

# بررسی رفتار سایشی کامپوزیت‌های WC-10wt% Co تجاری، WC-40vol% FeAl-B و WC-40vol% Co در دمای محیط

محمد متقی و مهدی احمدیان

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۹۳/۰۸/۲۰ - پذیرش مقاله: ۹۳/۱۰/۱۴)

## چکیده

در این پژوهش رفتار سایشی کامپوزیت‌های تجاری WC-10wt% Co (H10F)، WC-40vol% Co و کامپوزیت‌های WC-40vol% FeAl-B با مقادیر مختلف بور از صفر تا ۱۰۰۰ ppm به روش پین روی دیسک بررسی شد. آزمون‌های سایش در دمای محیط، تحت بار ۴۰ نیوتن و طی مسافت ۱۰۰ متر انجام شدند. سطوح سایش به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در بین نمونه‌ها، کامپوزیت WC-40vol% FeAl بدون بور کمترین مقاومت به سایش را دارد که به دلیل تردی بالاتر و عدم پیوستگی مناسب بین زمینه آلومیناید آهن و ذرات کاربرد تنگستن است. این رفتار منجر به جدا شدن ذرات تقویت‌کننده از زمینه می‌شود. با حضور بور تا ۵۰۰ ppm در زمینه آلومیناید آهن، رفتار سایشی این کامپوزیت‌ها بهبود یافت و مکانیزم سایش در این کامپوزیت‌ها به حالت خراشان تغییر پیدا کرد. در دمای محیط مقاومت به سایش کامپوزیت WC-40vol% FeAl-500ppmB با وجود این که درصد WC کمتری نسبت به WC-10wt% Co تجاری دارد، نزدیک به آن بود.

واژه‌های کلیدی: سایش خراشان، پین روی دیسک، کامپوزیت، WC-Co، WC-FeAl-B.

## Investigation of the Wear Behavior of Commercial WC-10wt%Co, WC-40vol%Co and WC-40vol%FeAl-B Composites in Ambient Temperature

M. Motaghi and M. Ahmadian

Materials Engineering Department, Isfahan University of Technology

(Received 11 November 2014, accepted 4 January 2015)

### Abstract

In this research, the wear behavior of commercial grade of WC-10wt%Co (H10F), WC-40vol%Co and WC-40vol%FeAl-B composites with different amount of boron from zero to 1000ppm was investigated by the pin on disk test method. The wear tests were done in ambient temperature, under load of 40 N and a distance of 100 m. Wear surfaces were examined by scanning electron microscopy (SEM). The results showed that among samples, the WC-40vol%FeAl composite without boron has the lowest wear resistance due to higher brittleness and lack of suitable continuity between iron-aluminide matrix and tungsten-carbide particles. This behavior leads to the separation of the reinforcer particles from matrix. In the presence of boron up to 500 ppm in iron-aluminide matrix, the wear behavior of these composites improved and the wear mechanism of these composites changed in to abrasive state. In ambient temperature the wear resistance of WC-40vol%FeAl-500ppmB composite was close to commercial WC-10wt%Co although has lower WC percent.

**Keywords:** Abrasive wear, Pin on disk, Composite, WC-FeAl-B, WC-Co.

**E-mail of corresponding author:** m.motaghi@ma.iut.ac.ir

## مقدمه

کاربیدهای سماتنه ترکیب مناسبی از سختی و چقرمگی دارند و هم چنین مقاوم به سایش و حرارت هستند. کامپوزیت‌های کاربید تنگستن - کبالت به طور گسترده برای ساخت قطعات مختلف صنعتی نظیر ابزار برش، نازل جریان گاز، قالب‌های اکستروژن یا کشش، حلقه‌های آب بندی به منظور مقاومت در برابر تخریب‌های ناشی از سایش به کار می‌روند [۱].

کاربیدهای سماتنه شامل یک فاز سخت (بیشتر کاربید تنگستن WC) و فاز بایندر (بیشتر کبالت Co) هستند. بخش اصلی سازنده آن‌ها کاربید تنگستن است که سختی و مقاومت به سایش کامپوزیت و بخش دیگر کبالت چقرمگی و کنار هم گذاشتن ذرات کاربید تنگستن را تامین می‌کند [۲].

اندازه ذره کاربید تنگستن در سرمت‌های WC/Co از ۰/۳ تا ۴۰ میکرومتر و مقدار کبالت از ۳ تا ۳۰ درصد وزنی متغیر است. اندازه ذره کاربید تنگستن در صنعت برش فلز برای کاربردهای عمومی در محدوده ۱-۲ میکرومتر قرار دارد. کاهش اندازه ذره WC سختی را افزایش می‌دهد. به‌تازگی ذرات فوق ریز WC کمتر از ۰/۱ میکرومتر توسعه پیدا کرده‌اند که در نتیجه آن رفتار سایشی بهبود می‌یابد [۱].

کبالت به علت داشتن خواصی مانند ترکندگی خوب ذرات کاربید تنگستن و ایجاد پیوندی خوب با آن‌ها، بیش‌ترین زمینه مصرف شده در سرمت‌های پایه کاربید تنگستن است. با این وجود به علت خورنده و اکسید کننده بودن محیط کاری بیش‌تر قطعات صنعتی، کارآمدی این کامپوزیت‌ها محدود شده است. همچنین یافتن جایگزینی برای کبالت به علت داشتن مقاومت کم به خوردگی و اکسیداسیون، سختی کم، سمی بودن پودر آن، قیمت بالا و استراتژیک بودن آن اهمیت پیدا کرده است [۳].

در یافتن جایگزینی مناسب برای کبالت افزون بر ترکندگی و حلالیت خوب با کاربید تنگستن باید به سختی، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون نیز توجه شود. به‌تازگی تلاش‌های زیادی برای یافتن جایگزینی برای کبالت انجام شده که به دنبال یافتن ترکیبی مناسب‌تر با افزودن عناصر آلیاژی یا عملیات حرارتی بوده‌اند. در میان ترکیبات بررسی شده می‌توان فلزات Fe، Ni و Co و آلیاژهای Ni-Fe، Ni-Co، Ni-Al، Ni-Cr-Mo، Ni-Ni-Cr-Mo و آلیاژهای Fe-Co، Cr-Mo-Al، فولاد زنگ نزن و ترکیبات بین فلزی را نام برد [۴].

آلومینایدهای آهن به علت داشتن مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون خوب، نقطه ذوب بالا، قیمت و چگالی کم برای کاربردهای ساختاری دمای بالا و زمینه جایگزین برای کامپوزیت‌های بین فلزی هستند. آلومینایدهای آهن در چند ترکیب مختلف وجود دارند [۵].

در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی برای افزایش انعطاف پذیری آلومینایدها انجام شده است. کنترل اتمسفر محیط، کاهش اندازه دانه، کنترل ریزساختار، عملیات حرارتی و اضافه کردن عناصر آلیاژی راه حل‌های بررسی شده برای افزایش انعطاف پذیری آلومینایدها هستند. از عناصری که برای بهبود انعطاف پذیری Fe-Al استفاده می‌شود، بور است. افزودن مقدار کمی بور در حد چند صد ppm باعث بهبود در انعطاف‌پذیری آن می‌شود [۶].

نیاز روز افزون به مواد مقاوم به سایش در دمای بالا، موجب شده است که بررسی مقاومت به سایش کامپوزیت با زمینه FeAl اهمیت زیادی پیدا کند. با توجه به این که حضور بور باعث بهبود چقرمگی آلومیناید آهن می‌شود، لذا انتظار می‌رود با حضور بور مقاومت سایشی کامپوزیت‌های WC-FeAl-B بهبود یابد [۷]. هدف از پژوهش حاضر بررسی رفتار سایشی کامپوزیت WC-FeAl در حضور بور است.

مواد و روش تحقیق

کامپوزیت‌های بررسی شده در این مطالعه، WC-40vol%FeAl با مقادیر مختلف بور در گستره صفر تا ۰/۱ درصد وزنی و WC-40vol%Co است. این کامپوزیت‌ها قبلاً به وسیله روش پرس داغ و فرآیند زینترینگ فاز مایع از پودرهای اولیه تولید شده‌اند. روش تهیه این نمونه‌ها در تحقیق دیگری آمده است [۷]. این کامپوزیت‌ها با کامپوزیت تجاری WC-10wt%Co (H10F) ساخت شرکت سندویک<sup>۱</sup> سوئد از نظر خواص سایشی مقایسه شدند. خصوصیات این کامپوزیت‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. علائم اختصاری و خصوصیات کامپوزیت‌های استفاده شده در این تحقیق.

علامت اختصاری	نوع	مقدار	مقدار بور	اندازه ذره
	بایندر	بایندر	(ppm)	(μm)WC
H10F	Co	۱۰٪ وزنی	-	۰/۸
CW2	Co	۴۰٪ حجمی	-	۰/۶۹
SF1	FeAl	۴۰٪ حجمی	۰	۰/۶۹
SF2	FeAl	۴۰٪ حجمی	۲۵۰	۰/۶۹
SF3	FeAl	۴۰٪ حجمی	۵۰۰	۰/۶۹
SF4	FeAl	۴۰٪ حجمی	۷۵۰	۰/۶۹
SF5	FeAl	۴۰٪ حجمی	۱۰۰۰	۰/۶۹

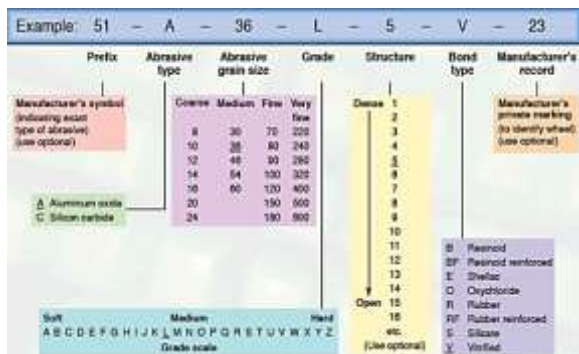
جهت شناسایی فازهای موجود در کامپوزیت‌ها از آزمایش پراش اشعه ایکس (XRD) استفاده شد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Philips، XLSeries، XL30 برای مطالعه ریز ساختار و مورفولوژی ذرات کاربرد تنگستن موجود در کامپوزیت‌ها استفاده شد.

این نمونه‌ها به شکل استوانه‌هایی به قطر ۶/۳۵ میلی‌متر بود. در آزمون پین روی دیسک که در این پژوهش از آن استفاده شد، نمونه‌های مورد بررسی پین و ساینده دیسک

بود. در این‌جا از سنگ‌های سایش آلومینایی (A)، استحکام بالا (P) با کد استاندارد A36P4V به عنوان ساینده استفاده شده است.

در انتخاب سنگ ساینده، عواملی چون جنس ذرات ساینده در سنگ، اندازه دانه‌بندی ذرات، تراکم سنگ (میزان پراکندگی دانه‌ها)، نوع چسب و استحکام پیوندی بین ذرات ساینده مهم است [۸].

در شکل ۱ مشخصات سنگ سایش مورد استفاده در این پژوهش آورده شده است.



شکل ۱. مشخصات سنگ سایش مورد استفاده در آزمون سایش.

جهت انجام آزمون سایش از روش پین بر روی دیسک استفاده شد. این آزمون طبق استاندارد ASTM-G99-04 انجام شد. خروجی‌های این آزمون کاهش وزن نمونه و ضریب اصطکاک بر حسب مسافت است. با استفاده از قسمت کنترل موجود بر روی نرم افزار دستگاه شرایط اولیه آزمون مطابق جدول ۲ اعمال شد.

جدول ۲. شرایط آزمون سایش در دمای محیط.

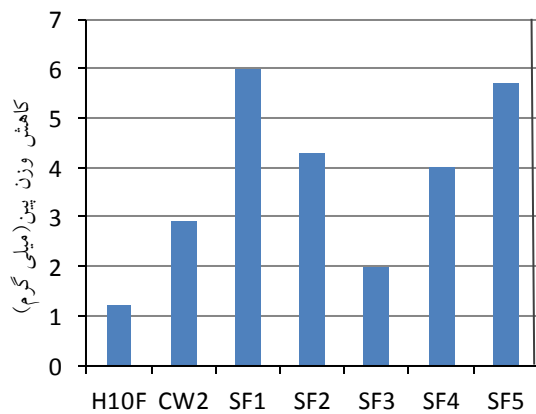
پارامتر	مقدار تنظیم شده
نیروی عمودی	۴۰ نیوتن
مسافت لغزش	۱۰۰ متر
شعاع مسیر	۱۰ میلی‌متر
سرعت چرخش	۶۰ دور بر دقیقه
سرعت لغزش	۰/۰۶۳ متر بر ثانیه
روان‌کار	استفاده نشد

<sup>1</sup>. Sandvic

ساختار کامپوزیت‌های استفاده شده شامل زمینه بایندر و فاز دوم کاربید تنگستن است. به عنوان نمونه ساختار میکروسکوپی دو کامپوزیت در شکل ۳ آورده شده است. فازهای روشن و تاریک که به ترتیب ذرات WC و بایندر فلزی یا بین فلزی هستند.

#### الف) بررسی مقاومت سایشی

نتایج مربوط به کاهش وزن نمونه‌های کامپوزیتی پس از سایش در دمای محیط به صورت نمودار ستونی در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴. نمودار کاهش وزن کامپوزیت‌های مختلف پس از سایش.

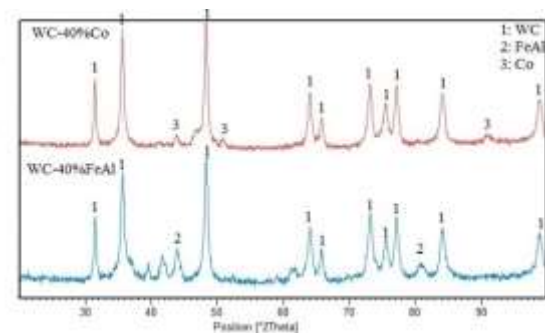
همان‌طور که مشاهده می‌شود کامپوزیت WC-10wt% Co تجاری (H10F) بیشترین مقاومت به سایش را داراست. این کامپوزیت درصد بالاتری از فاز سخت کاربید تنگستن را دارد. کامپوزیت WC-40vol% Co به دلیل داشتن درصد کبالت بیشتر که بایندری نرم است، مقاومت به سایش کمتری نسبت به کامپوزیت تجاری دارد.

همچنین براساس نتایج آورده شده در این شکل می‌توان مشاهده کرد که حضور بور در کامپوزیت‌های زمینه FeAl منجر به بهبود مقاومت سایشی این کامپوزیت‌ها می‌شود. از طرف دیگر افزایش بور تا ۵۰۰ppm باعث افزایش مقاومت به سایش شده است.

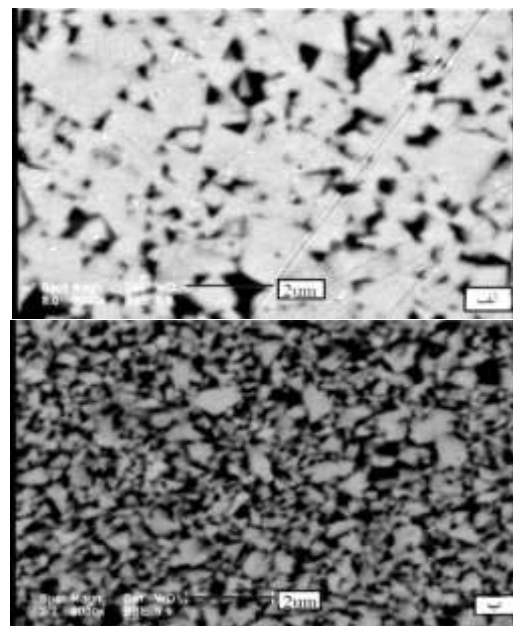
سطوح سایش نمونه‌ها به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل ناهمواری‌هایی که روی سطوح سایش وجود دارد، بیشتر از دکتور الکترون‌های ثانویه (SE) استفاده شد.

#### نتایج و بحث

در شکل ۲ الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به کامپوزیت‌های WC-40% C و WC-40% FeAl استفاده شده در این پژوهش، نشان داده شده است.



شکل ۲. الگوی پراش اشعه ایکس از کامپوزیت‌های WC-FeAl و WC-Co.



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در حالت الکترون

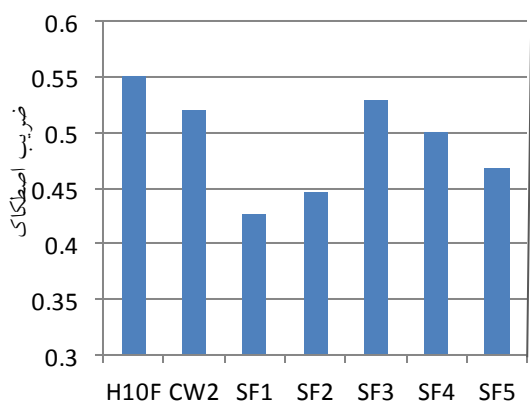
برگشتی از کامپوزیت‌های الف) WC-10wt% Co

و ب) WC-40vol% (FeAl-500ppmB).

بنابراین از نظر میزان کاهش وزن دیسک ساینده آلومینایی، کمترین و بیشترین مقدار به ترتیب مربوط به کامپوزیت‌های WC-40vol%FeAl و WC-10wt% Co است. این مقدار برای کامپوزیت‌های حاوی بور بیشتر از کامپوزیت بدون بور است.

با مقایسه شکل‌های ۵ و ۶ مشخص می‌شود که ترتیب قرارگیری کاهش وزن نمونه‌های مختلف درست عکس ترتیب قرارگیری کاهش وزن دیسک‌های مربوط به آن است. یعنی هر نمونه‌ای که کاهش وزن آن طی سایش کمتر باشد، کاهش وزن دیسک مربوط به آن بیشتر است. نمونه‌ای که مقاومت به سایش آن بیشتر است، خود دچار سایش نشده و روی دیسک سایش ایجاد می‌کند. بر عکس نمونه‌ای که مقاومت به سایش آن کمتر است در برخورد به دیسک ساینده دچار سایش بیشتری شده در نتیجه سایش کمتری روی دیسک ایجاد شده است.

نتایج مربوط به ضریب اصطکاک متوسط ناشی از لغزش بین‌های کامپوزیتی مختلف بر روی دیسک‌های ساینده آلومینایی پس از سایش در دمای محیط به صورت نمودار ستونی در شکل ۶ آورده شده است.



شکل ۶. نمودار ضریب اصطکاک میانگین برای کامپوزیت‌های مختلف در حین سایش.

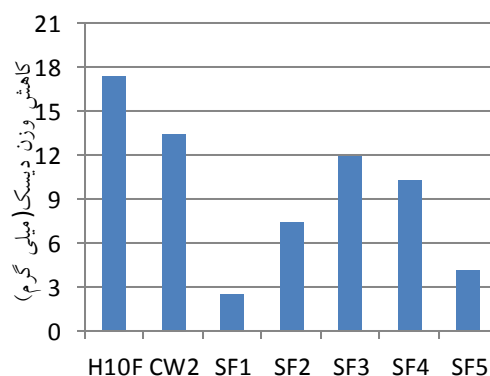
همان‌گونه که مشاهده می‌شود کمترین و بیشترین مقدار ضریب اصطکاک به ترتیب مربوط به کامپوزیت‌های

وجود پیوند فصل مشترکی مناسب بین ذرات کاربرد تنگستن و زمینه برای دستیابی به مقاومت سایشی مطلوب ضروری است [۹]. بور با افزایش میزان چقرمگی این کامپوزیت‌ها و افزایش قابلیت شکل‌پذیری آلومیناید آهن و همچنین بهبود حلالیت کاربرد تنگستن در آن منجر به بهبود پیوند فصل مشترک زمینه FeAl و ذرات کاربرد تنگستن و بنابراین افزایش مقاومت سایشی این کامپوزیت‌ها شده است [۷]. البته این روند تا مقدار 500ppm بور ادامه دارد. با افزایش مقدار بور به دلیل کاهش سختی، مقاومت به سایش مقداری کاهش پیدا می‌کند [۲].

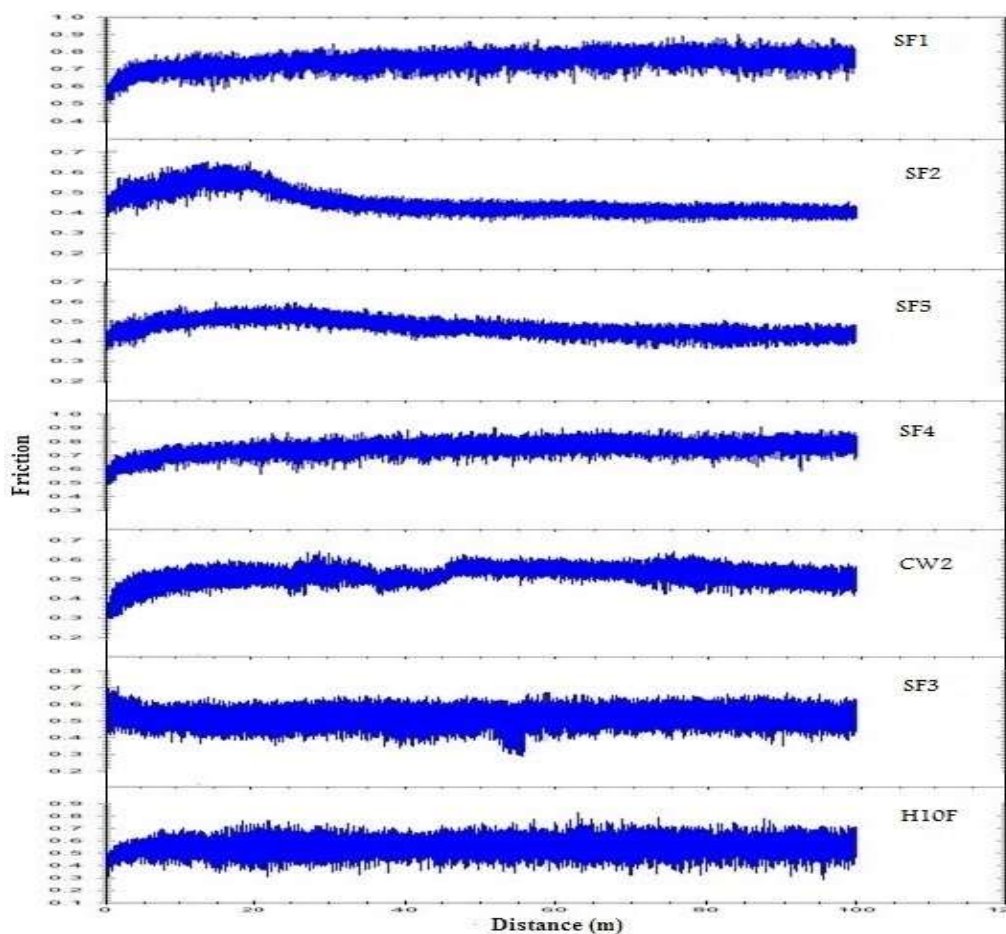
کامپوزیت WC-FeAl-500ppmB به دلیل داشتن حد بهینه‌ای از سختی و چقرمگی شکست [۲]، بیشترین مقاومت به سایش را در بین کامپوزیت‌های زمینه FeAl داراست. سختی و چقرمگی بر روی مقاومت سایشی کامپوزیت‌های زمینه بین فلزی اثر مثبتی دارند.

لازم به ذکر است که در دمای محیط کامپوزیت WC-40vol% FeAl-500ppmB با این‌که درصد WC کم‌تری نسبت به کامپوزیت تجاری WC-10wt% Co (H10F) دارد ولی مقاومت سایشی یکسانی دارند.

نتایج مربوط به کاهش وزن دیسک‌های ساینده آلومینایی پس از سایش در دمای محیط به صورت نمودار ستونی در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵. نمودار کاهش وزن دیسک‌های ساینده آلومینایی در آزمون‌های مختلف سایش.



شکل ۷. نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت برای کامپوزیت‌های مختلف در حین سایش.

با توجه به این نمودارها می‌توان مشاهده کرد که از بالا به پایین ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. کامپوزیت WC-10wt% Co تجاری (H10F) میزان نوسانات ضریب اصطکاک بیشتری نسبت به دیگر کامپوزیت‌ها دارد. در بین کامپوزیت‌های زمینه بین فلزی نیز، کامپوزیت حاوی 500ppm بور به دلیل مقاومت سایشی بالاتر، دارای ضریب اصطکاک و همچنین میزان نوسانات ضریب اصطکاک بیشتری نسبت به دیگر کامپوزیت‌های زمینه بین فلزی است.

با افزایش مقاومت سایشی، درگیری نمونه روی دیسک بیشتر می‌شود. میزان ارتعاشات نمونه بر سطح دیسک نیز افزایش می‌یابد. این ارتعاشات باعث می‌شود که نمونه یک مسیر کاملاً دایره‌ای شکل را روی سطح دیسک طی

WC-40vol% FeAl بدون افزودنی بور و WC-10wt% Co تجاری (H10F) است. این مقدار برای کامپوزیت‌های حاوی بور بیشتر از کامپوزیت بدون بور است و ضریب اصطکاک با افزایش میزان بور تا ۵۰۰ppm افزایش می‌یابد.

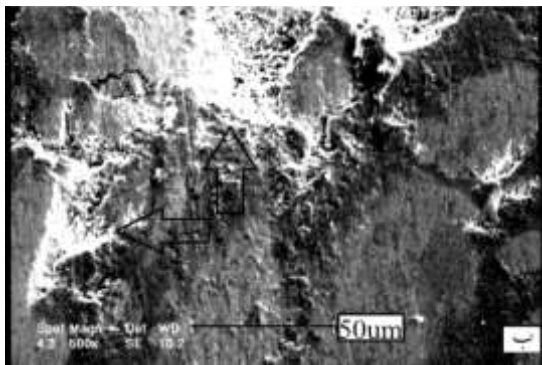
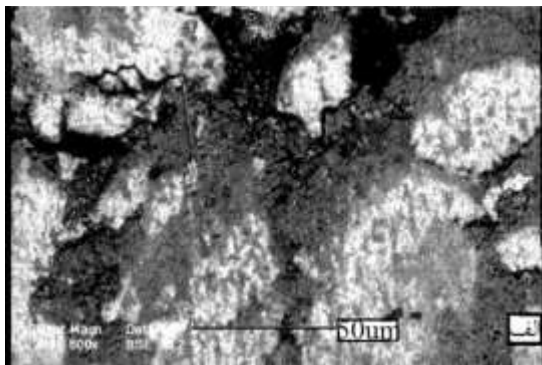
هرچه مقاومت سایشی بیشتر باشد، درگیری نمونه روی دیسک بیشتر است. نیروی افقی بیشتری جهت لغزش پین بر روی دیسک مورد نیاز است. در نتیجه ضریب اصطکاک که حاصل تقسیم نیروی افقی بر نیروی عمودی است، نیز بیشتر می‌شود.

نمودارهای ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده برای کامپوزیت‌های مختلف در حین سایش در دمای محیط در شکل ۷ آورده شده است.



حفره‌هایی در سطح تماس بین کامپوزیت و ذرات ساینده را نشان می‌دهد. در این تصاویر جدا شدن و کنده شدن بایندر کبالت مشهود است.

محققین دیگری نیز اشاره کرده‌اند که کندگی موضعی بایندر کبالت در سیستم WC-Co مرحله مهمی در فرآیند سایش این مواد بوده است [۱۰]. مقاومت به سایش این کامپوزیت به دلیل داشتن میزان بایندر بیشتر و WC کمتر نسبت به نمونه H10F، کمتر است.



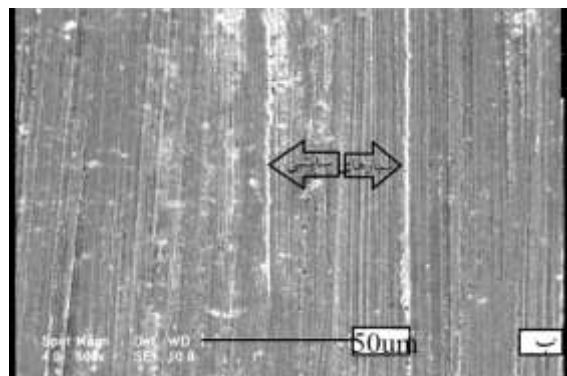
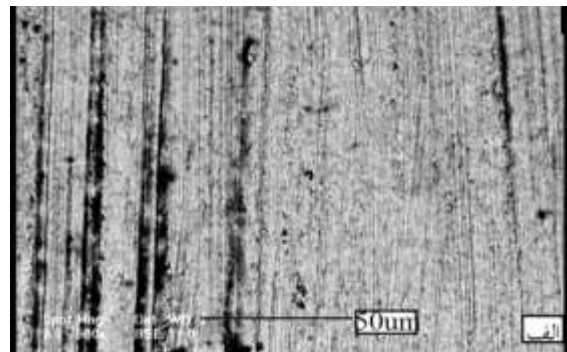
شکل ۹. تصاویر SEM از سطح سایش کامپوزیت WC-Co (40vol% در دو حالت: الف) BSE و (ب) SE.

شکل ۱۰ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش کامپوزیت WC-40vol% FeAl را نشان می‌دهد. در مورد کامپوزیت بدون بور سایش همراه با تشکیل کندگی‌هایی در سطح تماس بین کامپوزیت و ذرات ساینده اتفاق می‌افتد. برای این کامپوزیت میکروشکست‌هایی در سطوح سایش دیده می‌شود. به نظر می‌رسد که کندگی موضعی بایندر از لایه‌های سطحی کامپوزیت نقش اصلی را در سایش

نکند. این حرکات اضافی باعث می‌شود که ضریب اصطکاک در محدوده بیشتری تغییر کند.

### ب) بررسی سطوح سایش

در شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایشی کامپوزیت WC-10wt% Co تجاری (H10F) همراه با تشکیل شیارهایی در سطح تماس بین کامپوزیت و ذرات ساینده نشان داده شده است. عمق این شیارهای سایشی به دلیل وجود فاز سخت کاربید تنگستن بسیار کم است، به نحوی که کاهش وزن آن نسبت به کامپوزیت‌های دیگر کمتر است. سایش در اثر خیش خوردن پیشرفت می‌کند و به نظر می‌رسد مکانیزم سایش خراشان غالب باشد.

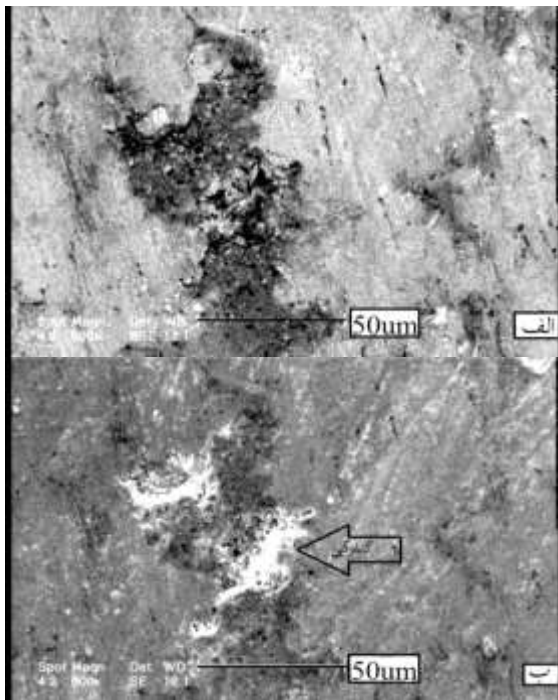


شکل ۸. تصاویر SEM از سطح سایش کامپوزیت WC-10wt% Co تجاری در دو حالت: الف) BSE و (ب) SE.

شکل ۹ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش کامپوزیت WC-40vol% Co همراه با تشکیل

ماندن چقرمگی شکست، سختی کاهش پیدا می‌کند. مکانیزم سایش این کامپوزیت از نوع خراشان بوده، اما میزان و عمق شیارهای ایجاد شده روی آن بیشتر از کامپوزیت با ۵۰۰ppm بور است. بنابراین مقاومت سایشی این کامپوزیت نسبت به نمونه با ۵۰۰ppm بور کمتر شده است.

با رسیدن میزان بور به ۱۰۰۰ppm چقرمگی شکست ثابت مانده ولی سختی روند کاهشی خود را ادامه می‌دهد. مکانیزم سایش این کامپوزیت نیز از نوع خراشان بوده و عمق شیارهای سایشی بیش‌تر از نمونه با ۷۵۰ppm بور است. مقاومت به سایش این کامپوزیت کمتر از نمونه با ۷۵۰ppm بور است.



شکل ۱۰. تصاویر SEM از سطح سایش کامپوزیت WC-40vol% FeAl-B در دو حالت: الف) BSE و ب) SE.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ از بالا به پایین میزان بور موجود در کامپوزیت‌های WC-40vol% FeAl-B افزایش می‌یابد. همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است مکانیزم سایش برای همه این کامپوزیت‌ها از نوع خراشان

خراشان کامپوزیت WC-FeAl داشته باشد. مقاومت به سایش این کامپوزیت نسبت به نمونه‌های با بایندر کبالت کمتر است.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح سایش کامپوزیت‌های WC-40vol% FeAl-B به ترتیب در حالت الکترون‌های ثانویه و الکترون‌های برگشتی را نشان می‌دهد.

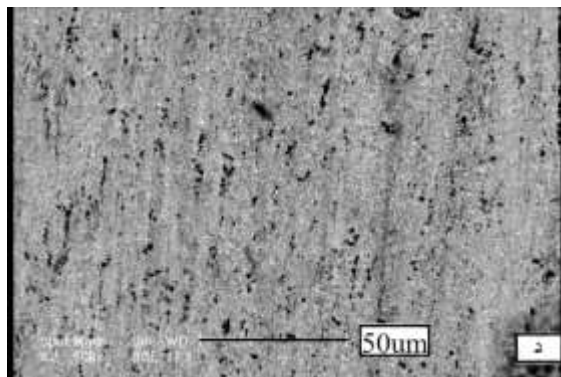
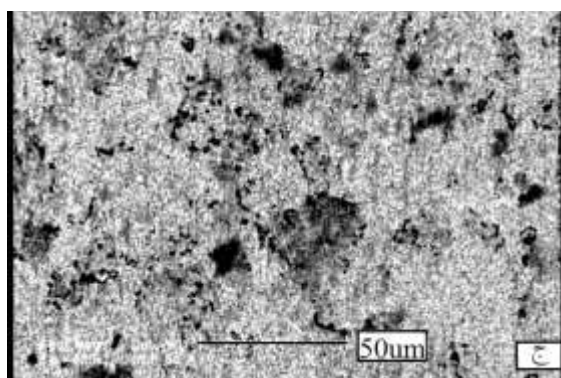
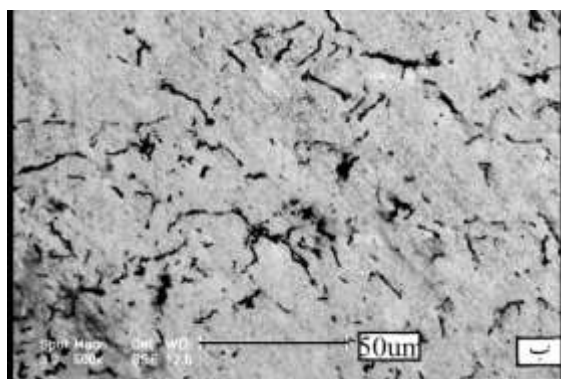
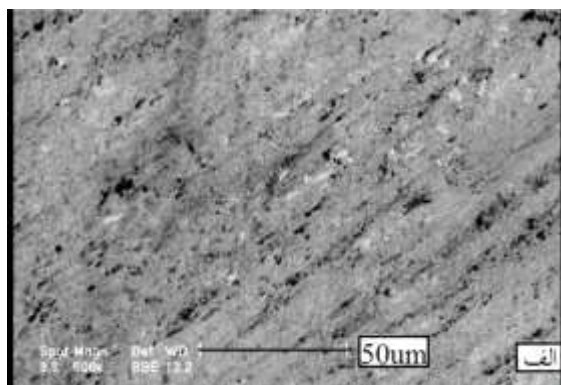
سختی کامپوزیت WC-40vol% FeAl در حضور بور کاهش ولی چقرمگی شکست آن افزایش می‌یابد. بنابراین مقداری از تردی آن کاهش می‌یابد.

در مورد کامپوزیت WC-40vol% FeAl-250ppmB دیگر اثری از کندگی روی سطح این کامپوزیت دیده نمی‌شود. حل شدن مقداری بور در زمینه آلومیناید آهن باعث قوی‌تر شدن پیوند فصل مشترک زمینه و ذرات کاربید تنگستن می‌شود که احتمال شکست ترد کامپوزیت از مرز بین زمینه و ذرات تقویت‌کننده را کاهش می‌دهد [۲]. این موضوع باعث می‌شود که مکانیزم سایش از حالت کندگی به حالت خراشان تغییر پیدا کند. بنابراین مقاومت به سایش این کامپوزیت نسبت به نمونه بدون بور بیشتر ولی نسبت به WC-Co تجاری کمتر است.

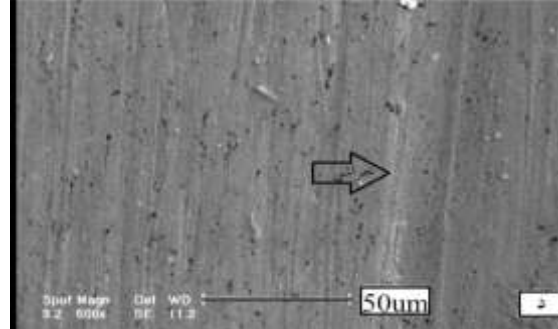
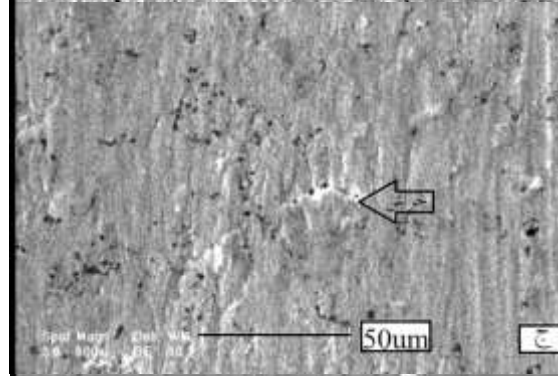
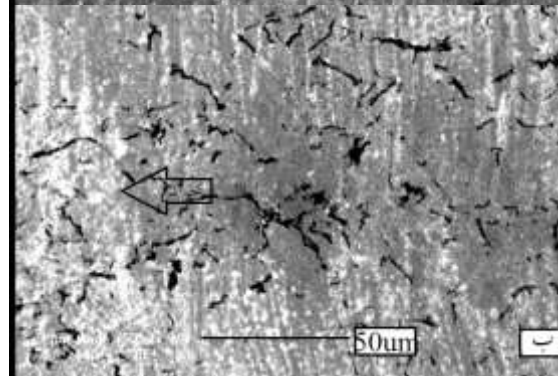
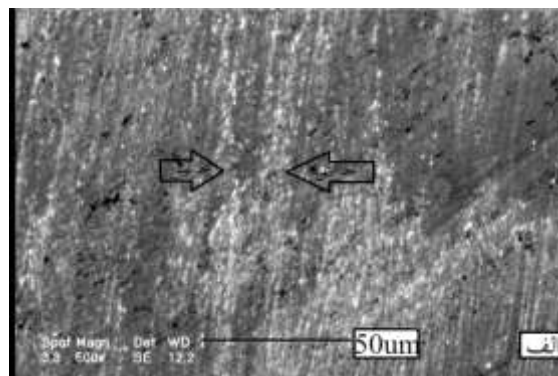
با افزایش میزان بور حل شده در زمینه FeAl به ۵۰۰ppm حالت بهینه ایجاد می‌شود. با افزایش میزان بور از این حد، با وجود کاهش سختی، چقرمگی شکست به حالت تقریباً پایداری می‌رسد. این کامپوزیت افزون برداشتن چقرمگی شکست مناسب، از سختی مطلوبی نیز برخوردار است. به نظر می‌رسد مکانیزم سایش این کامپوزیت نیز خراشان است. ولی میزان و عمق خراش‌های ایجاد شده روی سطح آن نسبت به نمونه با ۲۵۰ppm بور کمتر است. مقاومت به سایش این کامپوزیت نسبت به نمونه با ۲۵۰ppm بور افزایش پیدا کرده است. به نحوی که این کامپوزیت از لحاظ رفتار سایشی قابل رقابت با WC-10wt% Co تجاری (H10F) است. با افزایش میزان بور به مقدار ۷۵۰ppm با ثابت



بوده، اما میزان و عمق شیارهای سایشی برای کامپوزیت حاوی ۵۰۰ppm بور از همه کمتر است. یعنی این نمونه بیشترین مقاومت سایشی را بین این کامپوزیت‌ها دارد.



شکل ۱۲. تصاویر SEM از سطوح سایش کامپوزیت‌های WC- 40vol% FeAl-B در حالت BSE (الف) با ۲۵۰ppm بور، (ب) با ۵۰۰ppm بور، (ج) با ۷۵۰ppm بور و (د) با ۱۰۰۰ppm بور.



شکل ۱۱. تصاویر SEM از سطوح سایش کامپوزیت‌های WC- 40vol% FeAl-B در حالت SE (الف) با ۲۵۰ppm بور، (ب) با ۵۰۰ppm بور، (ج) با ۷۵۰ppm بور و (د) با ۱۰۰۰ppm بور.

## نتیجه‌گیری

- ۱- کامپوزیت WC-10wt% Co از مقاومت سایشی بالاتری نسبت به کامپوزیت WC-40vol% Co برخوردار بوده که دلیل آن داشتن میزان بایندر کمتر و در نتیجه سختی بیشتر کامپوزیت WC-10wt% Co است.
- ۲- کامپوزیت WC-40vol% FeAl بدون افزودنی بور، کمترین مقاومت سایشی را دارد که به دلیل ترد بودن و چقرمگی شکست کم آن است. اما با حضور بور تا ۵۰۰ ppm در زمینه FeAl، رفتار سایشی این کامپوزیت‌ها بهبود می‌یابد.
- ۳- کامپوزیت WC-10wt% Co بیشترین ضریب اصطکاک و میزان نواسانات آن را در بین کامپوزیت‌ها داراست که دلیل آن داشتن بیشترین مقاومت سایشی و درگیری پین با دیسک حین سایش است.
- ۴- مکانیزم سایش در کامپوزیت WC-10wt% Co از نوع خراشان بوده اما در کامپوزیت WC-40vol% C کنده‌شدن بایندر کبالت از بین ذرات کاربید تنگستن است.
- ۵- در کامپوزیت WC-40vol% FeAl، سایش از طریق جدا شدن بایندر از ذرات کاربید تنگستن اتفاق می‌افتد. اما در کامپوزیت‌های WC-40vol% FeAl-B سایش خراشان رخ می‌دهد.
- ۶- در دمای محیط مقاومت به سایش کامپوزیت WC-40vol% FeAl-500ppmB با وجود دارا بودن درصد WC کمتر، نزدیک به کامپوزیت تجاری WC-10wt% Co بوده و قابل رقابت با آن است.
۳. R. Subramanian and J.H. Schneibel, *Intermetallic bonded WC-based cermets by pressureless melt infiltration*, *Intermetallics*, 5(1997)401-408.
۴. G. Gille, J. Bredthauer, B. Gries, B. Mende and W. Heinrich, *Advanced and new grades of WC and binder powder-their properties and application*, *Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 18(2000)87-102.
۵. H. J. Grabke, *Oxidation of NiAl and FeAl*, *Intermetallic*, 7(1999)1153-1158.
۶. D. F. Johnson and E. A. Carter, *First-principles assessment of hydrogen absorption into FeAl and Fe<sub>3</sub>Si: towards prevention of steel embrittlement*, *Acta Materialia*, 58(2010)638-648.
۷. M. Ahmadian, *Sintering, microstructure and properties of WC-FeAl-B and WC-Ni<sub>3</sub>Al-B*, *Materials and mechatronic engineering*, University of Wollongong, 2005.
۸. عباسی مجید، خیراندیش شهرام، خرازی یوسف و حجازی جلال، بررسی تاثیر برخی عوامل اصلی بر رفتار سایشی فولاد هادفیلد، علوم و مهندسی سطح، ۶ (۱۳۸۷) ۵۷-۶۹.
۹. E. Sanchez, E. Bannier, M. D. Salvador, V. Bonache, J. C. Garcia, J. Morgiel and J. Grzonka, *Microstructure and wear behavior of conventional and nanostructured plasma-sprayed WC-Co coating*, *Journal of thermal spray technology*, 19(2010)964-974.
۱۰. A. Y. Mosbah, D. Wexler and A. Calka, *Abrasive wear of WC-FeAl composites*, *Wear*, 258(2005)1337-1341.

## مراجع

1. D. Jianxin, Z. Hui, W. Ze, L. Yansong and Z. Jun, *Friction and wear behaviors of WC/Co cemented carbide tool materials with different WC grain sizes at temperatures up to 600<sup>o</sup>C*, *Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 31(2012)196-204.
2. M. Ahmadian, D. Wexler, A. Calka and T. Chandra, *The effect of boron on the*