



## ارزیابی چقرمگی شکست و سختی در پوشش پاشش حرارتی کاربرد تنگستن - کبالت به روش تحلیلی و با استفاده از فرورونده ویکرز

مهدی مرادی<sup>۱</sup>، مهدی جلالی عزیز پور<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز (دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک-طراحی کاربردی)

<sup>۲</sup>. استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز

### چکیده

روش های پاشش حرارتی امروز به عنوان یک تکنولوژی موثر در ایجاد پوشش های مقاوم به سایش با چقرمگی مناسب مطرح است. از میان روش های متعدد پاشش حرارتی روش HVOF به عنوان یک روش موثر در ایجاد پوشش های سرامت WC-Co و WC-Ni مطرح است. رفتار خستگی، تنش پسماند، سختی و چقرمگی شکست ویژگی های مهم و تعیین کننده عمر قطعات در صنایع مختلف همچون نفت، فولاد، هوا فضا و ابزارهای ماشینکاری هستند. در این تحقیق با استفاده از روابط مربوط به مکانیک شکست و فرورونده ویکرز یک رابطه تحلیلی نوین جهت تعیین چقرمگی شکست این پوشش ارائه شده است. چقرمگی شکست این پوشش با اندازه گیری اثر فرورونده روی سطح مقطع، طول ترک ایجاد شده و میزان باز شدگی ترک و با تعیین مقادیر بحرانی این پارامترها بدست آمد. از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM و پراش پرتو X به منظور بررسی مورفولوژی و آنالیز فازی و همچنین از میکروسختی سنجی جهت اندازه گیری سختی پوشش بهره لازم حاصل شد.

**واژه های کلیدی:** کاربرد تنگستن-کبالت، سختی، چقرمگی شکست، فرورفتگی ویکرز، مکانیک شکست، پاشش حرارتی

<sup>۱</sup>. Moradi\_mehdi236@yahoo.com

## مقدمه ۱

- ۲ پوشش دهی یکی از روش های مهندسی سطح است که باعث بالابردن کیفیت سطح در قطعات و تجهیزات می شود.
- ۳ پوشش به روش پاشش حرارتی HVOF (High Velocity oxygen Flame) یکی از روش های مقرون به صرفه ای است که جهت ساختن قطعات ماشین آلاتی که تحت شرایط سخت کار می کنند استفاده می شود.
- ۴ پوشش حاصل از پاشش حرارتی به علت داشتن ویژگی های بسیار خوب در صنایع مختلف همچون نفت، فولاد، گاز و پتروشیمی و صنایع هوا فضا کاربردهای وسیعی پیدا کرده است. این کاربرد دقیقاً به دلیل مقاوم بودن نسبت به سایش و فرسایش این پوشش ها می باشد.
- ۵ ویژگی های پوشش های HVOF بستگی به موارد زیر دارد:
- ۶ ۱- آماده سازی سطح قطعه
- ۷ ۲- ترکیب (شکل و اندازه) سرعت تغذیه پودر می باشد.
- ۸ ۳- کنترل دقیق نسبت اکسیژن به سوخت، فاصله و زاویه پاشش دارد.
- ۹ در این میان چقرمگی شکست K<sub>IC</sub> و سختی این پوشش H بسیار متأثر از عوامل فوق می باشد [۱].
- ۱۰ پوشش کاربید تنگستن کبالت (WC-Co) جزء پوشش های سخت می باشد و از دو جز شامل: فلز کبالت Co به عنوان فاز زمینه یا Matrix و ماده سرامیکی کاربید تنگستن WC تشکیل شده است میزان Co در این ماده مرکب متغیر و بین ۵ تا ۲۰ درصد می باشد.
- ۱۱ در مکانیک شکست فرض بر این است که هر قطعه ای دارای یک سری عیوب ذاتی و یا ترک های بسیار ریز است که استحکام ماده را در برابر تنش های خارجی کاهش می دهد عملاً این ترک های ریز باعث ایجاد تمرکز تنش و منشا ایجاد ترک، رشد و پیشروی آن در یک سازه محسوب می شوند. در مکانیک شکست ضریبی به نام شدت تنش، K، تعریف می شود که شدت وضعیت ترک را که تحت تاثیر اندازه ترک، تنش و هندسه ترک می باشد مشخص می کند. یک ماده تا زمانی که شدت تنش، K، کمتر از یک مقدار بحرانی باشد می تواند در مقابل ترک بدون شکست ترد مقاومت کند این مقدار بحرانی که خصوصیتی از ماده می باشد چقرمگی شکست نامیده می شود به عبارت دیگر چقرمگی شکست میزان مقاومت ماده را در برابر ایجاد و گسترش ترک نشان می دهد. در مواد مختلف متفاوت است [۲].
- ۱۲ در سال های اخیر تکنیک استفاده از فرو رونده به صورت وسیعی برای مطالعه رفتار شکست پوشش استفاده شده است. تکنیک فرو رونده بعنوان یک روش تست سختی و همچنین جهت مطالعه ویژگی های مکانیکی مواد ترد استفاده شده است. برای مثال تکنیک فرورونده ویکرز برای ارزیابی چقرمگی شکست پوشش های اسپری حرارتی از طریق اندازه گیری قطر اثر فرورونده و طول ترک استفاده شده است. مزیت این روش در سادگی منحصر به فرد این روش در بوجود آوردن یک رژیم شدت تنش بالا در نمونه می باشد. هر چند در این روش آماده سازی سطح مقطع نمونه های پوشش دار از اهمیت زیادی برخوردار است [۳].

در این تحقیق کوشش شده است با استفاده از روابط پایه مکانیک شکست، فرورونده و یکرز و استخراج پارامترهای بحرانی رابطه ای برای چقرمگی شکست این پوشش ارایه و مقدار این پارامتر تخمین ارزیابی شود.	۳۰
	۳۱
	۳۲
<b>مواد و روش تحقیق</b>	۳۳
در این تحقیق از پودر کاربرد تنگستن - کبالت (WC-12Co) به عنوان ماده پوشش استفاده شد و زیر لایه فولاد CK45 انتخاب شد. نمونه های پوشش با استفاده از روش پاشش حرارتی تولید شد و سطح مقطع نمونه ها توسط کاغذ سمباده SiC با شماره های مختلف پولیش شد. به منظور بررسی مورفولوژی پودر و ترک حاصل از اثر گذاری فرورونده از میکروسکپ الکترونی روبشی SEM استفاده شده است. همچنین از پراش پرتو X با تشعشع KX-CU به منظور بررسی فازی پودر استفاده شد. در این تحقیق با استفاده از روابط پایه مکانیک شکست یک رابطه تحلیلی جهت KIC استخراج و سپس با اثر گذاری و یکرز و تعیین سختی و روش ارایه شده در این تحقیق پارامترهای بحرانی جهت استفاده در رابطه KIC استخراج شده است. مراحل کار به شرح ذیل است:	۳۴
	۳۵
	۳۶
	۳۷
	۳۸
	۳۹
	۴۰
مراحل استخراج رابطه KIC :	۴۱
۱) استخراج رابطه شدت تنش با استفاده از روابط و سترگاد	۴۲
۲) استخراج شدت تنش بحرانی یا KIC	۴۳
۳) انتخاب یک تابع چند جمله ای	۴۴
۴) در نظر گرفتن تمرکز تنش در نوک فرورونده و یکرز که به اصلاح طول ترک منجر می شود.	۴۵
روابط تنش در نوک ترک (توابع و سترگاد): (کرنش دو بعدی) [۴].	۴۶
مراحل استخراج پارامترهای بحرانی :	۴۷
۱- بارگذاری با دستگاه میکرو سختی جهت بدست آوردن میکروسختی نمونه ها	۴۸
۲- بارگذاری ماکرو جهت ارزیابی پاسخ الاستیک نمونه ها	۴۹
۳- آنالیز تصاویر و اندازه گیری طول ترک و قطر اثر فرورونده	۵۰
۴- تعیین پارامترهای بحرانی	۵۱
با تعیین پارامترهای بحرانی و جایگذاری در رابطه KIC چقرمگی شکست این پوشش بدست می آید.	۵۲
وسختی این پوشش با دستگاه میکرو سختی و بارگذاری روی ضخامت پوشش تعیین می گردد.	۵۳
	۵۴
نتایج و بحث	۵۵
۱) بررسی پودر و پوشش	۵۶
پودر استفاده شده در این پوشش که با استفاده از روش اگلومره-زینتر تولید شده است شامل ۱۲ درصد کبالت و ۸۸ درصد کاربرد تنگستن است. در شکل شماره ۱ تصویر میکروسکپ الکترونی روبشی ذرات پودر WC-CO نشان داده شده است. در شکل شماره ۲ تصویر میکروسکپ الکترونی SEM از پوشش WC-	۵۷
	۵۸
	۵۹

۶۰ 12CO نشان داده شده است. مناطق با رنگ خاکستری کم رنگ نشان دهنده ترکیبات WC (W-CO-C) یا

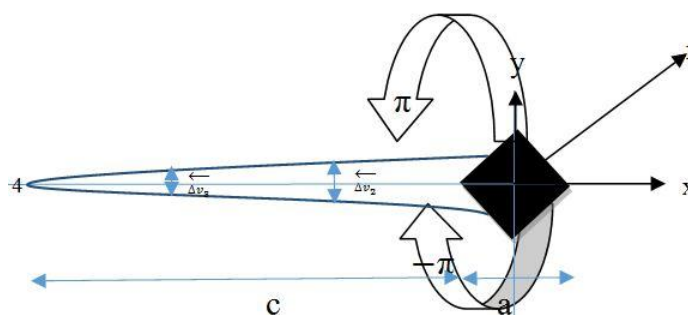
۶۱ W2C2) و مناطق با رنگ خاکستری پررنگ فلز Co است. در شکل شماره ۳، الگوی پراش پرتو X پودر مورد

۶۲ استفاده نشان داده شده است ترکیب فازهای موجود در نقاط مختلف این پوشش قابل مشاهده است.

۶۳ (۲) تحلیل ترک:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \begin{bmatrix} 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \\ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{Displacements}} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = 2(1 + \nu) \frac{K_I}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{bmatrix} \cos \frac{\theta}{2} (1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2}) \\ \sin \frac{\theta}{2} (2 - 2\nu - \cos^2 \frac{\theta}{2}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

۶۵



۶۶

۶۷

۶۸ شکل ۴: شماتیک ترک روی ضخامت پوشش (مقارن نسبت به محور X)

۶۹ نقاط ۲ و ۳ دو نقطه دلخواه روی طول ترک در نظر گرفته می شوند.

۷۰ با در نظر گرفتن مولفه قائم نقطه فرضی ۲ در قسمت بالای شکل شماتیک (r, π) و در قسمت پایین (r, -π)

۷۱ و جاگذاری در رابطه (۱) و سپس مرتب سازی بر اساس K<sub>I</sub>:

$$K_I = \frac{\sqrt{2\pi} * E}{8(1 - \nu^2)} \left[ \frac{v(r, \pi) - v(r, -\pi)}{\sqrt{r}} \right] \quad (2)$$

۷۲

$$K_{IC} = K_{tip} = \lim_{r \rightarrow 0} K_I = \frac{\sqrt{2\pi} * E}{8(1 - \nu^2)} \lim_{r \rightarrow 0} \left[ \frac{v(r, \pi) - v(r, -\pi)}{\sqrt{r}} \right] \cong \text{constant} \quad (3)$$

۷۳

۷۴ با ثابت فرض کردن پارامترهای E, ν، ترم اول رابطه (۳) مقداری ثابت است لذا ترم دوم نیز الزاما باید به سمت

۷۵ مقداری ثابت میل کند بنابراین مقدار داخل کروشه باید یک تابع چند جمله ای باشد. بررسی ها نشان داد فرض

۷۶ تابع درجه ۱ مقدار غیر قابل قبول ارایه می دهد لذا با فرض تابع درجه ۲ محاسبات را ادامه می دهیم.

$$\frac{v(r, \pi) - v(r, -\pi)}{\sqrt{r}} = \frac{\Delta v_r}{\sqrt{r}} = f(r) = A + Br + Cr^2 \quad (4)$$

۷۷

۷۸

$$\lim_{r \rightarrow 0} f(r) = A \quad (5)$$

۷۹

۸۰

۸۱ برای بدست آوردن ضرایب مجهول (A,B,C) نیاز به مختصات ۳ نقطه داریم مختصات این ۳ نقطه را به قرار ذیل

۸۲ فرض می کنیم:  $a$  = میانگین قطرهای اثر فرورونده ویکرز  $c$  = (شکل شماره ۵) جمع طول ترک های شعاعی

۸۳  $\Delta v$  = مقدار بازشدگی ترک و مختصات نقطه C بیانگر شرایط مرزی است.

۸۴ با توجه به اینکه هسته گذاری ترک در محل تمرکز تنش اتفاق می افتد و تمرکز تنش در مرکز اثر فرورونده

۸۵ ویکرز می باشد لذا با اندازه گیری طول ترک از مرکز فرورونده اثر تمرکز تنش را لحاظ می کنیم.

$$\begin{Bmatrix} A \\ B \\ C \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \left( \frac{c}{3} + \frac{a}{2}, \Delta v_2 \right) \\ \left( \frac{2c}{3} + \frac{a}{2}, \Delta v_3 \right) \\ \left( c + \frac{a}{2}, 0 \right) \end{Bmatrix} \quad (6) \quad 86$$

۸۷

۸۸ با جایگذاری (۶) در (۴) و حل دستگاه سه معادله ، سه مجهول با استفاده از نرم افزار Maple

۸۹ بدست می آوریم:

$$\begin{aligned} A = \frac{1}{8} \frac{1}{c^2 (4c + 3a) (2c + 3a)} & \left( \sqrt{12c + 18a} (27a^3 \Delta v_2 \right. \\ & + 126 \Delta v_2 a^2 c - 3a^2 \sqrt{24c + 18a} \sqrt{12c + 18a} \Delta v_3 \\ & + 192 \Delta v_2 a c^2 - 8a \sqrt{12c + 18a} \sqrt{24c + 18a} \Delta v_3 c \\ & \left. - 4 \sqrt{12c + 18a} \sqrt{24c + 18a} \Delta v_3 c^2 + 96 \Delta v_2 c^3 \right), \end{aligned} \quad (7) \quad 90$$

۹۱

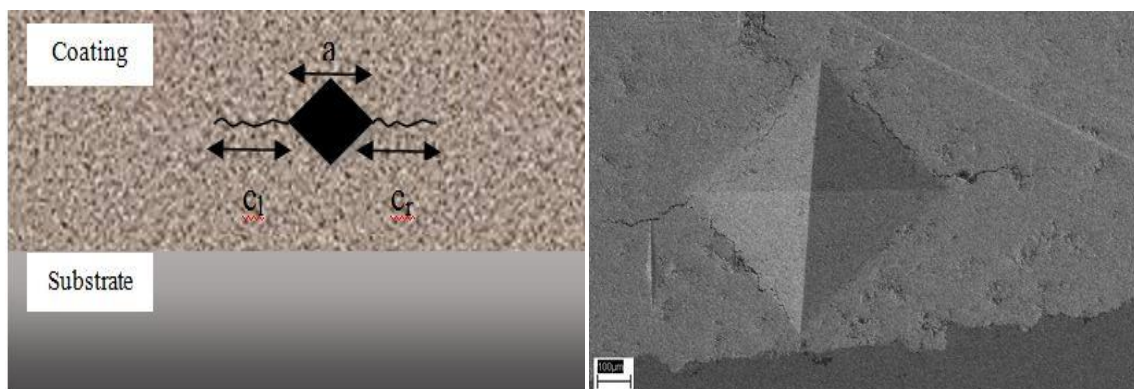
۹۲

۹۳

۹۴

$$K_{IC} = \frac{1}{\sqrt{1000}} * \frac{\sqrt{2\pi} * E}{8(1-\nu^2)} * A \quad (8) \quad 95$$

۹۶



۹۷

۹۸ شکل ۵: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی SEM از نمونه آزمایش (سمت راست)

۹۹ شماتیک اثر فرورونده ویکرز و ترک های ایجاد شده در ضخامت پوشش (سمت چپ)

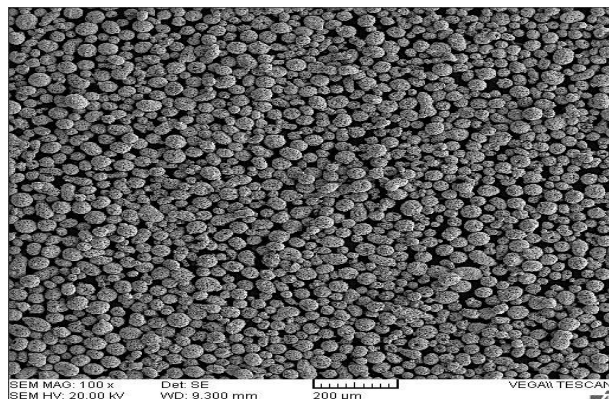
۱۰۰ مرحله دوم شامل گام های ذیل است:

۱۰۱ ۵- جایگذاری پارامترهای بحرانی در رابطه (۸) جهت استخراج چقرمگی شکست پوشش.

۱۰۲ به منظور ارزیابی پاسخ نمونه ها، بارگذاری با دستگاه سختی سنج از ۱۰ kgf تا ۵۰ kgf انجام شد.

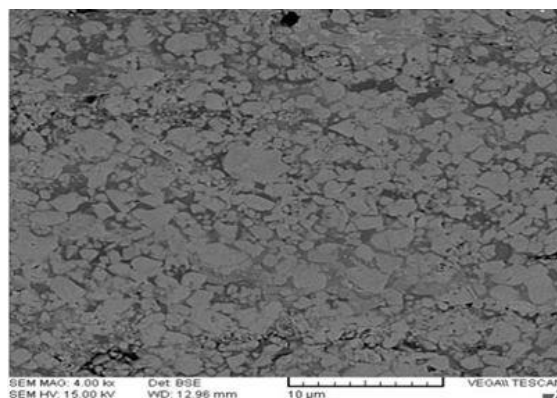
- ۱۰۳ سپس بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه ها عکس تهیه شد و با نرم افزار آنالیز تصویر پارامترهای
- ۱۰۴ طول ترک، قطر اثر فرورونده و مقدار بازشدگی ترک اندازه گیری شد.
- ۱۰۵ جهت استخراج پارامترهای بحرانی نمودارهای  $(\ln a - \ln P, \ln c - \ln p)$  را رسم می نمایم محل تلاقی این دو
- ۱۰۶ نمودار مختصات نقطه بحرانی  $(P_{cr}, C_{cr})$  را نشان می دهد (شکل شماره ۶).
- ۱۰۷ نقطه بحرانی نقطه ای است که در زیر آن هیچگونه ترکی وجود ندارد، این نقطه از خواص ذاتی هر ماده می
- ۱۰۸ باشد.
- ۱۰۹ از دستگاه Bowers model cv400 dat جهت تعیین میکرو سختی این پوشش استفاده شده است.
- ۱۱۰ (۳) محاسبه چقرمگی شکست
- ۱۱۱ با توجه به طبیعت ناهمسانگرد این پوشش سختی و چقرمگی شکست این پوشش در نقاط مختلف متفاوت است
- ۱۱۲، میکرو سختی این پوشش در این تحقیق بین ۹۶۰ تا ۱۰۶۰ و بیکرز بدست آمد.
- ۱۱۳ در این تحلیل P بر حسب Kgf و a, c بر حسب mm می باشد و  $E=200 \text{ Gpa}$  و  $\nu=0,3$  فرض شد.
- ۱۱۴ رابطه بدست آمده (۸) برای بارگذاری هایی غیر از بار بحرانی مستقل از H می باشد اما برای تعیین دقیق  $K_{IC}$  نیاز
- ۱۱۵ به تعیین بار و دیگر پارامترهای بحرانی  $(C_{min}, a_{min})$  داریم.
- ۱۱۶ با استفاده از جدول شماره ۱ و جایگذاری پارامترها در رابطه (۸) مقدار  $K_{IC}$  محاسبه شده است.
- ۱۱۷ با استفاده از مقادیر جدول شماره ۱ برای این پوشش بدست آمد:
- ۱۱۸ 
$$\frac{P}{C^2} \cong 252.203 \quad (Kg/mm^{3/2}) \quad (9)$$
- ۱۱۹ 
$$H = 1.854 \frac{P}{a^2} \rightarrow \frac{P}{a^2} = \frac{H}{1.854}, \left( \begin{array}{l} H = H_{MIN} = 960HV \\ H = H_{MAX} = 1060HV \end{array} \right) \rightarrow \frac{P}{a^2} = \begin{cases} 517.8 \\ 571.7 \end{cases} \quad (kg/mm^2) \quad (10)$$
- ۱۲۰ جهت تعیین مقادیر بحرانی از رابطه (۹) و (۱۰) لگاریتم گرفته و در یک نمودار لگاریتمی رسم می کنیم محل
- ۱۲۱ تلاقی این دو نمودار مقادیر بحرانی را نشان می دهد (شکل شماره ۶). رسم نمودار و محاسبات یکبار با  $H_{MIN}$  و بار
- ۱۲۲ دیگر با  $H_{MAX}$  به صورت جداگانه انجام شده است. جدول شماره ۲ مقادیر بدست آمده  $K_{IC}$  بر حسب پارامترهای
- ۱۲۳ بحرانی را نشان می دهد.
- ۱۲۴ نتیجه گیری و پیشنهادات:
- ۱۲۵ در این پژوهش بررسی تجربی-تحلیلی چقرمگی شکست مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد.
- ۱۲۶ (۱) سختی این پوشش در حدود  $1010 \pm 50 Hv$  بدست آمد.
- ۱۲۷ (۲) چقرمگی شکست این پوشش  $1.13 \pm 0.058 Mpa\sqrt{m}$  تخمین زده شد.
- ۱۲۸ (۳) چقرمگی شکست با افزایش سختی کاهش می یابد.
- ۱۲۹ (۴) چقرمگی شکست با افزایش میزان بارگذاری افزایش می یابد و این بدان معنی است که قبل از
- ۱۳۰ گسیختگی کامل پوشش مقدار مقاومت در برابر شکست افزایش می یابد (شکل شماره ۵).

- ۵) روش تحلیل استفاده شده در این تحقیق که بر اساس پروفایل ترک می باشد نتایج درست و احتمالاً محتاطانه ای از مقدار  $K_{IC}$  این پوشش ارائه می کند. ۱۳۱  
۱۳۲
- ۶) پیشنهاد می شود در تحقیقات آتی تاثیر عنصر  $Ni$  بر خواص  $WC-Co-Ni$  بررسی شود. ۱۳۳  
۱۳۴
- تشکر و قدردانی ۱۳۵
- از همکاری تمام عزیزانی که مرا در مراحل این پژوهش یاری رسانده اند بالاخص استاد ارجمندم جناب آقای ۱۳۶  
دکتر جلالی عزیز پور، مهندس قدم دزفولی (مسؤل آزمایشگاه پوشش دانشگاه آزاد اهواز) و مهندس داوودیان ۱۳۷  
(مسؤل آزمایشگاه کنترل کیفیت لوله سازی اهواز) تشکر و قدردانی می گردد. ۱۳۸  
۱۳۹
- مراجع ۱۴۰
1. Buang, A.P, B.Eng, " Cracking and Fracture Analysis of HVOF Coatings under Vickers Indentation", Journal of Coating Technology. PP. 513-534 ۱۴۱  
۱۴۲
۲. جاهد مطلق، حمیدرضا، غفوری آهنگر، رضا، کاظمی، بهنام، "رفتار مکانیکی مواد"، چاپ ۱۳۹۱، تهران: ۱۴۳  
دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۵. ۱۴۴
3. Lima , M.M , Godoy ,C. , Avelar-Batista , J.C. , Modenesi, P.J. , Davison, A. , Mattews, A. 2004, "Coating fracture toughness determined by Vickers indentation": an important parameter in cavitation, erosion resistance of WC-Co thermally sprayed coatings", Surface and Coatings Technology, PP. 489-496 ۱۴۵  
۱۴۶  
۱۴۷  
۱۴۸
۳. قاجار، رحمت الله، "مکانیک شکست"، چاپ اول، تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، ۱۳۸۱. ۱۴۹
۴. فرهی، غلامحسین، "مکانیک شکست"، چاپ دوم، همدان: دانشگاه بوعلی سینا، ۱۳۸۷. ۱۵۰
5. Alexey S Kurlov , Aleksandr I. Gusev, "Tungsten Carbides: Structure, properties and Application in Hardmetals", Springer Series in Materials Science, Volume 18 ۱۵۱  
۱۵۲
6. Sam Zhang , Xiaomin Zhang, 2011, "Toughness evaluation of hard coatings and thin films", Thin Solid Films , Vol.520 , PP.2375-2389. ۱۵۳  
۱۵۴
7. Armstrong, R.W. 2011, "The Hardness and Strength Properties of WC-Co Composites", Materials, Vol.4 , PP.1287-1308 . ۱۵۵  
۱۵۶
8. Ferreira, J.A.M. , 2008, "A study on the mechanical behaviour of WC/Co hardmetals, ", International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, Vol. 27, PP.1-8 ۱۵۷  
۱۵۸  
۱۵۹
9. Kucharski , S. and Mroz . Z , 2007, "Identification of yield stress and plastic hardening parameters from spherical indentation test", International Journal of Mechanical Sciences, PP. 1238-1250. ۱۶۰  
۱۶۱  
۱۶۲  
۱۶۳  
۱۶۴



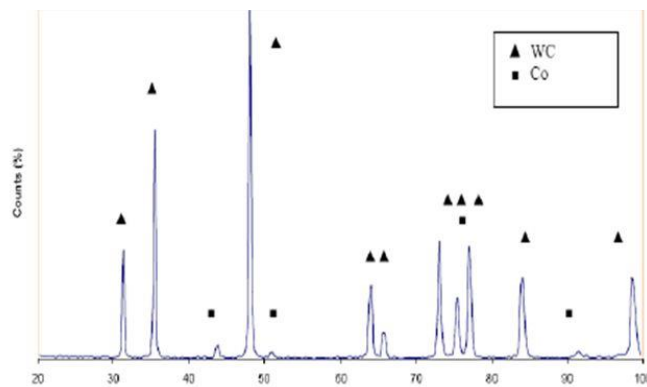
شکل شماره ۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ذرات پودر WC-12CO

۱۶۵  
۱۶۶



شکل شماره ۲: میکروگرافی میکروسکوپ الکترونی روبشی پوشش WC-12Co

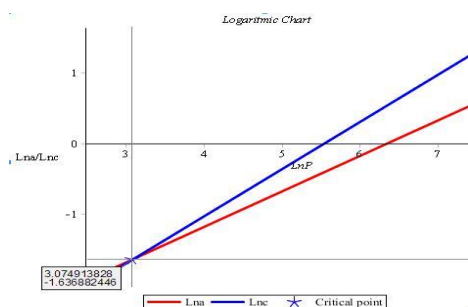
۱۶۷  
۱۶۸  
۱۶۹  
۱۷۰



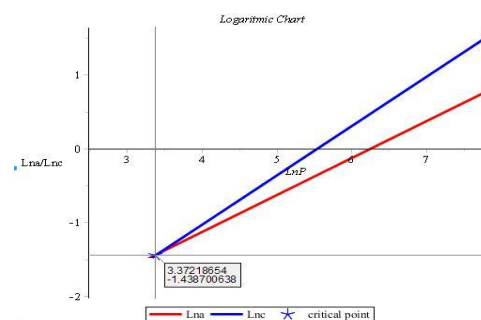
شکل شماره ۳: الگوی پراش پرتو X (X Ray Diffraction)

۱۷۱  
۱۷۲  
۱۷۳  
۱۷۴  
۱۷۵  
۱۷۶  
۱۷۷  
۱۷۸  
۱۷۹



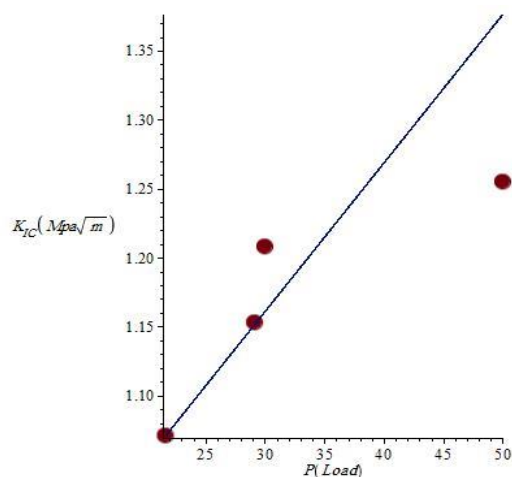


b



a

شکل شماره ۶: تعیین بار بحرانی با برون یابی دادها (H=960HV) a، (H=1060HV) b



شکل شماره ۷: تغییرات  $K_{IC}$  نسبت به بار گذاری اعمال شده

جدول شماره ۱: تعیین  $K_{IC}$  با استفاده از رابطه (۸)

مقدار بار گذاری (بیش از بار بحرانی) P(Kg)	جمع طول ترک های شعاعی c(mm)	میانگین قطرهای اثر فرورونده a(mm)	$K_{IC}(Mpa\sqrt{m})$
۳۰	۰/۴۸۲	۰/۴۹۶	۱/۲۰۸
۵۰	۰/۶۸۰	۰/۷۰۰	۱/۲۵۵

جدول شماره ۲: تعیین  $K_{IC}$  با توجه به سختی و پارامترهای بحرانی با استفاده از رابطه (۸) و شکل شماره ۶

H(HV)	P(Kg)	$c_{min}(mm)$	$a_{min}(mm)$	$K_{IC}(Mpa\sqrt{m})$
۹۶۰	$P_{min}=P_{cr}=۲۹/۱۴۲$	۰/۲۳۷۲	۰/۲۳۷۲	۱/۱۸۸
۱۰۶۰	$P_{min}=P_{cr}=۲۱/۶۴۸$	۰/۱۹۴۶	۰/۱۹۴۶	۱/۰۷۱

۱۸۰

۱۸۱

۱۸۲

۱۸۳

۱۸۴

۱۸۵

۱۸۶

۱۸۷

۱۸۸

۱۸۹

۱۹۰

۱۹۱

۱۹۲

۱۹۳

۱۹۴

۱۹۵

۱۹۶

۱۹۷

۱۹۸



# انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران

شکل ۸: آرم انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران.

۱۹۹

۲۰۰

۲۰۱

۲۰۲

۲۰۳

۲۰۴

۲۰۵

۲۰۶

۲۰۷