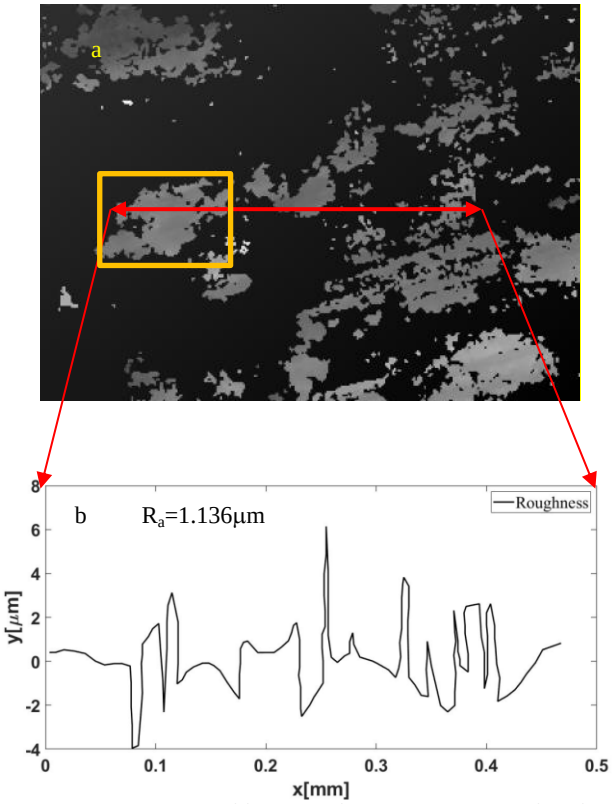


Fig.5 a) WLI picture of friction surface. b) Roughness profile of friction surface which is shown in line in Fig. 4a

شکل 5 a) تصویر تداخل سنج نور سفید سطح سایش. b) پروفیل زبری سطح سایش نشان داده شده با خط در شکل 5a

[1] Friction couple
[2] Grooves

با مشاهده شکل 5 می‌توان دریافت که بلندترین ساختار مربوط به صفحات تماسی بوده که به وسیله اجزاء مقاوم به سایش مانند الیاف فولادی و ذرات ساینده بیرون آمده از سطح کامپوزیت، تشکیل شده‌اند. بیشترین مقدار زبری سطح (R_t) برابر با 7.94 میکرون و متوسط بیشترین مقدار زبری سطح (R_{tm}) برابر 4.63 میکرون می‌باشد. بدین معنی که اکثر نواحی بلند سطح لنت ترمز نیمه فلزی شامل قله و دره‌ها دارای مقداری بین 0 تا 10 میکرون بوده که بلندترین نقاط مربوط به صفحات تماسی می‌باشند [9].

شکل 6a ناحیه بزرگ و جدا شده از تصویر WLI که شکل 5a با مستطیل مشخص شده است را نشان می‌دهد. ناحیه جدا شده، معرف صفحه اصطکاکی ایجاد شده بر روی سطح کامپوزیت می‌باشد.

مقدار میانگین ارتفاعات زبری سطح (R_a=1.49 µm) صفحه اصطکاکی بیشتر از میانگین ارتفاعات زبری سطح (R_a=1.134 µm)، سطح کلی کامپوزیت لنت ترمز است. این امر نشان می‌دهد که صفحات اصطکاکی دارای ارتفاع بیشتری نسبت به دیگر مناطق بوده و نقش مهمی را در تماس با دیسک و ایجاد یک ضریب اصطکاک پایدار ایفا می‌کند.

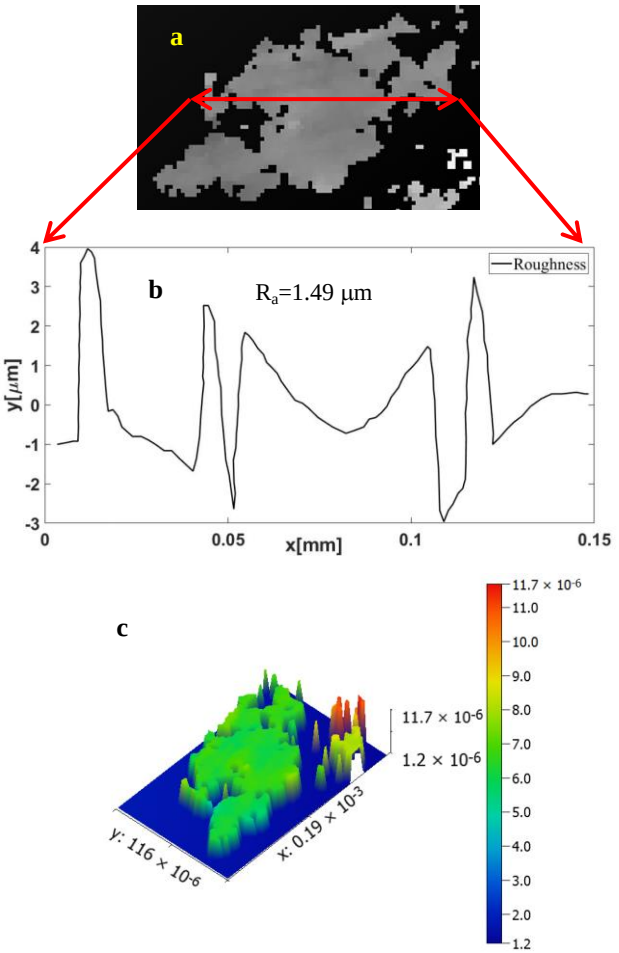


Fig.6 a) Zoomed in picture of contact plateau b) Roughness profile of contact plateau in the direction of line in Fig. 5a c) WLI 3D picture of zoomed in contact plateau

شکل 6 a) تصویر بزرگنمایی شده صفحه تماسی، b) پروفیل زبری صفحه تماسی در جهت خط نشان داده شده در شکل 5a، c) تصویر سه بعدی صفحه تماسی بزرگنمایی شده

شکل 7 مرحله آماده سازی سطح نمونه را در آزمون اصطکاکی، مطابق استاندارد SAE J661 نشان می‌دهد (7 مرحله انتخاب شده از بین 20 مرحله). همانگونه که مشاهده می‌شود با پیشرفت مراحل آزمون، ضریب اصطکاک به مقدار بیشینه خود می‌رسد. از مرحله 1 تا مرحله 7 افزایش ضریب اصطکاک تدریجی بوده، اما در اواسط مرحله 8 ضریب اصطکاک به صورت ناگهانی به بالای 0.5 افزایش می‌یابد. از این مرحله به بعد ضریب اصطکاک تقریباً رفتاری یکنواخت را داراست. در مراحل اولیه به دلیل عدم شکل گیری کامل صفحات اصطکاکی، ضریب اصطکاک مقدار کمینه‌ای (کمتر از 0.4) دارد. اما با پیشرفت آزمون صفحات اصطکاکی به صورت تدرجی ایجاد شده که منجر به افزایش ضریب اصطکاک می‌گردد.

شکل 8 تغییرات ضریب اصطکاک را نسبت به زمان نشان می‌دهد. در ابتدا تماس نمونه با کاسه ترمز، ضریب اصطکاک از مقدار 0.1 در کسری از ثانیه به مقدار بیشینه خود (0.5) می‌رسد. در این مدت زمان کوتاه صفحات اصطکاکی دوباره بازیابی شده و باعث افزایش ضریب اصطکاک و تماس بیشتر نمونه با کاسه ترمز می‌گردد. فرآیند تشکیل صفحات ثانویه تدریجی بوده و با وجود شرایط مناسب در زمانی کمتر از یک ثانیه تشکیل می‌گردد.

شکل 9 مورفولوژی و ترکیبات شیمیایی در لایه اصطکاکی شامل صفحه تماسی اولیه و صفحه تماسی ثانویه را نشان می‌دهد. با توجه به آنالیز صفحات تماسی نشان داده شده در شکل 9 به وسیله EDS، صفحه تماسی اولیه شامل لیف فولاد بوده که از سطح کامپوزیت بیرون آمده و در مقابل ذرات حاصل از سایش مانند سد عمل می‌کند و در حضور حرارت ناشی از اصطکاک و نیروی برشی، باعث فشرده شدن ذرات در پشت صفحه تماسی اولیه شده و در نتیجه صفحات تماسی ثانویه را تشکیل می‌دهند [10]. حضور نقره در ترکیب شیمیائی به علت اعمال پوشش نقره جهت تصویربرداری است.

آنالیز EDS صفحات تماسی ثانویه (شکل 9) دارای مقادیر قابل توجه آهن و اکسیژن می‌باشد زیرا صفحات تماسی ثانویه غالباً شامل اکسید آهن (FeO یا Fe_3O_4) است [19]. زمانی که صفحات تماسی ثانویه به وجود آمده و رشد می‌کنند، ترکیب شیمیایی مواد بر اثر سایش و همچنین واکنش-های شمیایی که در حضور حرارت حاصل از اصطکاک انجام می‌گیرد دستخوش تغییر می‌شود. مقدار زیادی از نیروی ترمزگیری به وسیله صفحات تماسی ثانویه منتقل شده و در نتیجه می‌توان گفت تعداد و اندازه صفحات تماسی نقش بسزایی در پایداری ضریب اصطکاک دارند [10].

فرآیند تشکیل صفحات ثانویه تدریجی بوده و تحت شرایط مناسب در زمانی کمتر از یک ثانیه تشکیل می‌گردد (شکل 8). مناطق با ارتفاع پایین‌تر که صفحات اصطکاکی را محاصره کرده‌اند شامل اجزاء با مقاومت سایشی کمتر لنت ترمز از قبیل رزین پلیمری، پرکننده‌ها و اصلاح کننده‌های اصطکاکی می‌باشند [20] که در شکل 9 آنالیز این نقاط نشان داده شده‌اند. همانگونه که از آنالیز عنصری صفحه ثانویه مشاهده می‌شود، این صفحه شامل عناصر اصلی Fe، Mg، Zr، Cu، O، C و Zn بوده که همگی دلالت بر حضور ترکیبات مواد ساینده و روانساز صفحه تماسی ثانویه دارد. وجود این مواد به دلیل پایدار سازی ضریب اصطکاک در شرایط کاری متفاوت، نقش بسیار مهمی را در مکانیزم سایش صفحات تماسی ثانویه ایفا می‌کنند [9].

مس در مقایسه با فولاد دارای سختی کمتری است و در مقابل سایش از استحکام کمتری برخوردار می‌باشد. از این رو الیاف مس در ترکیب کامپوزیت مواد اصطکاکی بیش از آن که عامل ایجاد صفحات اصطکاکی باشد، بهبود

دهنده در ایجاد صفحات اصطکاکی و باعث کاهش نوسانات ضریب اصطکاک می‌گردد. شکل 10 سطح سایشی کامپوزیت و نقشه EDS مربوط به توزیع عناصر مس و آهن را نشان می‌دهد. الیاف مس همانند الیاف فولاد باعث افزایش استحکام لنت می‌شوند. همانگونه که در شکل 10b مشاهده می‌گردد عناصر آهن به دلیل مقدار وزنی بیشتر مورد استفاده در ترکیب لنت نقش بیشتری را در ایجاد و تشکیل صفحات اصطکاکی ایفا می‌کند. از این رو الیاف مس برای بهبود دیگر خواص از قبیل افزایش هدایت حرارتی به منظور پراکنده کردن هرچه بهتر حرارت ایجاد شده در حین فرآیند ترمزگیری و همچنین یک روانساز دما بالا عمل کرده و در نتیجه باعث ایجاد لایه اصطکاکی پایدار در دمای بالا می‌گردد [21].

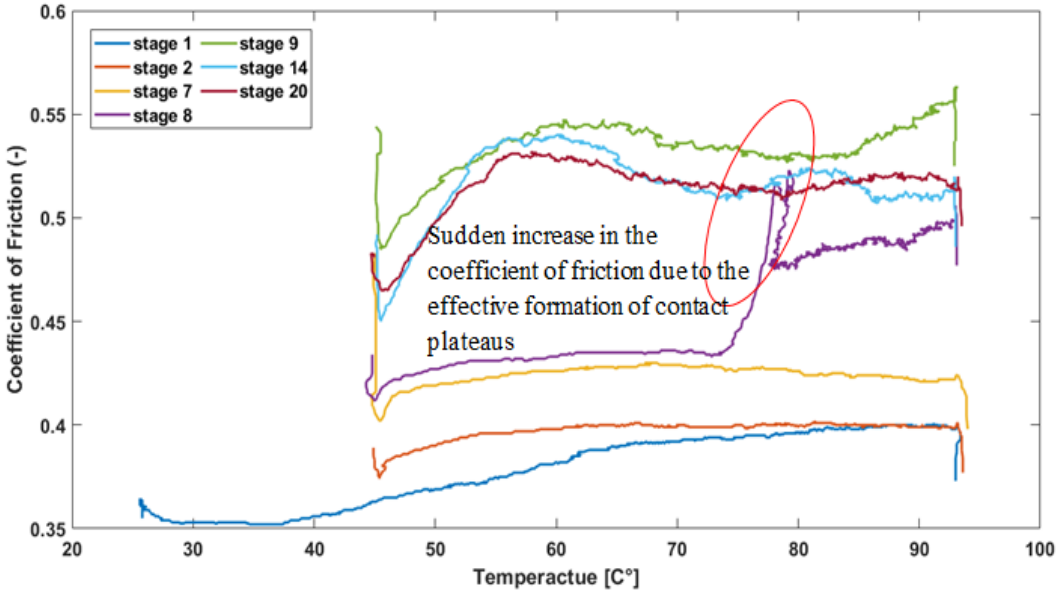


Fig. 7 variation of coefficient of friction in the burnishing process

شکل 7 تغییرات ضریب اصطکاک در مراحل فرآیند آماده سازی سطح نمونه

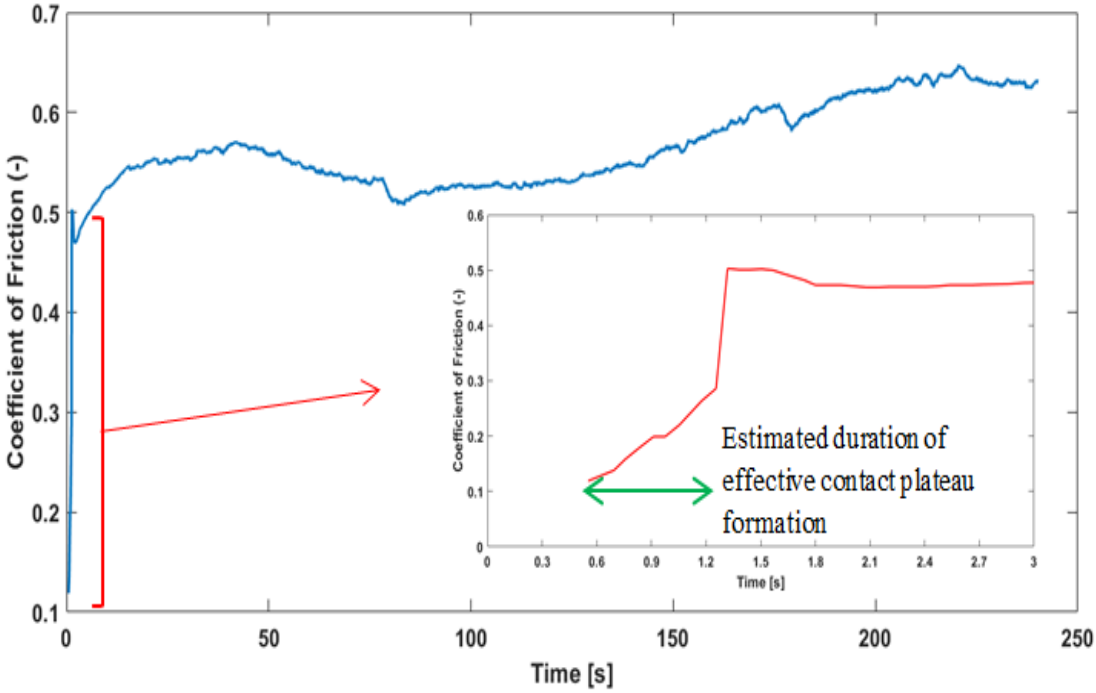


Fig. 8 build-up of contact plateaus as function of time

شکل 8 تشکیل صفحات تماسی به عنوان تابعی از زمان

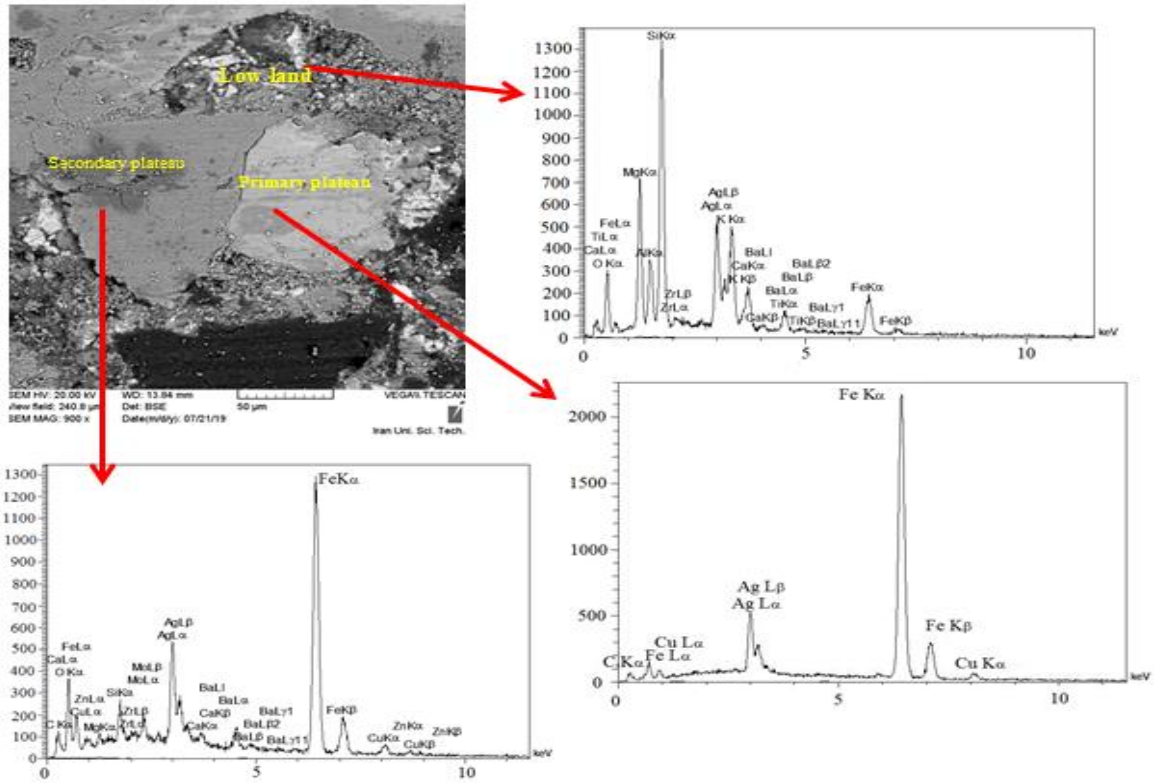


Fig. 9 SEM micrograph and chemecial compositions of primary contact plateau, secondray contact plateau and low land.

شکل 9 تصویر میکروسکوپی روبشی و آنالیز شیمیایی صفحات تماسی اولیه، صفحات تماسی ثانویه و مناطق با ارتفاع پایین‌تر

صفحات تماسی ثانویه بدون پشتیبانی صفحات اولیه نمی‌توانند به وجود آیند. در پژوهشی که توسط اریکسون و همکاران [20] انجام گرفت، نشان داده شد که صفحات ثانویه به محض از میان رفتن پشتیبان (صفحات تماسی اولیه) از بین می‌روند. همچنین به وسیله برخورد مستقیم سطح دیسک می‌تواند بلافاصله حتی با وجود حضور صفحه تماسی اولیه از بین برود. صفحات تماسی ثانویه نیازمند شرایط نسبتاً پایدار و نیروی کافی برای تشکیل می‌باشند. در هر زمانی که فشار ترمز از روی لنت برداشته می‌شود نواحی فشرده شده مانند لایه نازک، ترد و شکننده از سطح کامپوزیت جدا می‌شود. شکل 11 تصویر SEM در زاویه 45 درجه از سطح نمونه تهیه شده است. در صفحات تماسی ثانویه به دلیل ماهیت ترد و شکننده بودن به راحتی ترک ایجاد می‌گردد. همچنین به دلیل عدم چسپندگی مناسب با مواد زمینه زیرین، با برداشته شدن فشار ترمزگیری مطابق شکل 11 از مواد زمینه جدا می‌شوند.

شکل 12 تصویر مقطع عرضی از لنت ترمز نیمه فلزی را نشان می‌دهد که لیف فولاد بیرون زده از سطح کامپوزیت را می‌توان در آن مشاهده کرد. همانگونه که انتظار می‌رود الیاف فلزی و ذرات سخت ساینده به عنوان یک سد یا پشتیبان برای صفحات تماسی ثانویه عمل کرده و به تشکیل آن‌ها کمک می‌کند (شکل 12b).

وجود الیاف فولاد در ترکیب کامپوزیت لنت ترمز نقش مهم را در ایجاد صفحات تماسی ثانویه ایفا می‌کند به نحوی که در تحقیقی که توسط لی و همکاران [23] در ارتباط با تاثیر الیاف تقویت کننده بر تشکیل صفحات تماسی ثانویه انجام گرفت، نشان داد ترکیب حاوی الیاف فولاد دارای صفحات اصطکاکی بزرگتری نسبت به دیگر ترکیبات بوده است.

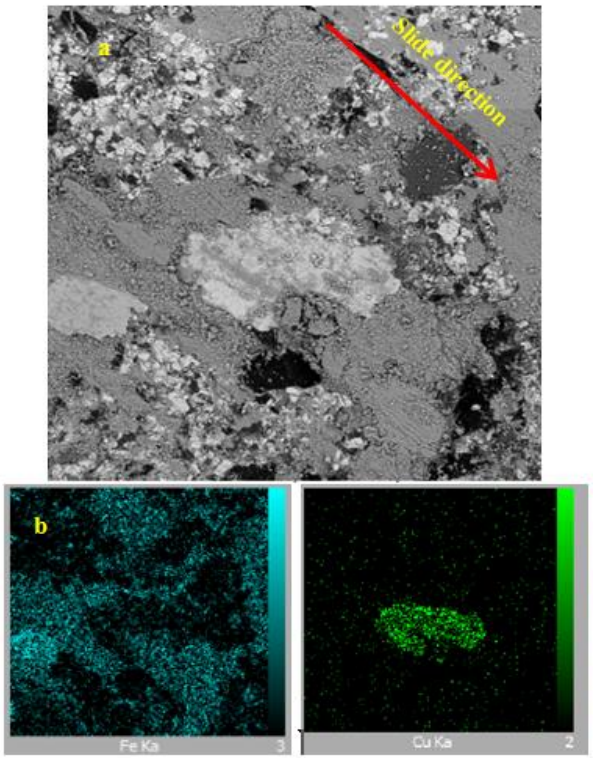


Fig. 10 a) SEM photo of worn surface in the presence of Cu fiber b) Fe and Cu EDS maps of worn surface

شکل 10 a) تصویر SEM سطح سایش یافته کامپوزیت در حضور الیاف مس b) نقشه آنالیز عنصری سطح سایش یافته کامپوزیت شامل دو عنصر آهن و مس

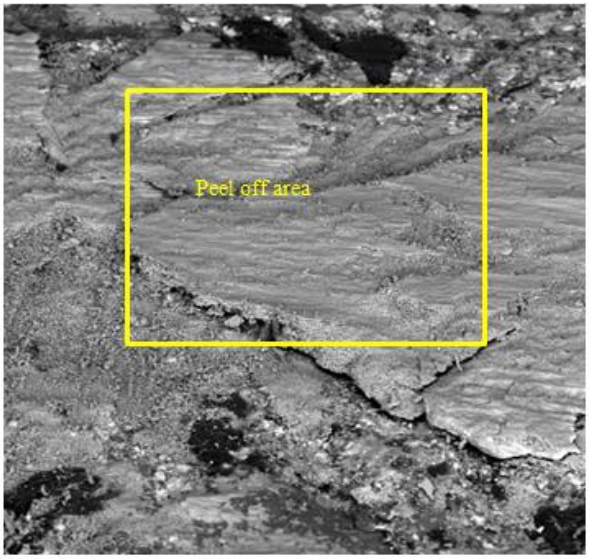
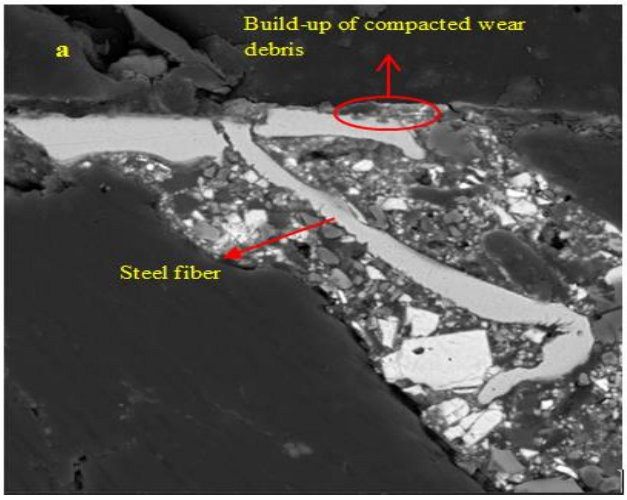


Fig. 11 SEM photo of a peeled off secondary plateau in flake form

شکل 11 تصویر SEM صفحه تماسی کنده شده به شکل لایه



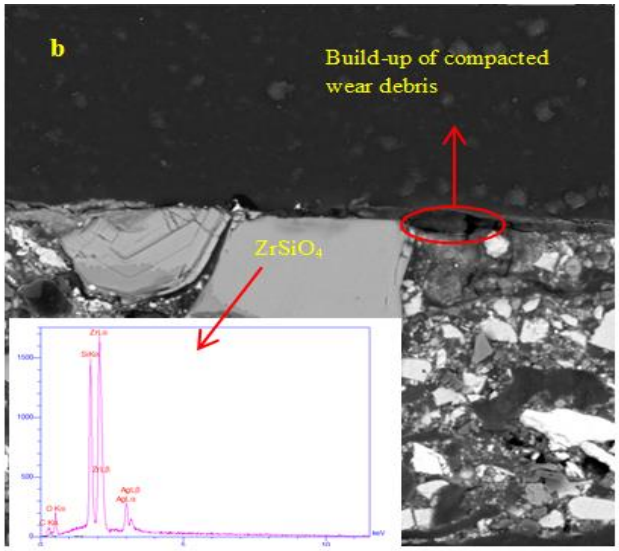


Fig. 12 cross section of semi-metallic pad

شکل 12 مقطع عرضی لنت ترمز نیمه فلزی

عدم به کارگیری الیاف فولاد در کامپوزیت مواد اصطکاکی باعث کاهش مقاومت به میرایی[1] (کاهش ناگهانی ضریب اصطکاک با افزایش دما) می‌گردد. از طرفی به دلیل نبود الیاف سخت که بتواند به عنوان یک سد در مقابل ذرات حاصل از سایش عمل کند، تشکیل و تعداد صفحات اصطکاکی تشکیل شده، به ذرات سخت (مواد ساینده) بستگی خواهد داشت (شکل 12b) که در مقایسه با کامپوزیت حاوی الیاف فولاد دارای عملکرد ضعیف‌تری هستند [24].

4- نتیجه گیری

مکانیزم سایش مواد اصطکاکی لنت‌های ترمز به دلیل وجود مواد مختلف، فرآیندی پیچیده است. در این پژوهش تمرکز بر روی مکانیزم غالب سایش لنت‌های ترمز نیمه فلزی بوده است. نتایج حاصل از پژوهش از قرار زیر است:

- نقش الیاف فولاد در ایجاد یک فیلم اصطکاکی پایدار در لنت ترمز نیمه فلزی بسیار حائز اهمیت می‌باشد.
- لایه اصطکاکی به دو قسمت صفحه تماسی اولیه و صفحه تماسی ثانویه تقسیم می‌گردد. صفحات تماسی اولیه حاصل به وسیله مواد سخت و الیاف فولادی بیرون زده از سطح کامپوزیت تشکیل شده که دارای ارتفاع بیشتری نسبت به دیگر مناطق هستند. صفحات تماسی ثانویه به وسیله جمع شدن، انباشته شدن و فشرده شدن ذرات حاصل از سایش مواد دیگر از قبیل ساینده‌ها و روانسازها در پشت صفحات تماسی اولیه به وجود آمده و نقش مهمی را در انتقال نیروی اصطکاکی ایفا می‌کنند.
- صفحات تماسی اولین نواحی شرکت کننده در فرآیند اصطکاک محسوب می‌شوند.
- صفحات تماسی اولیه به دلیل اینکه عموماً از مواد سخت و مقاوم به سایش تشکیل شده‌اند، در مقابل سایش از مقاومت بیشتری برخوردار بوده و طول عمر طولانی تری نسبت به دیگر مواد دارند. از این رو ارتفاع آن‌ها نسبت به دیگر مناطق سطح لنت بیشتر است.

5- مراجع

[1] kharazi, U., Karami, A, Khavandi, A., "The Effect of Abrasive Particle Size on the Wear Behavior of Non Asbestos Brake Pads Composite," In Persian, Journal of Science Engineering, vol. 17, No. 3, pp. 53–60, 2006.
[2] Moezzipour, A., Layeghi, M., Ebrahimi, G., "Investigation of Possibility of Using Lignocellulosic Materials and Nano Alominum Oxide in Manufacture of Brake Lining," In Persian ,Journal of Forest and Wood Products., Vol. 67, No. 2, pp. 283–294, 2014.
[3] Gupta, B. and Modi, A., "Review of Automotive brake friction materials," International Journal of Advance Engineering and Research, vol. 2, pp. 218–223, 2015.
[4] Rhee, S., K., Jacko, M., G., and Tsang, P., H., S., "The Role of Friction Film in Friction, Wear, and Noise of Automotive Brakes," Wear, vol. 146, pp. 89–97, 1991.
[5] Ostermeyer, G., P. and Wilkening, L., "Experimental Investigations of the Topography Dynamics in Brake Pads," SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst., vol. 6, pp. 1398–1407, 2013.
[6] Ostermeyer, G., P., "On the dynamics of the friction coefficient," Wear, Vol. 254, pp. 852–858, 2003.
[7] Wilkening, L., Paul, H., G., and Ostermeyer, G., P., "Investigations

[1] Fade

on Tribological Memory Effects in Friction Materials," SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst., vol. 7, pp. 1264–1273, 2014.
[8] Ostermeyer, G., P., and Müller, M., "Dynamic interaction of friction and surface topography in brake systems," Tribol. Int., vol. 39, pp. 370–380, 2006.
[9] Neis, P., D., Ferreira, N., F., Fekete. G, Matozo. L. T, and Masotti. D, "Towards a better understanding of the structures existing on the surface of brake pads," Tribol. Int., vol. 105, 2016..
[10] Eriksson, M., and Jacobson, S., "Tribological surfaces of organic brake pads," Tribol. Int., vol. 33, pp. 817–827, 2000.
[11] Eriksson, M., Bergman, F., and Jacobson, S., "On the nature of tribological contact in automotive brakes," Wear, vol. 252, pp. 26–36, 2002
[12] Eriksson, M., "Friction and Contact Phenomena of Disc Brakes Relates to Squeal," Krieger Publishing Company, Florida, pp. 121-132, 2019
[13] Kolluri, D., Ghosh, A. K., and Bijwe, J., "Analysis of Load-Speed Sensitivity of Friction Composites Based on Various Synthetic Graphites," Wear, vol. 266, pp. 266–274, 2009.
[14] Masotti, D., Neis, P., Ferreira, N. F., Gomes, K., Poletto, J., and Matozo, L., "Experimental Evaluation of Surface Morphology Characteristics During Stick-Slip Process at Low Speed Sliding Test," SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst., vol. 7, pp. 1266–1274, 2015.
[15] Day, A., "Braking of Road Vehicles," elsevier., pp. 1–472, 2014.
[16]Nasr, A. and Esnaashary, M. H., "A Case Study of Three Different Brake Pads Used in Iranian Rail Systems," J. Environ. Friendly Mater., Vol. 3, No. 1, 1398.
[17] Österle, W. and Dmitriev, A., "The Role of Solid Lubricants for Brake Friction Materials," Lubricants, Vol. 4, pp. 5, 2016.
[18] Cox, R., Engineered Tribological Composites: The art of friction material development. ISBN 978-0-7680-3485-1 http://books.sae.org/r-401/. 2011.
[19] Eriksson, M., Lundqvist, A., and Jacobson, S., "A study of the influence of humidity on the friction and squeal generation of automotive brake pads," Proc. Inst. Mech. Eng. Part D-journal Automob. Eng, Vol. 215, pp. 329–342, 2001
[20] Ertan, R. and Yavuz, N., "The effects of graphite, coke and ZnS on the tribological and surface characteristics of automotive brake friction materials," Ind. Lubr. Tribol., vol. 63, pp. 245–253, 2011.
[21] Eriksson, M., Lord, J., and Jacobson, S., "Wear and contact conditions of brake pads: Dynamical in situ studies of pads on glass," Wear, vol. 249, pp. 272–278, 2001.
[22] Barros, L. Poletto, J. Neis, P. Ferreira, N. F. and Pereira, C. "Influence of copper on automotive brake performance," *Wear*, vol. 426–427, pp. 741–749, 2019.
[23] Lee, J., Kwon, S., and Kim, J., "Effect of different reinforcement materials on the formation of secondary plateaus and friction properties in friction materials for automobiles," Tribol. Int., vol. 120, 70-79, 2017.
[24] Liu, Y. Ma, Y. junjian che, Duanmu, L. Zhuang, J and Tong, J "Natural fibre reinforced non-asbestos organic non-metallic friction composites: Effect of abaca fibre on mechanical and tribological behaviour," *Mater. Res. Express*, Vol. 5, 2018.