

# بررسی تأثیر سیکل عملیات حرارتی و ترکیب شیمیایی بر استحکام گسیختگی عرضی و ریزساختار بهینه هاردمتال های WC-Co

بهزاد طولمی نژاد<sup>۱</sup>، حسین عربی<sup>۲</sup>، محمد شاهمیری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استاد، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استادیار، دانشگاه علم و صنعت ایران

Btolaminejad@iust.ac.ir

## چکیده

در این پژوهش تأثیر میزان درصد بایندر کبالت و عملیات حرارتی بر ریزساختار و خواص مکانیکی سرمتهای WC-Co مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور از پودرهای کاربید تنگستن با سه ترکیب WC-6Co، WC-10Co و WC-14Co استفاده گردید. عملیات حرارتی زینترینگ نیز در دماهای ۱۳۵۰، ۱۴۰۰ و ۱۴۵۰°C انجام شد. جهت بررسی ریزساختار نمونه‌ها، میکروسکپ الکترونی روبشی و اندازه‌گیری اشباع مغناطیسی به کار گرفته شد. همچنین به منظور بررسی خواص مکانیکی، سختی سنجی و استحکام گسیختگی عرضی اندازه‌گیری گردید.

## واژه‌های کلیدی

سرمته، کاربید تنگستن، کبالت، سختی، استحکام گسیختگی عرضی

## ۱- مقدمه

برگرفته شده‌اند. کاربید تنگستن به علت سختی بالا دارای مقاومت به سایش خوبی است. همچنین ضریب انبساط حرارتی پایین و ترشوندگی خوبی با فلزات مذاب دارد. به علت تردی کاربید تنگستن جهت بهبود چقرمگی، آن را با یک فاز نرمتر نظیر کبالت ترکیب می‌کنند. در اغلب موارد کبالت به عنوان فاز بایندر فلزی استفاده می‌شود، زیرا دارای ترکنندگی عالی و چسبندگی و خواص مکانیکی مناسب است [۳ و ۵].

سرمتهای WC-Co که به روش متالورژی پودر ساخته می‌شوند به دلیل دارا بودن دو خاصیت سختی و چقرمگی در کنار هم، دارای کاربرد وسیعی به عنوان ابزار برشی در صنعت هستند. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی به منظور بهبود خواص مکانیکی و سایشی این سیستم با استفاده از اندازه ذرات مختلف صورت گرفته است [۲ و ۱]. سرمتهای WC-Co از یک فاز سخت کاربیدی WC تشکیل شده که توسط بایندر کبالت در

جدول (۱): مشخصات پودرهای خام مورد استفاده

نام پودر	اندازه ذرات ( $\mu\text{m}$ )	F.S.S.S. ( $\mu\text{m}$ )	%C (Min)	%C (Max)	%O (Max)	%Ni (Max)	%Co (Max)
WC	0.4	0.3-0.6	6.04	6.11	0.3	0.01	0.02
Co	6.3±0.2	6.1-6.5	-	0.1	0.1	0.01	99.5

جدول (۲): خصوصیات فیزیکی حاصل از بررسی ترکیبات WC-Co تحت دماهای مختلف عملیات حرارتی

نمونه	% WC	% Co	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	دانسیته ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	اشباع مغناطیسی ( $0.1\mu\text{Tm}^3/\text{Kg}$ )
۱	۹۴	۶	۱۳۵۰	۱۵,۱۳	۱۷۸
۲	۹۴	۶	۱۴۰۰	۱۵,۳۷	۱۸۵
۳	۹۴	۶	۱۴۵۰	۱۵,۵۹	۱۹۶
۴	۹۰	۱۰	۱۳۵۰	۱۴,۹۶	۱۹۸
۵	۹۰	۱۰	۱۴۰۰	۱۵,۱۷	۲۰۲
۶	۹۰	۱۰	۱۴۵۰	۱۵,۳۳	۲۰۶
۷	۸۶	۱۴	۱۳۵۰	۱۴,۷۸	۲۰۴
۸	۸۶	۱۴	۱۴۰۰	۱۴,۹۴	۲۰۹
۹	۸۶	۱۴	۱۴۵۰	۱۵,۱۳	۲۱۶

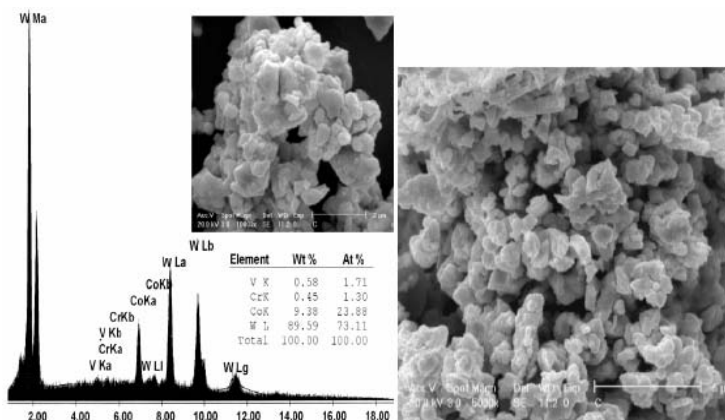
الکتریکی تحت اتمسفر آرگون در سه دمای ۱۳۵۰، ۱۴۰۰ و  $1450^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۰min زینتر شدند. نمونه‌های زینتر شده سنگ‌زنی شده و سپس توسط سوسپانسیون از ذرات الماس  $3\mu\text{m}$  به صورت مکانیکی پولیش شدند. جهت تعیین دانسیته نمونه‌ها از روش استاندارد ISO 3369 استفاده گردید. اشباع مغناطیسی نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM A342 صورت گرفت. سپس سختی ویکرز و استحکام گسیختگی عرضی (TRS) به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM B294 و ISO 3327 تعیین شد. همچنین جهت بررسی ریزساختار نمونه‌ها از دستگاه SEM مدل Cambridge استفاده گردید.

خصوصیات فیزیکی حاصل از بررسی ترکیب‌های WC-Co با درصد‌های مختلف کبالت در جدول (۲) ذکر شده است. مطابق این جدول مشاهده می‌شود که اشباع مغناطیسی با افزایش میزان کبالت افزایش یافته است. در شکل (۱) به ترتیب توزیع دانه‌بندی پودرهای نمونه‌های شامل ۶، ۱۰ و ۱۴ میکرومتری آورده شده است. در این تصاویر مشاهده می‌شود که پودرهای حاصل شده دارای شرایط یکسانی از نظر شکل و توزیع ذرات می‌باشند.

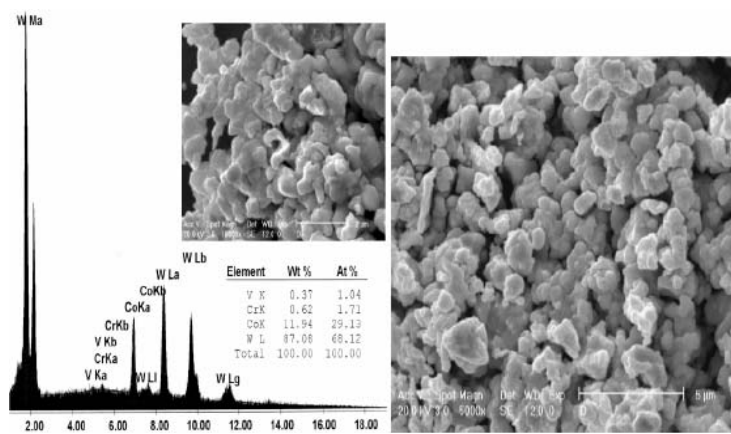
رشد دانه کاربرد تنگستن در سرمتهای WC-Co از طریق فرآیند Ostwald Ripening طی زینترینگ حالت مایع (LPS) صورت می‌گیرد. در این مکانیزم دانه‌های کوچک به علت پتانسیل انحلال بالاتر در بایندر حل می‌شوند و دانه‌های درشت رسوب می‌کنند تا انرژی فصل مشترک بین کاربرد تنگستن و بایندر کاهش یابد [۶ و ۷].

## ۲- روش تحقیق

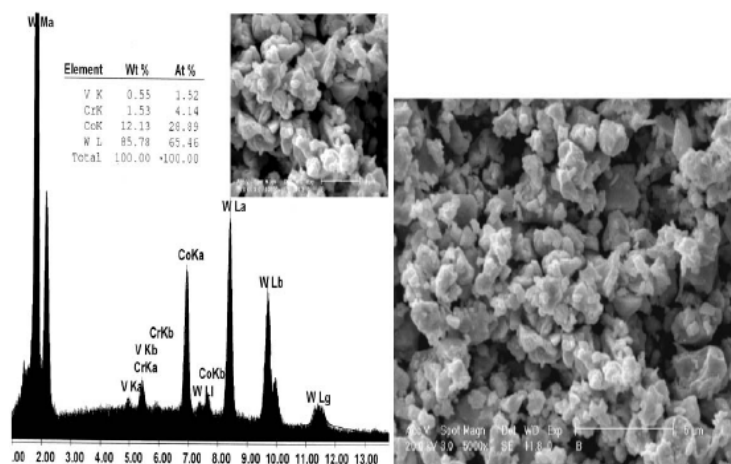
در این تحقیق از پودر کاربرد تنگستن با اندازه ذره ۰/۴ میکرومتر در ترکیب‌های مختلف ۶، ۱۰ و ۱۴ درصد وزنی کبالت استفاده شد. کاربرد تنگستن به کار رفته دارای خلوص بالای ۹۹/۸٪ بوده و مشخصات پودرهای مورد استفاده در جدول (۱) نمایش داده شده است. مواد اولیه به درون آسیاب شارژ شده و به مدت ۱۵h با گلوله‌هایی از جنس کاربرد تنگستن با سرعت ۲۵۰rev/min آسیاب شدند. پودر تولید شده با استفاده از یک پرس هیدرولیکی با نیروی معادل ۴۰۰Mpa به شکل نمونه‌های با ابعاد  $18 \times 6 \times 6$  cm پرس گردیدند. نمونه‌ها توسط یک کوره



الف



ب



ج

شکل (۱): تصاویر SEM و آنالیز EDS پودرهای آسیاب شده WC-Co با درصدهای وزنی الف) 6% Co، ب) 10% Co و ج) 14% Co

در ارتباط با خواص مکانیکی به طور کلی سختی کاربیدهای سماتنه متأثر از عواملی نظیر مقدار و نوع بایندر، اندازه و توزیع ذرات فاز کاربیدی، سختی فازهای تشکیل دهنده، همسایگی (contiguity) ذرات کاربید تنگستن و میزان انحلال کاربید در فاز بایندر است [۱۰ و ۹]. رابطه (۲) مدلی را برای محاسبه سختی سرمتهای WC-Co را بیان می کند [۱۱].

$$H_{CC} = H_{WC} \cdot f_{wc} \cdot C + H_{Co}(1 - f_{wc} \cdot C) \quad (2)$$

$$(C = 2N_{wc/wc} / 2N_{wc/wc} + 2N_{wc/Co})$$

در این رابطه  $H_{WC}$  و  $H_{Co}$  به ترتیب سختی کاربید تنگستن و بایندر کبالت،  $f_{wc}$  کسر حجمی کاربید تنگستن،  $C$  همسایگی ذرات و  $N_{wc/wc}$  و  $N_{wc/Co}$  به ترتیب تعداد برخورد با فصل مشترک های ذرات کاربید تنگستن و کاربید تنگستن-کبالت می باشد. همانطور که از نتایج پر می آید با افزایش میزان کبالت، همسایگی و  $f_{wc}$  کاهش می یابد (شکل (۲)). در نتیجه مطابق رابطه (۲) سهم فاز کاربیدی در سختی کل سرمتهای کاهش می یابد. این مسئله یکی از عوامل کاهش سختی با افزایش میزان کبالت است. از طرفی سختی فاز کاربیدی و بایندر از رابطه Hall-Petch پیروی می نماید [۱۱].

$$H_{Co} = a + b \cdot \lambda^{-0.5} \quad (\lambda = d_{wc} \cdot f_{Co} / 1 - f_{Co}) \quad (3)$$

$$H_{WC} = 13.5 + 7.2 d^{-0.5}$$

$d$  و  $\lambda$  به ترتیب اندازه دانه کاربید تنگستن و پویش آزاد میانگین (mean free path) کبالت بوده،  $a$  و  $b$  ضرائب ثابت می باشند. در واقع با افزایش مقدار کبالت ( $f_{Co}$ )،  $\lambda$  نیز افزایش یافته و لذا طبق رابطه (۳) سختی بایندر کاهش می یابد.

همچنین کاهش انحلال سختی (solution hardening) فاز بایندر در نتیجه افزایش میزان کبالت، یکی از دلایل دیگر کاهش سختی فاز بایندر به شمار می رود. با افزایش مقدار کبالت، اندازه دانه کاربید تنگستن کاهش می یابد و طبق رابطه (۳) باعث افزایش سختی فاز کاربیدی می گردد.

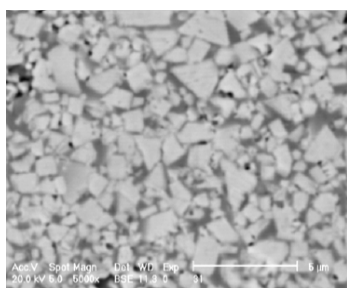
همچنین آنالیزهای EDS به دست آمده از این پودرها نیز همخوانی نزدیکی با ترکیبات مورد نظر نشان می دهند. تصاویر میکروسکپ الکترونی حاصل از الکترون های برگشتی مربوط به نمونه هایی با ترکیبات و شرایط مختلفی از عملیات حرارتی در شکل های (۲) و (۳) نشان داده شده است. نتایج حاصل از سختی سنجی نمونه ها نیز در شکل (۴) مشاهده می شود. همچنان که ملاحظه می شود، با افزایش میزان کبالت برای دماهای مختلف عملیات حرارتی سختی کاهش می یابد. همچنین شکل (۵) مربوط به نتایج حاصل از اندازه گیری استحکام گسیختگی عرضی نمونه ها بر حسب دما است که در ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته است. البته تغییرات مشابهی نیز برای درصد های بایندر کبالت در این شکل مشاهده می شود.

### ۳- نتایج و مباحث

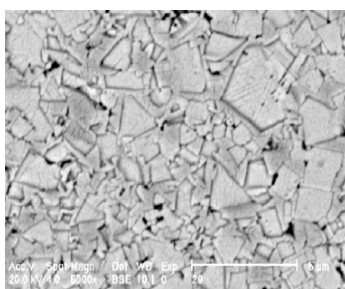
هر چه میزان انحلال کاربید در بایندر کبالت افزایش یابد، مقدار فاز بایندر کبالت آزاد که تنها ماده مغناطیسی موجود در سیستم است، کاهش یافته و در نتیجه از میزان اشباع مغناطیسی کاسته می شود بنابراین میزان اشباع مغناطیسی با میزان انحلال کاربید تنگستن در بایندر رابطه معکوس دارد. میزان انحلال فاز کاربیدی در بایندر را می توان با توجه به رابطه (۱) بیان نمود [۸]:

$$S = A \cdot C \cdot r \Delta T \quad (1)$$

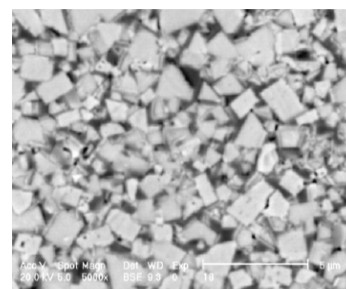
که در آن  $S$ ،  $A$ ،  $C$ ،  $r$  و  $\Delta T$  به ترتیب بیانگر غلظت کاربید حل شده در فاز بایندر، سطح ویژه کاربید در واحد وزن، غلظت ذرات کاربید، نرخ انحلال کاربید و زمان انحلال می باشند. در ترکیبی با اندازه دانه های مختلف، تمامی پارامترها به جز سطح ویژه که با افزایش اندازه دانه کاهش می یابد، ثابت هستند. لذا با افزایش اندازه دانه کاربید تنگستن با افزایش دمای عملیات حرارتی زینتر، غلظت کاربید انحلالی کاهش یافته و در نتیجه افزایش اشباع مغناطیسی مطابق جدول (۲) مشهود است.



(الف)

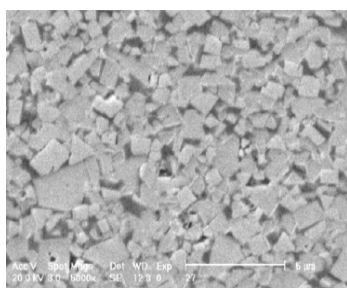


(ب)

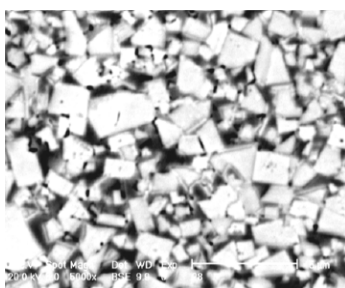


(ج)

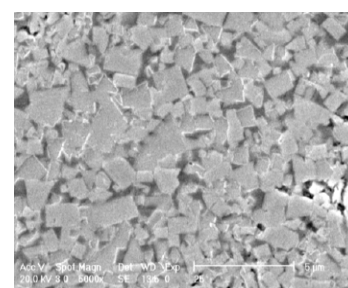
شکل (۲): تصاویر SEM و آنالیز EDS پودرهای آسیاب شده WC-Co با درصدهای وزنی الف) 6% Co، ب) 10% Co و ج) 14% Co



(الف)



(ب)



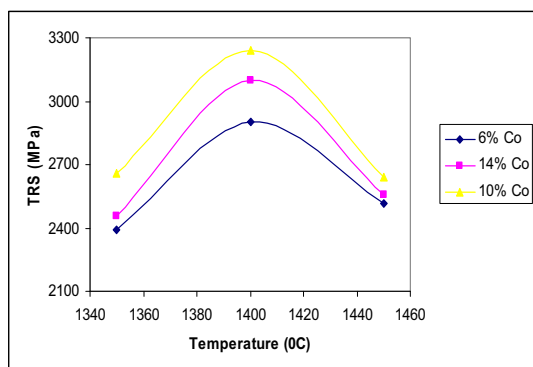
(ج)

شکل (۳): تصاویر SEM از سرمتهای WC-Co تحت دماهای مختلف زینترینگ الف) 1350°C، ب) 1400°C و ج) 1450°C

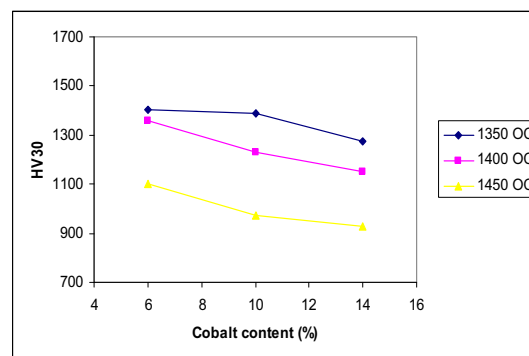
فاز کاربیدی در بایندر کاهش می‌یابد که موجب افزایش استحکام گسیختگی می‌گردد و از طرفی اندازه کاربید تنگستن کاهش می‌یابد که موجب کاهش استحکام می‌شود. در ابتدا افزایش میزان کبالت، تأثیر کاهش انحلال سختی بیشتر از کاهش اندازه دانه بوده و استحکام افزایش یافته است. اما با افزایش میزان کبالت به بیش از ۱۰ درصد وزنی، مکانیزم کاهش اندازه دانه کاربید غالب می‌گردد که موجب کاهش استحکام گسیختگی عرضی نمونه‌ها می‌گردد (شکل ۵). در این راستا مطابق شکل (۵) افزایش دمای عملیات حرارتی زینترینگ تا ۱۴۰۰°C نیز ابتدا سبب غالب شدن مکانیزم رشد دانه می‌گردد که در ادامه به دلیل بروز مکانیزم انحلال کاربید در فاز بایندر و کاهش اندازه دانه از استحکام گسیختگی کاست گردیده است.

بدین ترتیب با افزایش مقدار کبالت،  $H_{WC}$  افزایش و  $f_{WC}$ ، C و  $H_{CO}$  در رابطه (۲) کاهش می‌یابند و نهایتاً عواملی که موجب کاهش سختی می‌گردند، غالب شده و نتیجتاً سختی سرمتهای WC-Co روند کاهشی از خود نشان می‌دهد. همچنین با افزایش اندازه ذرات کاربید تنگستن بمرور افزایش دمای زینترینگ تا ۱۴۰۰°C (شکل ۳)، سختی کاهش یافته است. لازم به ذکر است که با افزایش دمای زینترینگ علیرغم اندکی کاهش اندازه ذرات کاربیدی که احتمالاً به دلیل انحلال تدریجی در بایندر می‌باشد، روند تغییرات سختی تفاوت چندانی نخواهد داشت. براساس تحقیقات صورت گرفته، استحکام گسیختگی عرضی سرمتهای با افزایش اندازه دانه کاربید و کاهش انحلال سختی فاز بایندر افزایش می‌یابد [۱۲].

همچنین همان‌طور که اشاره شد با افزایش میزان کبالت، انحلال



شکل (۵): استحکام گسیختگی عرضی سرمتهای WC-Co در دماهای مختلف زینترینگ با درصدهای مختلف کبالت



شکل (۴): تصاویر SEM از سرمتهای WC-Co تحت دماهای مختلف زینترینگ الف (۱۳۵۰°C، ب) ۱۴۰۰°C و ج) ۱۴۵۰°C

#### ۴- نتیجه گیری

- ۱- با افزایش میزان کبالت، میزان انحلال سختی فاز بایندر کاهش می یابد.
- ۲- با افزایش میزان کبالت، سختی کاربرد تنگستن افزایش می یابد و از سختی کبالت، کسر حجمی و همسایگی فاز کاربیدی کاسته می شود که در کل برآیند این عوامل باعث کاهش سختی سرمت WC-Co می گردد.
- ۳- در نمونه دارای ۱۰ درصد وزنی کبالت که تحت عملیات حرارتی زینترینگ در دمای ۱۴۰۰°C قرار گرفته، مقدار بیشینه استحکام گسیختگی عرضی حاصل می شود.

#### ۵- مراجع

- [5] T.Sailer, M.Herr, H.G.Sockel, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Vol.19, PP.335-340.2001.
- [6] B.Wittman, W.D.Schubert, B.Lux, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Vol.20, PP.141-152.2002.
- [7] H.Fischmeister, G.Grimval, Sintering and related phenomena, New York, Plenum Press, PP.119-149.1980.
- [8] J.Jung, S.Kang, Acta Materilia, Vol.51, PP.1379-1386 2004.
- [9] Z.H.Xu, J.Agren, Material Science Engineering A, Vol.386, PP.262-268. 2004.
- [10] H.Engqvist, S.Jacobson, N.Axen, Wear, Vol.252, PP.384-393.2002.
- [12] H.C.Lee, J.Gurland, Material Science Engineering, Vol.386, PP.125-133. 1978.
- [13] J.Zackrisson, H.O.Andren, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Vol.17, PP.265-270.1999.
- [1] R.W. Stevenson, ASM Hand book, Vol.7, ASM. 1993.
- [2] G.S. Upadhyaya, Review on powder metallurgy and physical ceramics, Vol. 4, PP. 59-78. 1990.
- [3] S.Sharafat, A.Kaobayashi, S.Chen, Surface coating technology, Vol.13, PP.164-169. 2000.
- [4] K.Eun, D.Y.Kim, D.N.Yeen, Powder metallurgy, Vol.27, PP.112-117. 1984.