

## بررسی تاثیر مورفولوژی پودر بر خواص حرارتی و استحکام پوشش های متخلخل شاربالای حرارتی سنتز شده به روش متالورژی پودر

مونا معیری\*<sup>۱</sup>، علی کفلو<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکترا، پژوهشکده مواد پیشرفته و انرژی های نو، سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

۲- استادیار، پژوهشکده مواد پیشرفته و انرژی های نو سازمان پژوهش های علمی و صنعتی ایران، تهران، ایران

\*mo\_moayeri@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۰۸)

### چکیده

امروزه با توجه به کاهش منابع انرژی، استفاده از مواد نو به منظور افزایش بازدهی تجهیزات مورد اقبال صنایع مختلف واقع شده است. پوشش های با شار حرارتی بالا (High Flux Tube) دسته ای از پوشش های متخلخل هستند که با استفاده از ذرات پودر و فرایند تفجوشی بدون فشار بر روی سطح ایجاد و علاوه بر افزایش سطح، با افزایش نقاط فعال جوانه زنی و نفوذپذیری موجب تسریع فرایند جوشش می شوند. درصد تخلخل، استحکام مکانیکی و نفوذپذیری حرارتی سطح از مهمترین خواص فیزیکی این پوشش ها هستند که از مورفولوژی و اندازه ذرات پودر اولیه و همچنین از شرایط زینترینگ تاثیر می پذیرند. در این پژوهش نقش مورفولوژی ذرات پودر اولیه بر خواص فیزیکی (تخلخل، استحکام چسبندگی و نفوذپذیری) پوشش های HF مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور پودرهای کرومی، شاخواری و نامنظم در یک کوره اتمسفر کنترل تحت گاز احیایی (H<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>) و یک سیکل مشخص و با استفاده از یک بایندر پلیمری بدون فشار بر پایه مس زینتر شدند. بر روی پوشش های بدست آمده آزمون تخلخل سنجی انجام شد. نتایج بدست آمده برای ذرات کرومی، شاخواری و نامنظم بترتیب ۲۴/۵، ۴۹/۵ و ۵۸ درصد بود. استحکام چسبندگی برای نمونه های ذکر شده مقادیر ۱/۴، ۰/۵۲ و ۰/۸۲ kN را نشان داد. نفوذپذیری پوشش ها در محدوده ۱۰<sup>-۱۲</sup> تا ۳/۳×۱۰<sup>-۱۲</sup> متر مربع بدست آمد. نتایج نشان داد پودر نامنظم با بیشترین درصد تخلخل دارای کمترین استحکام و بیشترین نفوذپذیری است. در حالیکه ذرات پودر کرومی دارای کمترین درصد تخلخل و نفوذپذیری و همچنین بیشترین استحکام می باشند.

### واژه های کلیدی:

پوشش متخلخل، شار حرارتی، تفجوشی، نفوذپذیری، پودر مس.

### ۱- مقدمه

خاطر انتقال حرارت بالا، مقاومت به خوردگی و استحکام مناسب بطور گسترده در صنعت نفت و گاز مورد استفاده قرار گرفته اند.

امروزه و با پیشرفت تکنولوژی به منظور کاهش هزینه های تولید و مصرف انرژی، صنایع مختلف تمایل به کوچک سازی تجهیزات خود دارند. لوله های مس و آلیاژهای آن از دیرباز به

استحکام می شود بنابراین حفظ تعادل میان آنها از اهمیت بالایی برخوردار است [۵]. مورفولوژی ذرات پودر یکی از عواملی است که انتخاب مناسب و صحیح آن موجب حفظ تعادل میان این پارامترها می شود [۴-۷].

در این پژوهش از پودر مس با مورفولوژی های متفاوت که به طرق مختلف تولید شده بودند برای ساخت سطوح متخلخل استفاده شده و تاثیر مورفولوژی بر استحکام مکانیکی و خواص حرارتی مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش انجام تحقیق

هدف اصلی این پژوهش بررسی تاثیر مورفولوژی ذرات پودر بر خواص مکانیکی و نفوذپذیری حرارتی پوشش متخلخل شار بالا در مقیاس میکرو با استفاده از پودر مس می باشد. مشخصات کامل پودرهای مورد استفاده در جدول (۱) آمده است. مورفولوژی ذرات با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل MIRATESCAN ارزیابی شد (شکل ۱).

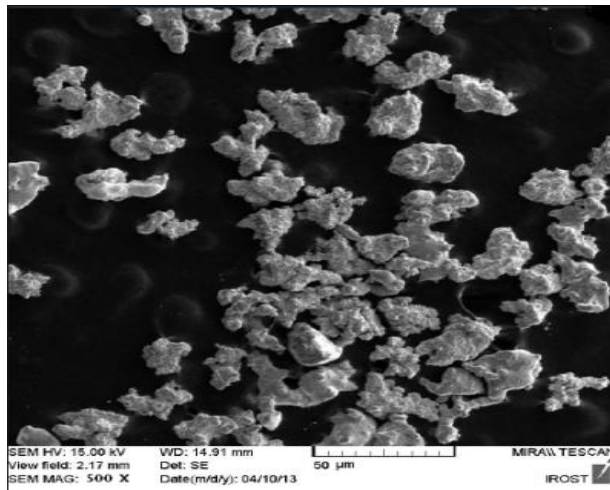
جدول (۱): خواص فیزیکی پودرهای مورد استفاده

پودر مورد استفاده	اتمیزه گازی	اتمیزه آبی	الکترولیتیک
خلوص	۹۹/۵	۹۹	۹۹/۹
اندازه ذره	۱۵ ± ۱۰	۲۵ ± ۱۰	۲۵ ± ۱۰
شکل ذره	کروی	نامنظم	شاخواری

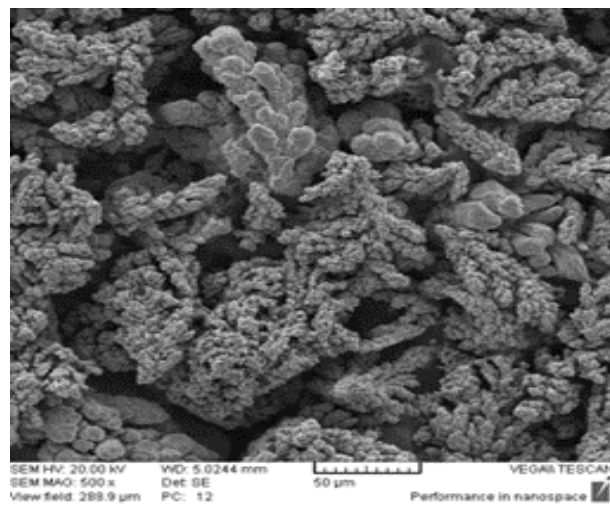
تاکنون روش های مختلفی برای افزایش بازدهی لوله های حرارتی ابداع شده است، چرا که نیل به این هدف نتایج زیادی از جمله افزایش بازدهی، کوچک تر شدن اندازه لوله ها و در نتیجه کاهش فضای مورد نیاز برای نصب و کمتر شدن مواد مصرفی از جمله تیوب ها<sup>۱</sup> را به دنبال خواهد داشت. افزایش سطح موثر در لوله ها از مهمترین و کاربردی ترین روش ها می باشد. پره دار کردن<sup>۲</sup> سطوح و ایجاد سطوح متخلخل<sup>۳</sup> (بر جداره داخلی و یا خارجی لوله ها) با همین رویکرد، تولید و در لوله ها مورد استفاده قرار گرفته است. پوشش متخلخل اولین بار در سال ۱۹۵۶ توسط میلتنون مورد بررسی قرار گرفت و پس از آن در سال ۱۹۷۲ تحت عنوان پوشش های متخلخل با شار حرارتی بالا<sup>۴</sup> ارائه شد [۱]. ادعا شده است که با استفاده از این پوشش ها شار حرارتی بحرانی<sup>۵</sup> در مقایسه با سطوح صاف دو برابر می شود. پوشش های متخلخل نه تنها با استفاده از افزایش نقاط جوانه زنی، ضریب جوشش را تا ده برابر افزایش می دهند بلکه موجب کاهش دمای جوشش نیز می شوند [۲-۴].

این پوشش ها تاکنون با روش های مختلفی همچون الکتروپلیتینگ، پاشش حرارتی و زینترینگ بر روی سطح داخلی و یا خارجی لوله ها با مواد مختلف اعمال شده است. هر کدام از روش های ذکر شده دارای مزایا و معایبی هستند [۵]. در این میان پوشش متخلخل با استفاده از تف جوشی پودر بیشترین بازدهی را در لوله های حرارتی از خود به نمایش گذاشته است [۶].

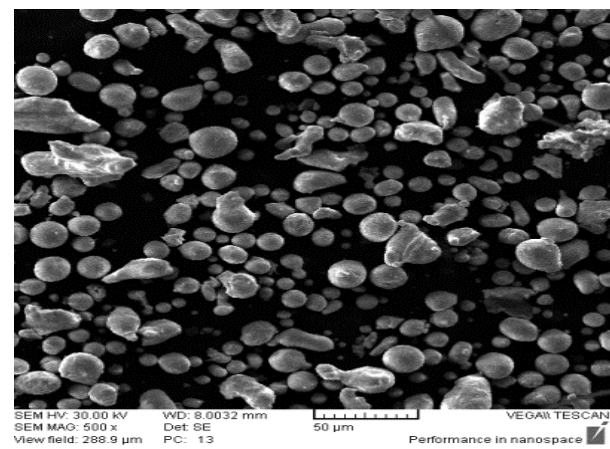
مهم ترین خواص این نوع پوشش ها داشتن ضخامت یکنواخت، حفره های سطحی مرتبط و بهم پیوسته با توزیع همگن و ابعاد در یک محدوده مشخص و استحکام چسبندگی خوب به زمینه می باشد [۷]. بنابراین انتخاب پودر با اندازه و مورفولوژی مناسب و دستیابی به شرایط بهینه فرایند تولید سطوح، از نقاط کلیدی در دسترسی به خواص حرارتی مورد انتظار از اینگونه لوله ها می باشد. از آنجاییکه برخی از این خواص در جهت عکس با یکدیگر رابطه دارند بدین معنی که بهبود یک خاصیت مطلوب باعث تضعیف خاصیت مطلوب دیگر می شود، به عنوان مثال افزایش درصد تخلخل موجب افزایش نفوذپذیری ولی باعث کاهش



الف

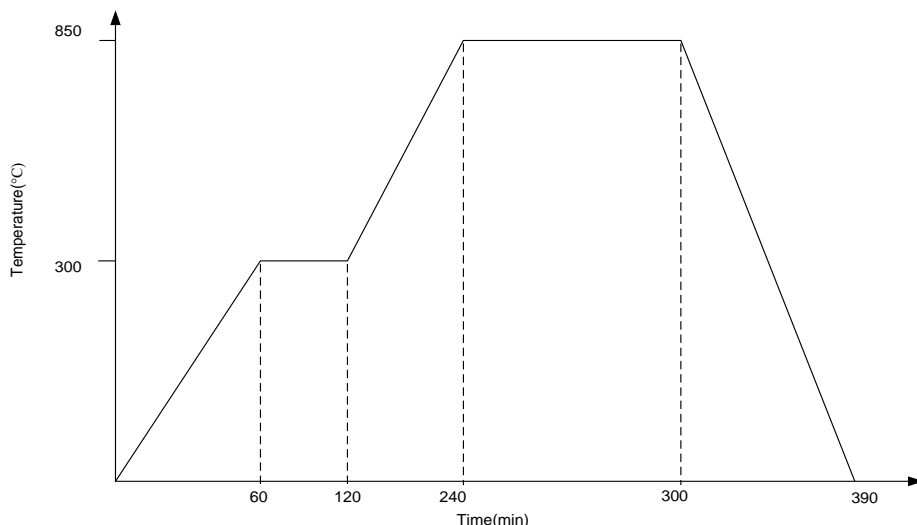


ب



ج

شکل (۱): تصاویر SEM پودرهای مورد استفاده: (الف): پودر اتمیزه آبی (نامنظم)، (ب): پودر الکترولیتیک (شاخواری) و (ج): پودر اتمیزه گازی (کروی)

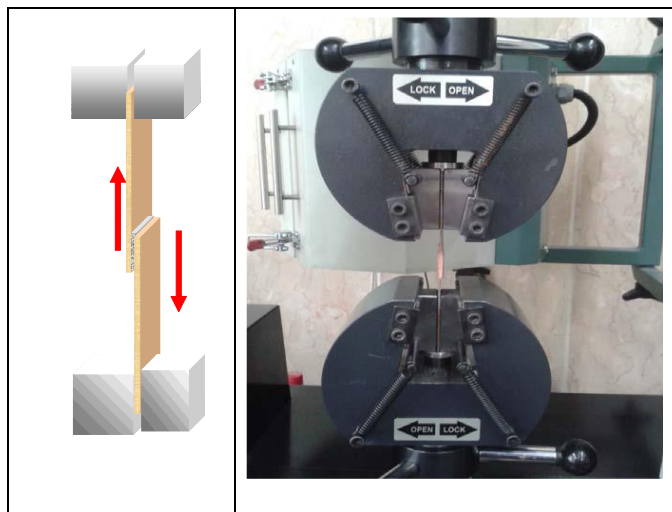


شکل (۲): نمودار عملیات حرارتی پوشش ها

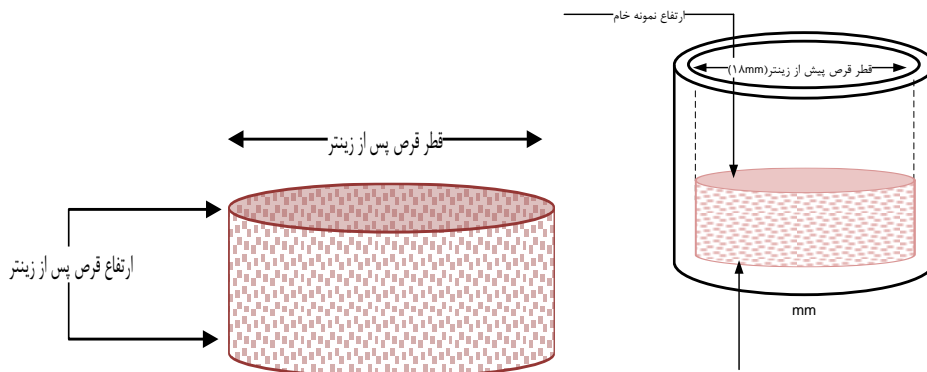
همراه نمونه های کشش با استفاده از کوره تیوبی اتمسفر کنترل (با نرخ  $300^{\circ}\text{C}/\text{h}$  تا دمای  $850^{\circ}\text{C}$  و به مدت ۶۰ دقیقه) تفجوشی شدند (شکل ۴). اتمسفر کوره شامل گاز نیتروژن به همراه ۵٪ گاز احیایی هیدرژن بود. این اتمسفر برای جلوگیری از اکسیداسیون پوشش و فلز پایه ۱۰ دقیقه قبل از شروع تفجوشی و در حین عملیات حرارتی به داخل کوره دمیده شد. نمونه های کشش به وسیله دستگاه کشش یک تن کشیده شد. قرص ها به وسیله روش ارشمیدسی و اشباع توسط اتیل الکل (رابطه ۱ و ۲) تخلخل سنجی شد علاوه بر آن، به منظور صحت سنجی نتایج، تصاویر ریزساختاری نمونه ها به روش SEM Image J آنالیز شد.

پوشش ها با استفاده از سه نوع پودر اتمیزه گازی، اتمیزه آبی و الکترولیتیک با اندازه های متفاوت و با روش تفجوشی پله ای به ضخامت ۲۵۰ - ۳۰۰ میکرومتر بر روی ورقه ای از جنس مس ایجاد شدند. نمودار عملیات حرارتی در شکل (۲) آمده است.

برای تهیه نمونه کشش، پودرها در سه مرحله بر روی ورق های مسی (شکل ۳) که با چسبی پایه پلیمری آغشته شده بودند، اعمال شد تا ضخامت پوشش به محدوده  $300\text{--}250\ \mu\text{m}$  برسد. این محدوده ضخامت مناسب برای کاربرد در پوشش های حرارتی می باشد [۸]. برای تهیه قرص از هر پودر به مقدار ۵ گرم درون بوته سرامیکی ریخته و پس از اندازه گیری ارتفاع پودر خام به



شکل (۳): موقعیت قرارگیری نمونه در دستگاه کشش



شکل (۴): قرص متخلخل برای آزمون تخلخل سنجی و چگالی توده متخلخل

شده محاسبه شد. ضمناً درصد انقباض نیز از نسبت ابعاد قرص پس و پیش از تفجوشی حاصل شد.

نفوذپذیری پوشش های متخلخل از دیگر خواص مهمی است که از درصد تخلخل پوشش ها تاثیر می پذیرد. در رابطه ای که توسط کازنی - کارمن ارائه شده است (رابطه ۳) نفوذپذیری را به قطر ذرات (D) بر حسب  $m\mu$  و درصد تخلخل ( $\varepsilon$ ) مرتبط دانسته است. در این رابطه C فاکتور شکل و بدون دیمانسیون می باشد و برای ذرات نامنظم، کروی و شاخواری بترتیب، ۱۴۴۵، ۲۵۰ و ۳۱۰۰ گزارش شده است [۷]. برای پوشش های تفجوشی شده نفوذپذیری با استفاده از رابطه ۳ بر حسب مترمربع محاسبه و نتایج در جدول ۲ آمده است.

$$K = \frac{D^2 \varepsilon^3}{C(1-\varepsilon)^2} \quad (3)$$

$$f = 1 - \frac{\rho(\text{coating})}{\rho(\text{material})} \quad (1)$$

رابطه ۱ معروف به ارشمیدس بوده و در آن  $\rho_{\text{coat}}$  چگالی پوشش و  $\rho_{\text{mat}}$  چگالی مواد خام قبل از تفجوشی می باشد. به منظور حصول اطمینان از تکرارپذیری نتایج، سه بار اندازه گیری انجام شد.

$$\varepsilon = \frac{(W_F - W_T) / \rho_L}{(W_T / \rho_m) + ((W_F - W_T) / \rho_L)} \quad (2)$$

در این رابطه  $W_T$  جرم پودر مس،  $\rho_m$  چگالی ذاتی مس،  $W_F$  جرم متیل الکی که در قرص متخلخل اشباع شده است و  $\rho_L$  چگالی متیل الکل است. دقت اندازه گیری در این روش  $\pm 0.1\%$  بود. چگالی توده متخلخل از تقسیم جرم توده به حجم توده تفجوشی

جدول (۲): خواص فیزیکی پوشش

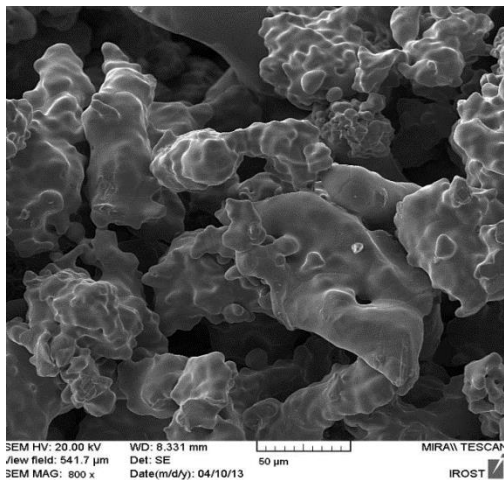
پودر	قطر میانگین حفرات ( $\mu\text{m}$ )	طول گردنه ( $\mu\text{m}$ )	چگالی توده تفجوشی شده ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	درصد تخلخل با استفاده از اشباع اتیل الکل	درصد تخلخل با استفاده از تحلیل گر Image J	درصد تخلخل با استفاده از روش ارشمیدسی	نفوذپذیری ( $\text{m}^2$ )
نامنظم	۱۲	۱۵	۳/۶۲	۵۹	۵۹/۴	۵۸	$4/8 \times 10^{-12}$
دندریتی	۸/۵	۶	۴/۶۴	۵۰	۵۱	۴۹/۵	$3/7 \times 10^{-12}$
کروی	۸	۱۲	۵/۷۱	۲۵	۲۶	۲۴/۵	$3/3 \times 10^{-12}$

### ۳- نتایج و بحث

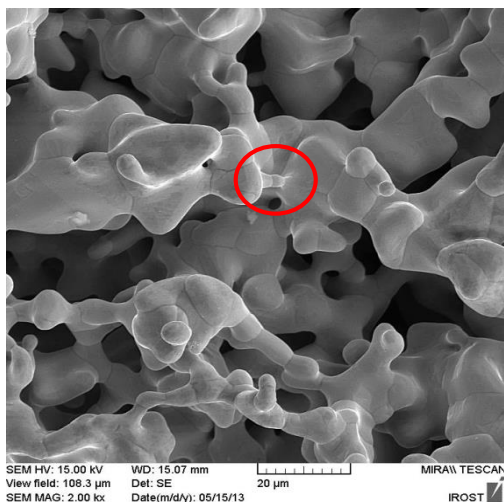
#### ۳-۱- بررسی ریزساختاری و درصد تخلخل پوشش

در شکل ۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی پوشش ها و نحوه اتصال حفرات به یکدیگر نشان داده شده است. حفرات بهم پیوسته و شبکه ای در تمامی پوشش ها به وضوح دیده می شود. پس از عملیات تفجوشی، در نتیجه نفوذ سطحی سطح ذرات پودر صافتر می شود [۹]. در اثر نفوذ، اتصال خوبی بین ذرات پودر در هر سه نمونه ایجاد شده است. وجود برخی اتصالات با طول اندک در نمونه با پودرهای دندریتی (تصویر ۵ج) به چشم می خورد که منشا آن ماهیت و شکل ذرات شاخه ای می باشد. درصد و اندازه حفرات که به سه طریق ذکر شده محاسبه شد که نتیجه در جدول ۲ گزارش شده است.

روش های مورد استفاده برای اندازه گیری درصد تخلخل تطابق قابل قبولی با یکدیگر دارند. در تمامی گونه های پودری بیشترین درصد مربوط به روش پردازش تصویر توسط نرم افزار Image J و کمترین مقدار مربوط به روش ارشمیدسی می باشد. با توجه به داده های بدست آمده تجربی می توان نتیجه گیری نمود که روش آنالیز Image J گزینه مناسبی برای ارزیابی مقدار و اندازه تخلخل پوشش می باشد.



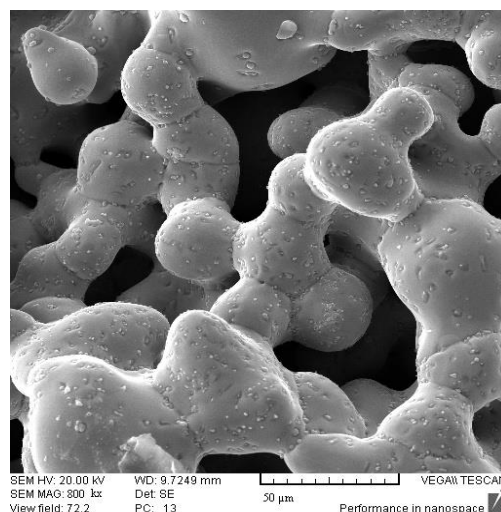
ب



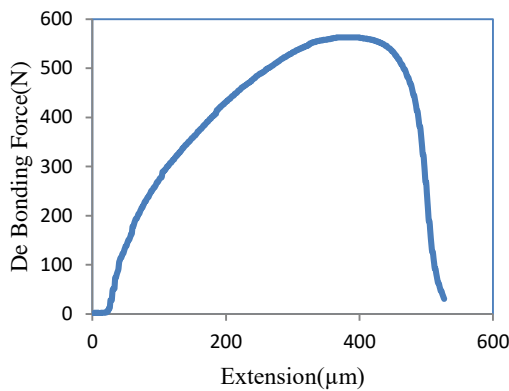
ج

شکل (۵): تصویر SEM از نمای بالای پوشش ها: (الف): پودر کروی، (ب): پودر نامنظم و (ج): پودر دندریتی

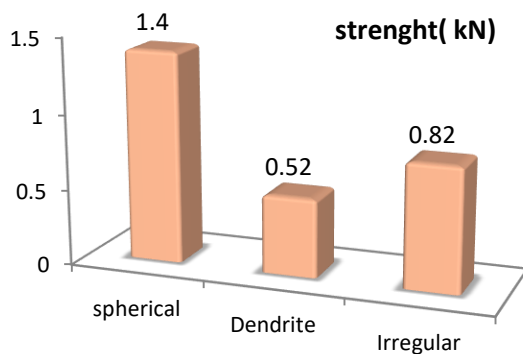
در روش های تفجوشی بدون فشار، درصد تخلخل و چگالی پوشش متاثر از شکل ذرات و مدل چیدمان آنها بر روی هم می باشد [۱۰]. ذرات نامنظم و دندریتی نسبت به ذرات کروی دارای انباشتگی کمتری هستند [۱۱-۱۲]. با افزایش چگالی پوشش، درصد تخلخل کاهش می یابد (جدول ۲). بیشترین چگالی پس از تفجوشی مربوط به پودر کروی بوده و بالطبع کمترین درصد تخلخل مربوط به همین پودر است. اصطکاک بین ذرات از



الف



شکل (۶): نمونه منحنی آزمایش تعیین استحکام چسبندگی



شکل (۷): نتایج آزمون ASTM1002 برای سه نوع پوشش کروی، نامنظم و شاخواری

یکی از معیارهای ارزیابی بازدهی تفجوشی، نسبت طول گلویی و یا گردنه به اندازه ذره می باشد [۱۵]. این نسبت برای ذرات کروی، نامنظم و شاخواری به ترتیب ۰/۸۳، ۰/۶۱ و ۰/۲۴ می باشد. با توجه به مقادیر ذکر شده استحکام پوشش شاخواری کمتر از ذرات نامنظم است. علاوه بر آن شکل نامنظم حفرات در پوشش های شاخواری موجب کاهش استحکام پوشش می شود. در ذرات کروی که اندازه گردنه تقریباً برابر با اندازه دانه شده (بیشترین بازدهی زینتر)، دارا بودن کمترین تخلخل (۲۶٪) و بیشترین استحکام برای این ذرات منطقی به نظر می رسد. همان گونه که در شکل ۵ ج دیده می شود، ذرات شاخواری دارای گردنه هایی با طول کوتاه هستند. گردنه هایی با طول کوتاه

برجستگی ها یا بی نظمی سطحی ذرات ناشی می شود. هرچه مساحت رویه ذرات بیشتر و شکل ذرات نامنظم تر و خشن تر باشد چگالی انباشت کمتر است. با توجه به منابع مطالعاتی چگالی انباشت پودر نامنظم و کروی به ترتیب ۰/۳ و ۰/۶ چگالی نظری است [۱۱]. در ذرات نامنظم چگالی انباشت اندک (به دلیل اصطکاک بین ذره ای) موجب مشکل شدن لغزش ذرات روی هم شده و در نتیجه باعث افزایش درصد تخلخل می شود. مقدار تخلخل بدست آمده در این تحقیق برای پوشش ایجاد شده با پودر نامنظم و شاخواری مطابقت خوبی با مقادیر گزارش شده برای لوله های حرارتی شار بالا دارد [۱۳].

شعاع حفرات در پوشش های با پودر نامنظم بیش از سایر پوشش ها است و این حفرات در کل پوشش توزیع شده اند. شکل ذرات نامنظم و برآمدگی های موجود بر روی سطح موجب می شود که حفرات شبکه ای در پوشش ایجاد شود.

با توجه به اینکه نفوذپذیری پوشش از درصد تخلخل و شکل ذرات تاثیر می پذیرد (رابطه ۳) می توان پیش بینی نمود که بیشترین نفوذپذیری مربوط به پوشش با پودر نامنظم و کمترین مربوط به پودر کروی است (جدول ۲). مقادیر به دست آمده همگی در محدوده قابل قبول برای پوشش های متخلخل مورد استفاده در لوله های حرارتی می باشد [۱۳-۱۴].

### ۳-۲- استحکام مکانیکی پوشش

استحکام مکانیکی پوشش با استفاده از استاندارد ASTM D1002 (ابعاد مطابق شکل ۲) و بر مبنای نیروی مورد نیاز برای جدایش پوشش از زیر لایه ارزیابی شده است. نمونه منحنی آزمایش تعیین استحکام چسبندگی در شکل (۶) آمده است. مقدار عدد بدست آمده در بیشینه نیرو به عنوان استحکام جدایش در نظر گرفته شده است. نتایج کلی برای سه پودر مختلف در شکل (۷) ارائه شده است. همان گونه که مشخص است بیشترین استحکام مربوط به نمونه با پودر کروی است که با توجه به نتایج درصد تخلخل این نتیجه قابل پیش بینی بود.



## ۵- مراجع

- [1] R. Milton & C. Gottzman, "High efficiency reboilers and condensers [High flux]". Chemical Engineering Progress, Vol. 68, No. 9, pp. 1090-1112, 1972.
- [2] L. H. Chiu, C. H. Wu & P. Y. Lee, "Comparison between oxide-reduced and water-atomized copper powders used in making sintered wicks of heat pipe", China Particuology, Vol. 5, No. 3, pp. 220-224, 2007.
- [3] L. Zhang, D. Mullen, K. Lynn & Y. Zhao, "Heat Transfer Performance of Porous Copper Fabricated by the Lost Carbonate Sintering Process", Materials Research Society Symp. Proc, Vol. 88, pp.04-07, 2009.
- [4] Y. Lin, "Swelling Of Copper Powders Durig Sintering Of Heat Pipes In Hydrogen-Containing Atmosphere", Materials transactions, Vol. 51, No. 12, pp. 2251-2258, 2010.
- [5] F. Dominguez Espinosa, T. Peters, J. Brisson, "Effect of fabrication parameters on the thermophysical properties of sintered wicks for heat pipe applications", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 5, pp. 7471-7486, 2012.
- [6] I. Sarbu, "Correlation for Enhanced Boiling Heat Transfer on Modified Surfaces Tubes", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 5, No.3, pp. 158-164, 2011.
- [7] Y. Lin, K. Hwang, "Effect of Powder Shape And Processing Parametere On Heat Disspation Of Heat Pipes With Sintered Porous Wicks", Material Transactions, Vol. 50, No. 10, pp. 2427-2434, 2009.
- [8] JT. Cieśliński, "Nucleate pool boiling on porous metallic coatings", Experimental thermal and fluid science, Vol. 25, No. 7, pp. 557-64, 2002.
- [9] F. Wakai & K. A. Brakke, "Mechanics of sintering for coupled grain boundary and surface diffusion", Acta Materialia, Vol. 59, pp. 5379-5387, 2011.
- [10] K. Katsuyoshi, "Powder Metalurgy", Intech, 2012.
- [11] German, M. Randall, "Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing", metal powder industry, 2005.
- [12] P. chen, "fabrication of high aspect ratio porous micro feature using hot compaction technique",

برای این پوشش نقاط ضعیفی محسوب می شوند که موجب شکست Interphase در پوشش می شوند. در این نوع شکست جدایش از قسمت متخلخل و در یکی از نقاط ضعیف پوشش ایجاد و در طول پوشش ادامه پیدا می کند. این در حالی است که در نمونه ها با پوشش کروی که درصد تخلخل کم و اندازه حفرات کوچک است جدایش از مرز پوشش با زیر لایه است (Interface).

در پوشش با پودر نامنظم علاوه بر درصد تخلخل بالای ۵۰٪ بازدهی تفجوشی نیز نزدیک به پودر کروی است. شکل ذرات نامنظم به گونه ای است که علاوه بر ایجاد درصد تخلخل بالا در فرایند تفجوشی بدون فشار گردنه هایی با طول مناسب در طی فرایند تفجوشی بوجود می آید.

## ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی پوشش های شاربالای متخلخل که با استفاده از فرایند تفجوشی بدون فشار بر روی سطح ایجاد شده بودند، پرداخته شد. پوشش ها با استفاده از سه نوع پودر کروی، نامنظم و شاخواری بر روی سطوح ایجاد شدند. علاوه بر درصد تخلخل، استحکام مکانیکی پوشش ها مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج به شرح زیر می باشد:

۱- در هر سه نوع پوشش شبکه حفره ای با استفاده از فرایند تفجوشی بدون فشار حاصل شد.

۲- کمترین درصد تخلخل در پوشش با پودر کروی و بیشترین درصد تخلخل در پوشش با پودر نامنظم حاصل شد.

۳- استحکام مکانیکی پوشش با پودر شاخواری کمتر از سایر پوشش ها است که ناشی از وجود برخی نقاط با گردنه ای با طول اندک است. بیشینه نفوذپذیری مربوط به پودر نامنظم است.

۴- با توجه به خواص مورد نیاز در پوشش های متخلخل شاربالا، پودر نامنظم دارای درصد تخلخل و نفوذپذیری مناسب و استحکام قابل قبول می باشد.



journal of manufacturing science and engineering,  
Vol. 130, pp. 311-318, 2008.

[13] Dominguez Espinosa F.A., Peters T.B., Brisson J.G., "Effect of fabrication parameters on the thermo physical properties of sintered wicks for heat pipe applications", International Journal of Heat and Mass Transfer 55, 2012, 7471–7486.

[14] Brian Holley AF, " Permeability and effective pore radius measurements for heat pipe and fuel cell applications", Applied Thermal Engineering, 2006; 26, 448–62.

[15] German, R. M., Powder Metallurgy Science 2<sup>nd</sup> edition, Princeton, New Jersey, 1994.

#### ۶- پی نوشت

---

- [1] Tube
- [2] Fin
- [3] Porous Surface
- [4] High Flux Tube
- [5] Critical Heat Flux