بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

بررسی رفتار سایشی کامپوزیت‌های WC-(FeAl-B) در دماهای بالا

پایان‌نامه کارشناسی ارشد استخراج فلزات

محمد متقی

استاد راهنما

دکتر مهدی احمدیان

۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مواد

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد- استخراج فلزات آقای محمد متقی

تحت عنوان

بررسی رفتار سایشی کامپوزیت‌های WC-(FeAl-B) در دماهای بالا

در تاریخ ۹۳/۱۰/۲۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر مهدی احمدیان
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر مسعود عطاپور
۳- استاد داور	دکتر علی شفیعی
۴- استاد داور	دکتر حمیدرضا سلیمی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر کیوان رییسی

قدردانی

بر خود لازم می‌دانم از زحمات و تلاش‌های دلسوزانه و مستمر استاد گرامی آقای دکتر مهدی احمدیان که همواره راهنمای بنده در طول مدت انجام پروژه بوده‌اند، سپاسگزاری نموده و امیدوارم که تا پایان عمر شاگرد شایسته‌ای برای ایشان باشم. هم‌چنین از دوستان عزیزم که اینجانب را در انجام پروژه یاری رساندند کمال تشکر را دارم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات ونوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به :

پدر، مادر و خانواده عزیزم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده ۱

فصل اول : مقدمه ۲

فصل دوم : مروری بر منابع ۵

۲-۱-کاربیدهای سمانته ۵

۲-۱-۱- تاریخچه ۶

۲-۱-۲- طبقه‌بندی کاربیدها ۷

۲-۱-۳-کاربید تنگستن / کبالت ۸

۲-۱-۴- روش‌های تولید ۹

۲-۲- زمینه در سرمت های WC ۱۳

۲-۲-۱- خواص ضروری زمینه ۱۳

۲-۲-۲- زمینه کبالت و محدودیت‌های آن ۱۵

۲-۲-۳- زمینه‌های جایگزین ۱۵

۲-۳- ترکیبات بین فلزی ۱۸

۲-۳-۱-آلومینایدها ۱۹

۲-۳-۲- ترکیب بین فلزی FeAl ۲۲

۲-۳-۳- ترکیب بین فلزی FeAl-B ۲۷

۲-۴- کامپوزیت‌های WC-FeAl ۲۹

۲-۵- کامپوزیت‌های WC-FeAl-B ۳۱

۲-۶- رفتار سایشی سرمت‌ها (کاربیدهای سمانته) ۳۲

۲-۶-۱- رفتار سایشی در دمای پایین ۳۳

۲-۶-۲- رفتار سایشی WC-FeAl در دمای پایین ۳۴

۲-۶-۳- رفتار سایشی مواد در دمای بالا ۳۷

۲-۶-۴- مکانیزم‌های سایش در دمای بالا ۴۰

۲-۶-۵- رفتار سایشی سرمت‌های کاربیدی در دمای بالا ۴۵

فصل سوم: مواد و روش تحقیق ۵۷

۳-۱- مشخصه‌یابی مواد اولیه و نمونه‌ها ۵۷

۳-۱-۱- آنالیز فازی ۵۷

۳-۱-۲- متالوگرافی ۵۸

۳-۱-۳- تخلخل سنجی..... ۵۹
۳-۱-۴- آنالیز تصویر SEM..... ۵۹
۳-۱-۵- سختی سنجی..... ۶۰
۳-۱-۶- چقرمگی شکست..... ۶۰
۳-۲- آزمون سایش..... ۶۱
۳-۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها و دیسک‌ها..... ۶۱
۳-۲-۲- زبری سنجی نمونه‌ها و دیسک‌ها..... ۶۱
۳-۲-۳- سایش پین بر روی دیسک..... ۶۲
۳-۳- بررسی سطوح سایش..... ۶۴
۳-۳-۱- توسط میکروسکوپ نوری..... ۶۴
۳-۳-۲- توسط SEM ۶۴
۳-۳-۳- توسط AFM ۶۴
فصل چهارم: نتایج و بحث..... ۶۵
۴-۱- مشخصه‌یابی کامپوزیت‌ها..... ۶۵
۴-۱-۱- آنالیز فازی..... ۶۶
۴-۱-۲- تخلخل..... ۶۸
۴-۱-۳- ریزساختار..... ۷۰
۴-۱-۴- سختی..... ۷۴
۴-۱-۵- چقرمگی..... ۷۵
۴-۲- بررسی رفتار سایشی کامپوزیت‌های WC-Co در دمای محیط و دماهای بالا ۷۷
۴-۲-۱- بررسی زبری نمونه‌ها و دیسک..... ۷۷
۴-۲-۲- بررسی مقاومت سایشی..... ۷۸
۴-۲-۳- بررسی ضریب اصطکاک..... ۷۹
۴-۲-۴- بررسی رفتار اکسیداسیون..... ۸۲
۴-۲-۵- بررسی سطوح سایش..... ۸۳
۴-۲-۶- آنالیز EDS سطوح سایش..... ۸۶
۴-۳- بررسی رفتار سایشی کامپوزیت‌های WC-FeAl-B در دمای محیط و دماهای بالا..... ۸۹
۴-۳-۱- بررسی مقاومت سایشی..... ۸۹
۴-۳-۲- بررسی ضریب اصطکاک..... ۹۲
۴-۳-۳- بررسی رفتار اکسیداسیون..... ۹۸
۴-۳-۴- بررسی سطوح سایش..... ۹۹
۴-۳-۵- آنالیز EDS سطوح سایش..... ۱۰۷

۴-۴- مقایسه رفتار سایشی کامپوزیت‌های WC-Co با WC-FeAl-B در دمای محیط و دماهای بالا..... ۱۱۰
۴-۴-۱- بررسی مقاومت سایشی..... ۱۱۰
۴-۴-۲- بررسی سطوح سایشی..... ۱۱۳

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۱۱۶
نتیجه گیری..... ۱۱۶
پیشنهادات..... ۱۱۸

مراجع..... ۱۱۹

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

۲-۱- نمودار فاز تعادلی سیستم تنگستن – کربن..... ۸
۲-۲- مراحل معمول زینترینگ فاز مایع..... ۱۱
۲-۳- تغییرات نیروی بین ذرات با زاویه تماس..... ۱۴
۲-۴- نمودار شماتیک برای مقایسه تاثیر حلالیت بر چگالش یا تورم در هنگام زینتر کردن..... ۱۴
۲-۵- نرخ های خوردگی کاربیدهای سمانته در محلول های بافر..... ۱۷
۲-۶- نمودار فازی دوتایی Fe-Al ۲۲
۲-۷- تاثیر غلظت جاهای خالی روی سختی آلومینایدهای آهن..... ۲۴
۲-۸- اثر افزودن بور روی تنش تسلیم در ترکیب FeAl..... ۲۴
۲-۹- تاثیر مقدار بور بایندر روی مقاومت سایشی دو کامپوزیت WC-40%(FeAl-B) و WC-40%(Ni_3Al-B) ۳۵
۲-۱۰- تصویر SE سطح سایش دو کامپوزیت پس از خراشیدن در مقابل ذرات SiC ۱۰۵ میکرومتری..... ۳۶
۲-۱۱-کاهش وزن در هاردمتال‌های مختلف..... ۳۶
۲-۱۲- ضریب اصطکاک چسبان (K_{ad}) در خلاء بر حسب دمای نسبی T/T_m طی تماس بین فلزات هم جنس..... ۳۷
۲-۱۳- ضریب اصطکاک بر حسب سختی ۳۸
۲-۱۴- نمایش شماتیکی چهار مکانیزم ممکن برای حرکت نسبی ذرات سایشی در طی لغزش..... ۴۲
۲-۱۵- نمایش شماتیکی از شرایط تماس برای یک ذره کروی بین سطح ثابت و یک برآمدگی از ساینده متحرک..... ۴۲
۲-۱۶- منحنی‌های ضرایب اصطکاک مواد با زمان آزمون در 800^0C و بار اعمالی ۱۰N و سرعت لغزش ۰/۲۰۲ m/s..... ۴۵
۲-۱۷- تغییرات ضرایب اصطکاک با دمای آزمایش در ۱۰N و سرعت لغزش ۰/۲۰۲ m/s..... ۴۶
۲-۱۸- تغییرات نرخ‌های سایش همه مواد با دمای آزمون در بار ۱۰N و سرعت لغزش ۰/۲۰۲ m/s..... ۴۷
۲-۱۹- تصاویر SEM مورفولوژی سطوح سایش ترکیب Fe-28Al-5Cr بدون TiC در دماهای مختلف..... ۴۷
۲-۲۰- تصاویر SEM مورفولوژی سطوح سایش ترکیب Fe-28Al-5Cr با ۲۵٪ TiC را در دماهای مختلف..... ۴۸
۲-۲۱- تصاویر SEM مورفولوژی سطوح سایش ترکیب Fe-28Al-5Cr با ۵۰٪ TiC را در دماهای مختلف..... ۴۹
۲-۲۲- تغییرات ضریب اصطکاک کاربید سمانته (اندازه WC ۱/۵-۲/۲میکرومتر) با زمان لغزش در دماهای متفاوت..... ۵۱
۲-۲۳- تغییرات ضریب اصطکاک کاربید سمانته (اندازه WC۰/۶-۱ میکرومتر) با زمان لغزش در دماهای متفاوت..... ۵۱
۲-۲۴- نرخ سایش کاربیدهای سمانته در دما و سرعت‌های مختلف..... ۵۲
۲-۲۵- نمای دو بعدی مسیرهای سایش کاربیدهای سمانته در دماهای مختلف..... ۵۲
۲-۲۶- زبری سطح کاربیدهای سمانته در دماهای مختلف..... ۵۲
۲-۲۷- تصاویر SEM از سطوح سایش کاربیدهای سمانته در ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد..... ۵۳
۲-۲۸- تصاویر SEM از سطوح سایش کاربیدهای سمانته در ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد..... ۵۳
۲-۲۹- تصویر SEM از سطح سایش کاربید سمانته در ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در بزرگنمایی بیش‌تر..... ۵۴
۲-۳۰- تصاویر SEM از سطوح سایش کاربیدهای سمانته در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد..... ۵۴
۲-۳۱- تصاویر SEM از سطوح سایش کاربیدهای سمانته در ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در بزرگنمایی بیش‌تر..... ۵۴

۲-۳۲- تفرق اشعه ایکس سطح کاربید سمانته پس از سایش در دمای ۲۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد.....۵۵
۳-۱- الگوی پراش اشعه ایکس از دیسک ساینده.....۵۸
۳-۲- الف) دیسک ساینده، ب) پین (نمونه) سایش.....۶۱
۳-۳- دستگاه آزمایش سایش دما بالای استفاده شده در این تحقیق.....۶۳
۴-۱- الگوی پراش اشعه ایکس از کامپوزیت‌های WC-40vol%Co و WC-10wt%Co.....۶۶
۴-۲- الگوی پراش اشعه ایکس از کامپوزیت‌های WC-40vol%FeAl با مقادیر مختلف بور.....۶۷
۴-۳- تصاویر میکروسکوپ نوری از WC-FeAl-500ppm B و WC-FeAl-1000ppm B ۶۸
۴-۴- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از WC-FeAl-500ppm B ۶۹
۴-۵- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از WC-FeAl-1000ppm B در بزرگنمایی‌های متفاوت.....۶۹
۴-۶- نمودار ستونی از درصد تخلخل اندازه گیری شده برای سرمت‌های مختلف.....۷۰
۴-۷- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از WC-10wt%Co و WC-40vol%Co.....۷۱
۴-۸- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه‌های WC-FeAl با مقادیر متفاوت بور..... ۷۲
۴-۹- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از WC-10wt%Co و WC-40vol%Coدر بزرگنمایی بیش‌تر.....۷۳
۴-۱۰- تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه‌های WC-FeAl با مقادیر متفاوت بور دربزرگنمایی بیش‌تر ۷۳
۴-۱۱- نمودار ستونی سختی ویکرز کامپوزیت‌ها در بار ۲ کیلوگرم.....۷۴
۴-۱۲- تصویر میکروسکوپ نوری از اثر فرورونده ویکرز بر سطح پولیش شده نمونه WC-10wt%Co..... ۷۵
۴-۱۳- نمودار ستونی از چقرمگی شکست محاسبه شده برای کامپوزیت‌ها.....۷۶
۴-۱۴- نمودار چقرمگی شکست کامپوزیت WC-FeAlبا مقادیر مختلف بور موجود در بایندر آلومینایدی.....۷۶
۴-۱۵- میزان کاهش وزن نمونه‌های WC-Co پس از سایش طی مسافت ۱۰۰ متر در دماهای مختلف.....۷۸
۴-۱۶- میزان کاهش وزن دیسک‌های ساینده پس از سایش در دماهای مختلف برای نمونه‌های WC-Co.....۷۹
۴-۱۷- ضریب اصطکاک میانگین نمونه‌های WC-Co پس از سایش در دماهای مختلف.....۸۰
۴-۱۸- نمودارهای ضریب اصطکاک بر حسب مسافت نمونهWC-10wt%Coدرحین سایش دردماهای مختلف.....۸۱
۴-۱۹- نمودارهای ضریب اصطکاک بر حسب مسافت نمونهWC-40vol%Coدرحین سایش دردماهای مختلف.....۸۲
۴-۲۰- درصد افزایش وزن نسبی نمونه‌های WC-Co در دماهای ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد.....۸۲
۴-۲۱- تصاویر SEM در دوحالت SE و BSE از سطح سایش WC-10wt%Co در دماهای مختلف.....۸۴
۴-۲۲- تصاویر SEM در دوحالت SE و BSE از سطح سایش WC-40vol%Co در دماهای مختلف.....۸۵
۴-۲۳- آنالیز EDS از سطح سایش نمونه WC-10wt%Co در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد.....۸۷
۴-۲۴- آنالیز EDS از سطح سایش نمونه WC-40vol%Co در دمای ۴۰۰ درجه‌سانتی‌گراد.....۸۸
۴-۲۵- نمودار کاهش وزن نمونه‌های WC-40vol%FeAl-B پس از سایش طی مسافت ۱۰۰ متر در دماهای مختلف.....۸۹
۴-۲۶- تاثیر دمای آزمون سایش بر کاهش وزن نمونه‌های WC-FeAl-B.....۹۰
۴-۲۷- نمودار کاهش وزن دیسک‌های مربوط به نمونه‌های WC-40vol%FeAl-B پس از سایش در دماهای مختلف...۹۱
۴-۲۸- تاثیر دمای آزمون سایش بر کاهش وزن دیسک‌های ساینده مربوط به نمونه‌های WC-FeAl-B.....۹۱
۴-۲۹- نمودار ضریب اصطکاک میانگین نمونه‌های WC-40vol%FeAl-B پس از سایش در دماهای مختلف.....۹۲
۴-۳۰- نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت نمونه‌های WC-FeAl-B در حین سایش در دمای محیط.....۹۳

۴-۳۱- نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت نمونه‌های WC-FeAl-B در حین سایش در دمای ۲۰۰ درجه..... ۹۴
۴-۳۲- نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت نمونه‌های WC-FeAl-B در حین سایش در دمای ۳۰۰ درجه.....۹۵
۴-۳۳- نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت نمونه‌های WC-FeAl-B در حین سایش در دمای ۴۰۰ درجه.....۹۶
۴-۳۴- نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت نمونه‌های WC-FeAl-B در حین سایش در دمای ۵۰۰ درجه.....۹۶
۴-۳۵- نمودار ضریب اصطکاک بر حسب مسافت نمونه‌های WC-FeAl-B در حین سایش در دمای ۶۰۰ درجه.....۹۷
۴-۳۶- تاثیر دمای آزمون سایش بر میانگین ضریب اصطکاک نمونه‌های WC-FeAl-B.....۹۸
۴-۳۷- درصد افزایش وزن نسبی نمونهSF3 در دو دمای ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد.....۹۸
۴-۳۸- تصاویر SEM در دو حالت SE و BSE از سطح سایش WC-FeAl بدون بور در دماهای مختلف.....۱۰۰
۴-۳۹- تصاویر SEM در دوحالت SE و BSE از سطوح سایش WC-FeAl -B در دمای محیط.....۱۰۲
۴-۴۰- تصاویر SEM در دوحالت SE و BSE از سطح سایش WC-FeAl -B در دمای ۳۰۰ درجه.....۱۰۳
۴-۴۱- تصاویر SEM در دوحالت SE و BSE از سطح سایش WC-FeAl -B در دمای ۴۰۰ درجه.....۱۰۴
۴-۴۲- تصاویر SEM در دوحالت SE و BSE از سطح سایش WC-FeAl -B در دمای ۵۰۰ درجه.....۱۰۵
۴-۴۳- تصاویر SEM در دوحالت SE و BSE از سطح سایش WC-FeAl -B در دمای ۶۰۰ درجه.....۱۰۶
۴-۴۴- آنالیز EDS از سطح سایش نمونه شامل ۵۰۰ppm بور در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد.....۱۰۷
۴-۴۵- آنالیز EDS از سطح سایش نمونه شامل ۷۵۰ppm بور در دمای محیط.....۱۰۸
۴-۴۶- آنالیز EDS از سطح سایش نمونه شامل ۷۵۰ppm بور در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد.....۱۰۹
۴-۴۷- کاهش وزن نمونه‌های WC-10wt%Co و WC-FeAl-500ppm B پس از سایش در دماهای مختلف.....۱۱۰
۴-۴۸- کاهش وزن دیسک‌های نمونه‌های WC-10wt%Co و WC-FeAl-500ppm B.....۱۱۱
۴-۴۹- ضریب اصطکاک میانگین نمونه‌های WC-10wt%Co و WC-FeAl-500ppm B ۱۱۲
۴-۵۰- درصد افزایش وزن نسبی نمونه‌های WC-10wt%Co و WC-FeAl-500ppm B ۱۱۲
۴-۵۱- تصویر AFM از سطح سایش نمونه WC-10wt%Co در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد ۱۱۴
۴-۵۲- تصویر AFM از سطح سایش نمونه WC-FeAl-500ppm B در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد.....۱۱۵

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

۲-۱- نرخ های خوردگی کاربیدهای سمانته شناورشده به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۲۲ درجه سانتی گراد..... ۱۶
۲-۲- خواص ترکیبات بین فلزی در دمای بالا..... ۲۰
۲-۳- نوع شکست در ترکیب FeAl..... ۲۳
۳-۱- برخی خواص لازم برای محاسبه چقرمگی شکست کامپوزیت..... ۶۰
۳-۲- شرایط آزمایش سایش در دمای محیط و دمای بالا..... ۶۲
۴-۱- علائم اختصاری و مشخصات کامپوزیت‌های استفاده شده در این تحقیق..... ۶۵
۴-۲- زبری متوسط سطح نمونه‌ها و دیسک مورد استفاده..... ۷۷
۴-۳- زبری سطح نمونه‌ها پس از سایش در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد..... ۱۱۵

چکیده

در این پژوهش رفتار سایشی کامپوزیت‌های WC-FeAl-B در دماهای بالا بررسی گردیده است. بر این اساس کامپوزیت تجاری WC-10wt%Co (H10F) ساخت شرکت سندویک سوئد با کامپوزیت‌های WC-40vol%Co و WC-40vol%FeAl با مقادیر مختلف بور از صفر تا ۱۰۰۰ppm سنتز شده به روش زینترینگ فاز مایع از نظر خواص مکانیکی و رفتار سایش دما بالا مقایسه شدند. این کامپوزیت‌ها از نظر فازهای تشکیل دهنده، ریزساختاری، سختی، چقرمگی شکست و رفتار سایشی مورد بررسی قرار گرفتند. آزمون‌های سایش به روش پین روی دیسک تحت بار ۴۰ نیوتن و طی مسافت ۱۰۰ متر و در شش دمای محیط، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شدند. سطوح سایش به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) مورد بررسی قرار گرفتند. پراش سنجی اشعه ایکس کامپوزیت‌های زمینه بین فلزی نشان می‌دهد که این کامپوزیت‌ها از اجزای اصلی WC و $Fe_{60}Al_{40}$ تشکیل شده‌اند و نسبت به کامپوزیت‌های با زمینه کبالت از مقدار کم‌تری فاز ترد W_2C تشکیل شده‌اند. نتایج سختی اندازه‌گیری شده از این کامپوزیت‌ها نشان دهنده سختی بالاتر کامپوزیت‌های WC-FeAl-B نسبت به کامپوزیت‌های WC-Co با میزان زمینه مشابه است. نتایج به دست آمده از چقرمگی شکست کامپوزیت‌ها نشان دهنده بهبود چقرمگی کامپوزیت‌های زمینه بین فلزی با افزودن بور است. نتایج سایشی به دست آمده مشخص می‌کند 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 کاربید تنگستن می‌باشد. این رفتار منجر به جدا شدن ذرات تقویت کننده از زمینه می‌شود. با حضور بور تا ppm ۵۰۰ در زمینه آلومیناید آهن، رفتار سایشی این کامپوزیت‌ها بهبود یافت و مکانیزم سایش در این کامپوزیت‌ها از حالت کندگی به خراشان تغییر پیدا کرد. بور با افزایش میزان چقرمگی این کامپوزیت‌ها و افزایش قابلیت شکل پذیری آلومیناید آهن و همچنین بهبود حلالیت کاربید تنگستن در آن منجر به بهبود پیوند فصل مشترک زمینه FeAl و ذرات کاربید تنگستن و بنابراین افزایش مقاومت سایشی این کامپوزیت‌ها شده است. بررسی سطوح سایش نشان داد که مکانیزم حاکم بر سایش در دمای محیط کامپوزیت‌های WC-10wt%Co تجاری وWC-40vol%FeAl خراشان بوده با افزایش دما تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد، مکانیزم همچنان خراشان بوده اما حالت آن شدیدتر شده است. در دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد، مکانیزم سایش بیش‌تر به چسبان تغییر پیدا کرده است. در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به دلیل اکسید شدن اندکی از زمینه مکانیزم چسبان کم‌تر است. در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد مکانیزم اکسیداسیون غالب شده است. کامپوزیت زمینه بین فلزی حاوی ۵۰۰ppm بور مقاومت سایشی بیش‌تری (به ویژه در دماهای بالا) نسبت به کامپوزیت WC-10wt%Co تجاری که دارای درصد فاز زمینه کم‌تر است، دارد. حضور بور در این کامپوزیت‌ها موجب دست‌یابی به مقاومت سایشی دمای محیط در حد کامپوزیت‌های تجاری شده است که دلیل آن سختی بالاتر زمینه آلومیناید آهن در مقایسه با کبالت است. بنابراین کامپوزیت‌های WC-FeAl-B مقاومت سایشی بالاتری در دمای پایین و رفتار بسیار مناسب‌تری در دماهای بالا نسبت به کامپوزیت‌های WC-Co تجاری دارا هستند و پتانسیل کاربرد در دماهای بالا را دارند.

کلمات کلیدی

کاربید تنگستن، FeAl-B، سرمت WC-Co، کامپوزیت WC- FeAl-B، سایش دما بالا

فصل اول

مقدمه

پیشرفت‌های علمی و فناوری به مواد ساختاری جدیدی که قادر به مقاومت در دماهای بالا و در سیال‌های مختلف باشند، نیاز دارند. در برخی کاربردها نبود این چنین موادی با خواص مورد نیاز از انجام پیشرفت‌های تازه جلوگیری می‌کند. بینش بر روی قواعد اصطکاک و سایش، مواد جدید با نقطه ذوب بالا برای مقاومت در دمای بالا برای عملکرد موثر اجزای متحرک و ثابت درگیر ماشین و برای ماشین کاری در دماها و فشارهای بالا مانند برش از اهمیت بالایی برخوردار است.

با ظهور تکنولوژی، تقاضا برای سیستم‌های سایشی دارای توانایی کار در شرایط سخت مانند حرکات نسبی زیاد، بارهای اعمالی زیاد، دماهای بالا و غیره افزایش یافته است. سایش در دماهای بالا مساله ای جدی در تعداد زیادی از کاربردهای صنعتی مانند تولید نیرو، حمل و نقل، تولید مواد، برینگ‌های دمای بالا، پیش برنده‌های برینگ، پمپ‌های آبی به کار رفته در تانک‌های باطله و غیره است. برای ارتقا دادن عملکرد مواد، تلاش‌هایی برای استفاده از مواد جایگزین یا پوشش‌ها با مقاومت اکسیداسیون بیش‌تر و خواص مکانیکی دمای بالای بهتر انجام شده است.

تماس لغزشی بین اجزای فلزی می‌تواند منجر به خسارات سایشی شدیدی شود. بنابراین مطالعات زیادی برای جلوگیری از خسارت این سایش‌ها انجام شده است. تحت شرایطی که دمای سطح نسبتا بالاست، (مانند گرمای اصطکاکی ناشی از بار و سرعت لغزش بالا یا دمای بالای محیط) اکسیداسیون فلزات می‌تواند این فرایندهای سایشی را تحت تاثیر قرار دهد، که باعث تغییرات مهمی در مجموع نرخ‌های سایشی می‌شود. مشخص شده که اکسیدها می‌توانند نرخ کاهش وزن را به وسیله کاهش یا حذف تماس فلز-فلز کاهش دهند که باعث تغییر حالت سایشی از شدید به آرام می‌شود. این اکسیدها ممکن است به صورت ذرات سایشی ریز ظاهر شوند. به هر حال در دماهای بالا، لایه

رویی درخشان و صاف[1]می‌تواند روی سطح ذرات فشرده تشکیل شود که منجر به کاهش سایش و نرخ سایشی می‌شود.

کاربیدهای سمانته (هاردمتال‌ها[2]) ترکیب یکنواختی از سختی بالا و چقرمگی شکست متوسط دارند و هم چنین مقاوم به سایش و حرارت هستند. بنابراین آن‌ها به طور گسترده در کاربردهای برش و سایش مانند ابزارهای برش، مته، تجهیزات معدن کاری، اجزای ولوهای طراحی شده برای انتقال محلول‌های ساینده، نازل جریان گاز، قالب‌های اکستروژن یا کشش و حلقه‌های آب بندی استفاده می‌شوند. کاربیدهای سمانته شامل یک فاز سخت (عمدتا کاربید تنگستن WC) و فاز بایندر (عمدتا کبالتCo) هستند. کاربید تنگستن استحکام و مقاومت سایشی لازم را برای آلیاژ فراهم می‌کند. در حالی که کبالت چقرمگی و داکتیلیته آلیاژ را موجب می‌شود. خواص مکانیکی کاربیدهای سمانته به ترکیب آن و اندازه ذره WC بستگی دارد. اندازه ذره کاربید تنگستن در WC/Co از ۰/۳ تا ۴۰ میکرومتر و مقدار کبالت از ۳ تا ۳۰ درصد وزنی متغیر است. کاربیدهای با اندازه ذره درشت اساسا در کاربردهای معدنی استفاده می‌شوند. 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. اخیرا ذرات فوق ریز WC کم‌تر از ۰/۱ میکرومتر توسعه پیدا کرده‌اند که در نتیجه آن رفتار سایشی بهبود می‌یابد.

کبالت به علت داشتن خواصی مانند ترکنندگی خوب ذرات کاربیدتنگستن و ایجاد پیوندی خوب با آن‌ها، بیش‌ترین زمینه مصرف شده در سرمت‌های پایه کاربیدتنگستن است. به هرحال هاردمتال‌ها با بایندر کبالت محدودیت‌هایی مانند مقاومت خوردگی و اکسیداسیون ضعیف، دانسیته بالا و مقاومت سایشی ضعیف بایندر دارند. 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.

خواص مکانیکی این مواد در دمای بالا افت زیادی می‌کند. خواص هاردمتال‌ها به ویژه سختی، استحکام و چقرمگی می‌تواند به وسیله اصلاح مناسب میکروساختار (مانند اندازه ذرات WC) و یا میکروشیمیایی (مانند ترکیب بایندر) بهبود یابد. توسعه هاردمتال‌ها با اندازه ذرات بسیار ریز به ویژه در مورد کامپوزیت‌های WC-Co با اندازه ذره WC در محدوده ۰/۴ تا ۱میکرومتر مورد بررسی‌های اخیر است.

در یافتن جایگزینی مناسب برای کبالت افزون بر ترکنندگی و حلالیت خوب با کاربیدتنگستن باید به سختی، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون نیز توجه شود. اخیرا 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 می توان فلزات Fe، Niو Coوآلیاژهای Ni-Fe، Co-Ni، Ni-Al، Ni-Cr-Mo، Ni-Cr-Mo-Al، Fe-Co، فولاد زنگ نزن و ترکیبات بین فلزی را نام برد.

---

[1] Glaze
[2] Hardmetals

ترکیبات بین فلزی ترکیباتی منظم از دو یا چند فلز با نسبت اتمی ساده هستند. ترکیبات بین فلزی مواد پیشرفته‌ای هستند که به علت داشتن خواص فیزیکی و مکانیکی ویژه‌ای مانند چگالی کم، خواص دمای بالا مانند نقطه ذوب و استحکام زیاد در دمای اتاق و حفظ استحکام در دمای بالا، مقاومت خمشی و خستگی و خزشی و سایشی خوب، مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون خوب اهمیت زیادی به عنوان مواد ساختاری پیدا کرده‌اند. در بین ترکیبات بین فلزی آلومینایدها و به ویژه آلومینایدهای آهن بیش‌ترین توجه را به خود معطوف کرده‌اند.

آلومینایدها آلیاژهای بین فلزی منظم با چگالی کم هستند که ساختار بلوری فوق شبکه با پیوند شیمیایی قوی دارند که باعث پایداری ساختاری خوب و مقاومت به تغییر شکل در دمای بالا می‌شود. آلومینایدها مقاومت عالی به خوردگی در محیط‌های اکسیدکننده، سولفیدکننده و در نمک مذاب دارند. این ترکیبات روی سطح خود یک لایه اکسیدآلومینیوم نفوذ ناپذیر تشکیل می‌دهند که مقاومت به خوردگی عالی را در محدوده وسیعی از محیط‌های خورنده در دماهای بالای ۱۰۰۰درجه سانتی گراد باعث می‌شود.

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.

FeAl به علت داشتن بیش‌ترین مقدار آلومینیوم شکل پذیری و چقرمگی مناسبی دارد. این میزان آلومینیوم مرز بین شکست درون دانه‌ای و مرزدانه‌ای است. با افزایش میزان آلومینیوم در FeAl، حالت شکست مرزدانه‌ای و برای آلومینیوم کم‌تر، شکست درون دانه‌ای خواهد بود. FeAl در محدوده گسترده‌ای از ترکیب شیمایی پایدار است که بهبود خواص مکانیکی این ترکیب از طریق آلیاژسازی امکان دارد.

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 می‌باشند. از عناصری که برای بهبود انعطاف پذیری FeAl استفاده می‌شود، بور می‌باشد. افزودن مقدار کمی بور در حد چندصد ppm باعث بهبود در انعطاف پذیری آن می‌شود.

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 وجود این‌که کامپوزیت‌های WC-FeAl دارای سختی بالاتر هستند ولی دارای تردی بالا نیز می‌باشند. استفاده از آلومینایدهای آهن- بور به عنوان بایندر در کامپوزیت‌های WC می‌تواند باعث بهبود چقرمگی و رفتار سایشی آن گردد. از طرف دیگر آلومینایدهای آهن در دماهای بالا، استحکام خود را حفظ می‌کنند. لذا انتظار می‌رود رفتار سایشی این کامپوزیت‌ها در دماهای بالا نسبت به کامپوزیت‌های تجاری WC مناسب‌تر باشد. بنابراین هدف از پروژه حاضر بررسی رفتار سایشی کامپوزیت WC-FeAl در دمای بالا در حضور بورمی‌باشد.

فصل دوم
مروری بر منابع

۲-۱-کاربیدهای سمانته

اهمیت و کاربرد کاربیدها سریعا در حال رشد است و این نه تنها از جنبه تجاری، بلکه بر اساس کاربردهای دیرگدازی و استحکامی آن‌ها از قبیل ابزارهای برشی و ساینده می‌باشد. کاربیدها دارای سختی و مقاومت بالا در برابر سایش بوده، و نقطه ذوب بالایی دارند و از لحاظ شیمیایی خنثی هستند. در عرض مدت کوتاهی این مواد توانستند به عنوان ابزار برش، ساینده‌ها، یاتاقان، اجزائ ماشین و غیره مورد استفاده قرار گیرند.

سرمت‌ها یا هاردمتال‌ها دسته ای از مواد سخت، دیرگداز و مقاوم به سایش‌اند که توسط روش متالورژی پودر ساخته می‌شوند. هاردمتال‌ها از ذرات کاربید فلزات انتقالی در زمینه‌ای فلزی از گروه آهن تشکیل می‌شوند. کاربیدهای سمانته معمولا بر پایه کاربیدتنگستن (WC) و برخی افزودنی‌ها مثل TiC، TaC و NbC هستند. کبالت به طور عمده درکاربیدهای سمانته به عنوان زمینه استفاده می‌شود، که علت آن ویژگی ترکنندگی خوب آن با کاربیدهاست.میزان کبالت در کامپوزیت‌های WC-Co برای ابزار برش کم‌تر از ده درصد وزنی و برای مواد مقاوم به سایش بیش‌تر از این میزان است و اندازه دانه کاربیدتنگستن در این مواد در گستره یک تا هفت میکرومتر است [۱].

خواص مواد کامپوزیتی به چند عامل مثل ویژگی فازها، اندازه و توزیع آن‌ها، انباشتگی ذرات کاربید، انرژی فصل مشترک و تنش بین فازها وابسته است. ذرات سرامیکی ترد بزرگ‌ترین بخش سازنده سرمت‌ها و فلز نرم کوچک‌ترین بخش سازنده آن‌ها هستند. به علت کنترل ریزساختار و چگالی بالای سرمت‌ها، از متالورژی پودر برای ساخت این مواد استفاده شده است. هم چنین برای ایجاد یک سرمت مطلوب، باید پیوندی قوی بین فلز و سرامیک وجود داشته باشد. برای ایجاد پیوندی قوی، داده‌های مربوط به استحکام بر حسب تابعی از فاکتورهای ساخت،

خواص ضروری مواد، سازگاری‌های شیمیایی و مکانیکی و ویژگی‌های نقاط فصل مشترک، مثل عیوب و مناطق بدون پیوند لازم است [۲].

بهبود خواص مواد زینتر شده با روش‌های مختلفی انجام می‌شود. در کامپوزیت‌های WC-Co از چند کاربید مثل TiC، TaC، Cr_2O_3، NbC و VC یا از کامپوزیت‌های با اندازه WCزیر میکرون استفاده می‌شود. بیش‌تر سازندگان هاردمتال‌ها، آلیاژهای زیر میکرون را با گستره میزان کبالت ۳ تا ۱۵ درصد وزنی با افزودنی‌های کاربید وانادیوم و کروم می‌سازند، اما کاربیدهای تانتالیوم و نایوبیوم انتخاب‌های بهتری هستند. میزان بهینه کبالت ۱۰ درصد وزنی است که ترکیبی با سختی ۱۶۰۰ ویکرز حاصل می‌شود. راه دیگر در ساخت کامپوزیت‌های WC-Co استفاده از روش‌های مختلف مثل پرس ایزواستاتیک گرم، سخت گردانی سطحی ترمومکانیکی و اعمال پوشش‌هایی مثل الماس و نیترید بور است [۳].

۲-۱-۱- تاریخچه

سنتز کاربید تنگستن در ۱۸۹۶ به وسیله دانشمند فرانسوی (مویسن[1])، انجام شد. تقاضا برای قالب‌های کشش فوق سخت برای سیم تنگستن مورد استفاده در لامپ‌های تنگستن، تحقیقات را برای جایگزینی الماس با یک ماده دیگر آغاز کرد. اتفاق مهم در تاریخ کاربیدهای سمانته زمانی بود که هاردمتال WC-Co در ۱۹۲۳ توسط شروتر[2] اختراع شد. توانایی WC به عنوان کاندید برای جایگزینی الماس تا قبل از اختراع شروتر برای مدت طولانی مشخص نشد. هم‌چنین مشخص شده مواد زینتر شده به وسیله پر شدن تخلخل‌هایشان با فلز مایع بهبود می‌یابند. ابتدا از نیکل بدین منظور استفاده شد. به هر حال رسوخ ناقص مذاب در ماده زینتر شده، باعث کیفیت ضعیف آن می‌شود. در پی اختراع شروتر (کامپوزیت WC-Co) تعدادی از آلیاژها مانند TaC-Ni و Mo_2C-TiC-Ni گسترش یافتند. حفظ سختی در دمای بالا و مقاومت به اکسیداسیون فوق العاده TiC، خواص جالبی برای استفاده از آن در برش سریع فولادها بودند. آلیاژسازی WC با TiC، Mo_2C و TaC در ۱۹۳۰ مورد توجه قرار گرفت [۴].

کاربرد پوشش‌های مقاوم به سایش روی زیر لایه هاردمتال، موضوع اصلی در حوزه ابزارهای برش در سال ۱۹۷۰ بود. جایی که پرس ایزواستاتیک داغ راه اصلی در حوزه ساخت ابزارهای معدنی و اجزای سایشی بود [۴].

گرایش به استفاده از مواد با دانه بندی ریزتر در صنعت هاردمتال، طی سال‌های اخیر رشد کرده است. پودرهای ریز زمانی که زینتر می‌شوند، به دلیل کاهش متوسط پویش آزاد اتمی، موادی با چقرمگی و استحکام بیش‌تر همراه با سختی و مقاومت به سایش بیش‌تر در مقایسه با پودرهای درشت‌تر، تولید می‌کنند. مقدار سختی بیش از ۲۲۰۰ویکرز(۶٪ وزنی Co) و استحکام خمشی بیش از ۵۰۰۰ مگاپاسکال(۱۵٪ وزنی Co) در کامپوزیت‌های WC-Co تجاری به دست آمده است. مشکلات استفاده از پودرهای ریز، حساسیت آن به شرایط فرایند و رشد ذره کاربید در طی زینتر شدن است. اما پودرهای ریز طی زینتر شدن فاز مایع فوق العاده واکنش‌گر هستند. خلوص پودر، پایداری شیمیایی و افزودن بازدارنده‌های رشد دانه مناسب، فاکتورهای مهمی در نگهداری ساختار ریز ماده زینتر

[1] Moisson
[2] Schroter

شده، هستند. پودرهای ریز می‌توانند به اندازه ذره نانومتری به وسیله تکنیک‌هایی مانند فرایند تبدیل اسپری و آسیاب گلوله‌ای طی دوره‌های زیاد زینتر شوند. پودرهای سرامیکی نانوکریستال در دما و فشار پایین‌تر می‌توانند به موادی با سختی، چقرمگی شکست و داکتیلیته بیش‌تر نسبت به پودرهای درشت‌تر تبدیل شوند. بهبود بیش‌تر در خواص کاربیدهای سمانته، با استفاده از پودرهای اولیه با اندازه نانو به دست می‌آید [۴].

۲-۱-۲- طبقه بندی کاربیدها

عنصر کربن با اغلب عناصر دیگر مثل اکسیژن، کلر و غیره ترکیب شده و ترکیباتی نظیر CCl_4 , CO_2 و غیره را تشکیل می‌دهند. اما کاربید تنها به ترکیباتی اطلاق می‌شود که در آن‌ها کربن با دیگر عناصری که از نظر الکترونگاتیویته برابر و یا کم‌تر از آن باشد ترکیب می‌شود.به این ترتیب بر اساس تعریف کاربید، کاربیدها به سه دسته طبقه بندی می‌شوند:

۱. کاربیدهای میانی یا واسط که از ترکیب کربن با فلزات انتقالی گروه VII , VIII تشکیل می‌شوند.

۲. کاربیدهای شبه نمکی که از ترکیب کربن با عناصر گروه های I , II , III به دست می‌آیند.

۳. کاربیدهای سمانته شامل یک خانواده از مواد سخت، مقاوم به سایش و مقاوم در مقابل درجه حرارت‌های بالا هستند که در آن‌ها ذرات کاربیدی سخت به وسیله یک فلز واسطه نرم به یکدیگر چسبانیده می‌شوند. تحقیقات جدی در راستای تولید کاربیدهای سمانته در آلمان در اوایل دهه ۱۹۲۰ توسط کارل شروتر انجام شد. وی‌منوکاربید تنگستن با ۱۳/۶ درصد کربن را به عنوان جزء سخت در اولین ثبت اختراع خود، به کار برد. نسبت تنگستن و کربن در این ترکیب به صورت موازنه شده بود. مقدار آهن به عنوان اتصال‌دهنده در این کاربید، حداکثر ۱۰ درصد بود. وی در فرآیندی که ابداع کرد، در مورد فشرده‌سازی و زینتز کردن در دماهای نزدیک به نقطه ذوب ماده اتصال دهنده بحث کرده بود. در دومین ثبت اختراع شروتر، فلز اتصال‌دهنده کبالت (تا ۲۰ درصد وزنی) بود که هنور هم مهم‌ترین عنصر در تولید کاربیدهای سمانته است. به علاوه، هنوز هم روشی که برای زینتر کردن توسط شروتر ابداع شد، به طور گسترده‌ای برای تولید کاربید سمانته به کار می‌رود. کاربیدهای سمانته ابتدا برای ساخت قالب‌های کشش جهت تولید سیم‌های تنگستن به کار رفته است. ضمنا به دلیل سختی و مقاوم به سایش زیاد این مواد نسبت به فولادهای ابزار تندبر برای ماشینکاری مناسب‌تر می‌باشند. امروزه از کاربیدهای سمانته برای برش‌کاری فلزات، برش سنگ‌های معدنی، سوراخک‌های سنگ‌ها، ابزار شکل دادن فلزات، قطعات مقاوم به سایش و نیز تولید مواد ریز ساینده استفاده می‌شود.

اولین کاربید ساخته شده، کاربید تنگستن WC با بایندر کبالت بوده است. کبالت به عنوان بهترین بایندر در تولید کاربیدهای سمانته شناخته شده است و پایه WC-CO در تولید بیش‌تر کاربیدهای سمانته به کار می‌رود. بیش از ۵۰٪کاربیدهای تولید شده در ساخت ابزارهای برشی به کار می‌رود. نوع پر مصرف دیگر کاربیدها، کاربید تیتانیم با بایندر نیکل است. کاربیدهای سمانته، به روش متالورژی پودر و تحت مراحل بسیار دقیق وکنترل شده تولید می‌گردد تا در نهایت، از ساختار کارائی مطلوب برخوردار باشند. سیستم طبقه بندی کاربیدهای تنگستن که امروزه بیش‌ترین مصرف را در صنعت ابزار برشی دارند بر طبق استانداردISO است [۵].