

## اثر افزودن نانوذرات SiC بر خواص مکانیکی و مقاومت به سایش کاربیدهای سماتنه فرآوری شده به روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای

نوع مقاله: علمی پژوهشی

مونا قیامانی، محمد معظمی گودرزی\*، ارغوان کاظمی

دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

\*moazami@srbiau.ac.ir

### اطلاعات مقاله:

دریافت: ۲ دی ۱۳۹۹

پذیرش: ۲۲ فروردین ۱۴۰۰

صفحه ۶۵ تا صفحه ۷۵

در دسترس در نشانی:

[www.ijcse.ir](http://www.ijcse.ir)

زبان نشریه: فارسی

شاپا چاپی: ۲۳۵۲-۲۳۲۲

شاپا الکترونیکی:

۳۰۰۳-۲۷۸۳

### کلیدواژه:

کاربیدهای سماتنه، نانوذرات

SiC، رشد دانه، چقرمگی

شکست، مکانیزم سایش.

20.1001.1.23222352.1400.10.0.17.0

کد DOR:

انتخاب مناسب از فازهای سخت، فاز بایندر فلزی و پارامترهای فرآیند، ترکیب گسترده‌ای از ریزساختار با خواص مکانیکی مختلف می‌تواند حاصل شود. این امر موجب کاربردهای گسترده کاربیدهای سماتنه به عنوان ابزار برش، تجهیزات مته‌زنی، قالب‌های مقاوم به سایش و آببندهای مکانیکی شده است [۱، ۲].

### ۱- مقدمه

کاربیدهای سماتنه و یا فلزات سخت یکی از گسترده‌ترین محصولات متالورژی پودر در سراسر جهان هستند. علت این موضوع، ترکیب بهینه سختی و چقرمگی آن‌ها نسبت به سایر مواد برش مانند الماس و فولادهای تندبر است. با یک



افزودن نانوذرات آلومینا گزارش شده است [۱۱]. همچنین گزارش شده است که نانویوسکرهای SiC [۱۲] و نانوذرات الماس [۱۳] نیز به عنوان فاز تقویت در کاربردهای سمانته موجب بهبود مقاومت به سایش شده‌اند.

نتایج تحقیقات مختلف نشان داده است که افزودن نانوذرات SiC موجب بهبود خواص مکانیکی و افزایش مقاومت به سایش زمینه‌های سرامیکی شده است [۱۴-۱۷]. با این وجود، تحقیقات زیادی درباره اثر نانوذرات SiC بر عملکرد سایشی کاربردهای سمانته بر پایه WC موجود نیست. لذا در این تحقیق به مطالعه اثر افزودن مقادیر مختلف نانوذرات SiC بر خواص مکانیکی و مقاومت به سایش کاربردهای سمانته WC-Co پرداخته می‌شود.

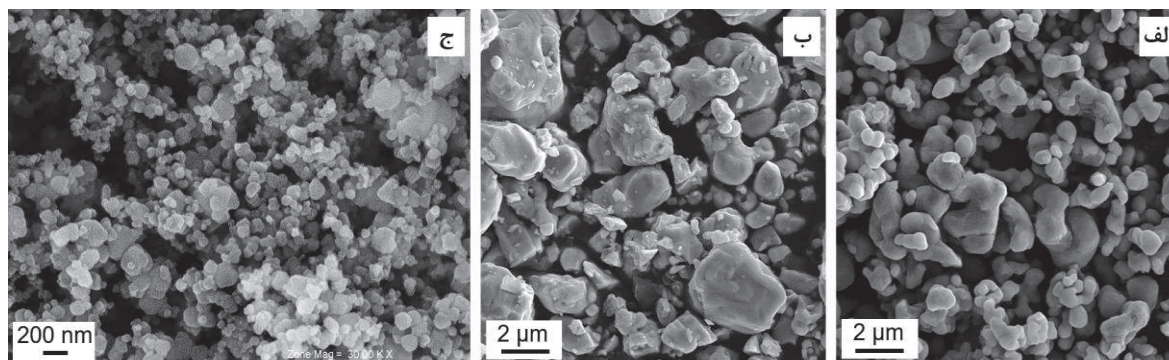
## ۲- فعالیت‌های تجربی

از پودرهای Co، WC و SiC با اندازه ذرات به ترتیب کوچک تر از ۲ میکرومتر، ۸ میکرومتر و ۲۰۰ نانومتر برای تولید کاربرد سمانته WC-10wt%Co و نانوکامپوزیت‌های حاوی ۱ تا ۴ درصد وزنی SiC استفاده شد. اندازه متوسط ذرات Co، WC و SiC به ترتیب ۰/۷ میکرومتر، ۳/۳ میکرومتر و ۸۰ نانومتر بود. مورفولوژی این پودرها در شکل ۱ نشان داده شده است.

ابتدا مخلوط‌های پودری در یک آسیای گلوله‌ای سیاره‌ای تحت آسیای تر درون اتانول قرار گرفتند. فرآیند آسیاکاری با استفاده از گلوله‌ها و ظروفی از جنس کاربرد سمانته با نسبت وزنی گلوله به پودر ۱۰ به ۱ و سرعت ۲۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۰ ساعت انجام شد. پس از آن پودرهای آسیا شده در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند.

سایش مواد به عنوان یک عامل انهدام مهم در قطعات متحرک مطرح است. تحقیقات مختلف نشان داده‌اند که مکانیزم‌های سایش کاربردهای سمانته شامل سایش نفوذی، ایجاد ترک در طول مسیر بایندر، ایجاد شیار و شکستن دانه های کاربرد می‌شوند [۳، ۴]. در این شرایط سختی و چقرمگی شکست ماده تعیین‌کننده میزان مقاومت در برابر سایش هستند [۵]. جهت افزایش سختی دو رهیافت کلی توسط محققین به کار گرفته شده است. یک راهکار موثر کاهش مقدار فاز بایندر است که البته با کاهش چقرمگی ماده همراه است. روش دوم شامل استفاده از ذرات WC با اندازه دانه‌های کوچک‌تر می‌شود. در این راستا در چند دهه گذشته، تاثیر اندازه دانه اولیه ذرات کاربرد و همچنین نقش ممانعت‌کننده‌های رشد دانه توسط محققین مختلف مطالعه شده است [۶].

یک رهیافت جدیدتر جهت بهبود مقاومت به سایش کاربردهای سمانته تقویت کردن آن‌ها با نانومواد است. به عنوان مثال نشان داده شده است که افزودن نانورق‌های گرافن موجب کاهش نرخ سایش کاربردهای سمانته در برابر سطوح ساینده از جنس فولاد AISI 1045 [۷]، آلومینا [۸] و نیتريد سیلیسیم [۹] می‌شود. در این تحقیقات از کاهش ضریب اصطکاک و افزایش سختی و چقرمگی شکست با افزودن گرافن به عنوان دلایل بهبود مقاومت به سایش یاد شده است. به طور مشابهی، افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانو آلومینا نیز با افزایش سختی، استحکام خمشی، چقرمگی شکست و مقاومت به سایش کاربرد سمانته WC-8Co همراه بوده است [۱۰]. در تحقیقی دیگر نیز بهبود عملکرد دندانه های مته‌های چکشی WC-Co در شرایط سایش ضربه‌ای با



شکل ۱- تصاویر SEM از پودرهای الف (Co، ب) WC و ج) SiC استفاده شده.

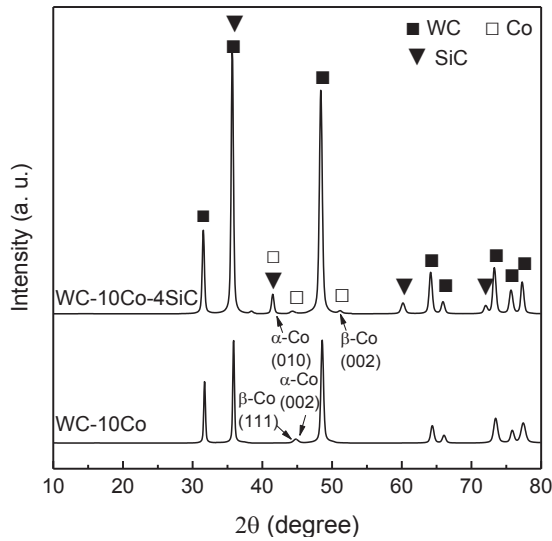
متر از نمونه‌های تفجوشی شده از روش ماشینکاری تخلیه الکتریکی استفاده شد. از دیسک‌هایی آلومینایی به قطر ۳ سانتی‌متر و سختی ۱۴۰۰ ویکرز به عنوان سطح مقابل استفاده شد. قطر مسیر لغزش ۲ سانتی‌متر و مسافت لغزشی کل ۱۰۰۰ متر بود. جرم ساییده شده با استفاده از یک ترازو الکتریکی با قدرت تفکیک ۰/۱ میلی‌گرم اندازه‌گیری و سپس با استفاده از آن نرخ سایش محاسبه شد.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- آنالیز فازی و ریزساختار

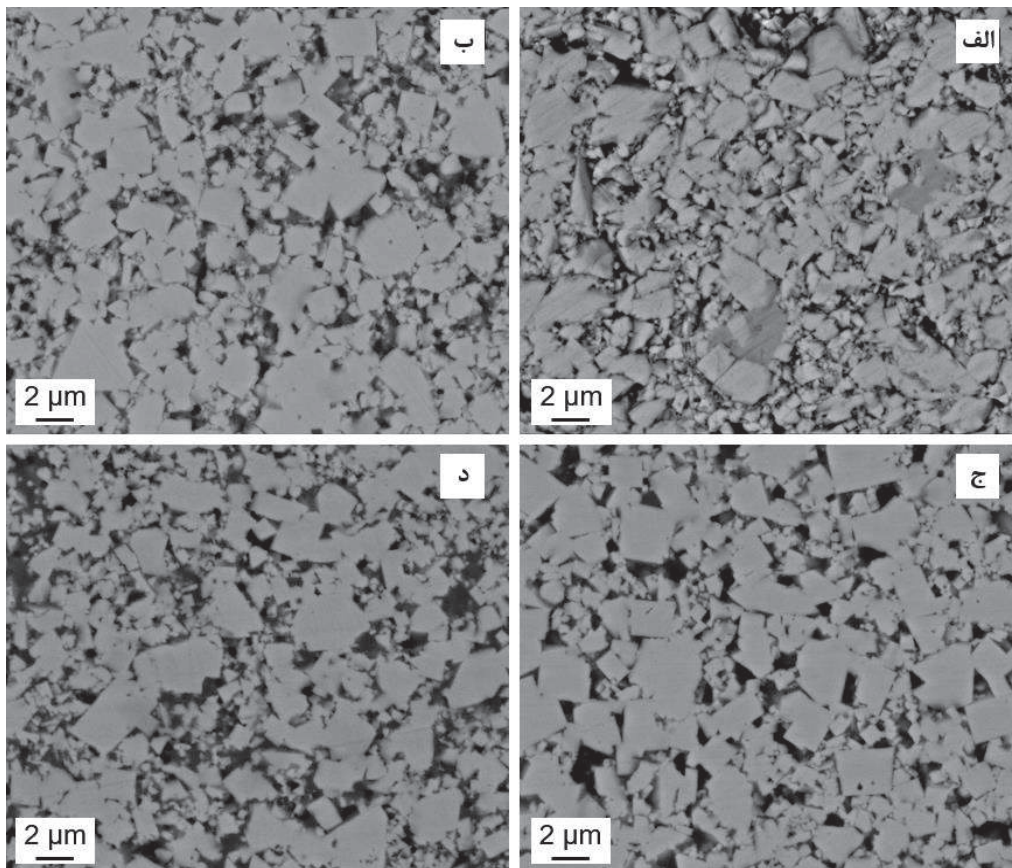
شکل ۲ الگوهای XRD نمونه‌های WC-10Co و WC-10Co-4SiC تفجوشی شده را نشان می‌دهد. مطابق انتظار، الگوی نمونه WC-10Co متشکل از پیک‌های WC و Co بود. فاز بایندر مخلوطی از  $\alpha$ -Co با ساختار hcp و  $\beta$ -Co با ساختار fcc تشخیص داده شد. مشاهده نشدن پیک‌های گرافیت و فاز  $\eta$ ( $W_3Co_3C$ ) نشان از کنترل مناسب محیط تفجوشی و شرایط آن دارد. الگوی نمونه‌های تقویت شده با ۱ و ۲ درصد وزنی SiC مشابه الگوی کاربید سماتنه WC-10Co بود و پیک‌های مشخصه SiC در آن‌ها نمایان نشد. علت این امر می‌تواند کم بودن مقدار SiC و یا ناپایداری در آن در حضور Co

منسجم‌سازی نهایی به روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار اعمالی ۵۰ مگاپاسکال به مدت ۱۰ دقیقه در خلا ۵ پاسکال انجام شد. نمونه‌های تولید شده دیسک‌هایی به قطر ۱۵ میلی‌متر و ارتفاع تقریبی ۱۱ میلی‌متر بودند. از روش پراش پرتوهای X (XRD, Philips PW1730) با تابش Cu ka برای آنالیز فازی مواد تفجوشی شده استفاده شد. ریزساختار و سطوح سایش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, FEI ESEM Quanta 200) مجهز به طیف‌سنج پراکندگی انرژی (EDS) مطالعه شد. متوسط اندازه دانه‌های WC به روش تقاطع خطی اندازه‌گیری شد. به این منظور، از دوایر رسم شده در تصاویر با بزرگنمایی ۵۰۰۰ برابر برای شمارش دانه‌ها (بیش‌تر از ۱۰۰ عدد) استفاده شد. سختی نمونه‌های تولید شده نیز به روش ویکرز با بار اعمالی ۲۹۴ نیوتن اندازه‌گیری شد. عدد سختی گزارش شده برای هر نمونه متوسط ۵ مرتبه سختی‌سنجی بوده است. چقرمگی شکست از آزمون ترک فروروی ویکرز و با استفاده از معادله Shetty [۱۸] محاسبه شد. آزمون سایش به روش پین بر دیسک در دمای اتاق و با سرعت لغزشی ۰/۵ متر بر ثانیه و تحت بار عمودی ۳۰ نیوتن انجام شد. به منظور تولید پین‌هایی به قطر ۵ میلی

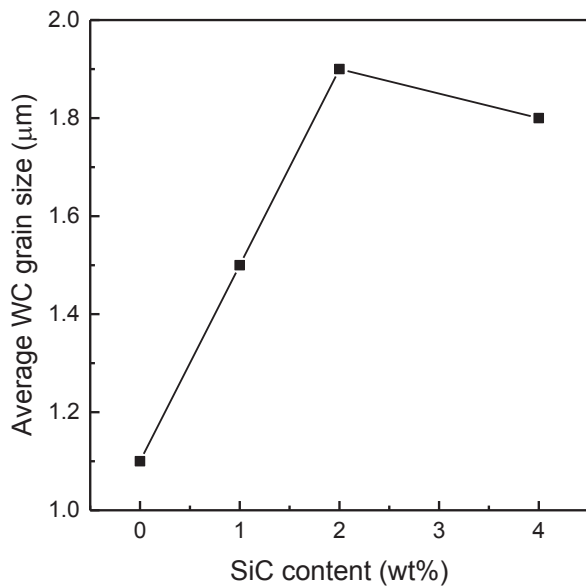


شکل ۲- الگوهای XRD نمونه‌های WC-10Co و WC-10Co-4SiC.

در حین تفجوشی باشد [۱۹]. با این وجود، پیک‌های مشخصه SiC به همراه پیک‌های WC و Co در الگوی XRD نمونه حاوی ۴ درصد وزنی SiC مشاهده شدند. علاوه بر این، نتایج XRD شواهدی از تشکیل محصولات واکنش SiC با Co مانند سیلیساید کبالت و کربن آزاد را آشکار ساخت. این نتایج نشان می‌دهد که در نمونه حاوی ۴ درصد وزنی SiC حداقل کسری از SiC اضافه شده به صورت پایدار پس از تفجوشی در نمونه باقی مانده است. تفاوت موجود در شدت پیک‌های Co می‌تواند ناشی از انحلال جزئی SiC در فاز Co باشد. شکل ۳ ریزساختار کاربرد سمانته WC-10Co و نانوکامپوزیت‌های حاوی مقدار مختلف از نانوذرات SiC را نشان می‌دهد.



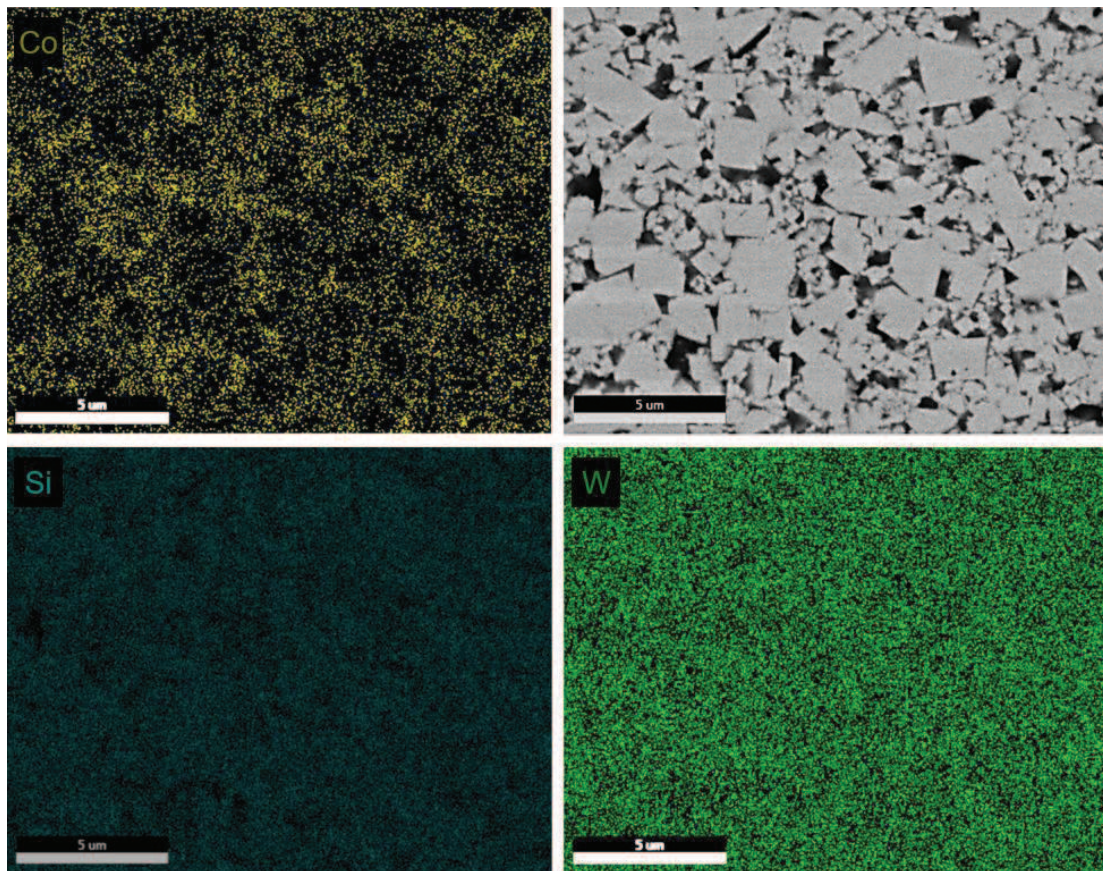
شکل ۳- ریزساختار کاربردهای سمانته حاوی الف) صفر، ب) ۱، ج) ۲ و د) ۴ درصد وزنی نانوذرات SiC.



شکل ۴- تغییرات اندازه دانه‌های WC با مقدار نانوذرات SiC.

همگی ریزساختارها متشکل از یک اسکلت از ذرات WC درون فاز زمینه پیوسته Co هستند. مهم‌ترین تفاوت مشاهده شده در اندازه دانه‌های WC است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است با افزایش مقدار SiC از صفر به ۲ درصد وزنی اندازه متوسط دانه‌های WC از ۱/۱ به ۱/۹ میکرومتر افزایش یافت. این نتایج با گزارش‌های محققین دیگر در مورد رشد دانه در کامپوزیت‌های پایه WC با افزودن SiC مطابقت دارد [۲۰-۲۲].

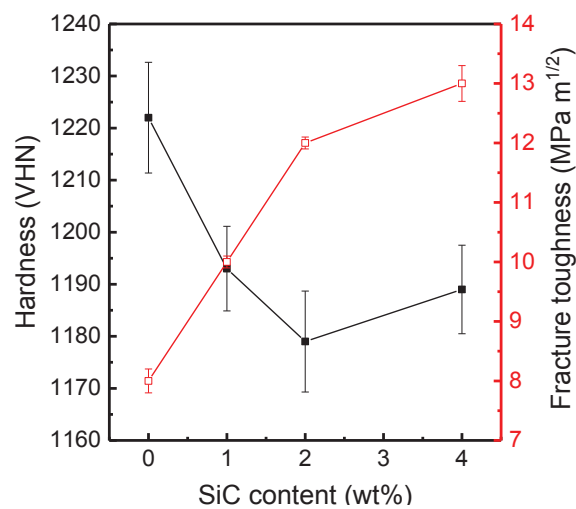
به منظور نشان دادن نحوه توزیع نانوذرات SiC، نقشه عنصری EDS نانوکامپوزیت حاوی ۲ درصد وزنی نانوذرات SiC در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- نقشه توزیع عنصری EDS در نانوکامپوزیت WC-10Co-2SiC.



در حضور نانوذرات تقویت کننده به اثر قفل کنندگی آنها نسبت داده می شود. بر اساس این اثر، یک فاکتور شدت تنش بیش تری برای اشاعه ترک اطراف نانوذرات مورد نیاز است [۲۳]. علاوه بر این، استحکام بخشی محلول جامد فاز بایندر Co به وسیله سیلیسیم نیز در بهبود چقرمگی با افزایش کسر وزنی SiC موثر است.



شکل ۶- تغییرات سختی و چقرمگی شکست با مقدار نانوذرات SiC

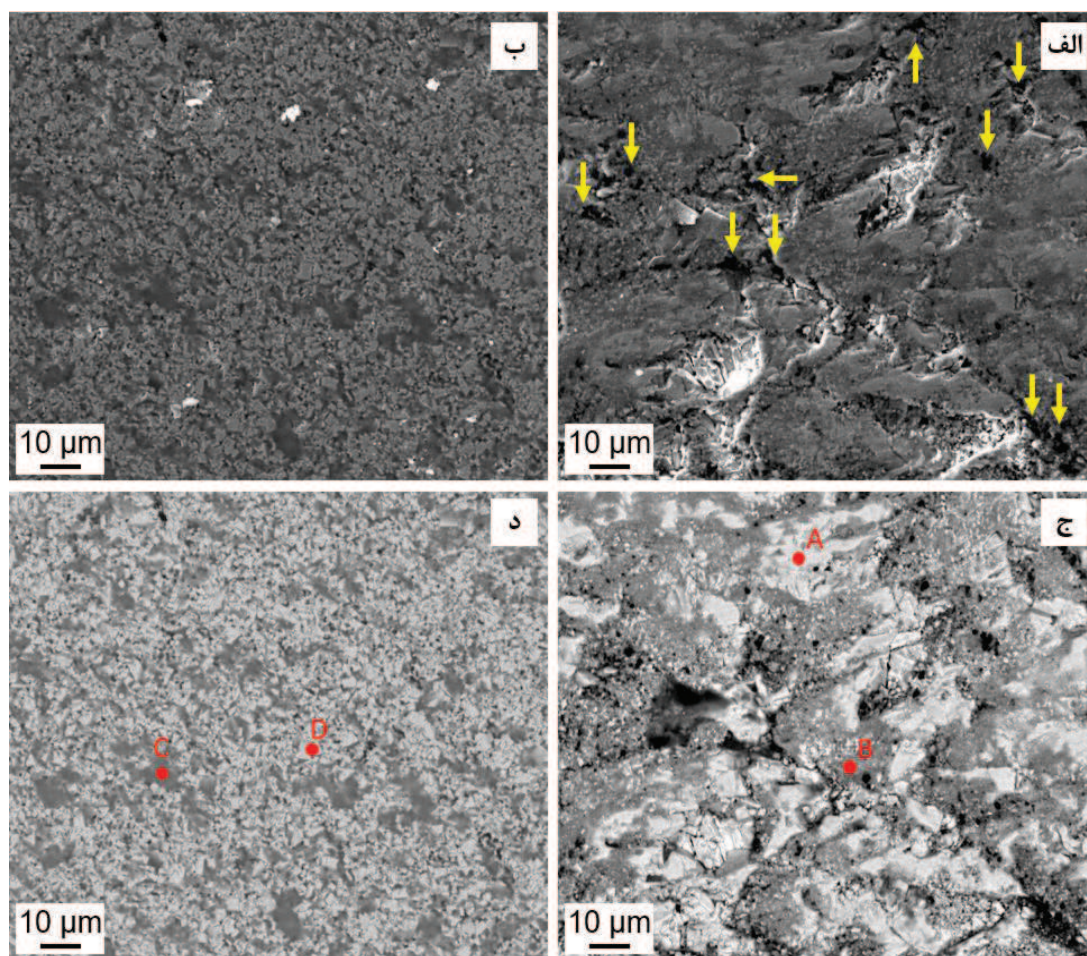
### ۳-۳- رفتار سایشی

در شکل ۷ سطوح ساییده شده نمونه های WC-10Co و WC-10Co-2SiC نشان داده شده اند. نتایج آنالیز EDS از نقاط مشخص شده در سطوح سایش نیز در جدول ۱ آورده شده است. مشخصه بارز سطح سایش نمونه بدون SiC (شکل ۷- الف و ج) سیلان پلاستیک فاز بایندر است. اکستروژن فاز انعطاف پذیر کبالت به اطراف در اثر نیروی برشی وارد شده از طرف سطح مقابل موجب ایجاد ترک هایی در سطح شده است. نتایج آنالیز EDS بیانگر مقادیر قابل توجهی از Co (به خصوص در نقطه A) در سطح سایش است.

همانطور که مشاهده می شود عنصر Si تقریباً در تمامی قسمت های ریزساختار پدیدار شده است. این امر نشان از حل شدن SiC و توزیع آن در فاز زمینه Co در حین تفجوشی دارد. علاوه بر این، موقعیت اتم های Si با W تطابق دارد. لذا می توان نتیجه گرفت که نانوذرات SiC در فرآیند رسوب مجدد پس از انحلال نیز شرکت داشته و در مرزهای WC/WC و WC/Co توزیع شده اند. این فرآیند موجب افزایش اندازه دانه های WC با افزودن ذرات SiC شده است.

### ۳-۲- خواص مکانیکی

تغییرات سختی و چقرمگی شکست با مقدار نانوذرات SiC در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، سختی با افزایش مقدار نانوذرات تا ۲ درصد وزنی کاهش یافت. علت این امر حل شدن ذرات SiC به عنوان یک فاز سخت و همچنین درشت شدن دانه های WC است. به طور کلی سختی کاربیدهای سمانته تابعی از درصد وزنی فاز زمینه و اندازه دانه های WC است [۲]. از آنجایی که در تحقیق حاضر ذرات SiC جایگزین ذرات WC شده اند، انحلال آنها در حین تفجوشی موجب کاهش کسر وزنی کلی ذرات سرامیکی سخت در مقایسه با نمونه بدون SiC می شود. این امر کاهش سختی را به همراه دارد. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می شود، نمونه حاوی ۲ درصد وزنی SiC دارای بزرگترین اندازه دانه است. لذا بر اساس یک رابطه هال- پیچ مانند، سختی کم تر نمونه WC-10Co-2SiC ناشی از اندازه دانه های بزرگ آن است. علاوه بر این، شکل ۶ نشان می دهد که چقرمگی شکست با افزایش مقدار نانو ذرات SiC به طور پیوسته افزایش یافت. افزایش چقرمگی



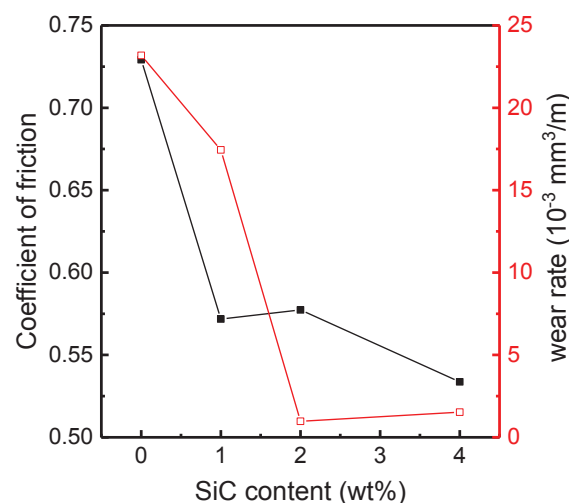
شکل ۷- تصاویر SEM از سطح سایش نمونه‌های WC-10Co (الف و ج) و WC-10Co-2SiC (ب و د). تصاویر ردیف بالا با استفاده از الکترون‌های ثانویه و تصاویر ردیف پایین با استفاده از الکترون‌های برگشتی تهیه شده‌اند. پیکان‌ها نشان‌دهنده بیرون کشیده شدن دانه‌های WC هستند.

جدول ۱- نتایج آنالیز EDS نقاط مشخص شده در سطوح سایش شکل ۷

درصد وزنی						نقطه
W	Co	Si	Al	O	C	
۷۹/۱۹	۱۵/۵۵	-	۲/۱۷	۰/۵۷	۲/۵۱	A
۵۸/۳۷	۱۱/۸۶	-	۱۴/۹۶	۱۴/۴۸	۰/۳۳	B
۶۶/۰۳	۵/۸۰	۲/۳۵	۱۰/۷۱	۱۵/۰۶	۰/۰۵	C
۸۸/۹۶	۲/۱۸	۰/۸۲	۲/۱۴	۵/۴۵	۰/۴۶	D



نانوذرات SiC از ۰/۷۳ به حداقل مقدار خود یعنی ۰/۵۳ کاهش یافت. علت بالا بودن ضریب اصطکاک کاربرد سمانته بدون SiC ناهموار بودن سطح سایش به دلیل تغییر شکل پلاستیک شدید است. نانوذرات SiC خصوصاً در مقادیر بالاتر می‌توانند نقاط در تماس با یکدیگر را به طور موضعی از یکدیگر جدا ساخته و در نتیجه موجب کاهش سطح واقعی تماس و اصطکاک میان سطوح شوند [۲۴]. از سوی دیگر این ذرات با آزاد شدن تدریجی و قرار گرفتن بین سطوح در تماس با هم می‌توانند حالت اصطکاک را از نوع لغزشی به غلتشی تغییر داده و موجب کاهش ضریب اصطکاک شوند [۲۵]. علاوه بر این، افزایش چقرمگی شکست هم می‌تواند دلیلی بر کاهش ضریب اصطکاک با افزایش مقدار نانوذرات SiC باشد. از آنجایی که شکست تامین‌کننده یک مکانیزم اضافه برای اتلاف انرژی حرارتی است، معمولاً ضریب اصطکاک سرامیک‌ها با افزایش چقرمگی شکست کاهش می‌یابد [۲۶].



شکل ۸- تغییرات ضریب اصطکاک و نرخ سایش با مقدار نانوذرات SiC.

این مشاهده موید سیلان پلاستیک فاز Co از فضای میان دانه‌های WC به روی سطح سایش است. شناسایی مقادیر قابل توجهی از عناصر Al و O در نقطه B از سطح نمونه فاقد SiC می‌تواند ناشی از اثر خراشان ذرات WC بر روی سطح آلومینایی مقابل باشد. علاوه بر این، حضور حفرات بزرگ در سطح سایش این ماده نشان از بیرون کشیدگی وسیع دانه‌های WC دارد. سطح ساییده شده نمونه حاوی ۲ درصد وزنی SiC (شکل ۷- ب و د) بسیار صاف‌تر و شامل تغییر شکل پلاستیک کم‌تری است. در این نمونه بافت سطح در اثر سایش تغییر نکرده و همچنان توزیع ذرات WC درون بایندر Co مشاهده می‌شود. علت این امر استحکام بخشی محلول جامد فاز زمینه ناشی از حل شدن نسبی ذرات SiC در بایندر است. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود فاز بایندر نمونه حاوی نانوذرات SiC (نقطه C) حاوی اتم‌های Si است. مقدار Co نمایان شده نیز کم‌تر از ۱۰ درصد وزنی است که علت آن انتقال اتم‌های سطح ساییده مقابل به سطح نمونه در اثر لغزش است. با این وجود، سطح ساییده شده این نمونه شامل حفرات کوچکی است که نتیجه کنده شده خفیف ذرات WC است. مقاومت بیش‌تر دانه‌های WC در برابر بیرون کشیده شدن در نمونه نانوکامپوزیتی به بزرگ‌تر بودن دانه‌های آن بر می‌گردد. ذرات WC بزرگ‌تر تا عمق بیش‌تری در درون فاز زمینه فرو می‌روند که موجب افزایش نیروی مورد نیاز برای بیرون کشیدن آن‌ها می‌شود.

شکل ۸ تغییرات ضریب اصطکاک و نرخ سایش با درصد وزنی SiC را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد ضریب اصطکاک نمونه WC-10Co با افزودن ۴ درصد وزنی



## ۵- مراجع

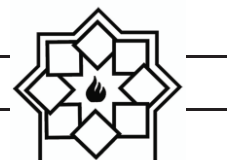
- [1] K. Bonny, P. De Baets, Y. Perez, J. Vleugels, B. Lauwers, Friction and wear characteristics of WC-Co cemented carbides in dry reciprocating sliding contact, *Wear*, 268 (2010) 1504-1517.
- [2] J. García, V. Collado Ciprés, A. Blomqvist, B. Kaplan, Cemented carbide microstructures: a review, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 80 (2019) 40-68.
- [3] W. Ji, Y. Yuan, B. Zou, S. Dai, H. Zhang, Friction and wear behaviour of cemented carbide tool materials sliding against  $Al_2O_3$  and  $Si_3N_4$  ceramics under dry condition, *Ceram. Int.*, 44 (2018) 17486-17491.
- [4] K. Jia, T.E. Fischer, Abrasion resistance of nanostructured and conventional cemented carbides, *Wear*, 200 (1996) 206-214.
- [5] G.W. Stachowiak, *Wear - Materials, Mechanisms and Practice*, 1st ed., John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2005.
- [6] J. Pötschke, V. Richter, T. Gestrich, T. Säuberlich, J.A. Meese-Marktscheffel, Grain growth inhibition in ultrafine hardmetals, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 66 (2017) 95-104.
- [7] J. Sun, J. Zhao, M. Chen, Y. Zhou, X. Ni, Z. Li, F. Gong, Multilayer graphene reinforced functionally graded tungsten carbide nano-composites, *Mater. Des.*, 134 (2017) 171-180.
- [8] T. Hezaveh, M. Moazami-Goudarzi, A. Kazemi, Effects of GNP on the mechanical properties and sliding wear of WC-10wt%Co cemented carbide, *Ceram. Int.*, 47 (2021) 18020-18029.
- [9] M. Li, Z. Song, M. Gong, D. Mo, L. Wang, J. Dusza, C. Zhang, WC+Co+graphene platelet composites with improved mechanical, tribological and thermal properties, *Ceram. Int.*, (2021).
- [10] W. Su, J. Zou, L. Sun, Effects of nano-alumina on mechanical properties and wear resistance of WC-8Co cemented

همانطور که مشاهده می‌شود، نرخ سایش نیز با افزودن نانوذرات SiC به شدت کاهش یافت. نرخ سایش با افزودن ۲ درصد وزنی SiC از ۲۳ به ۱ میلی‌متر مکعب بر متر کاهش یافت و به کم‌ترین مقدار خود رسید. این افزایش مقاومت به سایش در شرایطی به دست آمد که سختی با افزایش مقدار SiC کاهش یافته بود. علت این امر بهبود چقرمگی شکست و کاهش ضریب اصطکاک با افزایش مقدار نانوذرات SiC است.

این نتایج نشان می‌دهند که نمونه حاوی ۲ درصد وزنی SiC به دلیل درشت‌تر بودن ذرات WC بیش‌ترین مقاومت در برابر بیرون کشیدگی و در نتیجه بیش‌ترین مقاومت به سایش را از خود نشان داد.

## ۴- نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که اگرچه افزودن نانوذرات SiC موجب کاهش سختی کاربید سمانته WC-10Co شد، با این حال مقاومت به سایش افزایش یافت. درشت‌دانگی حاصل از افزودن نانوذرات SiC ضمن افزایش مقاومت به بیرون کشیده شدن ذرات WC موجب کاهش نرخ سایش شد. علاوه بر این، استحکام بخشی زمینه Co به وسیله اتم‌های سیلیسیم ناشی از انحلال نسبی ذرات SiC موجب کاهش سیلان پلاستیک فاز بایندر در نمونه‌های نانوکامپوزیتی شد. افزایش پیوسته چقرمگی شکست با مقدار نانوذرات SiC نیز در بهبود مقاومت به سایش موثر بود. در نهایت کاهش ضریب اصطکاک به علت تغییر حالت اصطکاک از اصطکاک لغزشی به غلتشی با اضافه شدن نانوذرات SiC به عنوان عاملی تاثیرگذار در بهبود مقاومت به سایش نمونه های نانوکامپوزیتی ارزیابی شد.



- 1873-1882.
- [19] Y. Pan, J.L. Baptista, Chemical Instability of Silicon Carbide in the Presence of Transition Metals, *J. Am. Ceram. Soc.*, 79 (1996) 2017-2026.
- [20] M.T. Albdiry, B.F. Yousif, Effect of SiC addition on mechanical and wear characteristics of WC-32(W-Ti)C-6Co cemented carbides, *International Journal of Precision Technology*, 4 (2014) 110-121.
- [21] A. Nino, Y. Izu, T. Sekine, S. Sugiyama, H. Taimatsu, Effects of ZrC and SiC addition on the microstructures and mechanical properties of binderless WC, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 69 (2017) 259-265.
- [22] H. Taimatsu, S. Sugiyama, M. Komatsu, Effects of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> and V<sub>8</sub>C<sub>7</sub> on the Microstructure and Mechanical Properties of WC-SiC Whisker Ceramics, *Mater. Trans.*, 50 (2009) 2435-2440.
- [23] A.K. Soh, D.-N. Fang, Z.-X. Dong, Analysis of Toughening Mechanisms of ZrO<sub>2</sub>/Nano-SiC Ceramic Composites, *J. Compos. Mater.*, 38 (2004) 227-241.
- [24] H. Ghaednia, R.L. Jackson, The Effect of Nanoparticles on the Real Area of Contact, Friction, and Wear, *Journal of Tribology*, 135 (2013) 041603.
- [25] I. Hutchings, P. Shipway, 6 - Wear by hard particles, in: I. Hutchings, P. Shipway (Eds.) *Tribology (Second Edition)*, Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 165-236.
- [26] P. Menezes, M. Nosonovsky, S.P. Ingole, S.V. Kailas, M.R. Lovell, *Tribology for Scientists and Engineers: From Basics to Advanced Concepts*, 1st ed., Springer, New York, 2013.
- carbide by spark plasma sintering, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 92 (2020) 105337.
- [11] Z. Huang, G. Li, Investigation on impact toughness and wear resistance of nanocomposite Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/WC-Co hammer bit teeth, *Engineering Failure Analysis*, 80 (2017) 272-277.
- [12] X. Ren, Z. Peng, Y. Peng, C. Wang, Z. Fu, L. Qi, H. Miao, Ultrafine binderless WC-based cemented carbides with varied amounts of AlN nano-powder fabricated by spark plasma sintering, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, 41 (2013) 308-314.
- [13] A. Nieto, L. Jiang, J. Kim, D.-E. Kim, J.M. Schoenung, Synthesis and Multi Scale Tribological Behavior of WC-Co/Nanodiamond Nanocomposites, *Scientific Reports*, 7 (2017) 7060.
- [14] R.W. Davidge, R.J. Brook, F. Cambier, M. Poorteman, A. Leriche, D. O'Sullivan, S. Hampshire, T. Kennedy, Fabrication, properties, and modeling of engineeringceramics reinforced with nanoparticles of silicon carbide, *Br. Ceram. Trans.*, 96 (1997) 121-127.
- [15] M. Parchovianský, J. Balko, P. Švančárek, J. Sedláček, J. Dusza, F. Lofaj, D. Galusek, Mechanical properties and sliding wear behaviour of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC nanocomposites with 3–20 vol% SiC, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 37 (2017) 4297-4306.
- [16] H. Porwal, R. Saggarr, 6.6 Ceramic Matrix Nanocomposites, in: P.W.R. Beaumont, C.H. Zweben (Eds.) *Comprehensive Composite Materials II*, Elsevier, Oxford, 2018, pp. 138-161.
- [17] H. Wu, 10 - Understanding residual stresses and fracture toughness in ceramic nanocomposites, in: M.M. Shokrieh (Ed.) *Residual Stresses in Composite Materials*, Woodhead Publishing, Cambridge, 2014, pp. 256-292.
- [18] D.K. Shetty, I.G. Wright, P.N. Mincer, A.H. Clauer, Indentation fracture of WC-Co cermets, *J. Mater. Sci.*, 20 (1985)

## **Effect of SiC Nanoparticles Addition on Mechanical Properties and Wear Resistance of Cemented Carbides Fabricated by Spark Plasma Sintering**

**Mona Ghayem Amani, Mohammad Moazami-Goudarzi\*, Arghavan Kazemi**

**Department of Materials Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran**

\* moazami@srbiau.ac.ir

**Abstract:** WC-10Co cemented carbides containing 1 to 4 wt% SiC nanoparticles were prepared by spark plasma sintering. The effects of SiC content on microstructure, mechanical properties and wear resistance of the sintered materials were studied. Microstructural studies showed that SiC addition resulted in WC grain coarsening. In addition, the hardness decreased with increasing SiC content. However, the fracture toughness and wear resistance significantly improved with SiC incorporation. The lowest wear rate ( $1 \text{ mm}^3/\text{m}$ ) was attained for the nanocomposite reinforced with 2 wt% SiC. In the unreinforced cemented carbide, the extensive plastic flow of the Co binder and WC grain pullout led to a high wear rate ( $23 \text{ mm}^3/\text{m}$ ). In the nanocomposite samples, solid solution strengthening of the Co binder by partial dissolution of SiC particles decreased the degree of plastic deformation on the worn surfaces. In addition, coarser WC particles within the nanocomposite samples exhibited a higher resistance against pullout resulting in enhanced wear resistance.

**Keywords:** Cemented carbides, SiC nanoparticles, Grain growth, Fracture toughness, Wear mechanism.